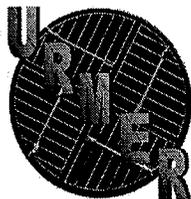
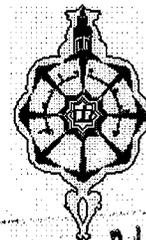


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Tlemcen Aboubakr Belkaïd
Faculté des Sciences
Département de Physique



Inscrit : 24 AVR. 2009.
Date le :
Code: 35475

Mémoire pour l'obtention du diplôme
De Magistère en
Ecole Doctorale en Energies Renouvelables

Thème :

« Optimisation de l'estimation du gisement éolien par simulation numérique dans la région côtière de l'ouest algérien ; cas de Béni-Saf »

Présenté par :
M. BOUDIA Sidi Mohammed

Soutenu le Mercredi 18 mars 2009

Devant le jury composé de :

CHABANE SARI N.E.	PR	UAB Tlemcen	Président
GHELLAI N.	MC	UAB Tlemcen	Examinatrice
KALAJDI D.	MC	UAB Tlemcen	Examineur
BENMANSOUR A.	MC	UAB Tlemcen	Encadreur
TABET HELAL M. A.	CC	UAB Tlemcen	Co-encadreur

Dédicaces

A ma famille... à tous ceux qui me sont chers

*A l'Electronique Bio-Médicale qui m'a bercé
Et aux Energies Renouvelables qui m'ont adopté*

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué à l'Unité de Recherche de Matériaux et Energies Renouvelables (URMER) du département de Physique de la faculté des Sciences de l'université Abouber Belkai de Tlemcen.

Je remercie notre seigneur d'avoir donné à l'homme le pouvoir de raisonner et d'explorer les vérités de l'univers.

Que mes remerciements les plus sincères s'adressent à mon encadreur

M. BENMANSOUR Abdelhalim, maitre de conférences à l'université de Tlemcen, pour sa présence et son pragmatisme exemplaire qui a donné un véritable sens à notre travail, aussi de m'avoir donné l'opportunité de travailler sur l'axe éolien.

Mes remerciements vont également à M. TABET HELAL Abdellatif, chargé de cours à l'université de Tlemcen qui a co-encadré ce travail, sa confiance ne m'a jamais fait défaut, avec son regard critique, ouvert et constructif sur mes recherches, ainsi que sa patience et ses précieux conseils qui m'ont été d'une aide inouï, donnant un but à ce travail.

Que le Pr. CHAABANE SARI Nasr Eddine, Professeur à l'université de Tlemcen et Directeur du Laboratoire de Simulation et Caractérisation des Dispositifs et Microsystèmes (LSCDM) de l'URMER veuille croire à ma profonde reconnaissance et sincère gratitude pour avoir mit en notre disposition le laboratoire et d'avoir accepté de présider le jury.

Que les honorables membres du jury, Mme. GHELLAI Nacera et M. KALAJI Djamel veuillent croire en mes remerciements anticipés pour avoir bien voulu accepter d'enrichir et d'évoluer ce travail.

Que mes chers parents trouvent dans ce travail ma profonde reconnaissance et ma gratitude pour leur patience avec moi, leurs soutiens et encouragements tout au long de... ma vie.

Résumés

Résumé :

La demande sans cesse croissante de l'énergie, l'épuisement des énergies fossiles et la pollution de notre planète poussent les pays à se retourner vers des énergies plus propres et renouvelables.

L'énergie éolienne fait partie de ces énergies propres et inépuisables qui ont été jadis très utilisées par nos ancêtres et qui pourront être exploitées à nouveau avec de très bons rendements.

Dans le présent travail nous avons évalué la puissance optimale d'un aérogénérateur spécifique du gisement éolien de Béni-Saf. Pour cela nous avons simulé la vitesse du vent en fonction de la hauteur en utilisant différentes méthodes empiriques.

La simulation la mieux adaptée au site choisi a été celle du modèle de H. NFAOUI de la méthode de puissance.

Mots clés : simulation, climat, vent, éolienne, vitesse, puissance, énergie, Beni-Saf, Algérie.

Abstract:

The ever-increasing demand for energy, fossil fuel depletion and pollution of our planet oblige our countries to search for cleaner energies sources .

Wind energy is one of these clean and inexhaustible energies that were once heavily used by our ancestors and which can be used again with good yields .

In this study, we evaluated the optimum power of a specific turbine wind deposit situated in Ben-Saf. For this, we have simulated wind speed according to the height, by using different empirical methods .

The better simulation for Beni-Saf was that of H. NFAOUI's model for the power method.

Key words: simulation, climate, wind, wind turbine, wind speed, power, energy, Beni-Saf, Algeria.

ملخص :

الطلب المتزايد للطاقة، نفاذ الوقود الأحفوري و التلوث في الأرض، دفعوا البلدان للجوء إلى طاقات نظيفة و متجددة. طاقة الرياح هي الواحدة من تلك التي لا تنضب، النظيفة و التي كانت من قبل تستخدم استخداما مكثفا من طرف أسلافنا ويمكن أن تستخدم من جديد بعوائد جيدة.

في هذه الدراسة، قيمنا الطاقة الأمثلية للتوربينات الريحية المحددة في منطقة بني صاف. ولذلك، كان علينا محاكاة سرعة الرياح وفقا للارتفاع وذلك باستخدام عدة أساليب تجريبية. المحاكاة الأنسب لهذا الموقع المختار كانت لنموذج ح. نفاوي من الطريقة الأسية.

المصطلحات: محاكاة - المناخ - الرياح - توربينات الرياح - سرعة الرياح - الطاقة - بني صاف - الجزائر.

Sommaire

Introduction générale.....	9
----------------------------	---

Chapitre I : Climat, météorologie et origine du vent

Introduction.....	13
I- Le vent	13
I-1- La mesure du vent	13
I-1-1- La direction	13
I-1-2- La vitesse	15
I-2- Caractéristiques du vent	16
II- L'atmosphère terrestre	17
II-1- Composition de l'air de l'atmosphère	17
II-2- Composition de l'air de l'atmosphère à la surface de la Terre.....	17
II-3- Structure atmosphérique	18
II-3-1- Force gravitationnelle.....	19
II-3-2- Force de pression.....	19
II-3-3- Force de Coriolis.....	19
II-3-4- Forces de frottements.....	19
II-4- Couche limite atmosphérique	19
II-5- Stabilité atmosphérique	21
II-5-1- Influence thermique du sol : les brises	22
II-5-1-1- Brise de terre et brise de mer	23
II-5-1-2- Brise de pente.....	24
II-5-1-3- Brise de vallée	25
II-5-2- Influence mécanique du relief : obstacles montagneux.....	25
III- Le climat	26
III-1- Le climat méditerranéen	26
III-2- La météorologie	27
III-3- La station météorologique	28
III-4- Capteurs météorologiques	28
Conclusion.....	29
Bibliographie	

Chapitre II : Les Capteurs éolien

Introduction.....	31
I- Historique	31
II- Différents types de capteurs éoliens	32
II-1- Eolienne à axe vertical	32
II-1-1- Rotor de Darrieus	33
II-1-2- Rotor de Savonius	34
II-2- Eolienne à axe horizontal	35
II-2-1- Application des éoliennes	37
II-2-2- Architecture d'une éolienne à axe horizontal.....	38
II-2-2-1- La tour	39
II-2-2-2- Le rotor et ses pales	40

II-2-2-3- La nacelle	44
III- Classement des types d'éolienne en fonction du coefficient de puissance	47
IV- Potentiel énergétique éolien	50
V- Conditions d'utilisation	51
Conclusion.....	52
Bibliographie	

Chapitre III : Le choix du site

Introduction.....	54
I- La région de Beni-Saf	54
II- Le choix du site	54
III- Les reliefs	55
Conclusion.....	58
Bibliographie	

Chapitre IV : Calculs et méthodes

Introduction.....	61
I-Méthode d'extrapolation verticale	61
I-1- Loi Logarithmique.....	62
I-2- Loi de puissance	63
I-2-1- Loi de puissance – Justus C.G et all 1976	64
I-2-2- Loi de puissance modifiée - Justuc & Mikhail 1981-	64
I-2-3- Loi de puissance – Mikhail 1985-.....	65
I-2-4- Loi de puissance à coefficient variable – H. Nfaoui et all –.....	65
II- Extrapolation verticale de la vitesse du vent	66
III- Hauteur du mat et qualité de mesure.....	68
VI-Problème de rugosité.....	68
V- Extrapolations verticales de la vitesse du vent	72
VI- Estimation de la puissance générée	73
Conclusion.....	77
Bibliographie	

Conclusion générale.....	79
--------------------------	----

Annexe A : L'Office National de la Météorologie (ONM)

Annexe B : Communication par poster au CNPA'08 à Bejaia

Annexe C : Le nom des différents vents dans le monde

Tableaux

Tab.I.1 : effets du vent en fonction de sa vitesse.....	16
Tab.III-2 : Caractéristiques du site de Beni-Saf	54
Tab.IV.1 : tableau des classes et longueurs de rugosité Z_0	62
Tab.IV-2 : écart de vitesse moyenne entre la loi logarithmique et la loi de puissance dictée Par Mikhaeil.....	67
Tab.IV-3 : écart de vitesse moyenne entre la loi de puissance modifiée et la loi de puissance dictée par Justu.....	67
Tab.IV-4 : vitesses de vents calculées à différentes hauteurs	70
Tab.IV-5 : vitesses du vents calculées à différentes hauteurs pour $V_1 = 3,8m/s$	73
Tab.IV-6 : vitesses du vents calculées à différentes hauteurs pour $V_1 = 4,8m/s$	73
Tab.IV-7 : liste de quelques éoliennes de moyenne puissance des principaux constructeurs au monde.....	75

Figures

Fig.I-1 : Rose des vents à 16 directions.....	14
Fig.I-2 : Girouette moderne.....	14
Fig.I.3 : Anémomètre à rotation.....	15
Fig.I.4 : Vue schématique de la couche atmosphérique standard.....	18
Fig.I.5 : Vue schématique de la couche limite atmosphérique.....	20
Fig.I.6 : Brise de mer.....	23
Fig.I.7 : Brise de terre.....	24
Fig.I.8 : mouvement de l'air le long d'un obstacle orographique.....	26
Fig.I.9 : Les climats dans le Monde.....	27
Fig.II-1 : Éolienne de type Darrieus.....	32
Fig.II-2 : Différents types de rotor Darrieus.....	34
Fig.II-3 : Rotor de Savonius.....	35
Fig.II-4 : éoliennes à axe horizontal à trois pales.....	36
Fig.II-5 : configurations à axe horizontal.....	37
Fig.II-6 : composants d'une éolienne.....	38
Fig.II-7 : Différents types de tours.....	40
Fig.II-8 : classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales.....	42
Fig.II-9 : exemples de structures d'une pale.....	43
Fig.II-10 : Eléments d'une nacelle.....	44
Fig.II-11 : Coefficients de puissance en fonction de la vitesse normalisée λ pour différents types de turbines.....	49
Fig.II-12 : Bilan des dégradations successives de l'énergie éolienne avant utilisation.....	50
Fig.III-1 : Cartographie de la région de Beni-Saf.....	56
Fig.III-2 : Carte géographique de Béni-Saf.....	57
Fig.III-3 : vue aérienne de la région de Béni-Saf par Google Earth.....	58
Fig.III-4 : Vue aérienne du relief de la zone étudiée par Google Earth.....	59
Fig.IV-1 : Vitesses du vent en fonction de la hauteur par plusieurs méthodes.....	66
Fig.IV-2 : Effet de la rugosité sur le model d'extrapolation vertical de la vitesse du vent (Loi de puissance modifié).....	69
Fig.IV-3 : Effet de la rugosité sur le model d'extrapolation vertical de la vitesse du vent (Loi de puissance à coefficient variable – Model H. Nfaoui).....	70
Fig.IV-4 : Atlas de la vitesse du vent à 50 m d'altitude.....	71
Fig.IV-5 : Extrapolation verticale de la vitesse du vent pour différentes valeurs de V_1	72
Fig.IV-6 : Les puissances théoriques et effectives générées en fonction du rayon du rotor (de 1 à 3m).....	73
Fig.IV-7 : Les puissances théoriques et effectives générées en fonction du rayon du rotor (de 1 à 10m).....	74
Fig.IV-8 : Puissances générées en fonction des vitesses à l'entrée de la voilure.....	76

Nomenclature

R	Rayon du rotor	m
Ω	Vitesse angulaire de l'éolienne	$rad.s^{-1}$
Z_0	Longueur de rugosité	m
C_p	Coefficient de puissance	
P_v	Puissance du vent	W
ρ	Masse volumique de l'air	$Kg.m^{-3}$
S	Surface de la voilure	m^2
V_v	Vitesse du vent à l'entrée de la voilure	$m.s^{-1}$
P_{max}	Puissance maximale récupérable	W
C_p^{opt}	Coefficient de puissance maximal récupérable	
λ	Vitesse réduite ou normalisée	
V_1	Vitesse connue a l'altitude de référence	$m.s^{-1}$
V_2	Vitesse à calculer	$m.s^{-1}$
Z_1	Altitude de référence	m
Z_2	Altitude à laquelle on désire calculer la vitesse	m
α	Facteur de puissance	
\bar{Z}	Moyenne géométrique de l'altitude	m
V_n	Vitesse à des conditions neutres de stabilité	$m.s^{-1}$
x	Coefficient variable	
ΔV	Ecart entre deux vitesses	$m.s^{-1}$
P_{th}	Puissance théorique récupérable	W
P_{eff}	Puissance effective fournie par une éolienne	W
P_{eol}	Puissance de l'éolienne	W

Introduction générale

Le rayonnement solaire et la rotation de notre planète produisent des différences de températures et de pression sur la surface du globe qui se traduisent localement par la mise en mouvement de masses d'air, formant ainsi Les vents.

La conquête de l'énergie éolienne ne date pas d'hier. L'histoire nous apprend que les moulins à vent existaient déjà dès la plus haute antiquité, en Perse, en Irak, en Egypte et en Chine. Ce n'est qu'au moyen âge qu'ils font leur apparition en Europe et leur utilisation se répand rapidement.

Cependant, au cours des deux derniers siècles, avec la découverte de nouvelles sources d'énergie tel que le charbon, les hydrocarbures et le nucléaire, celles-ci vont être surexploitées au détriment de l'énergie du vent qui sera très vite négligée puis abandonnée.

Néanmoins, l'industrialisation massive au cours du dernier siècle, le progrès, l'évolution des sociétés sont tellement de paramètres qui ont poussé l'homme à surexploiter les énergies fossiles et nucléaires, sans pour cela nuire à l'équilibre écologique naturel.

Effectivement, le progrès a généré des catastrophes et des phénomènes irréversibles nocifs à l'homme et à la nature. On peut citer ; le réchauffement climatique du aux gaz à effet de serre, les différentes pollutions industrielles, la catastrophe de Chernobille, etc.

Par ailleurs la surexploitation des ressources naturelles fossiles limitées et épuisables poussent les pays développés et émergents à se rabattre vers des énergies inépuisables, propres et renouvelables telles, le solaire, la géothermie, la biomasse et l'énergie éolienne.

Cette dernière décennie a connu un grand développement dans le domaine de l'énergie éolienne dans le monde et particulièrement en Europe. L'installation d'aérogénérateurs pour la production électrique se fait de plus en plus. De même, cette technologie se répand de plus en plus pour le pompage de l'eau dans le domaine de l'agriculture et beaucoup d'autres applications.

Toute fois, Cette ultime étape qu'est l'application éolienne, ne peut pas se faire sans l'étude préalable de la source d'énergie qui est le vent. L'estimation des ressources éoliennes d'un pays en constitue la plus importante étape. L'établissement d'un atlas éolien demande un travail de longue haleine avec l'utilisation d'un nombre important de données et de modèles performants dans la majorité des cas empiriques.

Par ailleurs, l'étude de la rentabilité des systèmes éoliens est étroitement liée à la source elle-même, à savoir, le vent. En ce qui concerne l'Algérie, peu d'études ont été entreprises pour l'évaluation de cette ressource ; mais on note avec satisfaction, la publication de l'Atlas éolien par le Dr. N. KASBADJI MARZOUK en 2006 qui a donnée un essor non négligeable à l'étude du vent en Algérie.

Les résultats ont montré une variabilité importante de la vitesse du vent en fonction des saisons et de l'altitude et une variation substantielle d'un endroit à un autre à cause de l'influence de la topographie et du climat.

En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200km et un relief montagneux de climat méditerranéen, représenté par les deux chaînes de l'Atlas, Télien et Saharien ; entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

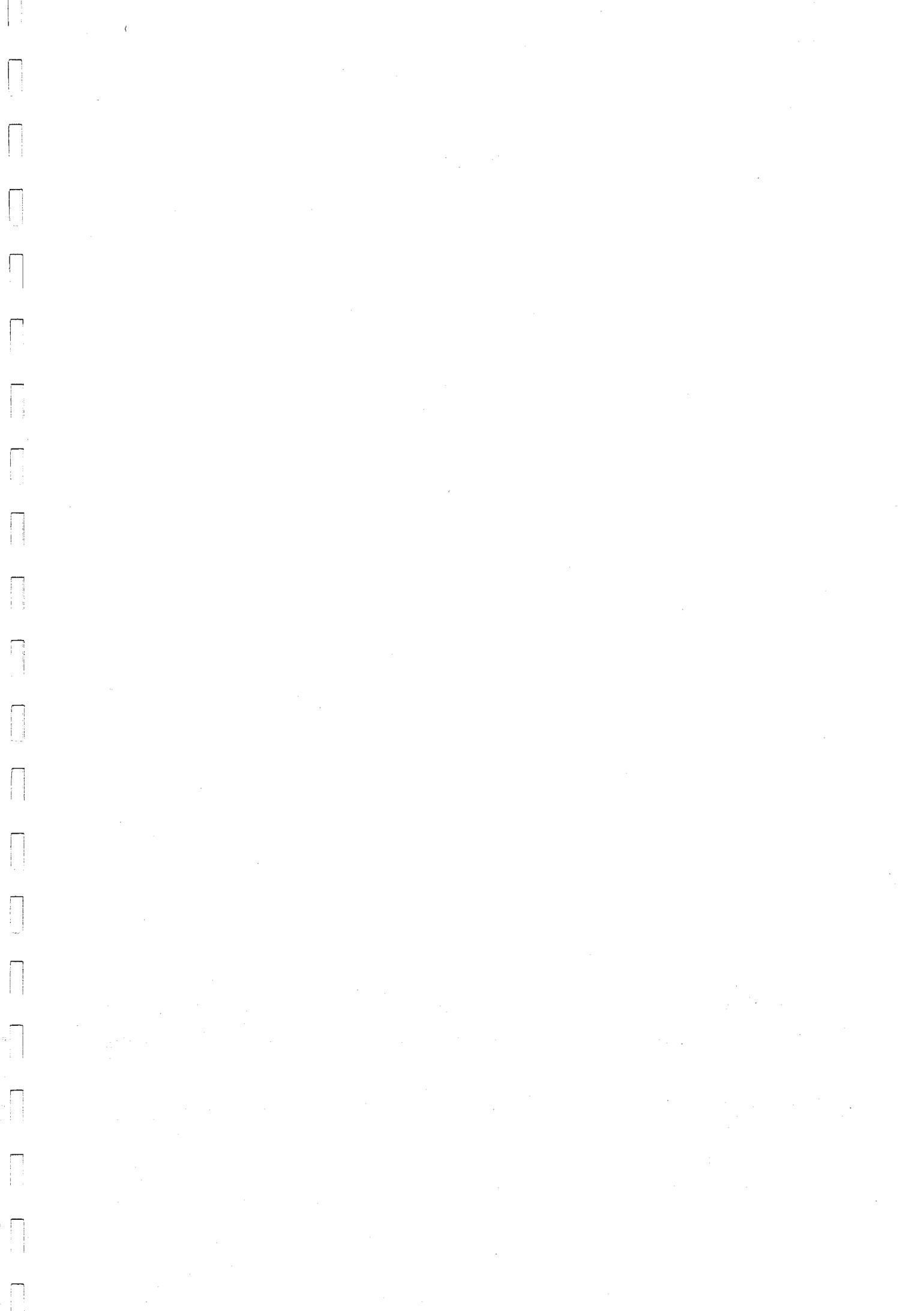
Dans la présente étude nous nous intéressons à la région côtière de Béni-Saf dans la wilaya de Aïn Témouchent, car cette zone est balayée durant toute l'année par des vents locaux, assez présents dans la région, vu son ouverture sur la mer méditerranée.

Pour une exploitation optimale de l'énergie éolienne, il est nécessaire de connaître la vitesse du vent à des hauteurs ascendantes du sol. Sachant que la vitesse du vent augmente en fonction de la hauteur, l'énergie du vent est généralement captée à des hauteurs supérieures à la hauteur de mesure du vent par l'Office National de la Météorologie (ONM) qui est de 10m. Ceci pour échapper aux problèmes de turbulences dus à la nature de la surface du sol et aux obstacles environnants.

L'objectif de ce travail n'est autre que l'estimation de la vitesse moyenne annuelle du vent à différentes hauteurs dans la région côtière de Béni-Saf par simulation numérique utilisant différents modèles empiriques et le calcul de la puissance générée par une éolienne de moyenne puissance.

Dans le premier chapitre, nous donnons un aperçu général sur la source du vent, ses caractéristiques, sa mesure, l'introduction d'éléments de physique atmosphérique et la définition des couches atmosphériques et des forces qui régissent le mouvement des masses d'air. A la fin du chapitre nous définirons la spécificité du climat de cette région ouverte sur la mer méditerranée.

Le second chapitre sera consacré aux avancés technologiques de la machine éolienne. On définit les différents types d'aérogénérateurs et leurs domaines d'application en tenant compte



de l'architecture tout en énonçant les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal dans chaque compartiment et leurs classements en fonction du coefficient de puissance.

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude du site de Béni-Saf, en argumentant notre choix de la région avec toutes les conditions requises pour un emplacement optimum tout en délimitant une zone qui est adéquate pour l'exploitation d'une ferme éolienne.

Le quatrième et dernier chapitre consiste à donner une estimation de la puissance effective d'une éolienne plantée sur la région côtière de Béni-Saf. Pour cela, nous avons fait une simulation par extrapolation verticale de la vitesse du vent à différentes hauteurs tout en décrivant les modèles utilisés dans notre travail, puis nous avons estimé la puissance produite par un aérogénérateur.

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

Chapitre I

Climat, météorologie et origine du vent

Introduction

Les anciens voyaient dans le vent un phénomène mystérieux tirant sa force d'une origine divine. Il était supposé punir en déclenchant sa force et sa colère dans les tempêtes et les ouragans. Les Grecs savaient déjà différencier les vents en fonction de leurs origines. Ainsi Borée était le vent du nord, Euros celui de l'est, Notos le vent du sud et Zéphyros celui de l'ouest. Aristote en détermina huit et à Athènes au 1^{er} siècle avant Jésus Christ un édifice octogonal fut construit et il était surmonté d'une girouette. Pendant encore longtemps les vents ont suscité crainte et respect. Mais ce n'est qu'en 1640 que Galilée a montré que l'air est pesant et donc le début de bon nombre d'explications concernant le vent.

Dans ce premier chapitre, nous allons décrire le phénomène du vent, son origine, ses caractéristiques, sa mesure, mais aussi la composition de l'air après avoir définie l'atmosphère terrestre qui n'est autre que le nid du phénomène du vent.

I- Le vent

Le vent est généralement appliqué aux déplacements naturels horizontaux de l'atmosphère (mouvement d'air). Les mouvements de direction verticale sont appelés des courants. Les vents sont produits par les différences de pressions atmosphériques engendrées principalement par les gradients de température. Les variations de la distribution des pressions et des températures sont dues essentiellement à une distribution inégale de l'énergie solaire sur la surface de la terre, et aux différences des propriétés thermiques des surfaces des continents et des océans. Quand les températures de régions voisines deviennent inégales, l'air le plus chaud tend à s'élever et à s'écouler par-dessus l'air le plus froid (le plus lourd). La direction des vents générés de cette façon est généralement grandement modifiée par la force de Coriolis résultant de la rotation de la Terre [1].

I-1- La mesure du vent :

Deux éléments servent à caractériser le vent :

I-1-1- La direction :

Le mot « direction » en parlant du vent sous-entend celle d'où vient le vent. Un vent d'ouest est un vent qui souffle de l'ouest, un vent de nord est un vent qui souffle du nord.

Les directions du vent sont reportées dans une rose des vents obtenue en divisant une circonférence en plusieurs parties égales comptées à partir du Nord (divisions suivant les cas) dans le sens des aiguilles d'une montre [2].

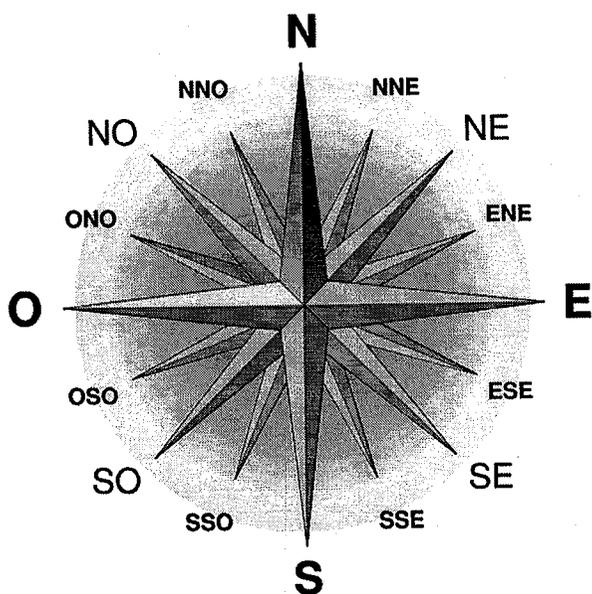


Fig.I-1 : Rose des vents à 16 directions. [3]

Pour indiquer la direction du vent, on utilise des girouettes.

Celle-ci comporte autour d'un axe vertical, une partie mobile dotée d'un empennage et d'un contrepoids. L'empennage s'oriente dans le lit du vent et la partie avant de la girouette portant le contrepoids s'oriente dans la direction d'où souffle le vent (Fig.I-2).

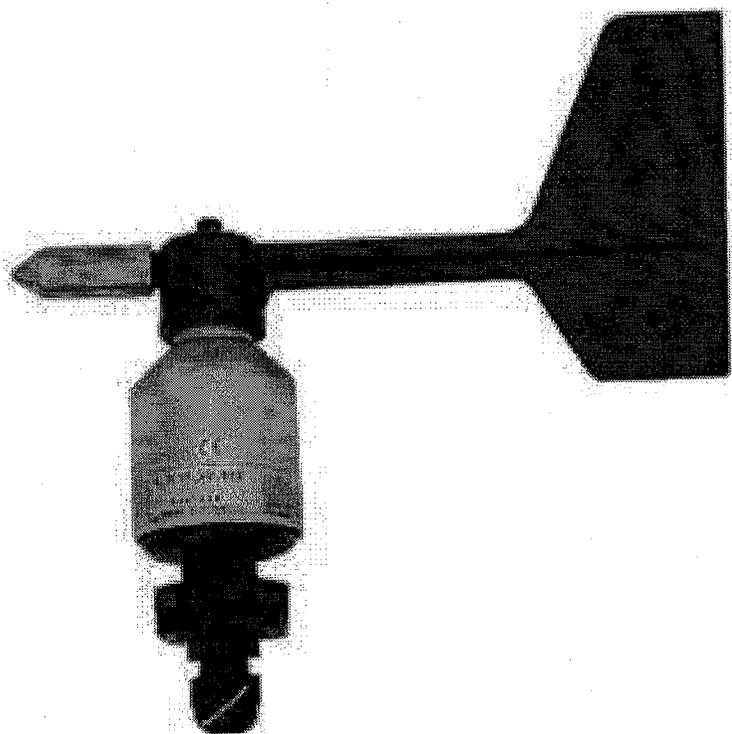


Fig.I-2 : Girouette moderne. [4]

Les girouettes peuvent revêtir diverses apparences dont certaines sont familières aux habitués des aérodromes, telle la manche à air par exemple [2].

I-1-2- La vitesse :

La vitesse du vent est exprimée en :

- mètres par seconde m/s
- kilomètre par heure km/h
- nœuds (milles par heure) n

Il existe entre ces diverses unités les relations suivantes :

$$1\text{m/s} = 3,6 \text{ Km/h} = 1,94 \text{ nœud}$$

Les instruments utilisés pour mesurer la vitesse du vent sont les anémomètres [2].

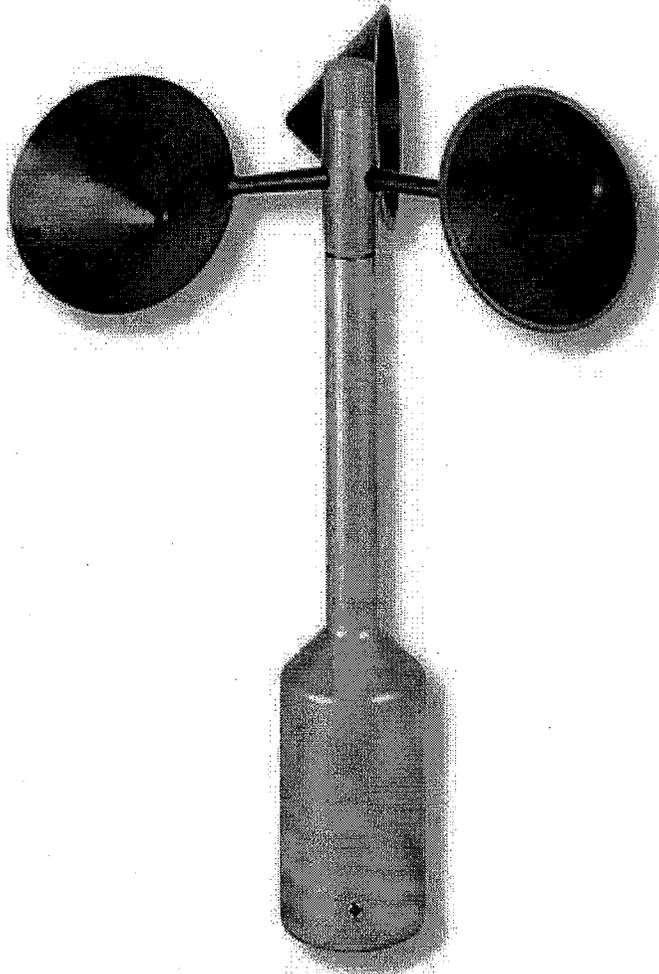


Fig.I.3 : Anémomètre à rotation. [4]

Pour l'usage météorologique, on se sert couramment des anémomètres à rotation, sorte de moulinets légers à axe horizontal ou vertical dont la vitesse de rotation est proportionnelle à la vitesse du vent (Fig.I.3).

Certains anémomètres sont dotés d'un dispositif électrique permettant l'enregistrement de la vitesse du vent, à distance (anémographe).

I-2- Caractéristiques du vent :

La puissance du vent est sensiblement constante à chaque instant pour l'ensemble du globe, en un lieu donné et sur une période solaire, mais elle varie considérablement en tout lieu et suivant les jours, la vitesse du vent est très variable [5]. Le tableau I.1 donne les différents effets produits par le vent en fonction de sa nature et de sa vitesse :

Échelle en degrés Beaufort	Nature du vent	Effets physiques	Vitesse du vent (moyenne) (m/s)
1	vent insensible et très faible	la fumée monte verticalement (les feuilles semblent immobiles)	1
2	brise infime	imperceptible frémissement des feuilles la fumée est légèrement déviée	2
	brise légère (les moulins démarrent)	les feuilles s'agitent doucement la fumée est nettement déviée	3
3	vent modéré (frais)	les petits rameaux remuent un peu	4
4	vent léger	les branchettes plient légèrement	6
	brise moyenne (bon frais)	les branchettes plient nettement	7
5	forte brise	les branches oscillent et se balancent	8
	grand frais	les branches plient	9
	très forte brise	les peupliers plient	10
6	vent fort	les feuilles sont arrachées	12
7	vent très fort	les petites branches cassent	15
8	vent impétueux	les branches moyennes se brisent	20
9	fort coup de vent	début de dégâts sur les toitures	22
10	tempête violente	les fortes branches cassent	24
11	tempête violente	ravages étendus	30
12	ouragan	les toitures sont très endommagées	36
	grand ouragan	gros arbres et toitures sont arrachés effets catastrophiques	46

Tab.I.1 : effets du vent en fonction de sa vitesse. [5]

Le vent est variable dans le temps et dans l'espace.

- Variabilité temporelle : selon 3 fréquences
 - Basses fréquences : annuelles, saisonnières ou mensuelles.
 - Moyennes fréquences : journalière ou suivant les horaires (matinée, après-midi, soirée...)
 - Hautes fréquences les variations à la seconde ou à plus haute fréquence (au-dessus de 1Hz) caractéristiques de la turbulence du vent.
- Variabilité spatiale : selon l'axe vertical (par rapport à l'altitude).

II- L'atmosphère terrestre :

C'est l'enveloppe gazeuse entourant la Terre solide.

II-1- Composition de l'air de l'atmosphère :

L'air qui compose notre atmosphère terrestre est constitué de gaz qui proviennent du volcanisme terrestre. Ces gaz ont été expulsés lors des éruptions volcaniques de l'ère primaire puis de manière moins soutenue ensuite.

Dans les 100 premiers kilomètres, l'atmosphère est composée à 78% d'azote et 21% d'oxygène. Ses autres constituants sont les gaz rares : argon, néon, hélium, krypton et xénon. Il existe aussi dans l'atmosphère du gaz carbonique, de l'hydrogène, du méthane, de l'ozone... et de la vapeur d'eau. Le mélange est uniforme excepté pour l'ozone que l'on retrouve en plus grande quantité vers 30km d'altitude [6].

II-2- Composition de l'air de l'atmosphère à la surface de la Terre

Azote	(N ₂)	78%
Oxygène	(O ₂)	21%
Argon	(A)	0.93%
Vapeur d'eau	(H ₂ O)	0 à 4%
Gaz carbonique	(CO ₂)	0.033%
Autres	traces	

Les constituants les plus importants dont la quantité est variable dans le temps sont [6] : la vapeur d'eau, le gaz carbonique, l'ozone et certaines particules en suspension dans l'air : poussières, fumées, polluants...

II-3- Structure atmosphérique :

L'atmosphère standard se compose de deux parties essentielles, (voir Fig.I.4), à savoir [7] :

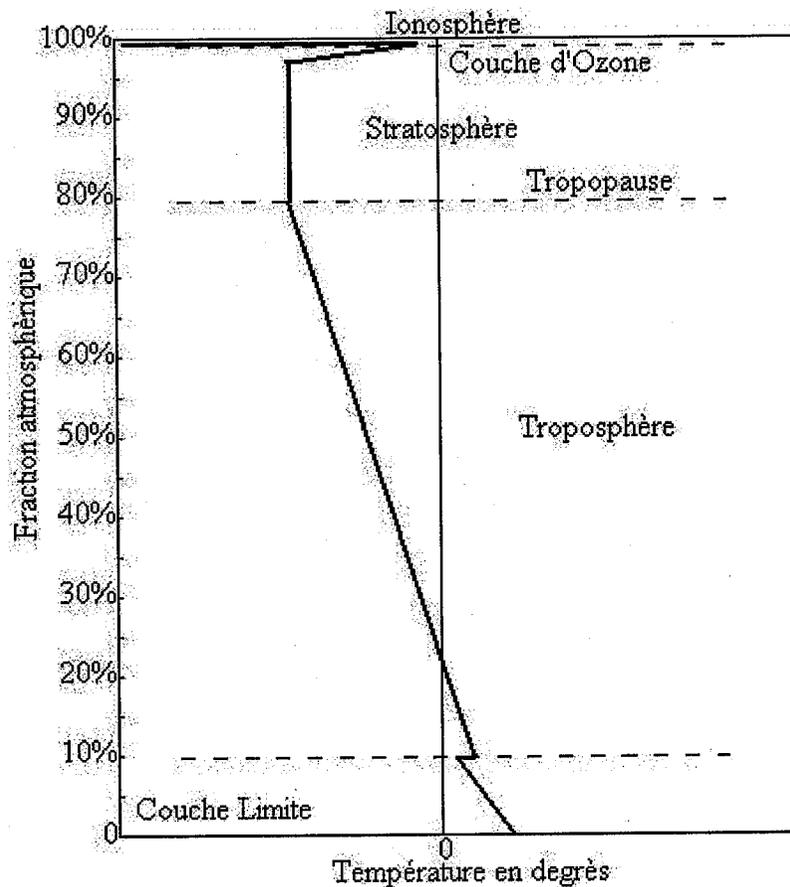


Fig.I.4 : Vue schématique de la couche atmosphérique standard. [7]

L'épaisseur de la troposphère représente 80% de la structure atmosphérique, sa limite inférieure est le sol et sa limite supérieure la tropopause. Son épaisseur est de l'ordre de 10km.

La stratosphère représente les 20% de la structure atmosphérique. Elle est au-dessus de la tropopause, sa limite supérieure est l'ionosphère.

L'air qui constitue l'atmosphère terrestre est un mélange de gaz et de particules solides et liquides, concentrés dans la troposphère.

Dans cette région, le déplacement de l'air, par rapport à la surface terrestre, appelé vent résulte de l'équilibre entre les forces en présence.

Pour un observateur à l'arrêt par rapport au sol, il existe quatre forces majeures qui agissent sur une partie élémentaire d'air :

- la force gravitationnelle.
- la force due au gradient de pression.
- la force de Coriolis.
- et les forces de frottements.

II-3-1- Force gravitationnelle

Conséquence de l'attraction mutuelle des corps, cette force intervient grâce à la grande masse de la terre. Elle est dirigée vers le centre de la terre (attraction terrestre).

II-3-2- Force de pression

Dirigées des hautes pressions vers les basses pressions, ces forces sont dues au gradient de pression résultant de l'échauffement inégal de l'air suivant les latitudes, la nature des sols et la répartition des océans et des continents. Les forces de pressions sont à l'origine du déplacement des masses d'air.

II-3-3- Force de Coriolis

Cette force est le résultat de la rotation de la terre autour de son axe et est perpendiculaire à la vitesse du vent. Elle intervient dans les déplacements atmosphériques en raison de la faiblesse des forces contribuant à mettre l'air en mouvement.

II-3-4- Forces de frottements

Ces forces traduisent la friction turbulente de l'air avec le sol. Elles interviennent dans la couche limite atmosphérique.

La force gravitationnelle et la force du gradient de pression sont les deux forces qui peuvent initier un mouvement de l'air. Leurs actions se font ressentir près du sol dans une zone appelée couche limite atmosphérique.

II-4- Couche limite atmosphérique :

La couche limite atmosphérique, [7] dont l'épaisseur est d'environ 1000m, est la couche qui contient 10% du recouvrement de la masse d'air totale et où le déplacement d'air est régi par le gradient de pression. Elle est contrôlée et modifiée partiellement par le

frottement aérodynamique de la surface et par l'importance de la stratification de la densité d'air qui résulte des différences de températures entre la surface du sol et l'air ambiant. Elle est fonction de plusieurs paramètres, tel que :

- la vitesse du vent.
- la rugosité des sols.
- et l'ensoleillement variable suivant les lieux, les saisons et l'heure de la journée.

Près de la surface terrestre, la présence du sol perturbe l'écoulement de l'air et crée une forte turbulence (vent) alors que dans l'atmosphère libre, l'air sous l'action des forces de pression et de Coriolis est uniforme, horizontal et sa vitesse est constante (vent géostrophique).

La CLA (Couche Limite Atmosphérique) se divise en trois parties distinctes (Fig.I.5) [8] :

- la couche d'Eckerman.
- la couche de surface.
- la sous-couche rugueuse.

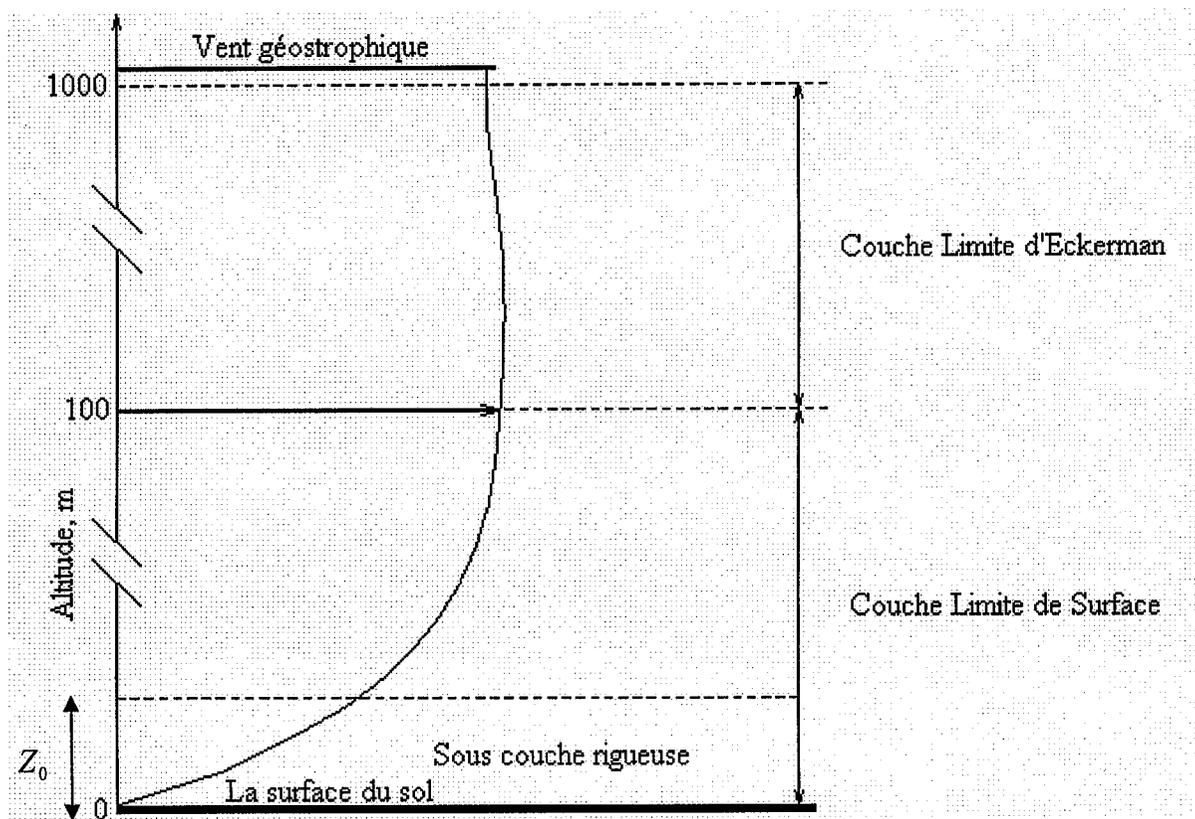


Fig.I.5 : Vue schématique de la couche limite atmosphérique. [7]

La couche d'Eckerman est la partie supérieure de la CLA. Dans cette zone, la structure du champ de vent est influencée par les frottements sur la surface, la stratification thermique et la force de Coriolis. Si l'altitude augmente, les forces de frottements deviennent négligeables devant la force de Coriolis. La direction du vent subit donc une rotation (vers l'est dans l'hémisphère Nord) et s'aligne à son sommet avec le vent géostrophique.

La couche de surface est directement en contact avec la surface terrestre. Dans cette couche, la force de Coriolis est négligeable devant les forces de frottements et les effets thermiques. La structure du champ de vent est donc complexe et variable avec la nature du terrain et sa rugosité.

La sous-couche rugueuse est la partie inférieure de la couche de surface, juste au-dessus de la surface du sol. Son épaisseur varie de quelques dizaines de millimètres sur une surface de mer plane à quelques dizaines de mètres en ville. L'écoulement de l'air est alors fortement turbulent non homogène et non stationnaire. Ceci est caractérisé par le paramètre de longueur de rugosité aérodynamique globale Z_0 . Ce paramètre est défini par J.P Costes [9] comme étant "la hauteur au dessus du sol à laquelle il convient d'admettre que le vent s'annule pour tenir compte de la présence des aspérités". Plus généralement, cette longueur de rugosité caractérise l'influence globale de la sous-couche rugueuse sur le vent.

II-5- Stabilité atmosphérique :

Sachant que les éoliennes d'aujourd'hui ont une hauteur inférieure à 100m, on peut conclure que le domaine d'application se limite à l'étude de la couche limite de surface. Dans cette couche [8], les forces de frottement issues de l'écoulement de l'air sur une surface rugueuse impliquent une forte activité turbulente du fluide atmosphérique.

Ainsi :

- On peut négliger la force de Coriolis, car elle est faible devant les autres forces en présence, notamment des forces de frottements.
- La proximité du sol modifie le profil de vitesses de vent et induit un fort cisaillement.
- La direction sera modifiée par la présence d'obstacles.

Donc l'écoulement de l'air est régi par des turbulences d'origine, [7] :

- Mécanique : les turbulences sont générées par la proximité du sol qui modifie le profil de la vitesse du vent par la présence d'obstacle ou de discontinuité au sol.
- Thermique : les turbulences sont générées par la distribution de la température, due essentiellement aux différences de température résultant du réchauffement et refroidissement, échange radiatif quotidien de la terre ainsi que de l'écoulement de l'air entre les régions chaudes et froides.

Le rapport entre le gradient de température et le gradient adiabatique (taux de décroissance d'une masse d'air s'élevant de façon adiabatique) détermine la sensibilité de l'atmosphère à la turbulence d'origine thermique [8] :

- l'atmosphère est stable si la température de l'air décroît moins vite avec l'altitude que le gradient adiabatique. Dans ce cas, les masses d'air qui s'élèvent se refroidissent plus vite que le milieu environnant et ont tendance à redescendre par la gravité. Cet état entraîne l'atténuation, voire la disparition de la turbulence,
- l'atmosphère est instable si la température de l'air décroît plus vite avec l'altitude que le gradient adiabatique. Dans ce cas, les masses d'air qui s'élèvent se refroidissent moins vite que le milieu environnant et ont tendance à continuer leur ascension, tandis qu'elles sont remplacées, près du sol par des masses d'air froides issues des couches supérieures. Cet état est source de turbulence,
- l'atmosphère est neutre si le taux de décroissance de la température de l'air avec l'altitude est égal au gradient adiabatique. C'est le cas du vent fort, lorsque les effets de la turbulence mécanique sont prédominants.

II-5-1- Influence thermique du sol : les brises

Dans le langage courant, on confond généralement vent et brise. Pour le météorologue, il s'agit pourtant de circulations d'air tout à fait différentes.

Comme il a été précédemment défini, le vent se situe à l'échelle météorologique, il a pour moteur les anticyclones et les dépressions, par contre la brise est un phénomène local, d'origine convective [2].

II-5-1-1- Brise de terre et brise de mer :

Suite à l'échauffement non uniforme et inégal du sol et de l'eau, sous l'effet du rayonnement solaire, la variation de température est beaucoup plus sensible au-dessus de la terre qu'au-dessus des grandes étendues d'eau (lacs, mer, océans...)

Si, pendant la journée, la température varie de 2 à 3°C, par exemple à la surface de l'eau cette variation atteindra facilement 10°C au-dessus de la terre ferme. Dès le lever du soleil, la terre froide durant la nuit, se réchauffe rapidement. La température atteint et dépasse celle de la mer. Au contact du sol l'air s'échauffe, il tend alors à s'élever.

Dans ces conditions la pression devient décroissante au-dessus de la terre tandis qu'elle reste inchangée au-dessus de la mer. Il s'établit ainsi une différence de pression, un gradient de pression dirigé de la mer vers la terre (des hautes vers les basses pressions) qui détermine le mouvement de l'air dans cette direction [2]. Le vent se met à souffler venant de la mer, c'est la brise de mer (Fig.I.6).

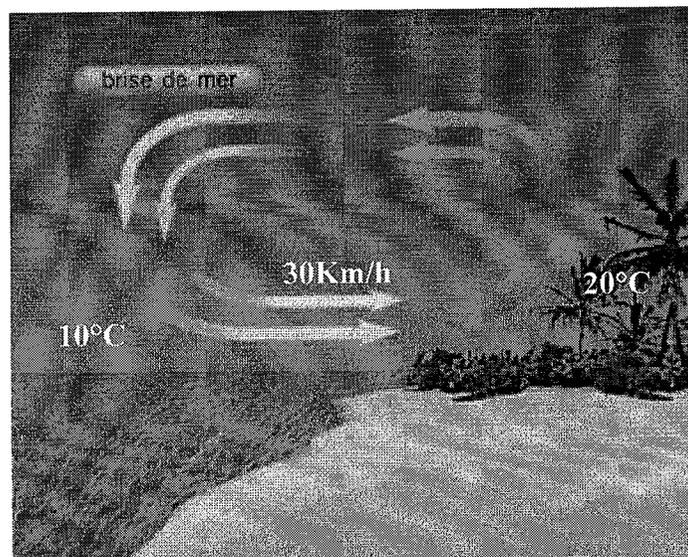


Fig.I.6 : Brise de mer. [10]

La nuit, la terre se refroidit beaucoup plus rapidement car elle rayonne vers l'espace beaucoup plus que la mer, qui elle, reste chaude plus longtemps. Là encore, le phénomène s'inverse la nuit, on l'appelle alors la brise de terre (Fig.I.7).

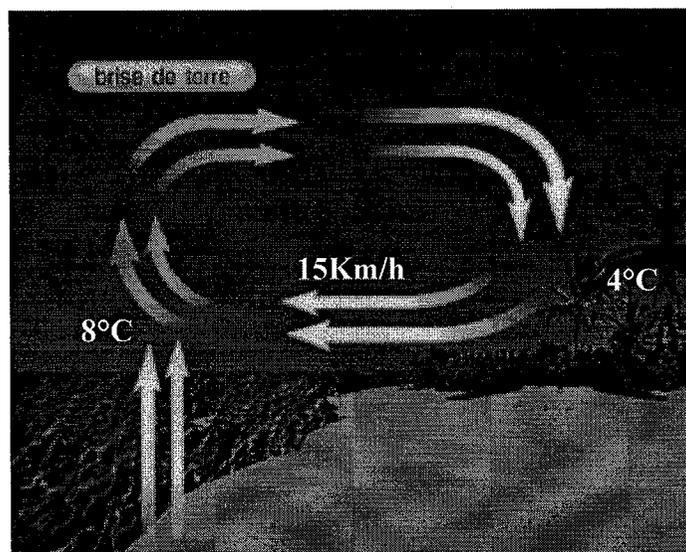


Fig.I.7 : Brise de terre. [10]

En l'absence de courant général, la brise de mer s'établit entre 10h et 18h et la brise de terre entre 21h et 7h.

Les brises peuvent renforcer les grands courants généraux si elles ont la même direction. Dans le cas contraire, elles peuvent être masquées par eux [2].

II-5-1-2- Brise de pente :

La nature du relief introduit des différences de températures importantes dans les couches atmosphériques voisines du sol. Il s'ensuit des perturbations du champ de pression lesquelles ont une influence considérable sur la direction et la vitesse du vent. C'est ainsi que se forment les brises de pente et de vallée.

Dans la journée, l'air s'échauffe plus vite au contact de pentes ensoleillées qu'au même niveau au-dessus du fond d'une vallée. Un phénomène semblable à la brise de mer se produit, sous l'effet d'une différence de pression qui s'établit entre les pentes et la vallée, duquel un mouvement de l'air prend naissance en direction du relief où la pression est décroissante.

L'air chaud qui s'élève des pentes est donc remplacé par un flux d'air froid issu de la vallée : c'est la brise montante.

La nuit, au contraire, le rayonnement du sol vers l'espace refroidit l'air à son contact. L'air alourdi s'écoule le long des pentes vers la vallée produisant la brise descendante [2].

II-5-1-3-Brise de vallée :

Les températures mesurées au-dessus d'une vallée et de la plaine voisine présentent toujours des différences notables. Ceci tient au fait que l'air s'échauffe plus le jour et se refroidit plus la nuit au-dessus de la vallée qu'au-dessus de la plaine.

La journée, la vallée est le siège d'une pression plus faible que celle qui règne au-dessus de la plaine, d'où un vent dirigé de la plaine vers la vallée, dénommé brise de vallée montante.

La nuit, la brise de pente descendante amène en permanence de l'air refroidi dans la vallée. Le refroidissement finit par intéresser tout l'air contenu dans la vallée alors qu'il reste beaucoup plus superficiel au-dessus de la plaine. Plus froid, l'air de la vallée s'écoule en direction de la plaine : la brise de vallée descendante s'établit.

L'intensité des brises de vallée peut atteindre 5m/s, leur direction est celle de l'axe général de la vallée.

L'existence simultanée des brises de pente et des brises de vallée ne permet pas en réalité d'établir une distinction aussi rigoureuse comme nous venons de le faire. Alors, des échanges et des interactions s'établissent entre les deux systèmes de brises et il s'agit, beaucoup plus des deux parties d'une même circulation que de deux circulations indépendantes [2].

II-5-2- Influence mécanique du relief : obstacles montagneux

Les obstacles isolés sont plus au moins contournés par le vent mais dès que le barrage formé par le relief est suffisamment développé, le courant aérien doit le franchir souvent sur la plus grande partie de sa longueur.

Sur le versant dit « au vent » l'air s'élève en donnant naissance à un courant ascendant, nommé ascendance de pente, souvent utilisé pour le vol à voile (Fig.I.8).

Poursuivant son mouvement, l'air redescend, ensuite le long du versant opposé, dit encore « sous le vent », il est animé d'une turbulence plus au moins grande formant des courants rabattants et des tourbillons [2]. Sous le vent, l'écoulement épouse rarement le profil du relief. Il décolle de celui-ci et devient tourbillonnaire (Fig.I.8).

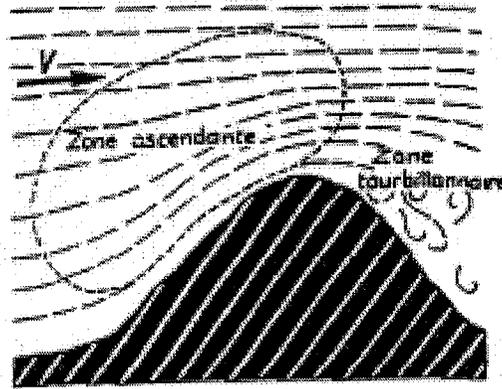


Fig.I.8 : mouvement de l'air le long d'un obstacle orographique. [2]

Donc si l'on rencontre souvent des vitesses de vent accélérées sur les collines, c'est à cause de la différence de pression existant à l'avant et à l'arrière de celles-ci. Ainsi, le vent se trouve comprimé par la colline à la face exposée au vent, pour s'étendre ensuite, une fois passé le sommet, vers la zone de basse pression du côté sous le vent de la colline.

III- Le climat :

Le climat correspond à la distribution statistique des conditions atmosphériques dans une région donnée pendant une période de temps donnée. Il se distingue de la météo qui désigne le temps dans un futur à court terme et dans des zones déterminées. L'étude du climat est la climatologie.

La détermination du climat est effectuée à l'aide de moyennes établies à partir de mesures statistiques annuelles et mensuelles sur des données atmosphériques locales : température, précipitations, ensoleillement, humidité, vitesse et direction du vent.

Sont également pris en compte leur récurrence ainsi que les phénomènes exceptionnels. Ceci s'appuie sur des relevés météorologiques historiques, comme sur des mesures relevées par satellite, mais aussi l'épaisseur du manteau neigeux, le recul des glaciers, l'analyse chimique de l'air emprisonné dans la glace, etc. [12]

III-1- Le climat méditerranéen :

Zone climatique tempérée propre au pourtour méditerranéen et à quelques régions méridionales et littorales de l'Afrique, de l'Amérique et de l'Australie.

La chaleur et la sécheresse de l'été, l'irrégularité des précipitations de l'automne et la douceur de l'hiver sont caractéristiques des régions de type méditerranéen. Le gel est assez rare, la nébulosité peu élevée et l'insolation importante. Les vents locaux, liés à la présence de couloirs et de reliefs montagneux, sont nombreux et assez violents [1].

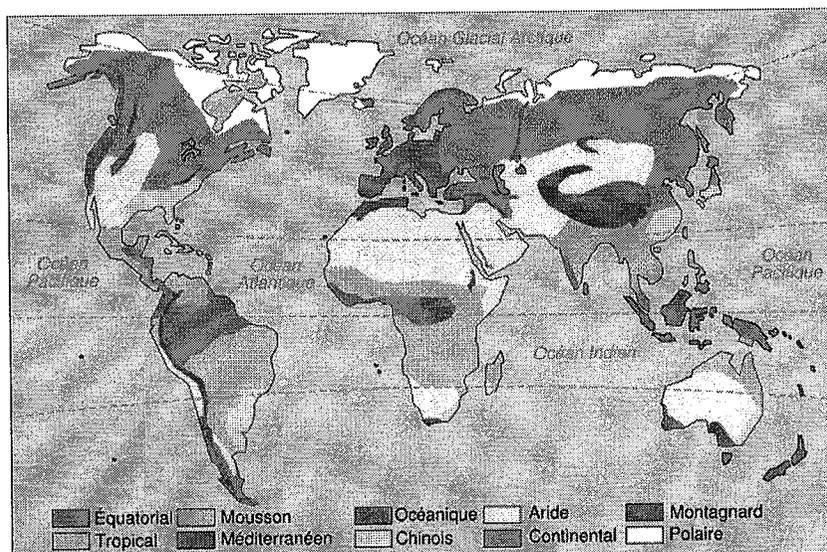


Fig.I.9 : Les climats dans le Monde. [11]

Le climat méditerranéen s'étend sur une frange plus ou moins large, dans les régions entourant la mer Méditerranée : la péninsule Ibérique (sauf sur le littoral nord atlantique), le Midi de la France, c'est-à-dire le Roussillon, le Languedoc, la vallée du Rhône jusqu'au défilé de Donzère, la Provence et la Côte d'Azur, l'Italie (à l'exception de l'Apennin central, de la plaine du Pô et des Alpes), le littoral dalmate, l'Albanie, la Grèce, la Turquie, le littoral d'Asie Mineure et du Levant et le Maghreb. Ce type de climat s'étend également sur les franges littorales de la Californie, du Chili et sur les régions méridionales de l'Afrique et de l'Australie (Fig.I.9).

III-2- La météorologie :

La météorologie est l'étude des phénomènes atmosphériques tels que les nuages, les dépressions et les précipitations. C'est une discipline qui traite principalement de la mécanique des fluides appliquée à l'air mais qui fait usage de différentes autres branches de la physique et de la chimie.

Elle permet donc d'établir des prévisions météorologiques en s'appuyant sur des modèles mathématiques à court comme à long terme. Elle est également appliquée pour la prévision de la qualité de l'air, pour les changements climatiques et pour l'étude dans plusieurs domaines de l'activité humaine (construction, trafic aérien, etc.)

Le but de la météorologie est de trouver les lois régissant la dynamique du fluide que l'on nomme l'air et de pouvoir prédire son comportement futur. L'air est un fluide compressible, formé de différents gaz et se trouvant dans une mince couche à la surface d'un référentiel en rotation (la Terre). La météorologie étant une branche de la physique, la théorie des fluides, le calcul des forces et la thermodynamique sont mises à profit pour expliquer le comportement de l'atmosphère [13].

III-3- La station météorologique :

Une station météorologique enregistre et fournit des mesures physiques liées aux variations du climat [14].

Chaque mesure est obtenue à l'aide d'un capteur. Certains sont exposés aux éléments, comme l'anémomètre et la jauge pluviométrique, alors que d'autres sont groupés dans un abri pour mesurer les caractéristiques intrinsèques de la masse d'air (thermomètre, hygromètre, etc.).

Ces instruments peuvent être manuels, et demandent la prise de données régulières par un observateur, mais de plus en plus ils sont automatisés.

III-4- Capteurs météorologiques :

Dans les services météorologiques nationaux, les observations sont prises toutes les heures. Dans les stations principales par différents capteurs ([14] et [15]) pour les mesures suivantes :

- La température (température sèche, température humide, température maximum et température minimum)
- La pression atmosphérique
- La vitesse du vent
- La direction du vent
- L'hygrométrie (humidité relative de l'air)

- Le point de rosée
- La pluviométrie
- La hauteur et les types des nuages
- Le type et l'intensité des précipitations
- La visibilité
- L'ensoleillement.

Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons passé en revue les principales définitions qui font partie du lexique du phénomène du vent. Nous avons défini les différents paramètres qui le régissent ainsi que d'autres grandeurs qui sont indispensables à la mesure du vent.

A la fin du chapitre, il a été procédé à l'étude du climat dans la région considérée, à savoir Béni Saf, afin de définir le choix du site.

Ce chapitre va nous permettre dans un premier temps d'avoir une bonne connaissance des phénomènes régissant le vent et dans une deuxième étape de prendre en charge le problème posé à savoir l'optimisation de la rentabilité de l'utilisation de l'énergie éolienne.

Bibliographie

- [1] Encyclopédie Encarata 2008
- [2] R. BELLIARD, R. FORGEAT, A. HEMOND, « Météorologie Aérienne» Tome1, Service de la formation en aéronautique, Paris.
- [3] <http://www.traversee-baie.com/images/rose%20des%20vents.png>
- [4] Sathyajith Mathew, « Wind Energy », Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Inde, 2006
- [5] B. DENIS, V. PAREDES, « l'énergie éolienne », INSA, Lyon
- [6] Lirafort, « La pression atmosphérique », France, 2002
- [7] N. KASBADJI MERZOUK, « Evaluation du gisement énergétique éolien. Contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie », Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables URMER Tlemcen. 2006.
- [8] Nicolas Fichaux, « EVALUATION DU POTENTIEL EOLIEN OFFSHORE ET IMAGERIE SATELLITALE », Thèse de doctorat, Ecole des mines de Paris, Ecole Doctorale, 2003.
- [9] J. P. Costes, Simulations numériques des écoulements atmosphériques sur sols fortement hétérogènes. Thèse de doctorat, Université de Nantes, 1996.
- [10] <http://hydrometeorologie.blogspot.com/2008/02/la-brise-marine.html>
- [11] http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Climats_dans_le_Monde.svg
- [12] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Climat>
- [13] <http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9t%C3%A9orologie>
- [14] www.msc-smc.ec.gc.ca
- [15] N.E. BENMOUSSA, « Etude et réalisation d'une station météorologique ». Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 1981.

Chapitre II

Les capteurs éolien

Introduction

Il est à noter qu'il existe un grand nombre de dispositifs permettant de capter l'énergie éolienne pour la transformer en énergie mécanique, seulement il est important de se poser certaines questions essentielles telles que :

- Quelle sera sa taille ?
- Son coût ?
- La puissance qu'il pourra fournir ?
- Sa résistance à l'usure.
- Son impact sur l'environnement comme les problèmes de bruit, l'impact visuel ainsi que les nuisances sonores.

Autant de questions qui font qu'un grand nombre de capteurs éoliens ont été mis de côté et que seul un petit nombre d'entre eux ont été largement exploités.[1]

Cependant plus généralement, on classe les capteurs éoliens par l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. Nous distinguons alors deux grandes familles :

- les capteurs à axe horizontal.
- les capteurs à axe vertical.

I- Historique :

L'utilisation de la force du vent pour suppléer l'énergie humaine ou animale n'est pas nouvelle. La première utilisation de l'énergie éolienne, et sans doute la plus simple, a été la propulsion des bateaux à voiles. Cette énergie aidait le bateau à avancer et remplaçait l'énergie des hommes qui ramaient jadis.

On peut ainsi trouver la trace d'ancêtres des éoliennes modernes jusque dans la Perse ancienne. Plus près de nous, certains pays ont, depuis le Moyen Âge, largement fait usage de ce type d'énergie par le biais des moulins à vent (moulins hollandais) ou des éoliennes dites américaines que ce soit pour moulinier le grain ou pomper l'eau.

Au cours des siècles, on a vu ainsi la technologie des moulins évoluer grâce à l'apparition de toits orientables permettant une utilisation plus intensive, puis de moulins complets montés sur pivot. Enfin, la dernière évolution marquante a été l'adoption de profils

semblables à des ailes d'avion, en lieu et place de la toile tendue sur une structure en bois, du fait de la compréhension des phénomènes aérodynamiques, acoustiques et aéro-élastiques impliqués.

Parallèlement, les progrès technologiques, tant dans les domaines de l'électrotechnique, de l'électronique que dans celui des matériaux, font que l'on peut désormais disposer de machines aux performances étonnantes en terme de puissance produite, tout en limitant les impacts sur l'environnement [3].

II- Différents types de capteurs éoliens :

II-1- Eolienne à axe vertical :

L'axe de rotation de l'éolienne à axe vertical est à la verticale du sol et presque perpendiculaire à la direction du vent comme nous pouvons le voir sur la figure II-1.

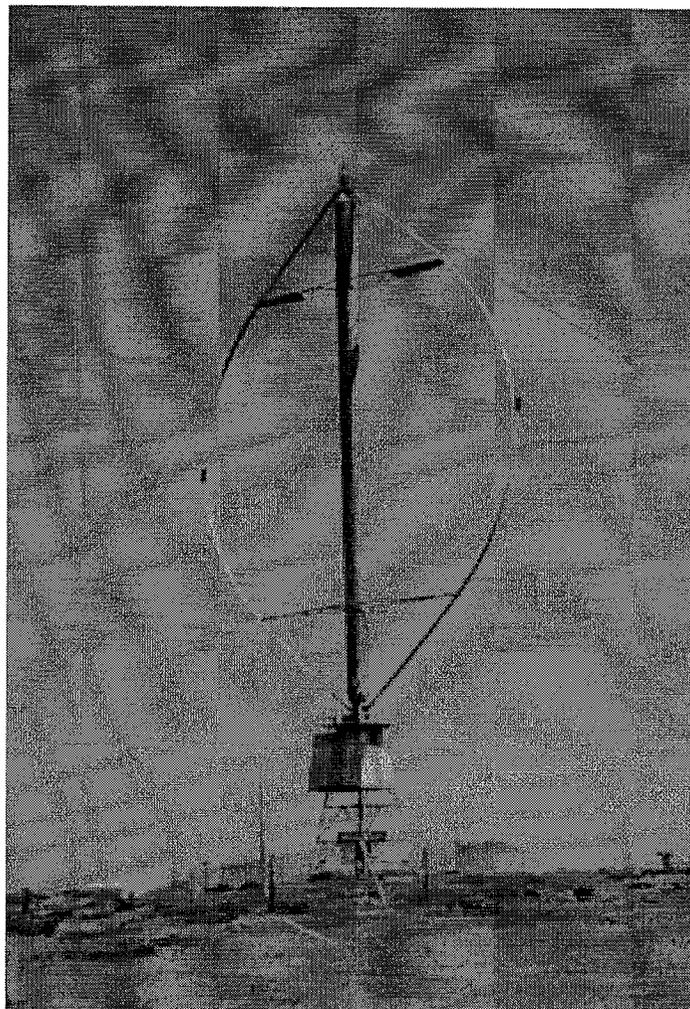


Fig.II-1 : Éolienne de type Darrieus [10]

Le principe de mise en mouvement de ce type de machine est identique à celui d'un anémomètre : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte donc un couple moteur, que l'on peut utiliser pour entraîner un générateur électrique ou un autre dispositif mécanique tel qu'une pompe.

Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour. Par ailleurs, une éolienne à axe vertical fonctionne quelle que soit la direction d'où souffle le vent, permettant donc de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine.

En revanche, le fait qu'une telle éolienne soit érigée près du sol signifie que le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable (gradient de vent, turbulence due aux accidents du terrain en amont de la machine), ce qui réduit significativement l'efficacité de la machine. Par ailleurs, le principe même de fonctionnement, basé sur des variations incessantes de charge aérodynamique sur les pales, fait que ces éoliennes sont très sujettes aux problèmes d'aéroélasticité. Enfin, pour des éoliennes de grande puissance, la surface occupée au sol par le haubanage est très conséquente. [4]

Les deux plus importantes conceptions d'éoliennes à axe vertical sont : Darrieus et Savonius.

II-1-1- Rotor de Darrieus :

Le fonctionnement est ici basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La combinaison de ces forces génère alors un couple moteur. En fait, les différents angles auxquels sont soumis les profils, proviennent de la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil (en rotation autour de l'axe vertical) et de la vitesse du vent.

Ce principe de fonctionnement a été breveté au début des années 1930 par le Français Darrieus. De tels rotors peuvent être de forme cylindrique, tronconique, parabolique... (Figure II-2). Le fonctionnement intrinsèque faisant appel à la rotation des pales, implique que l'éolienne ne peut pas démarrer toute seule. Un système de lancement s'avère donc nécessaire, pour lequel différentes solutions ont été essayées par les constructeurs, d'où la complexité de leur conception. [3]

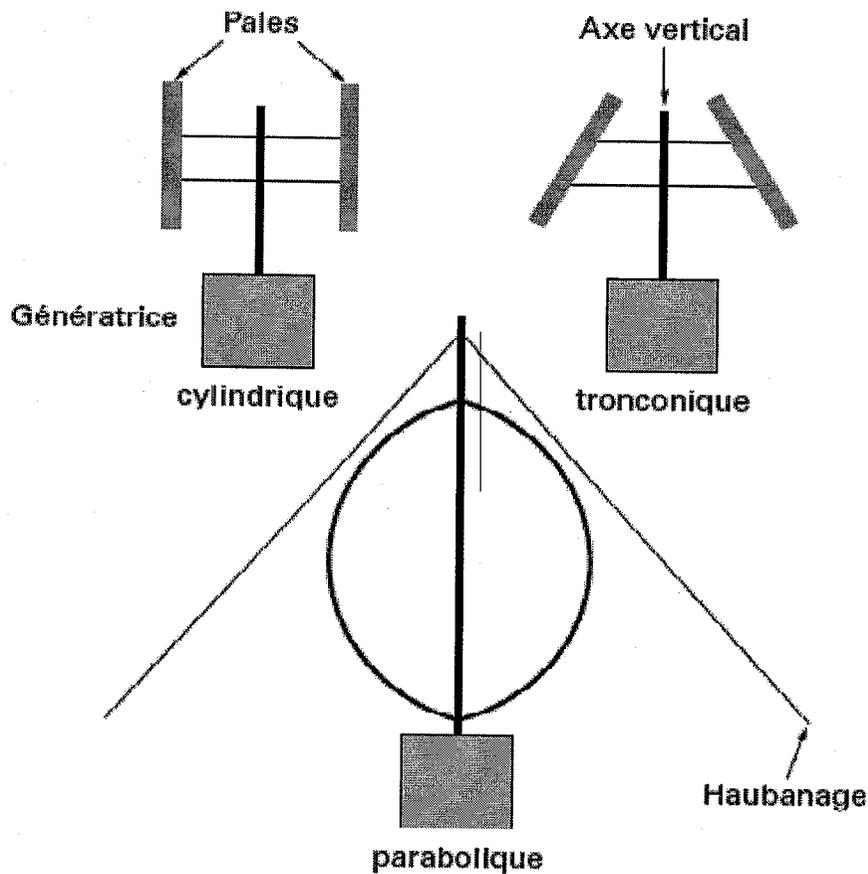


Fig.II-2 : Différents types de rotor Darrieus [3]

II-1-2- Rotor de Savonius:

Du nom de son inventeur, un ingénieur finlandais qui l'a breveté à la fin des années 1920. Le fonctionnement est ici amélioré par rapport à l'anémomètre par la circulation de l'air rendue possible entre les deux demi-cylindres (Figure II-3), ce qui augmente le couple moteur. On peut aisément imaginer que, lors du démarrage de ce type de machine (phase d'établissement du vent), les cylindres soient orientés par rapport au vent de telle manière que le couple résultant soit nul. L'éolienne ne pourra donc pas démarrer spontanément. La superposition de plusieurs rotors identiques, mais décalés d'un certain angle l'un par rapport à l'autre, permet de remédier à ce problème, rendant ainsi la machine totalement autonome.

Il est intéressant de noter que ce type de rotor peut être construit à partir de fûts industriels découpés, ce qui rend son implantation aisée dans les pays en voie de développement.

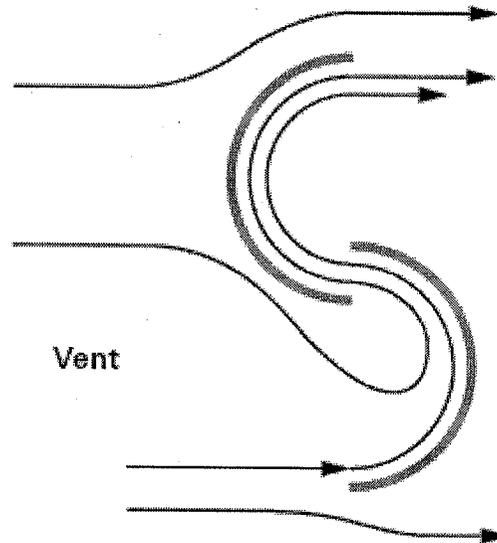


Fig.II-3 : Rotor de Savonius [3]

II-2- Eolienne à axe horizontal :

Ces éoliennes ont leur axe de rotation à l'horizontale du terrain mais aussi presque parallèle à la direction du vent (figure II-4). La majorité des éoliennes présentes dans le marché appartiennent à cette catégorie. [4]

Ces machines sont les descendantes directes des moulins à vent sur lesquels les ailes, faites de voiles tendues sur une structure habituellement en bois, ont été remplacées par des éléments ressemblant fortement à des ailes d'avion. La portance de ces ailes placées dans le vent sert ici à générer un couple moteur destiné à entraîner un dispositif mécanique tel qu'une génératrice électrique ou une pompe. Ces machines présentent généralement un nombre de pales compris entre 1 et 3 et peuvent développer des puissances élevées allant jusqu'à plusieurs mégawatts. Deux types de configuration peuvent être rencontrés : les éoliennes «amont», sur lesquelles les pales sont situées du côté de la tour exposé au vent, et les éoliennes «aval» (figure II-5).

Une catégorie particulière d'éolienne à axe horizontal est celle des machines multipales de faible diamètre, jusqu'à 10m environ. Les vitesses de rotation peu élevées en regard du diamètre, font que ces machines de faible puissance sont utilisées principalement pour le pompage de l'eau. [3]

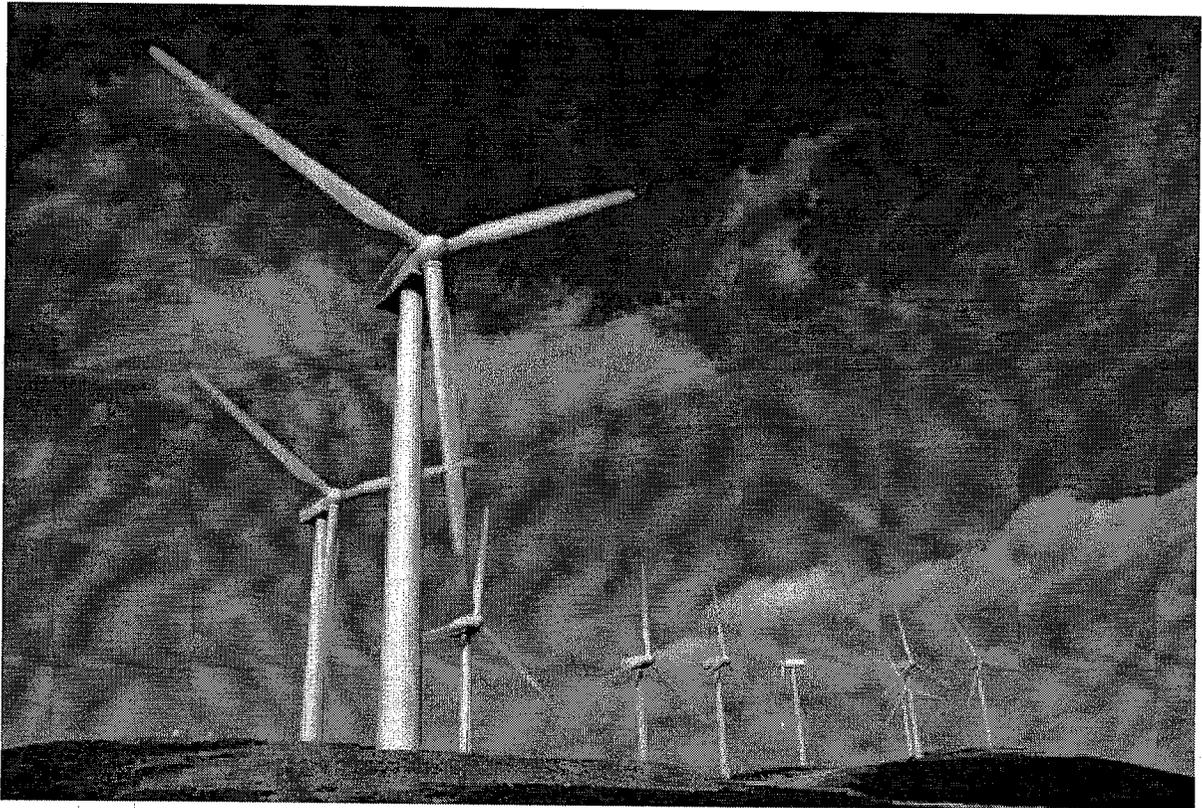


Fig.II-4 : éoliennes à axe horizontal à trois pales. [11]

Elles ont un certain nombre d'avantages, comme la facilité au démarrage et pour de petites vitesses de vent. En général, elles donnent un coefficient de puissance relativement élevé. Toutefois, la génératrice et le multiplicateur de ces éoliennes sont placés en haut de la tour, ce qui rend sa conception plus complexe mais aussi plus coûteuse. Un autre inconvénient est la nécessité d'orienter à chaque fois la machine par le lacet en direction du vent. [4]

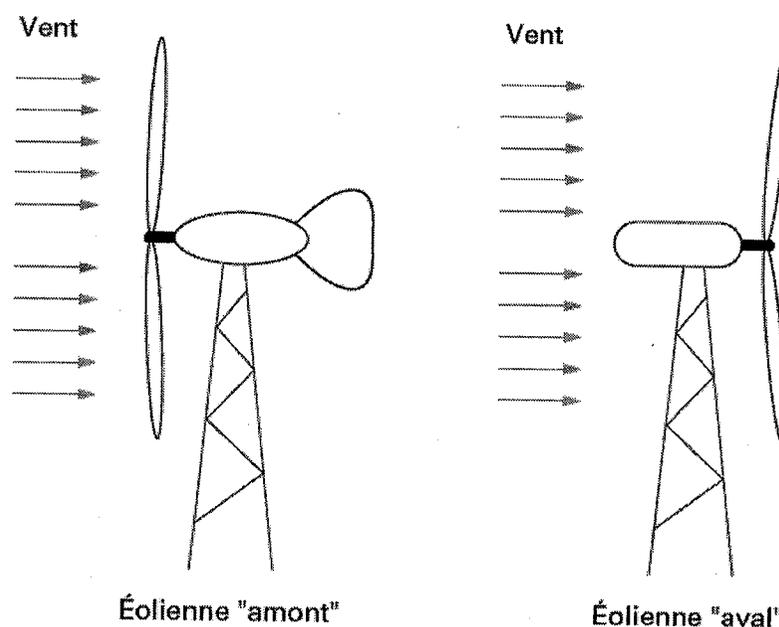


Fig.II-5 : configurations à axe horizontal [3]

II-2-1- Application des éoliennes :

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent.

Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation tout en tenant compte du rendement de la machine. Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- Soit directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau.
- Soit pour entraîner une génératrice électrique, qui à son tour fournit de l'énergie électrique.

Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration :

- L'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure.
- L'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne, à savoir d'une part la complémentarité avec les moyens traditionnels de production (centrales thermiques classiques ou nucléaires, barrages...) pour des régions disposant d'une infrastructure existante et d'autre part la possibilité de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel. Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne en ce qui concerne le désenclavement de régions peu urbanisées et ses applications dans les pays en voie de développement (alimentation d'unités de désalinisation, cogénération avec des groupes diesel, des panneaux photovoltaïques...). [3]

II-2-2- Architecture d'une éolienne à axe horizontal

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour, comme illustrés sur la figure II-6 pour une machine de type amont.

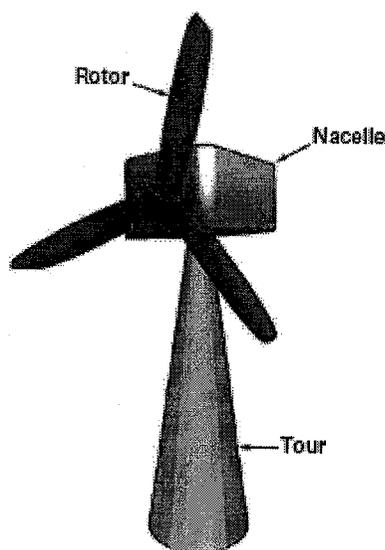


Fig.II-6 : composants d'une éolienne [5]

II-2-2-1- La tour :

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor et nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie.

Il existe sur le marché trois grands types de tour (figure II-7) :

- Tour à mât haubané :

Sa réalisation est simple mais elle est essentiellement utilisée pour les machines de faible puissance. L'intervention au niveau de la nacelle nécessite en général de coucher le mât. Elle présente toutefois l'avantage de pouvoir soustraire l'éolienne à des conditions météorologiques extrêmes (forte tempête, cyclone). L'emprise au sol de l'haubanage peut devenir un obstacle à son utilisation.

- Tour tubulaire :

Bien que sa réalisation est plus complexe, elle a la faveur des constructeurs car elle permet d'abriter certains dispositifs de régulation ou de commande et apporte une protection évidente aux personnels chargés de la maintenance qui doivent grimper jusqu'à la nacelle (installation aisée d'une échelle voire d'un ascenseur intérieur). Son aspect esthétique est de plus un atout pour l'intégration visuelle harmonieuse de l'éolienne.

- Tour en treillis :

Son avantage essentiel est la simplicité de sa réalisation. Ceci la rend attractive pour les pays en voie de développement. Pour des machines de grande taille, son aspect inesthétique devient un handicap certain.

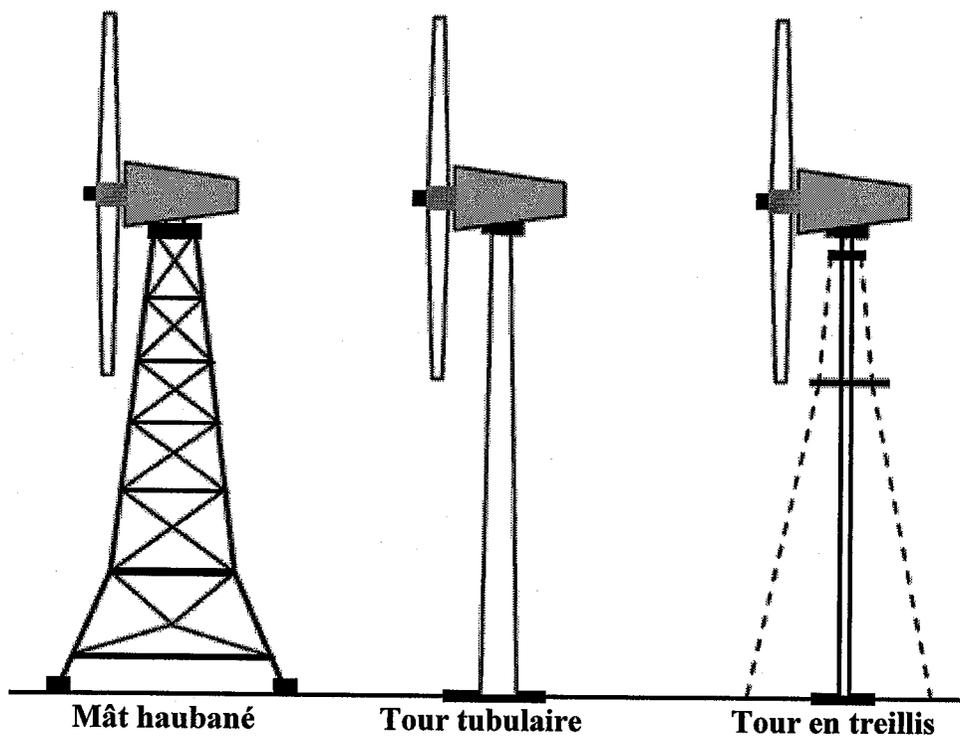


Fig.II-7 : Différents types de tours [4]

Pour les petites éoliennes, la solution la moins coûteuse est un tuyau en sections qui se trouve amplement haubané. La dimension du tuyau d'acier est surtout fonction du poids de l'éolienne, car ce sont les haubans qui assurent la stabilité de l'ensemble. Plus il y a d'haubans et de structure porteuse, plus le bruit est élevé dans les grands vents.

Les tours en treillis sont les moins chères, mais souvent mal acceptées et très peu utilisés.

La dernière alternative, la tour tubulaire est beaucoup plus élégant, (aucun hauban n'est alors nécessaire) mais le prix d'une telle tour peut atteindre trois ou quatre fois celui d'un pylône haubané. La solidité de la fondation deviendra un élément important. C'est la solution pour les grandes éoliennes. [5]

II-2-2-2- Le rotor et ses pales :

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué des pales d'un nombre variable et de l'arbre primaire. La liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre primaire

qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant).

❖ **Les pales :**

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

• Dimensionnement :

La conception d'une pale doit faire appel à un compromis délicat entre le rendement aérodynamique, la légèreté, la résistance statique, la tenue en fatigue etc..

Ainsi le choix des profils, leur répartition en envergure, la forme en plan (évolution de la corde en fonction de l'envergure) et le vrillage de la pale doivent être soigneusement étudiés. Par exemple, selon le type de régulation choisi et selon la taille de l'éolienne, le vrillage pourra différer significativement d'une machine à l'autre.

Pour une machine de grande taille à pas variable, on pourra envisager de démarrer la rotation en s'aidant du générateur utilisé en moteur. Par contre, pour une petite éolienne régulée au décrochage, le vrillage, notamment au pied de la pale, devra permettre un démarrage autonome de la machine. À ces contraintes s'ajoutent bien évidemment les critères relatifs au vent que la machine devra « utiliser ». Les constructeurs sont ainsi amenés à proposer différents types de pales pour une même puissance en fonction de la vitesse moyenne rencontrée sur les sites d'implantation.

Après le choix d'une première configuration aérodynamique, il faut concevoir une structure résistante et légère. Là encore, les conditions de vent (vitesses, taux de turbulence) influent sur la conception (charges extrêmes, tenue en fatigue).

On s'aperçoit donc aisément que la conception d'une pale est en fait un procédé itératif avec de nombreux paramètres et de nombreuses contraintes. Il est indéniable que l'apparition de logiciels de calcul évolués associés à des optimiseurs facilite grandement la tâche du concepteur. [3]

- Le nombre de pales :

Les éoliennes d'aujourd'hui sont soit ; monopale, bipale, tripale ou bien encore multipale (figure II-8). L'utilisation de rotor à trois pales est prédominante dans l'ensemble des machines de moyenne et grande puissance, exploitées ou construites dans le monde soit environ 80% du marché. Aujourd'hui, nous évitons de construire de grandes éoliennes avec un nombre pair de pales, surtout pour des raisons de stabilité. Un rotor constitué d'un nombre impair de pales (trois au minimum) ressemble à un disque lorsqu'on calcule les propriétés dynamiques de l'éolienne.

Dans le cas d'une éolienne à structure rigide, il y aura des problèmes de stabilité si le rotor a un nombre pair de pales : au moment même où la pale supérieure fléchit légèrement vers l'arrière, atteignant le point le plus extrême du disque balayé et captant ici la puissance maximale du vent, la pale inférieure traverse la zone d'abri créée juste devant la tour.

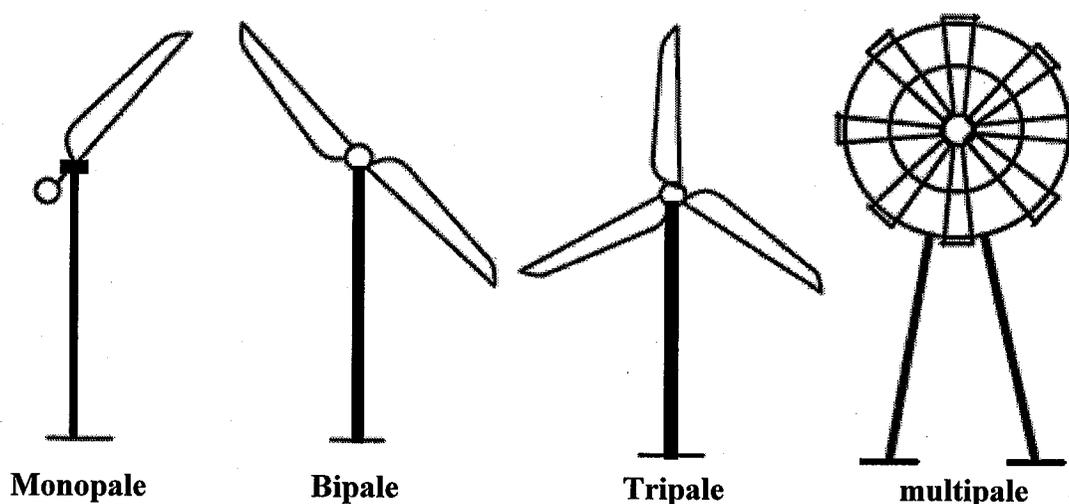


Fig.II-8 : classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales. [4]

Les éoliennes monopales commerciales sont assez rares avec des problèmes encore plus prononcés que dans le cas des éoliennes bipales. Outre une vitesse de rotation plus élevée, des problèmes de bruit et d'impact visuel, l'inconvénient de ce type d'éolienne est que, pour équilibrer le rotor, il faudra munir l'éolienne d'un balancier du côté du moyeu opposé à la pale. Cette disposition annule évidemment les économies de poids que l'on peut faire en dotant l'éolienne d'une seule pale au lieu de deux.

Le choix résulte donc d'un compromis entre l'efficacité aérodynamique du rotor, le poids, la dynamique des structures, les nuisances sonores et le prix associé. [6]

- Construction et matériaux :

Du fait de la ressemblance entre une pale d'éolienne et une aile d'avion, il n'est pas étonnant que les techniques de construction et les matériaux utilisés pour les pales soient relativement proches de l'aéronautique.

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

C'est pourquoi cette technique n'est quasiment plus retenue de nos jours.

Il est à noter que le bois est encore utilisé, sous la forme de lamellé-collé principalement, mais cette technique n'est guère employée pour les éoliennes de grande taille. Assez rapidement, les matériaux composites à base de fibres de verre imprégnées de résines polyester ou époxyde se sont généralisés.

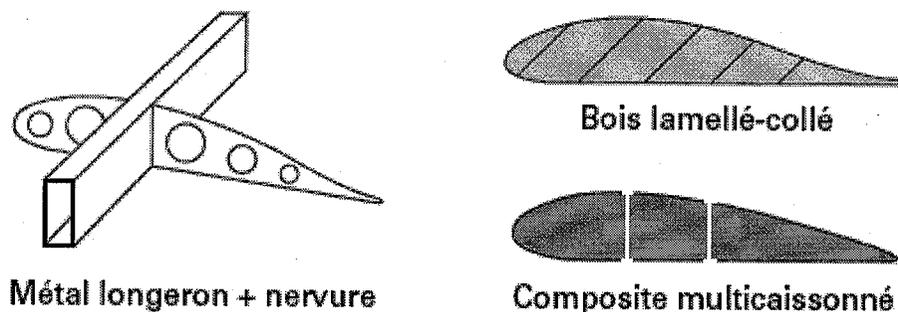


Fig.II-9 : exemples de structures d'une pale [3]

Depuis quelques années, les fibres de carbone ont également fait leur apparition. Les caractéristiques mécaniques de ces dernières sont bien sûr très intéressantes (rapport rigidité/masse très favorable), mais leur prix élevé comparé à celui de la fibre de verre tend à restreindre leur emploi aux machines à hautes performances. [3]

Les matériaux composites sont habituellement mis en oeuvre par imprégnation manuelle ou automatisée de tissus secs, par utilisation de produits préimprégnés ou, plus récemment, par moulage par transfert (RTM Resin Transfer Molding) [3]. Les structures de pales composites peuvent faire appel à un ou plusieurs longerons recouverts d'une peau, les parties creuses étant éventuellement remplies de mousse, ou à une configuration multicoussons à noyaux de polystyrène expansé ou de mousse. La figure II-9 présente quelques exemples de structures en fonction des matériaux utilisés.

II-2-2-3- La nacelle :

La nacelle est une véritable salle des machines perchées dans le ciel. Elle comporte une ou deux génératrices, une boîte de vitesses, un système de freins à disque et différents équipements automatisés d'asservissement. On construit maintenant des éoliennes énormes de 1500 kW sur des tours de près de 80 mètres et qui sont surtout limitées non par la technologie, mais par les grues gigantesques qu'elles nécessitent pour leur installation.

La figure II-10 présente une coupe de la nacelle avec ses différents composants. [5]

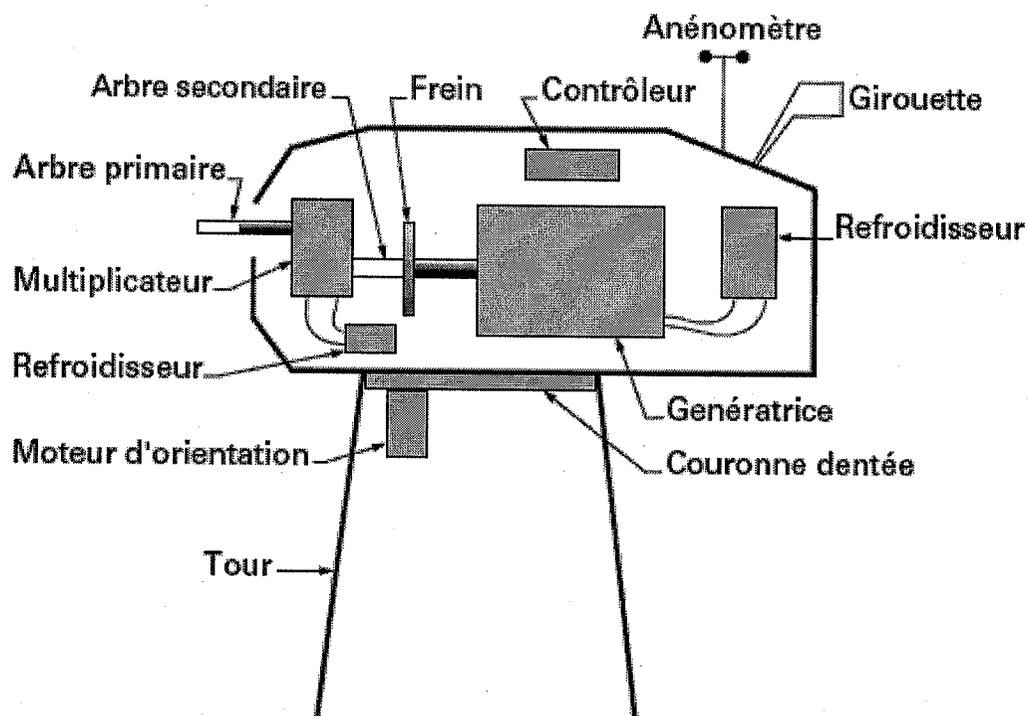


Fig.II-10 : Eléments d'une nacelle. [3]

- Le multiplicateur de vitesse :

Il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques. La boîte de vitesse permet d'avoir un rotor tournant lentement (30 à 40 tours/min) pouvant se coupler à un générateur de série, donc peu cher, qui tourne lui 40 à 50 fois plus vite. Dans les pays froids on doit réchauffer ces grosses boîtes d'engrenages.

- L'arbre secondaire :

L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

- La génératrice :

C'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

C'est un alternateur. Les plus simples et robustes sont des générateurs à induction, mais il faut alors contrôler leur excitation par des condensateurs ou les relier au réseau, ce qui n'est pas facile. On doit essayer de stabiliser la vitesse de ces moteurs asynchrones près de leur puissance nominale (vers 1800 tours) pour avoir en bout de ligne une fréquence et une tension régulières. Voilà pourquoi certains fabricants installent 2 génératrices, l'une exploitant les basses vitesses de vent, l'autre pour les hautes vitesses.

On peut utiliser une génératrice auto-excitée : un moteur synchrone à aimants permanents. Plus facile à gérer, ce type d'alternateur est plus cher et comporte de nombreuses pièces mécaniques.

Enfin, l'avenir pourrait bien se situer dans les génératrices à basse vitesse car elles suppriment tout recours à un multiplicateur. La nouvelle génératrice discoïde de Jeumont Industrie est une innovation majeure car elle réduit la taille, normalement imposante, de ces alternateurs multipôles. Toutefois, le courant produit doit passer par un onduleur de grande puissance. Il s'agit là aussi d'une technologie de pointe [5].

- Un contrôleur électronique :

Il est chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble (rotor + nacelle) face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts non stationnaires sur l'installation. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.

- Le dispositif d'orientation de la nacelle :

Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée : cela évite de solliciter constamment les moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance. Le dispositif d'orientation comprend un compteur de tours, de manière à éviter de tordre inconsidérément le câble acheminant l'énergie électrique provenant de la génératrice jusqu'au pied de la tour. Au bout d'un certain nombre de tours de la nacelle, celle-ci est alors manoeuvrée en sens inverse à l'aide des moteurs d'orientation pour dévriller le câble.

On trouve aussi divers dispositifs de refroidissement par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile et un groupe hydraulique.

- Frein de secours : [4]

Durant les périodes de vents violents, les éoliennes doivent être complètement arrêtées pour leur propre sécurité. De la même façon si une ligne à haute tension est coupée ou s'il y a un dysfonctionnement au niveau de la génératrice pour une quelconque raison la turbine va rapidement accélérer. Cela mène l'éolienne à des conditions extrêmes en quelques secondes seulement. Sachant que le système n'est pas conçu pour tolérer une telle accélération qui engendre une très grande vitesse de rotation. La nécessité d'équiper les éoliennes par un frein

de secours est primordiale, afin d'arrêter le systèmes et de l'immobiliser lors des conditions extrêmes.

Comme le rotor accélère rapidement, les freins de secours doivent avoir une réponse réactive très rapide.

Deux types de freins sont communément utilisés sur les machines: les freins aérodynamiques et les freins mécaniques.

Pour assurer leur propre sécurité, les machines disposent habituellement de deux systèmes de freinage, le premier comme frein fondamental et un autre comme frein de secours qui entre en action seulement s'il y a disfonctionnement du premier frein.

Pour caractériser un capteur éolien et notamment son efficacité, une classification méthodique, universellement adoptée fait apparaître les groupes, les noms et les formes de ces capteurs. A cet effet nous avons plusieurs paramètres de fonctionnement.

III- Classement des types d'éolienne en fonction du coefficient de puissance (C_p) :

Sachant que la turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Nous pouvons à partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active S de la voilure, calculer la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne et qui est donnée par :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad 2.1$$

Avec P_v la puissance du vent en *Watt*

ρ la masse volumique de l'air en $Kg.m^{-3}$

S la surface de la voilure en m^2

V_v la vitesse du vent à l'entrée de la voilure en $m.s^{-1}$

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité [2]. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz :

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot P_v = 0,59 \cdot P_v \quad 2.2$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_p^{opt} = \frac{P_{\max}}{P_v} = \frac{2 \cdot P_{\max}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} \quad 2.3$$

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de cette puissance maximale théorique peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce rendement, appelé coefficient de puissance C_p de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce coefficient lie la puissance de l'éolienne P_{eol} à la vitesse du vent V_v :

$$C_p = \frac{2 \cdot P_{eol}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} \quad 2.4$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne une grandeur spécifique est utilisée : la vitesse réduite λ , qui est le rapport entre la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine et de la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V_v} \quad 2.5$$

Après avoir définie la limite de Betz qui caractérise la limite maximale de l'énergie, due à la masse d'air amont, susceptible d'être captée par une éolienne. Le graphe de la Figure.II-11 donne une vue sur les coefficients de puissance C_p habituels en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types d'éoliennes :

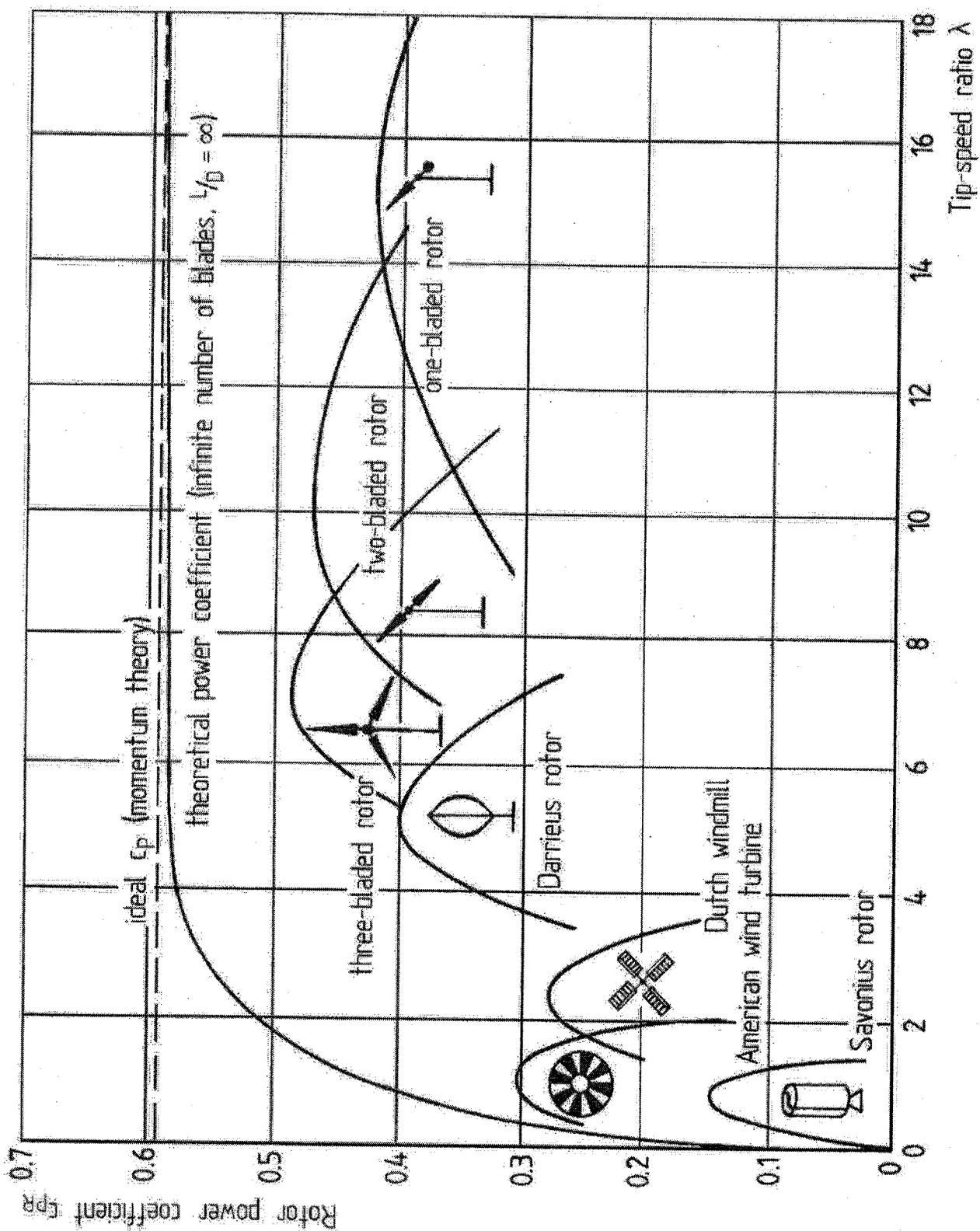


Fig.II-11 : Coefficients de puissance en fonction de la vitesse normalisée λ pour différents types de turbines. [7]

Des courbes typiques pour différents aérogénérateurs sont présentes sur la figure précédente. En général, dans un premier temps, le coefficient de puissance augmente avec la vitesse normalisée, atteignant un maximum pour une certaine valeur de λ puis diminue même avec une augmentation de la vitesse normalisée.

Ces variations de $C_p(\lambda)$, dépendent de plusieurs propriétés aérodynamiques, mais essentiellement de plusieurs éléments dans la conception du rotor, notamment, dans le nombre de pales utilisées.

IV- Potentiel énergétique éolien :

Compte tenu des nécessités de conversion de l'énergie cinétique due au vent en énergie mécanique (mouvement de rotation de l'éolienne) l'énergie disponible (potentiel) subit une suite de pertes en cascades, jusqu'à la sortie de la machine, (limite de Betz, seuils machine et pertes de conversion), [8]. Cette dégradation de l'énergie est représentée schématiquement en figure II-11.

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

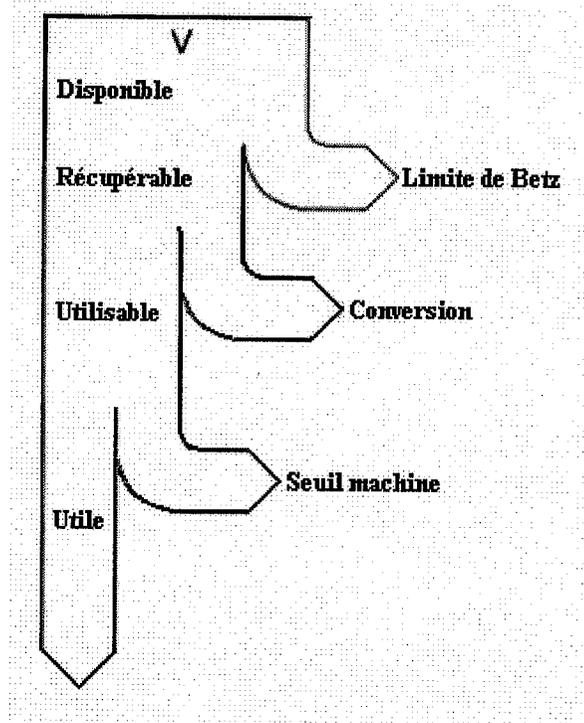


Figure II-11 : Bilan des dégradations successives de l'énergie éolienne avant utilisation. [9]

V- Conditions d'utilisation :

- Durée de vie

Les pales d'une éolienne sont dimensionnées de manière à résister aux sollicitations aérodynamiques et mécaniques, qu'elles soient statiques ou dynamiques. D'autres facteurs doivent être pris en considération lors de l'élaboration d'une pale, comme la résistance à l'abrasion (poussières charriées par le vent, pluie, grêle), la corrosion chimique (embruns maritimes, rayonnement UV). Ces spécifications sont d'autant plus contraignantes que la durée de vie prévue pour une pale est de l'ordre de vingt ans. Bien évidemment, des contrôles sont effectués régulièrement pour s'assurer de l'intégrité des pales d'une machine, mais ces opérations peuvent se révéler délicates dans le cas d'installations off-shore par exemple. C'est pourquoi, on constate actuellement le développement de l'application de méthodes de contrôle de santé et de maintenance prédictive à l'aide de capteurs noyés dans les pales (jauges de déformations classiques ou par interférométrie optique). [3]

- Givrage

Une des utilisations des éoliennes est la production d'énergie électrique dans des zones isolées. Cela peut nécessiter l'adoption de systèmes particuliers, par exemple lorsque l'implantation se fait dans une région au climat froid (Europe du Nord, Canada, Alaska...).

Le phénomène de givrage des pales doit alors être pris en compte. Non seulement l'accumulation de givre sur les pales dégrade significativement le rendement aérodynamique de celles-ci (l'accrétion de glace étant favorisée par la rotation), mais la masse de glace ajoutée en conditions givrantes sévères peut amener à la rupture statique d'une pale. Le remède ne consiste donc pas éventuellement à immobiliser le rotor lorsque ce type de conditions météorologiques prévaut, mais à munir la machine d'un dispositif de dégivrage à l'instar de ceux que l'on trouve habituellement sur les avions ou les hélicoptères, à base de résistances chauffantes électriques noyées dans les pales. C'est pourquoi la majorité des constructeurs propose des versions à dégivrage automatique des pales. [3]

- Foudroiement

Une éolienne étant par définition une construction d'une hauteur importante érigée sur une surface dégagée, la possibilité d'un foudroiement n'est pas à exclure au cours de son

utilisation. Une telle éventualité est particulièrement sensible lorsque des pales en fibres de carbone sont utilisées, en raison de la très forte conductivité électrique de ce matériau. Cela impose de munir les pales lors de leur construction de dispositifs parafoudre (treillis métallique noyé dans la structure par exemple) permettant autant que faire se peut de protéger la machine et plus particulièrement l'installation de la foudre. [3]

Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, il a été question d'étudier la machine en elle-même, connaître ses composants, leur classification, les matériaux utilisés pour leur fabrication, leur usage, leurs avantages ainsi que leurs inconvénients. Nous avons aussi défini les paramètres qui sont utilisés pour leur classification, notamment, le coefficient de puissance en aboutissant sur la définition du potentiel énergétique éolien.

Bibliographie

- [1] M. BEY, « Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne », Mémoire de magistère, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables URMER Tlemcen. 2005.
- [2] Danish Wind Industry Association. <http://www.windpower.org>
- [3] LECONTE P., RAPIN M. et SZECHENYI E., Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, Réf : BM 4 640.
- [4] Sathyajith Mathew, « Wind Energy », Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Inde, 2006
- [5] B. DENIS, V. PAREDES, « l'énergie éolienne », INSA, Lyon
- [6] www.thewindpower.net
- [7] E. HAU, « Wind Turbine, Fundamentals, technologies, Application, Economics » Springer, 2000.
- [8] Technical note of WMO, « Meteorological Aspect of the Utilisation as an Energy Sources », N°175, 1981.
- [9] N. KASBADJI MERZOUK, « Evaluation du gisement énergétique éolien. Contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie », Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables URMER Tlemcen. 2006.
- [10] http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Eoliennes_Gaspesie.jpg
- [11] www.energie-planete.com

Chapitre III

Le choix du site

Introduction

Le choix de l'emplacement d'une ferme éolienne est complexe et ne laisse pas de place au hasard. Il faut savoir que la puissance délivrée par une éolienne augmente avec le cube de la vitesse du vent, c'est pour cela qu'il faut en premier chercher des zones soumises à des vents forts et réguliers, mais aussi que le site en question obéisse à certaines conditions que nous allons aborder sur ce chapitre, en argumentant notre choix de la région de Béni-Saf.

I- La région de Beni-Saf :

La région de Beni-Saf se trouve sur la côte ouest de l'Algérie. Elle est délimitée au Nord par la mer Méditerranée, au Sud par le Douar Sidi Ali Bouhamad, à l'est par l'Oued Sidi Djelloul et à l'Ouest par l'Oued Tafna.

Elle est à 60Km de Tlemcen et 100Km d'Oran, elle s'étend sur une superficie de 174000hectares, elle comporte un port de pêche, une zone industrielle, un littoral touristique et surtout elle est à vocation agricole. La surface agricole utile est de 11000 hectares sur une surface de 135000 hectares, la majeure partie de la population est regroupée en trois localités (Beni-Saf, Sidi-Safi et Emir Abdelkader).

Le climat général de cette région est de type méditerranéen, les précipitations sont rares et responsables de la tendance vers l'aridité. Le relief de cette région est formé de plateaux, d'une vallée et d'une montagne à pente douce, il permet d'installer des fermes d'aérogénérateurs sans nuire à l'être humain ni à l'environnement. [1]

II- Le choix du site :

La région de Beni-Saf présente un couloir constamment balayé par les vents, notamment par les brises de mer (le jour) et de terre (la nuit) vu sa situation ouverte vers la mer méditerranée. Elle est délimitée par les coordonnées suivantes :

à l'Est : 1° 17' W au Sud 35°12' N et à l'Ouest 1°27' W

Station Météo. (ONM)	Longitude (degré)	Latitude (degré)	Rugosité (m)	V (m/s)
Beni-Saf	-1.35	35.3	0.02	2.8

Tableau III-2 : Caractéristiques du site de Beni-Saf [2]

Les données du tableau nous donnent une vitesse moyenne du vent de 2,8m/s prise à 10mètres du sol et une rugosité de 0,02m. Sachant que la vitesse du vent augmente avec l'altitude, nous pouvons faire une extrapolation verticale de la vitesse du vent afin d'affirmer que ces vents peuvent fournir de l'énergie électrique.

III- Les reliefs :

Le périmètre de la région est le lieu de rencontre de deux grandes entités géographiques: à l'Est, le plateau de Sidi Ben Adda et à l'Ouest, la chaîne côtière des Traras dont la partie terminale située à l'intérieur des limites de la région est séparée de son ensemble par la vallée de la Tafna.

Le contact massif-vallée est marqué par la rupture de pente très prononcée, le plateau est composé de deux sous-ensembles, le plateau du nord-ouest d'une part et celui de l'ouest de la région d'autre part.[3]

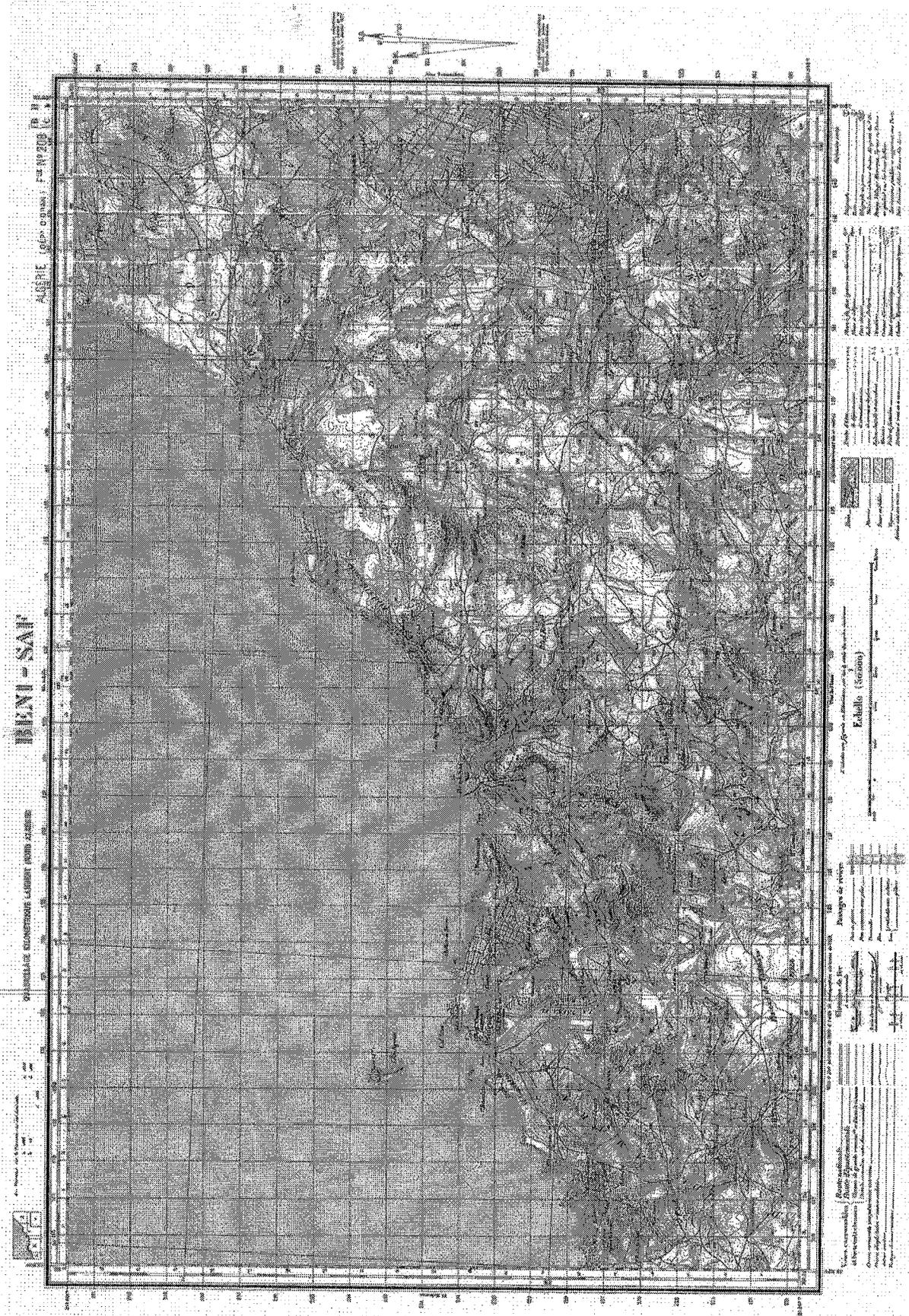


Fig.III-1 : Cartographie de la région de Beni-Saf. [4]

Le plateau occidental est appelé Gaadet El Ghouzlène. Il est limité à l'est par le chef-lieu, à l'ouest par Rachgoun, au nord par la mer, au sud par le massif montagneux. Le plateau oriental Sidi-Safi est limité par la mer au nord, les monts de Sebâa Chioukh au sud et le massif montagneux à l'ouest. Il continue à l'est par le plateau de Sidi Ben Adda. Le terrain a une morphologie relativement ondulée. La pente globalement faible est comprise entre 1 et 15 %. L'altitude générale décroît du sud au nord.

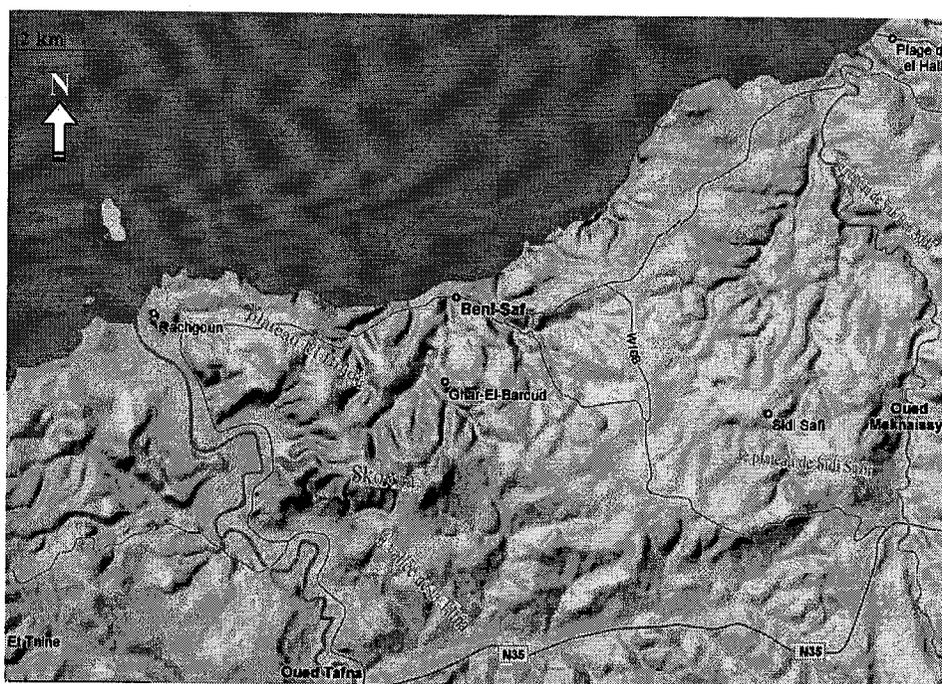


Fig.III-2 : Carte géographique de Béni-Saf [5]

Dans Le massif montagneux, occupant le centre ouest de la région, La seule vraie montagne est le Djebel Skouna dont l'altitude est de 409 m. Tout autour de celle-ci les éléments principaux du massif sont des monticules à pente inférieure à 25% et dont les sommets se terminent soit par un replat très étroit, soit par un pic présentant un aspect presque radioconcentrique décroissant.

Une étude faite sur la direction des vents qui balayent la région de Béni-Saf a permis de mettre en œuvre une rose des vents qui démontre que la région choisie est balayée par des vents Ouest et Nord-Ouest.

Ce qui nous pousse à délimiter des sites qui sont directement exposés à ces vents sans qu'il n'y ait aucun obstacle en amont, tels les reliefs montagneux et les falaises de pente raide. Nous prendrons en compte le terrain adéquat pour un champ d'éolienne qui doit être assez vaste, de faible rugosité, à proximité du réseau électrique avec un accès facile par les chemins de transport.

VI- Conclusion :

Site proposé :

Dans la carte suivante nous délimitons (en rouge) la partie de la région de Béni-Saf qui est la plus appropriée pour l'implantation d'aérogénérateurs.

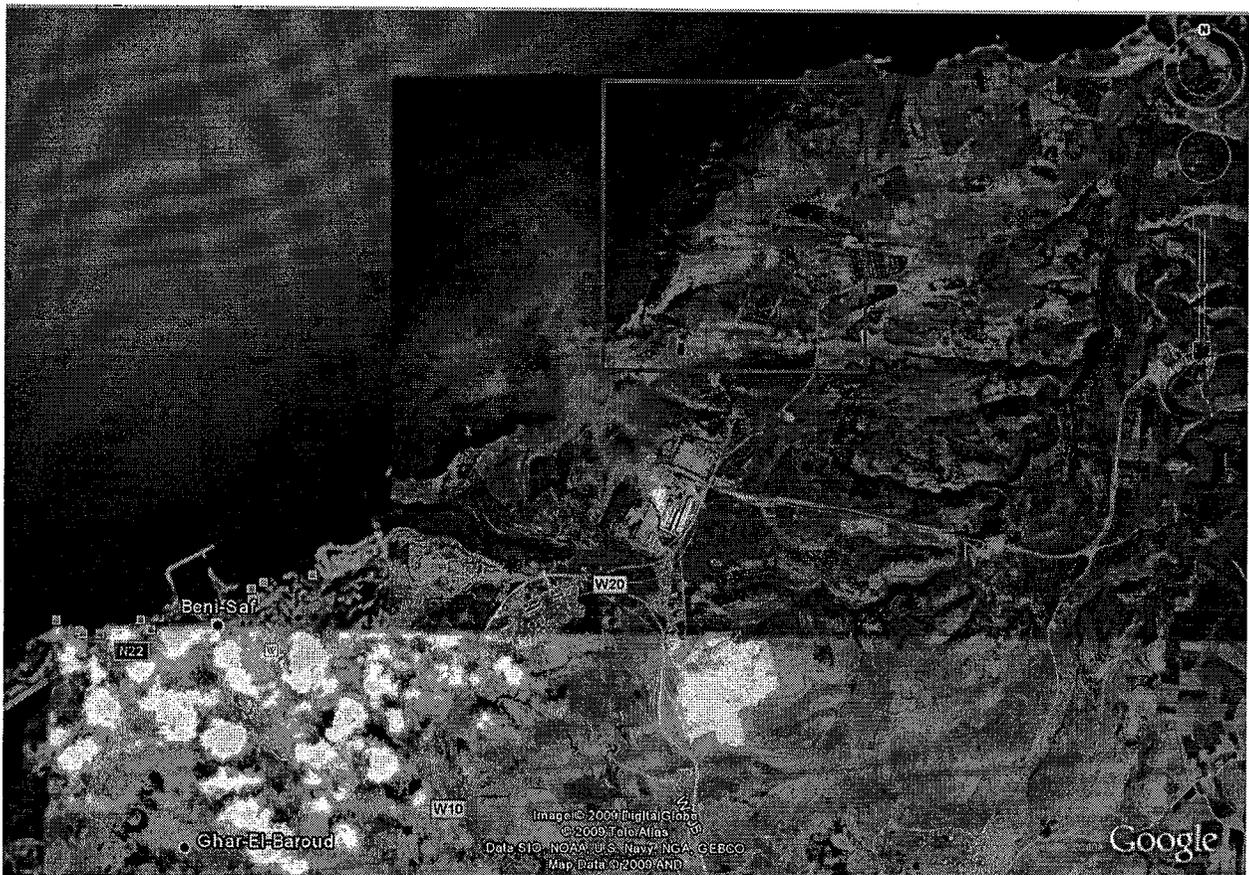


Fig.III-3 : vue aérienne de la région de Béni-Saf par Google Earth. [5]

Le site choisi comprend un terrain sans obstacles assez vaste, à proximité de la cimenterie de Béni-Saf, ce qui conclue le non loin du réseau électrique (indispensable pour la zone industrielle de la région), la présence de la route Wilaya le N°20 juste en aval mais aussi une ouverture directe sur les vents d'ouest et de nord-ouest avec une pente ascendante en amont qui donne un effet accélérateur à la vitesse du vent, comme ont peut le voir sur la figure III-4.

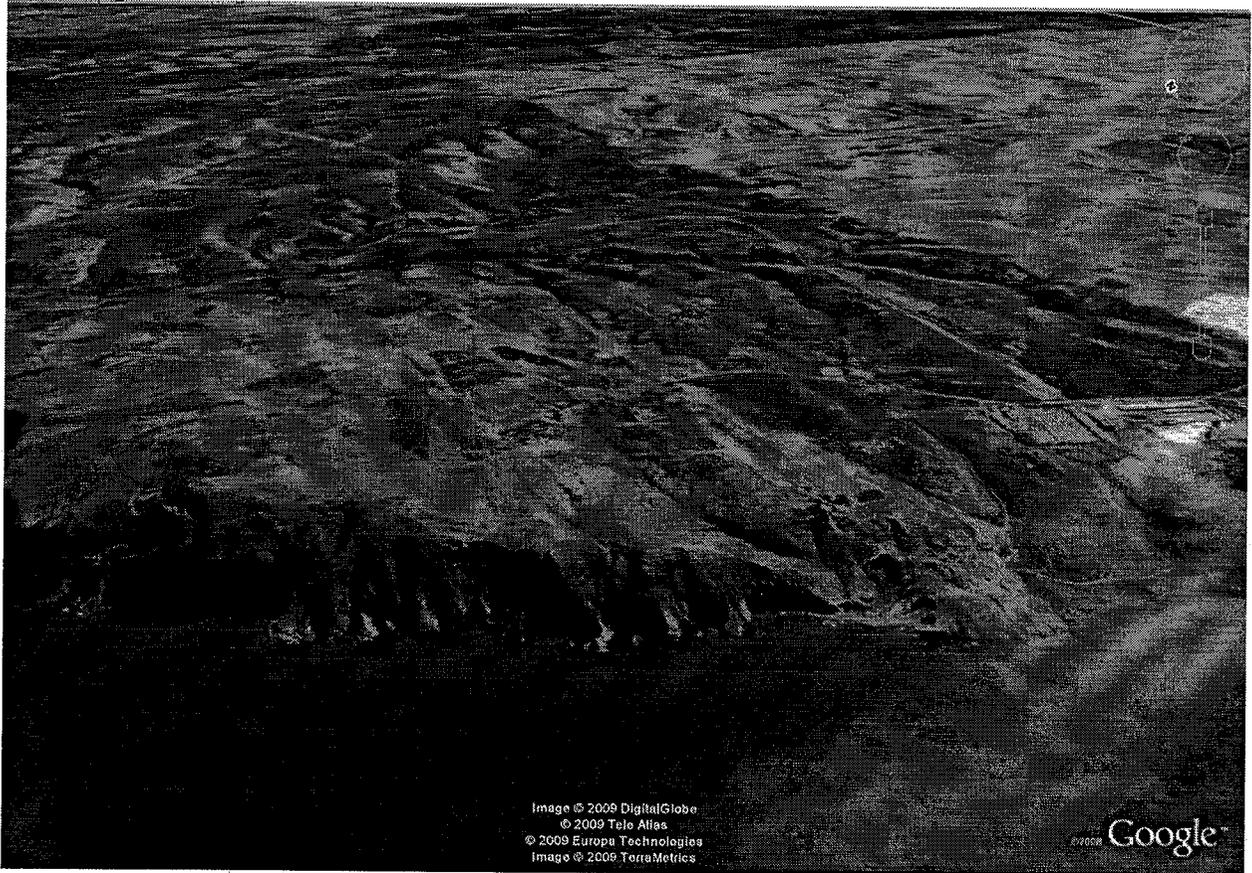


Fig.III-4 : Vue aérienne du relief de la zone étudiée par Google Earth. [5]

Bibliographie

- [1] TABET HELAL M. A. et GHELLAI N., Le Gisement Eolien à Béni-Saf Région Côtière de l'Ouest Algérien, 2003.
- [2] KASBADJI MERZOUK N., Evaluation du gisement énergétique éolien. Contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie, Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables URMER Tlemcen. 2006.
- [3] Direction de l'environnement de Aïn Témouchent, Rapport « étude de l'impacte sur l'environnement de la réalisation et l'exploitation de l'usine de dessalement d'eau de mer » Aïn Témouchent 2007.
- [4] Ministère des travaux publics et des transports, Institut géographique national
- [5] Google Earth maps

Chapitre IV

Calculs et méthodes

Introduction

Le travail, consiste à donner une estimation de la puissance effective d'une éolienne implantée dans la région côtière de Béni-Saf. Pour cela, nous ferons une extrapolation verticale de la vitesse du vent à différentes hauteurs de celle mesurée après avoir décrit les modèles utilisés pour notre travail. A la fin, une estimation de la puissance produite par un aérogénérateur pour différentes valeurs du rayon du rotor a été donnée.

I-Méthode d'extrapolation verticale :

L'extrapolation verticale de la vitesse du vent passe par l'élaboration d'un profil de la vitesse du vent en fonction de la hauteur. Ces profils dépendent de fonctions implicites dont l'expression diffère selon le cas de stabilité atmosphérique. Souvent, dans la littérature, on suppose que l'atmosphère est neutre afin d'annuler la valeur de la fonction implicite.

Pour comparer les modèles d'extrapolation verticale des vitesses moyennes et des paramètres de Weibull, il faut classer les données en fonction des conditions de stabilité rencontrées pendant les mesures. [1]

On appelle « loi de cisaillement du vent » une équation permettant de calculer à partir d'une donnée de vitesse de vent connue, la vitesse du vent à une altitude différente, dans la plupart des cas plus élevée. En effet, dans la majorité des cas, les capteurs de vitesses des tours de mesures ne sont pas situés à la même hauteur que les nacelles d'éoliennes. Même si pour remédier à ce problème, les tours de mesure sont construites de plus en plus hautes, les éoliennes elles aussi ont tendance à être de plus en plus hautes afin de capter le plus de vent possible. Le problème est donc seulement déplacé. Il existe plusieurs lois de cisaillement possédant chacune des paramètres caractéristiques reliés au site étudié.[2]

I-1- Loi Logarithmique

Cette loi est définie par :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_1}{Z_0}\right)} \quad 3.1$$

Avec :

- Z_2 , l'altitude en m à laquelle on désire calculer la vitesse du vent.
- V_2 , la vitesse à calculer en m/s.
- Z_1 , l'altitude de référence en m.
- V_1 , la vitesse connue à l'altitude de référence en m/s.
- Z_0 , la rugosité en m.

Cette loi est utilisée dans certaines études [3] et a pour principal avantage la prise en compte d'un paramètre physique Z_0 , définissant la rugosité du terrain. Dans ce cas, il est nécessaire d'évaluer la rugosité du terrain qui dépend du relief et des constructions entourant le site.

Le tableau suivant présente l'évaluation de ce paramètre suivant les conditions extérieures.

Classe de rugosité	$Z_0 (m)$	Description
0	0,0002	Surface d'un plan d'eau
0.5	0,0024	Terrain vague avec surface lisse (piste de décollage, gazon entretenu,...)
1	0,03	Zone agricole sans barrière ni haie, parsemée d'habitations éparées sur un relief de collines douces.
1.5	0,055	Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 1250 m.
2	0,1	Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 500 m.
2.5	0,2	Zone agricole avec de nombreux bâtiments, ou des haies de 8 mètres espacées de 250 m.
3	0,4	Villages, petites villes, zones agricoles avec de nombreuses haies, forêts et terrains très accidentés.
3.5	0,8	Grandes villes avec bâtiments hauts
4	1,6	Très grandes villes avec de grands immeubles et gratte-ciel.

Tab.IV-1 : tableau des classes et longueurs de rugosité Z_0 [4].

I-2- Loi de puissance :

Cette loi est celle qui est le plus couramment utilisée dans le monde de l'éolien:

$$V_2 = V_1 \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^\alpha \quad 3.2$$

Où :

- Z_1 , hauteur de l'observation initiale de la vitesse du vent, en m.
- V_1 , vitesse observée à l'altitude Z_1 , en m/s.
- Z_2 , hauteur à laquelle on veut estimer la vitesse du vent, en m.
- V_2 , vitesse du vent que l'on estime à la hauteur Z_2 , en m/s.
- α est un facteur de puissance dont la valeur varie généralement entre 0,1 et 0,25 suivant les sites ([5] et [6]).

La loi étudiée ici ne dépend que d'un seul paramètre: l'exposant α , dont la valeur dépend de plusieurs facteurs comme la rugosité, la topographie et la stabilité de l'atmosphère.

Pour chaque site, il est donc nécessaire de déterminer le facteur α et on peut même supposer que l'étude de α , en relation avec les caractéristiques dont il dépend, pourrait permettre de trouver une relation du style:

$$\alpha = f(\text{rugosité, topographie, stabilité de l'atmosphère})$$

La détermination de cette fonction passe évidemment par l'étude des données existantes sur les tours de mesure possédant des anémomètres à des altitudes différentes. Cette étude permettra non seulement de mieux connaître le paramètre α et ses variations mais, aussi, d'étudier d'autres types de lois de puissance moins souvent utilisées.

Cependant, les variations de la vitesse du vent suivant l'altitude, c'est-à-dire le cisaillement du vent, pourraient être caractérisées de manière plus précise par des lois de Weibull avec des facteurs de forme et d'échelle différents suivant l'altitude.

Les premiers travaux portant sur la détermination des formules d'extrapolation de la vitesse du vent d'un niveau Z_1 à Z_2 ont été effectués par Justus C.G. et A.S. Mikhail qui étudient la variation de la vitesse du vent ainsi que les paramètres de Weibull à partir de 1976. Nous allons citer dans les paragraphes suivants, quatre des différentes formules proposées par la littérature.

I-2-1- Loi de puissance – Justus C.G et all 1976-

Etudiée par Justus C.G. et all, [7] sous la forme suivante :

$$V_2 = V_1 \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^\alpha \quad 3.2$$

Justus C.G. et all, 1976, [7] ont proposé une expression pour l'exposant de la loi de puissance permettant l'extrapolation de la vitesse instantanée du vent et donnée par :

$$\alpha = a + b \log V_1 \quad 3.3$$

Et pour une rugosité du sol comprise dans la gamme suivante :

$$0,05m \leq Z_0 \leq 0,5m$$

Ils obtiennent alors :

$$a = \frac{0,37}{\left(1 - 0,0881 \cdot \ln \left(\frac{Z_1}{10} \right) \right)} \quad \text{et} \quad b = \frac{-0,0881}{\left(1 - 0,0881 \cdot \ln \left(\frac{Z_1}{10} \right) \right)}$$

I-2-2- Loi de puissance modifiée - Justuc & Mikhail 1981-

Ce modèle a pour but d'allier théorie et expérimentation par l'introduction du paramètre de rugosité dans la loi de puissance. En effet, afin de combiner la précision du modèle théorique et la simplicité du modèle empirique précédent, le modèle de la puissance modifiée a été proposé par Mikhail et Justus C.G. et all en 1981, [8]. Pour une altitude égale à 10m, et pour des conditions neutres de stabilité, l'exposant de la loi de puissance α se met sous la forme :

$$\alpha = \frac{1}{\ln \frac{\bar{Z}}{Z_0}} - \left(\frac{0,0881}{1 - 0,0881 \cdot \ln \frac{Z_1}{10}} \right) \cdot \ln \left(\frac{V_1}{V_n} \right) \quad 3.4$$

Avec $V_n = 6m/s$ pour des conditions neutres de stabilité.

Et \bar{Z} la moyenne géométrique de la hauteur.

$$\bar{Z} = \exp[\ln(Z_1) + \ln(Z_2)]/2 \quad 3.5$$

I-2-3- Loi de puissance – Mikhail 1985-

En 1985, Mikhail ajuste expérimentalement le modèle précédent et propose l'expression suivante, [9]:

$$\alpha = \frac{1}{\ln \left(\frac{\bar{Z}}{Z_0} \right)} + \frac{0,0881 - 0,881 \cdot \ln V_1}{1 - 0,0881 \cdot \ln \left(\frac{Z_1}{10} \right)} \quad 3.6$$

I-2-4- Loi de puissance à coefficient variable – H. Nfaoui et al –

A travers leurs travaux sur le potentiel éolien au Maroc, H. Nfaoui et al [10] optent pour l'utilisation d'une formule empirique dont l'exposant est à coefficient variable, fonction de la rugosité. Cette expression a été proposée lors de l'établissement de l'atlas marocain des vents, [11], soit :

$$\alpha = \frac{x - 0,0881 \cdot \ln(V_1)}{1 - 0,0881 \cdot \ln \left(\frac{Z_1}{10} \right)} \quad 3.7$$

En prenant :

$$x = 0,25 \text{ si } 0 < Z_0 \leq 0,005m$$

$$x = 0,31 \text{ si } 0,005 < Z_0 \leq 0,05m$$

$$x = 0,37 \text{ si } 0,05 < Z_0 \leq 0,5m$$

$$x = 0,48 \text{ si } 0,5 < Z_0 \leq 0,4m$$

En remarque que le coefficient varie en fonction de la classe de rugosité.

II- Extrapolation verticale de la vitesse du vent :

En considérant la zone agricole avec plusieurs haies vives comme zone d'étude, elle comprend une longueur de rugosité de $Z_0 = 0,2m$, avec une vitesse de vent à 10 mètres de hauteur $V_1 = 2,8m/s$. Nous avons calculé la vitesse du vent à différentes hauteurs avec la loi logarithmique et les 4 lois citées dans la méthode d'extrapolation dite de puissance.

Les résultats obtenus figurent sur le graphe suivant

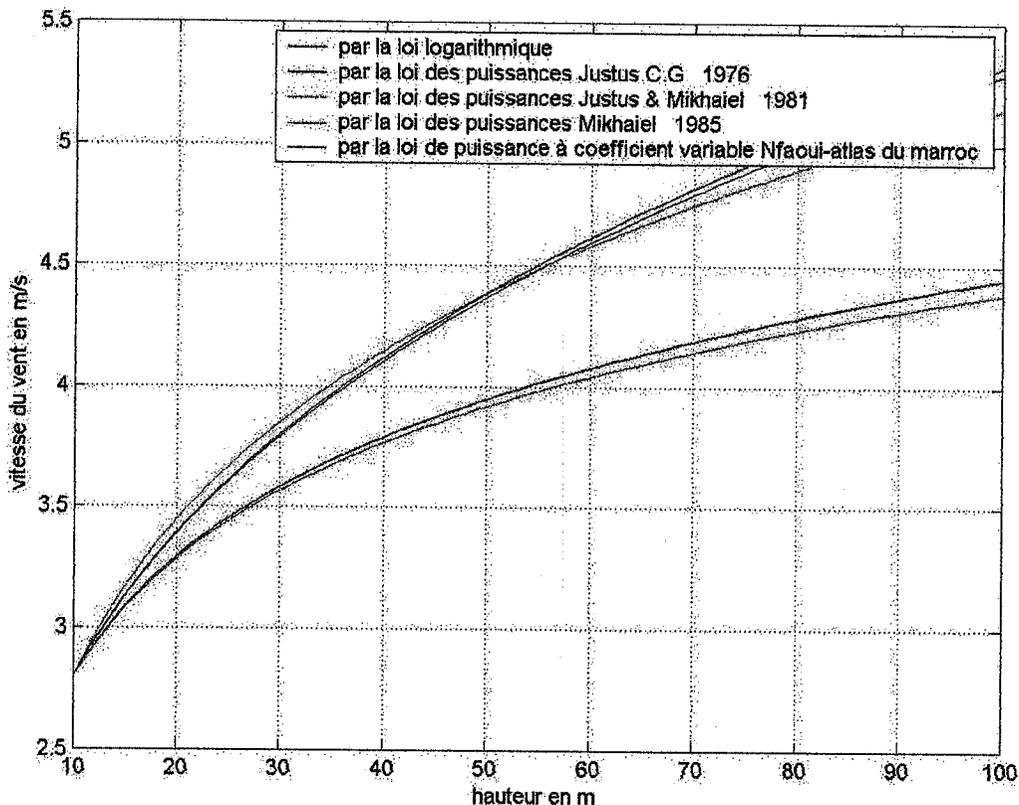


Fig.IV-1 : Vitesses du vent en fonction de la hauteur par plusieurs méthodes.

Nous remarquons que pour chaque méthode, la vitesse du vent croît, et pourrait bien se stabiliser pour des hauteurs dépassant les 100m.

Bien que l'allure de la courbe soit identique pour chaque une des méthodes, il est à noter que la loi logarithmique et la loi de puissance dictée par Mikhaeil sont assez proche avec des écarts entre les vitesses moyennes à différentes hauteurs presque nul, comme il est indiqué sur le tableau suivant

Hauteur (m) \ Vitesse (m/s)	Hauteur (m)					
	20	30	40	50	60	100
Logarithmique	3.296	3.586	3.792	3.951	4.082	4.448
Mikhaeil	3.289	3.571	3.769	3.922	4.045	4.385
ΔV	0.007	0.014	0.022	0.029	0.036	0.062

Tab.IV-2 : écart de vitesse moyenne entre la loi logarithmique et la loi de puissance dictée par Mikhaeil

D'un autre coté, nous remarquons aussi une proximité entre la loi de puissance à coefficient variable, la loi de puissance dictée par Justus et la loi de puissance modifiée, avec des écarts de vitesse moyenne tout aussi infime que celui entre la loi logarithmique et celle de puissance dicté par Mikhaeil, comme il est clairement montré sur le tableau IV-4.

Hauteur (m) \ Vitesse (m/s)	Hauteur (m)					
	20	30	40	50	60	100
Justus	3.398	3.805	4.123	4.389	4.618	5.326
Justus et Mikhaeil	3.451	3.856	4.152	4.388	4.584	5.149
ΔV	0.053	0.050	0.028	0.001	0.034	0.176

Tab.IV-3 : écart de vitesse moyenne entre la loi de puissance modifiée et la loi de puissance dictée par Justus.

Ainsi, pour une hauteur de 50m du sol, qui nous semble raisonnable pour une éolienne à moyenne puissance, nous remarquons que même si le model de Mikhaeil et de la loi logarithmique sous-estiment la vitesse du vent récupérable à cette hauteur et du coup le potentiel énergétique éolien par rapport à celui de trois autres models, la vitesse du vent à cette hauteur varie de 3,95m/s à 4,38m/s pour les différentes méthodes et modèles utilisés dans notre travail, soit une différence de 0,46m/s, qui n'est pas assez importante pour parler de grand écart dans le calcul de puissances générées, entre les méthodes.

III- Hauteur du mat et qualité de mesure

La vitesse du vent utilisée pour nos calculs a été mesurée par l'ONM de Béni-Saf sur un mât théoriquement de dix mètres de hauteur, alors qu'en réalité, l'anémomètre est placé à une hauteur bien inférieure à celle citée.

Ajouté à cela, le site choisi pour les différentes mesures météorologique est situé sur le haut d'une falaise en amont de plusieurs habitations, ce qui nous mène à conclure que la rugosité du site est bien supérieure des 0,02m.

Par conséquent, nous pouvons faire nos calculs avec des vitesses de vent supérieur à 2,8m/s et mesurer à 10m du sol.

VI-Problème de rugosité

Il est clair que l'effet de la rugosité dans l'établissement des formules empiriques joue un rôle important dans l'extrapolation des paramètres vents.

Son introduction dans les formules d'extrapolation de la vitesse du vent nécessite l'installation de pylônes sur des terrains présentant des natures différentes et permettant la mesure des paramètres vents proches du sol et sur plusieurs niveaux.

Pour tester la validité du model de Justus et Mikhaeil (loi de puissance modifiée), nous avons tracé le profil du vent en faisant varier la rugosité, d'une valeur quasi nulle à 0.5m (figure IV-2). Les résultats montrent que cette restriction fait que ce modèle ne soit pas valable pour les sites sahariens ou dans notre cas pour les sites en mer (offshore) dont la rugosité est très faible.

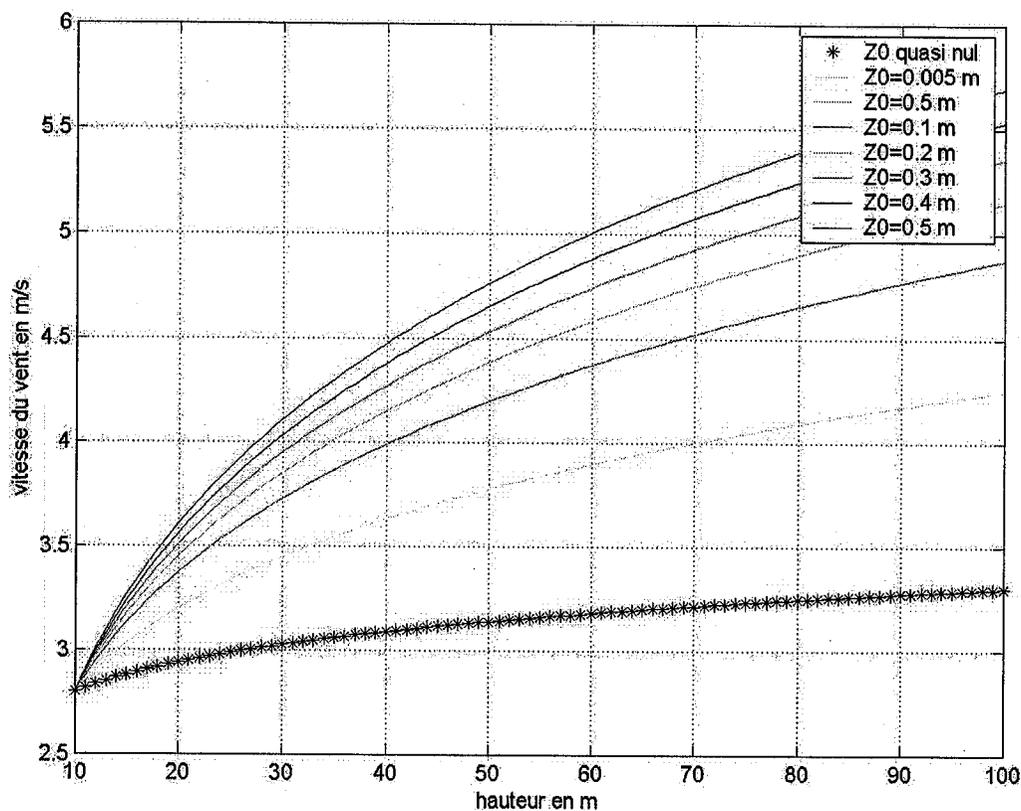


Fig.IV-2 : Effet de la rugosité sur le model d'extrapolation vertical de la vitesse du vent (Loi de puissance modifié)

Par contre, en faisant varier le paramètre x qui est en fonction de la rugosité sur le model de H. Nfaoui (Figure IV-3), bien qu'ils soient un peu loin des vitesses réelles sur des sites à faible rugosité, nous remarquons que les résultats sont meilleurs que ceux du modèle de Justus et Mikhaeil.

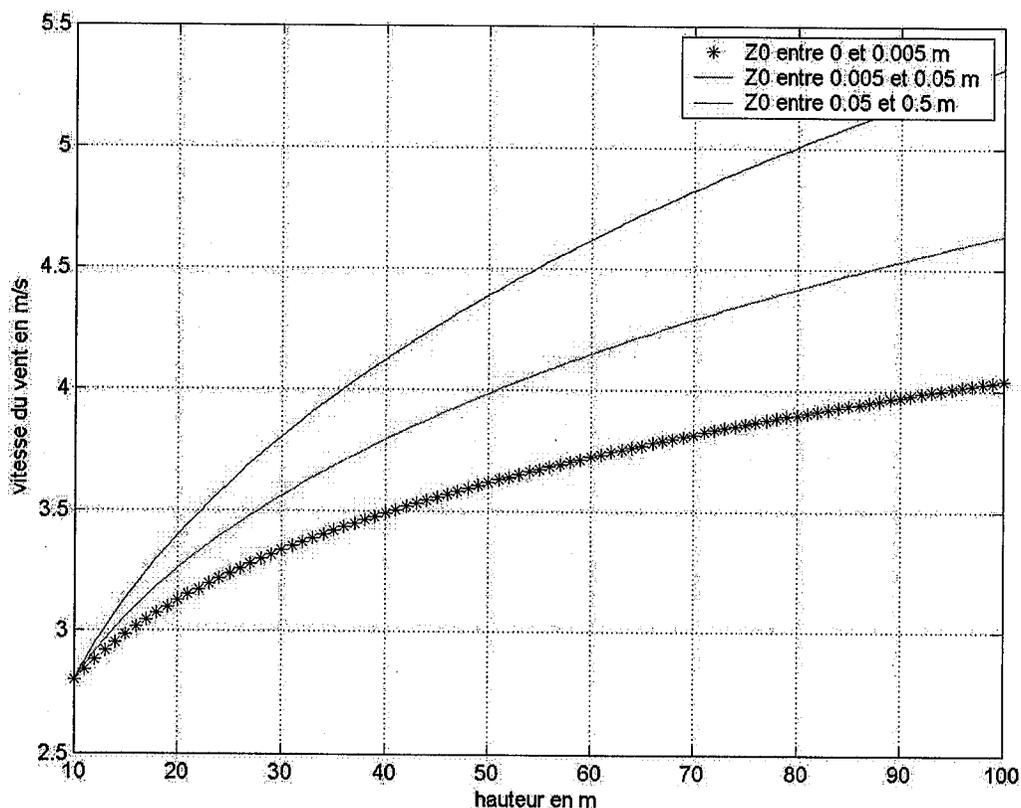


Fig.IV-3 : Effet de la rugosité sur le model d'extrapolation verticale de la vitesse du vent (Loi de puissance à coefficient variable – Model H. Nfaoui)

En tenant Compte de ces résultats, en considérant notre climat assez proche de celui du Maroc et en supposant que les deux pays voisins Maghrébins aient la même nature orographique, nous avons choisis de travailler avec la loi de puissance à coefficient variable utilisée par H. Nfaoui pour la mise en œuvre de l'atlas marocain des vents. Dans ce cas bien précis, le tracé en noir sur la figure IV-1 nous donne une vitesse moyenne de 4,38m/s pour une hauteur de 50m du sol. Cette valeur sera prise pour le calcul des puissances dans ce qui suit.

Le tableau IV-5 donne les vitesses du vent calculées par le model de H. Nfaoui à différentes hauteurs avec une rugosité de $Z_0 = 0,2m$.

Hauteur (m)	10	20	30	40	50	60
Vitesse (m/s)	2.800	3.398	3.805	4.123	4.389	4.618

Tableau.IV-4 : vitesses de vents calculées à différentes hauteurs

Afin de valider les résultats obtenus par l'extrapolation verticale de la vitesse du vent de notre travail, nous avons comparés la vitesse du vent évaluée dans notre travail à 50m du sol avec celle calculée par Dr. KASBADJI MARZOUK et présentée sur la figure IV-4.

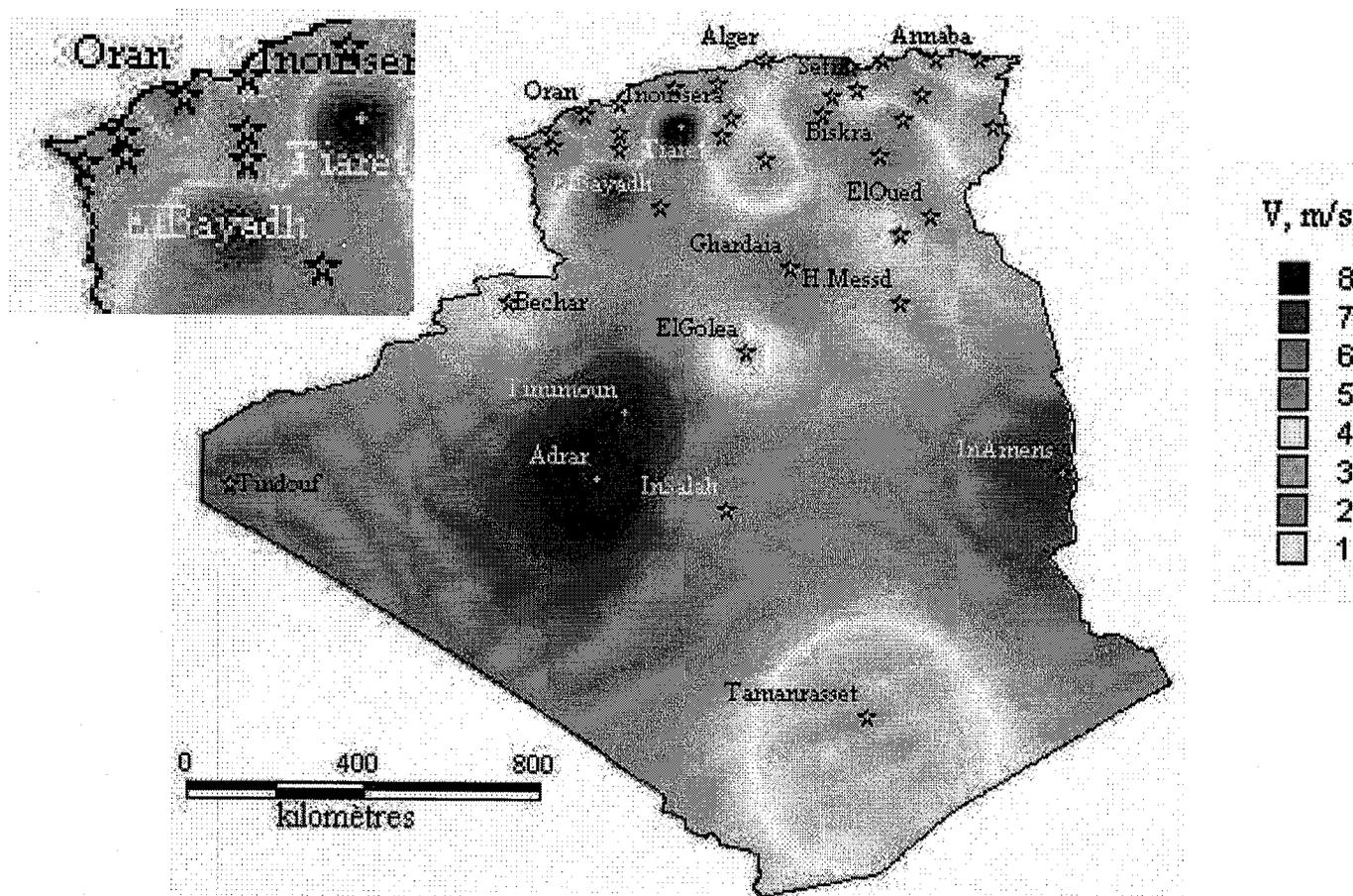


Fig.IV-4 : Atlas de la vitesse du vent à 50 m d'altitude.[1]

Nous remarquons une certaine cohérence entre notre résultat et celui évalué par l'étude du Dr. KASBADJI avec une vitesse comprise entre 3 et 4m/s sur la région ouest voisine à Béni-Saf, ce qui n'est pas très loin de la vitesse calculée par notre extrapolation verticale estimée à 4,38m/s à 50m du sol.

V- Extrapolations verticales de la vitesse du vent

En travaillant avec le model de H. Nfaoui, on n'aura pas de problème en variant la hauteur de la rugosité Z_0 puisqu'on travail théoriquement sur des sites avec une rugosité qui varie entre $0,05 < Z_0 \leq 0,5m$ et pour cela, le coefficient x est constant et égal à 0,37.

Nous allons extrapoler verticalement la vitesse du vent pour 3 vitesses mesurées à 10m du sol (2,8m/s 3,8m/s et 4,8m/s). Les résultats obtenus sont présents sur la figure suivante.

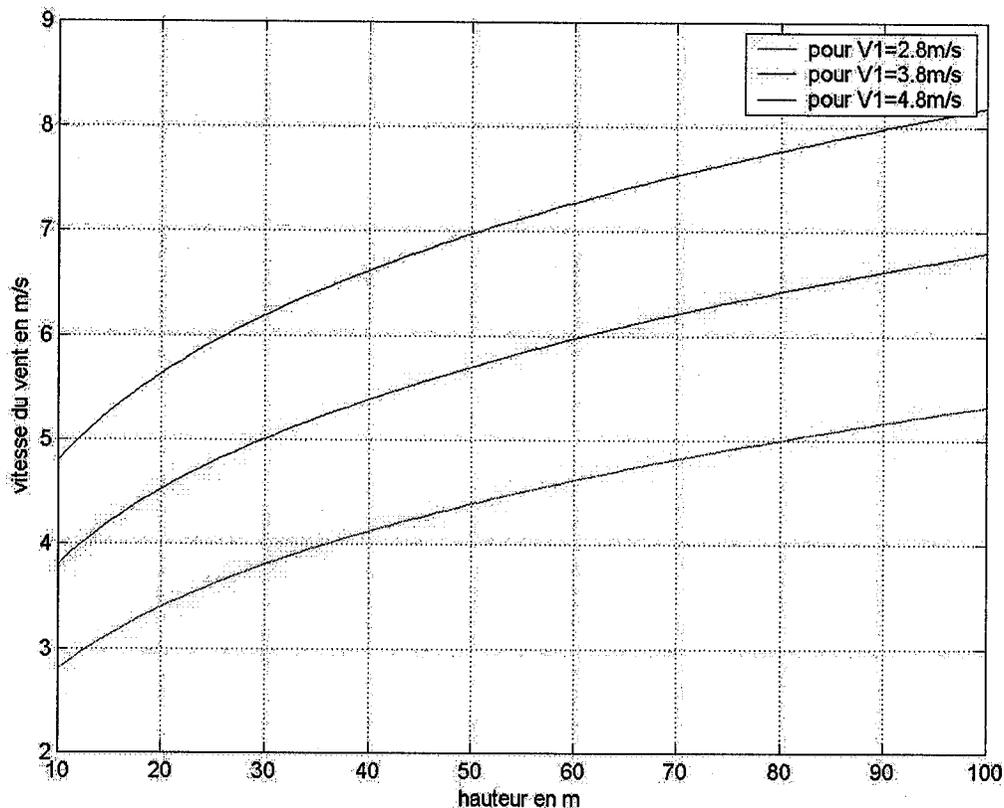


Fig.IV-5 : Extrapolation verticale de la vitesse du vent pour différentes valeurs de V_1

La vitesse du vent croît et tend à se stabiliser pour des hauteurs assez importantes. Ainsi, nous remarquons que les vitesses du vent sont beaucoup plus optimistes en hauteur quand la vitesse du vent est assez importante à 10m du sol.

Sachant que pour une éolienne de moyenne puissance, la vitesse du vent minimale nécessaire à son démarrage est de 3,5m/s [13] contenu des dernières mises au point technologiques, dans la forme aérodynamique des pales ainsi que des matériaux utilisés dans leur fabrication, nous constatons que les valeurs évaluées à 50m/s du sol sont assez optimistes, vu qu'elles frôlent les 7m/s pour une vitesse $V_1 = 4,8m/s$ à 10m de hauteur.

Hauteur (m)	10	20	30	40	50	60
Vitesse (m/s)	3.800	4.526	5.014	5.391	5.704	5.972

Tableau.VI-5 : vitesses des vents calculées à différentes hauteurs pour $V_1 = 3,8m/s$

Hauteur (m)	10	20	30	40	50	60
Vitesse (m/s)	4.800	5.636	6.192	6.619	6.970	7.271

Tableau.IV-6 : vitesses des vents calculées à différentes hauteurs pour $V_1 = 4,8m/s$

VI- Estimation de la puissance générée :

La puissance théorique de l'énergie éolienne est définie comme suit : [1]

$$P_{th} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad 3.8$$

Avec :

- P_{th} : Puissance théorique lorsque le vent est totalement freiné en *Watt* .
- ρ : Densité moyenne de l'air au niveau de la mer égale à $1,25$ en $Kg.m^{-3}$
- S : Surface de l'éolienne perpendiculaire au vent en m^2
- V_v : la vitesse du vent en $m.s^{-1}$

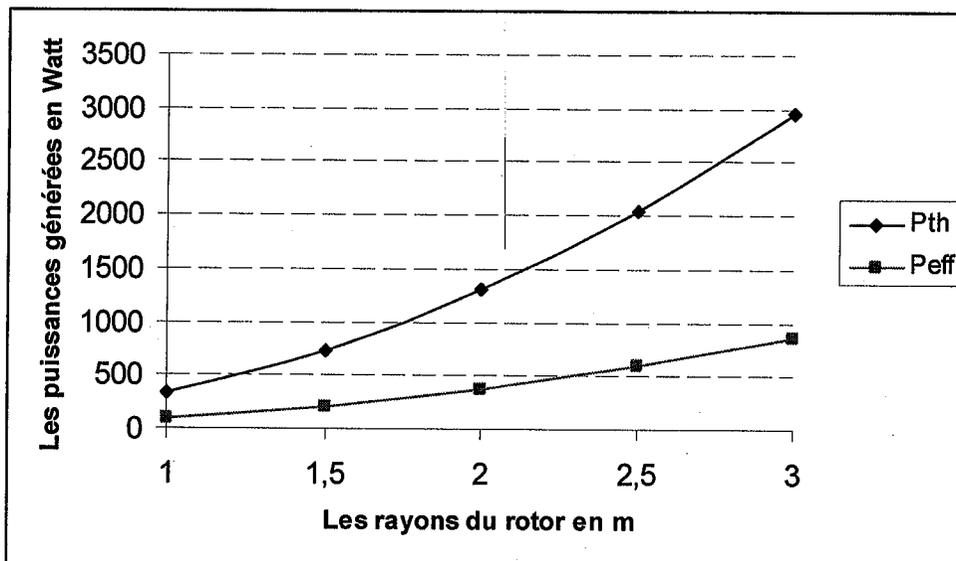


Fig.IV-6 : les puissances théoriques et effectives générées en fonction du rayon du rotor (de 1 à 3m).

La puissance effective fournie par une éolienne en considérant toutes les pertes et seulement avec un rendement de 29 % est :

$$P_{eff} = 0,29 \cdot P_{th} \text{ (Watt)} \quad 3.9$$

En considérant un rayon minimal du rotor d'une valeur de 1 m, et la vitesse du vent à l'entrée de la voilure égale à 4,4m/s à 50 m du sol (vitesse déduite de l'extrapolation verticale de la vitesse du vent pour $V_1 = 2,8m/s$) nous avons pu calculer les puissances théoriques et effectives fournis par les aérogénérateurs (Figure IV-5 et Figure IV-6).

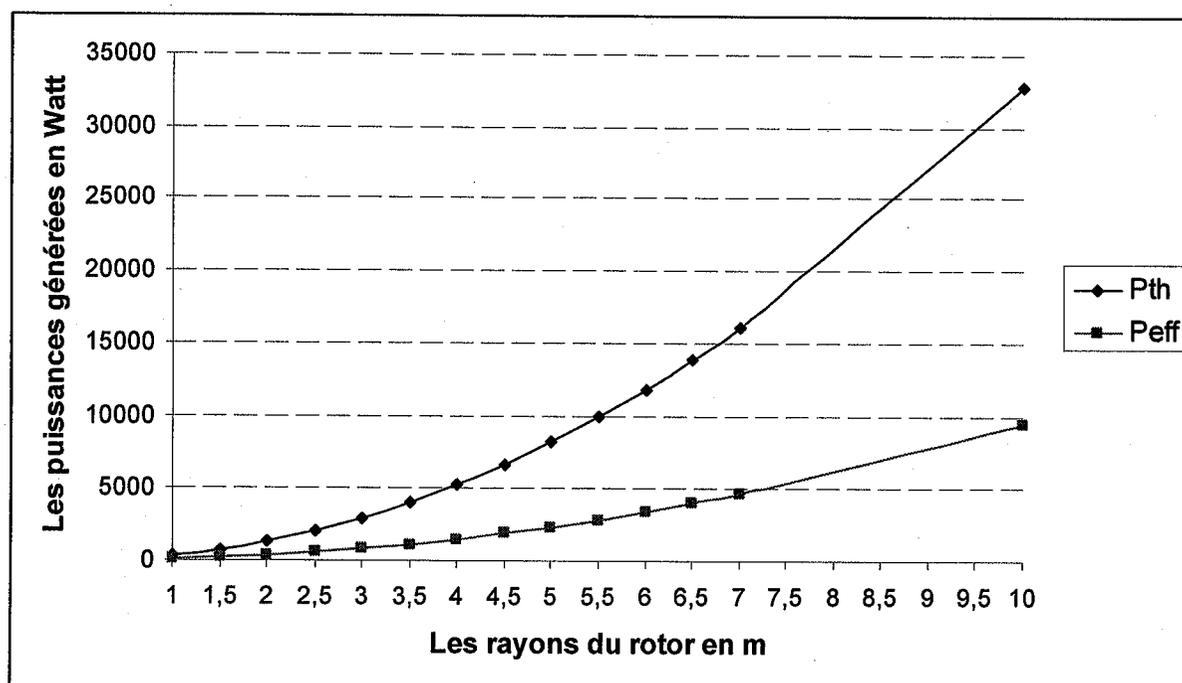


Fig.IV-7 : les puissances théoriques et effectives générées en fonction du rayon du rotor (de 1 à 10m).

De la figure IV-6, nous remarquons qu'en passant d'un rayon de 1m à celui de 3m, la puissance effective générée a été multipliée par 9, passant de 95Watt à presque 1KWatt, d'où l'importance des valeurs des rayons des rotors lors des conceptions des éoliennes.

De la Figure IV-7, nous remarquons que la puissance effective peut aller jusqu'à une valeur de 9,5KWatt avec un rayon de 10m. Sans pour cela négliger l'impacte acoustique dû au bruit aérodynamique des pales.

Le tableau IV-7 ci-dessous représenté nous donne les caractéristiques d'éoliennes de certains constructeurs. Celui-ci nous permet de déduire que les machines d'une hauteur de 50m ont un diamètre de voilure compris entre 45 et 60m (exemple de model N60 du constructeur Nordex).

Constructeur	Modèle	Puissance (kW)	Diamètre (m)	Hauteur tour (m)
Mitsubishi	MWT-1000-61	1000	61.4	45 – 69
Mitsubishi	MWT-1000-57	1000	57	45 – 69
<u>Nordex</u>	<u>N60</u>	<u>1300</u>	<u>60</u>	<u>46 – 69</u>
Vensys	62	1200	62	69
Neg Micon	NM64/1500	1500	64	68
Bonus	B54/1000	1000	54.1	50 – 60
Bonus	B62/1300	1300	62	60
Enron	900s	1000	54	60
Goldwind	S48/750	750	48	50 – 60
Leitwind	LTW62	1200	62	60
Made	AE-52	800	52	50 – 60
Made	AE-59	800	59	50 – 60
Made	AE-56	800	56	50 – 60
Made	AE-61	1320	61	60
Mitsubishi	MWT-600-47	600	47	45 – 60
Mitsubishi	MWT-600-45	600	45	45 – 60
Neg Micon	NM52/900	900	52	60
Nordex	N54	1000	54	60
Turbowinds	T600-48	600	48	50 – 60

Tab.IV-7 : liste de quelques éoliennes de moyenne puissance des principaux constructeurs au monde [13]

Pour cela, nous avons calculé la puissance théorique et effective générées par des éolienne perchées à 50m du sol, avec des diamètres du rotor de 54m et pour les différentes vitesses estimées avec le model de H. Nfaoui.

$$V_2(50m) = 4,40m/s \Rightarrow V_1 = 2,8m/s$$

$$V_2(50m) = 5,70m/s \Rightarrow V_1 = 3,8m/s$$

$$V_2(50m) = 6,97m/s \Rightarrow V_1 = 4,8m/s$$

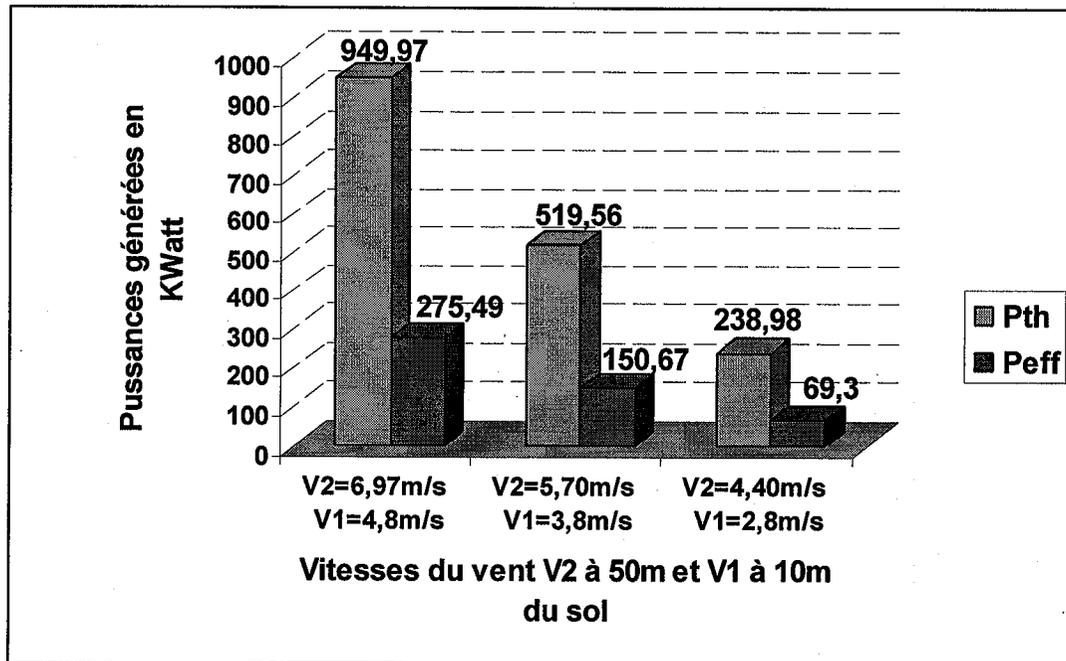


Fig.IV-8 : Puissances générées en fonction des vitesses à l'entrée de la voile

Nous remarquons que les puissances générées par les éoliennes croient avec les vitesses du vent à l'entrée de leur voile. Cependant, pour une différence de seulement 1m/s dans la vitesse du vent à 10m du sol, nous récupérons le double de la puissance générées à 50m d'altitude et un diamètre de 54m , ainsi :

$$V_1 = 2,8m/s \text{ à } 10m \text{ du sol} \Rightarrow P_{eff} = 69KWatt \text{ avec } V_2 = 4,4m/s \text{ à } 50m$$

$$V_1 = 3,8m/s \text{ à } 10m \text{ du sol} \Rightarrow P_{eff} = 150KWatt \text{ avec } V_2 = 5,7m/s \text{ à } 50m$$

$$V_1 = 4,8m/s \text{ à } 10m \text{ du sol} \Rightarrow P_{eff} = 275KWatt \text{ avec } V_2 = 6,9m/s \text{ à } 50m$$

Conclusion

Comme nous l'avons vu, la région de Béni-Saf est balayée en grande partie de l'année par des vents forts.

Le site choisi est favorable à l'exploitation de l'énergie éolienne. La vitesse annuelle moyenne du vent est de l'ordre de 4,4m/s et peut aller jusqu'à 7m/s. Cette vitesse est évaluée à une hauteur de 50m du sol avec le model empirique de H.Nfaoui qui a été utilisé pour établir l'atlas des vents du Maroc, pays voisin de notre région d'étude.

Ainsi, nous avons évalué une vitesse de vent supérieure à la vitesse de démarrage d'une éolienne actuelle qui est inférieure à 4m/s.

De ce fait, nous avons estimé la puissance générée par une éolienne de moyenne puissance présente sur le marché ayant un diamètre de la voile de 54m et d'une hauteur de 50m.

Selon les données susmentionnées, notre aérogénérateur génère une puissance effective dépassant les 275KW.

Bibliographie

- [1] N. KASBADJI MERZOUK, « Evaluation du gisement énergétique éolien. Contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie », Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables URMER Tlemcen. 2006.
- [2] Jean-Louis RETIVEAU, « Analyse de données expérimentales et conception d'un aérogénérateur numérique de vitesse de vent », Mémoire de recherche, Université du Québec à Rimouski, Janvier 2006.
- [3] S. MATHEW, K.P. PANDY et A. KUMA, « Analysis of wind regimes for energy estimation », Renewable Energy, Mars 2002.
- [4] www.espace-eolien.fr/lille/pu_wind/puwch1.htm
- [5] Chang Tsang-Jung, Wu Yu-Ting, Hsu Hua-Yi, Chu Chia-Ren et Liao Chun-min, « Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan ». Renewable Energy, Mai 2003
- [6] Rehman Shafiqur et Al-Abbadi Naif, "Wind shear coefficients and their effect on energy production". Energy conversion and management. Septembre 2005
- [7] Justus C.G. et A. Mikhail, « Height Variation of Wind speed and Wind Distributions Statistics ». Geophysical Research Letters, vol. 3, N° 5, 1976.
- [8] Mikhail A.S. et C.G. Justus, « Comparison of Height Extrapolation Models and Sensitivity Analysis » Wind Engineering, Vol. 5, N° 02, 1981.
- [9] Mikhail A.S, « Height Extrapolation of Wind Data » Transaction of ASME, vol. 107, pp. 10- 14, 1985.
- [10] Nfaoui H., J. Bahraoui Buret et A.A.M. Sayigh, « Wind Characteristics and Wind Energy Potential in Marocco », Solar Energy, N°1, pp 51-60, 1998.
- [11] Knidiri F, A. Laaouina, M. Fabre et A. Wyatt, « L'énergies éolienne au Maroc » rapport interne au CDER, 1986.
- [12] TABET HELAL M. A. et GHELLAI N., Le Gisement Eolien à Béni-Saf Région Côtière de l'Ouest Algérien, 2003.
- [13] www.thewindpower.net/214-eoliennes-gammes.php?tri=4

Conclusion générale et perspectives

Le tracé de différentes cartes de vitesses annuelles moyennes à 10m du sol, constitue un apport considérable à l'évaluation des ressources énergétiques éoliennes de l'Algérie, ce qui a permis de fournir des informations sur la répartition géographique du vent.

Ceci est une première approche pour l'identification des régions dites ventées dotées d'un important potentiel éolien, pouvant, selon les besoins, constituer des régions candidates à l'exploitation de cette énergie.

D'où l'intérêt porté à la région côtière de Béni-Saf dans notre étude. Cette zone ouverte sur la mer méditerranée et constamment balayé par des vents locaux durant toute l'année pourra faire l'objet d'un champ éolien.

Dans ce travail, nous avons abordé l'optimisation du gisement éolien de la région côtière de Béni-Saf, et cela par l'évaluation de la vitesse du vent à des hauteurs supérieures à celles mesurées pour un meilleur rendement au niveau de la puissance générée par d'éventuels aérogénérateurs implantés dans la région.

Dans le contexte de l'énergie éolienne, une définition globale du phénomène du vent est présentée dans le premier chapitre. Son origine, ses caractéristiques, sa mesure ainsi que la définition des couches et des forces qui régissent le mouvement des masses d'air ont été passés en revue.

Notre étude bibliographique a été dirigée dans le deuxième chapitre sur les avancées technologiques qu'ont connues les aérogénérateurs. Nous avons donné un aperçu sur les deux types d'éoliennes et nous avons fait une étude plus détaillée sur l'architecture et les différents éléments composant une machine à axe horizontal.

Après avoir défini les deux éléments nécessaires pour la production d'une énergie éolienne, à savoir le vent et l'aérogénérateur, il nous a été indispensable d'argumenter dans le troisième chapitre le choix porté sur le site de Béni-Saf. Nous avons donc délimité la zone qui remplit un maximum de conditions favorables pour l'implantation d'une ferme éolienne.

Sachant que la vitesse du vent augmente en fonction de la hauteur, notre travail s'est focalisé sur l'extrapolation verticale de la vitesse du vent, en présentant différentes méthodes et modèles empiriques présents dans la littérature, regroupés dans le quatrième chapitre. Ainsi, une évaluation de la vitesse moyenne du vent à différentes hauteurs a été évaluée et présentée en fonction de différents paramètres.

Pour donner un sens technologique à notre simulation, nous avons estimé la puissance générée par une éolienne de moyenne puissance. Nos résultats concordent avec ceux de la littérature.

Néanmoins les résultats de ce modeste travail constituent les bases d'un travail à poursuivre et à améliorer pour une étude beaucoup plus approfondie qui pourra faire l'objet d'une thèse de doctorat.

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 zone côtière.

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

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

Ces informations statistiques doivent être synthétisées par la rose des vents du site, illustré par les paramètres de Weibull avec une bonne précision spatiale et temporelle afin d'établir les potentialités énergétiques de la région avec la variabilité temporelle des vents en fonction de différents paramètres (heure, mois, saisons, etc.).

Diversifier la ressource et développer l'énergie éolienne revient à répondre aux besoins des générations actuelles sans pour cela compromettre ceux des générations futures.

Nous espérons avoir posé la première pierre dans le domaine de l'énergie éolienne à l'URMER ce qui donnera une impulsion à la recherche locale dans cet axe, en vue d'une prise de conscience de « l'après pétrole », du respect de l'environnement et du développement durable.

Alors faisons rentrer un nouveau concept dans nos recherches : « agir local, penser global » pour préserver la nature. Nous avons tous une responsabilité environnementale.

Annexe A

L'Office National de la Météorologie (ONM)

L'Office National de la Météorologie est un établissement public à caractère industriel et commercial sous la tutelle du ministère des transports et son siège est situé à Alger.

L'Office a pour mission la mise en œuvre de la politique nationale dans le domaine de la météorologie et ce, en liaison avec les institutions concernées. Il doit également contribuer à la sécurité et au développement des secteurs socio-économiques.

Il est chargé entre autre d'assurer l'acquisition, le traitement, l'exploitation et la diffusion des données météorologiques nationales et internationales.

L'Office est administré par un conseil d'administration et dirigé par un Directeur Général. L'organisation administrative de l'O.N.M se compose d'une direction générale, de départements fonctionnels et opérationnels et de régions météorologiques.

Annexe B

Communication par poster au CNPA'08 à Bejaia

ESTIMATION DE LA PUISSANCE D'UNE EOLIENNE DANS LA REGION COTIERE DE BENI-SAF – ALGERIE DE L'OUEST

Sidi Mohammed BOUDIA¹, A.BENMANSOUR², M.A.TABET HELAL³ et N.E.CHABANE-SARI⁴

¹ Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables URMER Tlemcen, simmed1@yahoo.fr

² Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables URMER Tlemcen, halim_benmansour@yahoo.fr

³ Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables URMER Tlemcen, am_tabet@yahoo.fr

⁴ Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables URMER Tlemcen

Résumé :

L'utilisation de l'énergie cinétique du vent est en plein essor dans le monde, en particulier dans les pays européens, et actuellement elle commence à être connue dans notre pays.

Les aérogénérateurs peuvent être installés pour générer de l'électricité, que ça soit pour un raccordement au réseau ou bien sur des sites isolés.

Afin d'optimiser le rendement énergétique de source éolienne, il est nécessaire de connaître les besoins énergétiques de la population, d'étudier l'intensité, la vitesse, la fréquence et la direction des vents. Pour cela, le gisement éolien de la région agricole sur les hauteurs de la ville côtière de Béni-Saf sera déterminé. Ainsi, nous argumenterons l'utilité d'implanter des éoliennes dans cette zone stratégique ouverte vers la mer méditerranéenne par les résultats de nos travaux en utilisant plusieurs méthodes pour l'extrapolation verticale de la vitesse du vent à différentes hauteurs en se basant sur les données fournies par l'Office National Météorologique ainsi que la rugosité du sol dans la région de Béni-Saf et cela afin d'aboutir à une présentation de l'estimation de la puissance générée par un aérogénérateur pour différentes valeurs du rayon du rotor.

Mots clés : Gisement éolien, aérogénérateur, rendement.

Introduction :

Nous allons donner une estimation de la puissance effective d'une éolienne plantée sur la région côtière de Béni-Saf. Pour cela, nous décrirons le climat, les paramètres météorologiques ainsi que la situation géographique de cette région côtière pour argumenter notre choix. Puis, nous ferons une extrapolation verticale de la vitesse du vent à des différentes hauteurs de celle de la mesure selon plusieurs méthodes. A la fin, une estimation sera présentée de la puissance produite par un aérogénérateur à différentes valeurs du rayon du rotor.

1. Le gisement éolien en Algérie

L'étude des vents en Algérie a prit un essor non négligeable après la publication de l'Atlas éolien par le Dr. N. KASBADJI MARZOUK en 2006. L'évaluation globale du gisement éolien dans notre pays se fait en premier lieu à partir des données fournies par l'office national météorologie avec des vents mesurés à dix mètres du sol. Par la suite des études approfondies sont nécessaires lors d'une localisation d'une zone ou d'une région jugée intéressante comme source d'énergie.

2. Les Capteurs éoliens :

Il est à noter qu'il existe un grand nombre de dispositifs permettant de capter l'énergie éolienne pour la transformer en énergie mécanique de rotation, seulement il est important de se poser certaines questions essentielles telles que son coût, sa taille, sa résistance à l'usure mais aussi la puissance qu'il pourra fournir [1]. Autant de questions qui font qu'un grand nombre de capteurs éoliens ont été mis de côté et que seul un petit nombre d'entre eux ont été largement exploités.

Cependant plus généralement, on classe les capteurs éoliens par l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent.

Nous distinguons de cette manière deux grandes familles :

- les capteurs à axe horizontal.
- les capteurs à axe vertical.

La majorité des éoliennes présentes dans le marché appartiennent à la deuxième catégorie. Ces machines ont généralement un nombre de pales compris entre 1 et 3 et peuvent développer des puissances élevées allant jusqu'à plusieurs mégawatts. [2]

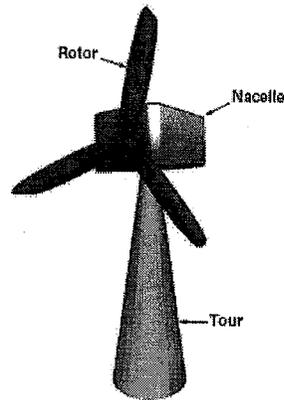


Figure 1 : composants d'une éolienne [3]

Elles comprennent trois composants essentiels : le rotor, la nacelle et la tour, comme illustrés sur la figure 1. Plusieurs facteurs présents sur la machine en elle-même peuvent avoir une influence sur la puissance générée à sa sortie, parmi eux : la forme de la tour, le diamètre du rotor, les matériaux utilisés ainsi que le nombre des pales, mais aussi la conception interne et la nature de la génératrice présentes dans la nacelle.

3. La région de Béni-Saf :

La région de Beni-Saf est balayée durant toute l'année par des vents forts, elle se trouve sur la cote ouest de l'Algérie à 60Km de Tlemcen et 100Km d'Oran, elle s'étend sur une superficie de 174000hectares, elle comporte un port de pêche, une zone industrielle, un littoral touristique et surtout elle est à vocation agricole.

La surface agricole utile est de 11000 hectares sur une surface de 135000 hectares, la majeure partie de la population est regroupé en trois localités (Beni-Saf, Sidi-Safi et Emir Abdelkader). Le climat général de cette région est de type méditerranéen, les précipitations sont rares et responsables de la tendance vers l'aridité. Le relief de cette région formé de plateaux, d'une vallée et d'une montagne à pente douce permet d'installer des fermes d'aérogénérateurs sans nuire à l'être humain ni à l'environnement. [4]

4. Le choix du site :

La région de Beni-Saf présente un couloir constamment balayé par les vents, notamment par les brises de mer (le jour) et de terre (la nuit) vu sa situation ouverte vers la mer méditerranée.

Region	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Rugosité (m)	V(m/s)
Beni-Saf	-1.35	35.3	0.02	2.8

Tableau 1 : Caractéristiques du site de Beni-Saf [5]

Les données du tableau nous donnent une vitesse moyenne du vent de 2,8m/s prise à 10mètres du sol et une rugosité de 0,02m. Sachant que la vitesse du vent augmente avec l'altitude, nous pouvons faire une extrapolation verticale de la vitesse du vent afin d'affirmer que ces vents peuvent fournir de l'énergie électrique.

5. Méthodes Utilisées :

En considérant la zone agricole avec plusieurs haies vives comme zone d'étude, elle comprend une longueur de rugosité de 0,03m.

Si la vitesse du vent est connue à une certaine hauteur Z_1 , nous pouvons calculer les vitesses à différentes hauteurs Z_2 par différentes lois de cisaillement utilisant la hauteur de rugosité Z_0 . Dans notre cas, nous avons utilisés deux lois, une dite logarithmique et une seconde dite de puissance. [5]

5.1. Loi logarithmique :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_1}{Z_0}\right)} \quad (1)$$

Avec V_1 et V_2 les vitesses des vents, Z_1 et Z_2 les hauteurs et Z_0 , la hauteur de la rugosité.

5.2. Loi de puissance :

$$V_2 = V_1 \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^\alpha \quad (2)$$

Les indices sont les même que pour la loi logarithmique sauf pour α qui est en fonction de la rugosité de la topographie et de la stabilité de l'atmosphère pour laquelle plusieurs méthodes théoriques et ou expérimentales ont aboutis a une expression bien déterminée pour la calculer ; parmi elles, les études suivantes : [5]

- Justus C.G 1976
- Mikhaeil 1985
- Justus & Mikhaeil 1981
- Nfaoui, méthode dite à coefficient variable qui a été utilisée pour l'atlas marocain.

6. Extrapolation verticale de la vitesse :

En considérant la zone agricole avec plusieurs haies vives comme zone d'étude, elle comprend une longueur de rugosité de 0,2m.

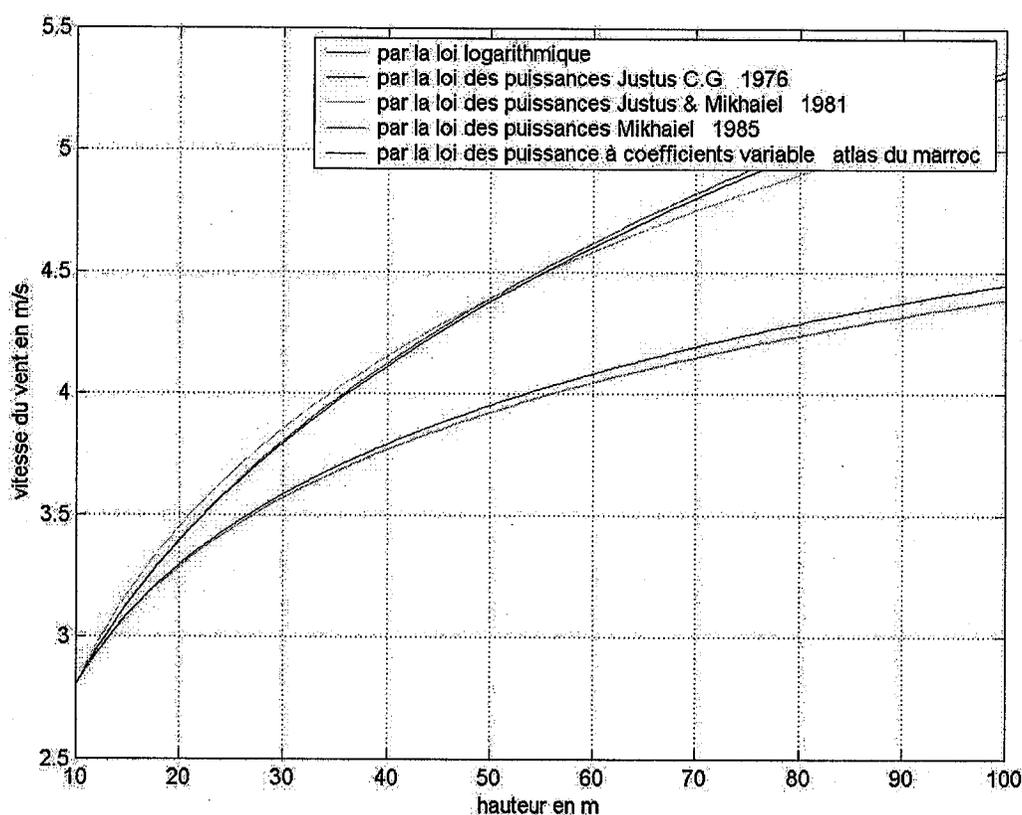


Figure 2 : Vitesses du vent en fonction de la hauteur par plusieurs méthodes.

En fonction de la hauteur de la rugosité, nous avons tracé des courbes des vitesses des vents à différentes hauteurs du sol (figure 2).

Les vitesses croient et pourraient bien se stabiliser pour une hauteur dépassant les 100m. Ainsi, nous remarquons que pour une hauteur de 50m du sol, qui nous semble raisonnable pour une éolienne, la vitesse du vent à cette hauteur varie de 3,8m/s à 4,4m/s pour les différentes méthodes et modèles utilisés dans notre travail, soit une différence de 0,6m/s. En considérant notre climat assez proche de celui du Maroc ainsi que la nature orographique, nous choisissons de travailler avec la loi de puissance à coefficient variable utilisé pour la mise en œuvre de l'atlas marocain, avec le tracé en noir sur la figure 2 qui nous donne une vitesse de 4m/s pour une hauteur de 50m du sol, et c'est la valeur qui sera prise pour le calcul des puissances.

7. Estimations de la puissance générée :

La puissance théorique de l'énergie éolienne est définie comme suit : [5]

$$P_{th} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (3)$$

Avec :

- P_{th} : Puissance théorique lorsque le vent est totalement freiné en Watt.
- ρ : Densité moyenne de l'air au niveau de la mer égale à 1,25 kg/m³.
- S : Surface de l'éolienne perpendiculaire au vent en m².
- V_v : la vitesse du vent en m.

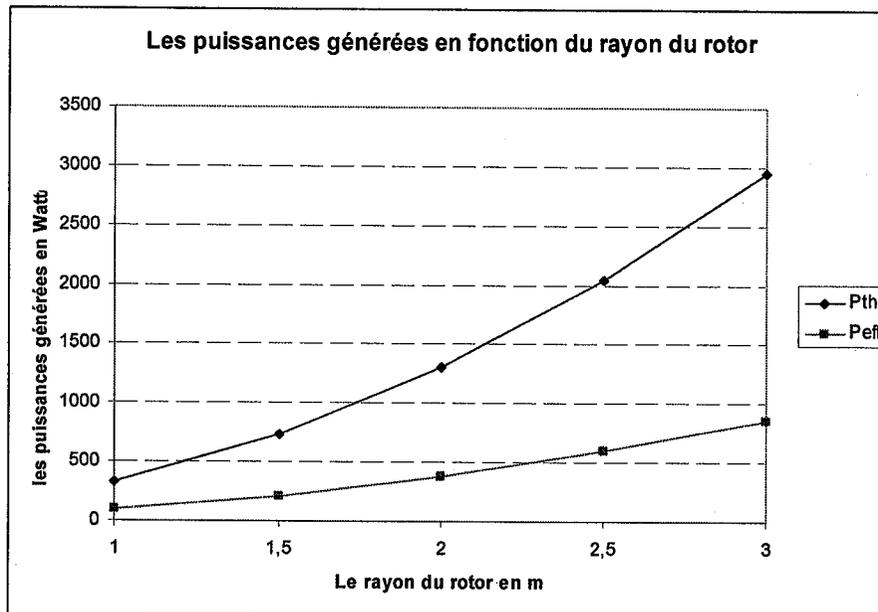


Figure 3 : les puissances théoriques et effectives générées en fonction du rayon du rotor (de 1 à 3m).

La puissance effective fournie par une éolienne en considérant toutes les pertes et seulement avec un rendement de 29 % est :

$$P_{eff} = 0,29 \cdot P_{th} \text{ (Watt)} \quad (4)$$

En considérant un rayon minimal du rotor d'une valeur de 1 mètre, nous avons pu calculer les puissances théoriques et effectives fournis par les aérogénérateurs (Figure 3 et Figure 4).

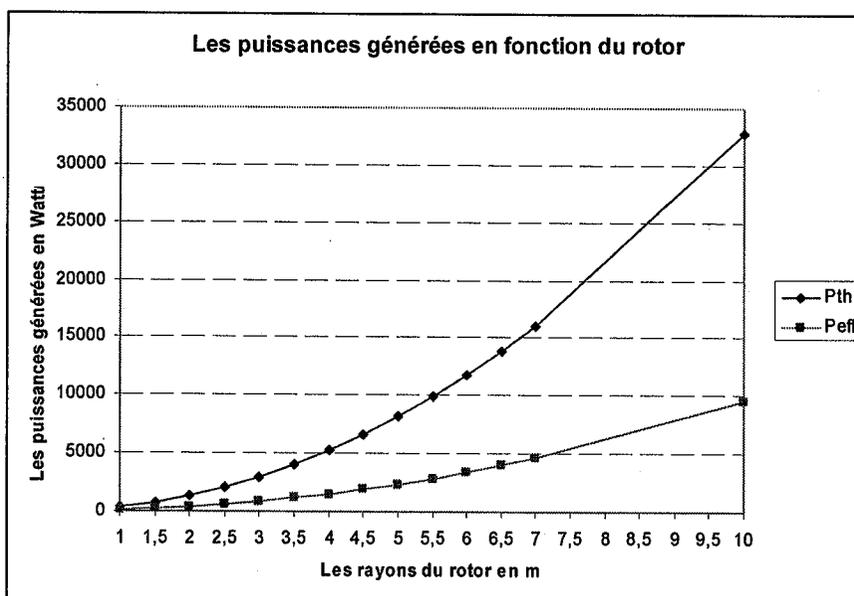


Figure 4 : les puissances théoriques et effectives générées en fonction du rayon du rotor (de 1 à 10m).

De la figure 3, nous remarquons qu'en passant d'un rayon de 1m à celui de 3m, la puissance effective générée a été multipliée par 9, passant de 95Watt à presque 1KWatt, d'où l'importance des valeurs des rayons des rotors lors des conceptions des éoliennes.

De la Figure 4, nous remarquons que la puissance effective peut aller jusqu'à une valeur de 9,5KWatt avec un rayon de 10m. Sans pour cela négliger l'impacte acoustique dû au bruit aérodynamique des pales.

8. Conclusion :

La région de Béni-Saf présente un favorable site pour l'exploitation de l'énergie éolienne. Il y souffle des vents avec des vitesses supérieures à 4,4m/s pour des hauteurs de 50m du sol, ceci nous donne des puissances effectives assez importantes en fonction du choix du rayon du rotor. Il est possible d'atteindre une puissance de 9,5KWatt pour un rayon de 10m.

La situation géographique de la zone de Béni-Saf, offre des vents fréquents et du coup un potentiel énergétique disponible durant toute l'année, toutes saisons confondues et à tout moment, de jour comme de nuit, cela est dû à son ouverture vers la mer et son exposition aux brises, ce qui rend d'autres sources énergétiques alternatives notamment le solaire moins compétitive.

Références Bibliographiques :

- [1] BEY M., Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne, Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables URMER Tlemcen, 2005.
- [2] Danish Wind Industry Association. <http://www.windpower.org>
- [3] LECONTE P., RAPIN M. et SZECHENYI E., Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, Réf : BM 4 640.
- [4] TABEL HELAL M. A. et GHELLAI N., Le Gisement Eolien à Béni-Saf Région Côtière de l'Ouest Algérien, 2003.
- [5] KASBADJI MERZOUK N., Evaluation du gisement énergétique éolien. Contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie, Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables URMER Tlemcen. 2006.

Annexe C

Le nom des différents vents dans le monde.

- Alizés:**
vents réguliers qui soufflent constamment sur près du tiers du globe.
- Aquilon:**
vent du nord.
- Auster:**
vent chaud du Midi.
- Autan ou Autan blanc:**
un vent violent, chaud et sec soufflant du sud-est sur le Toulousain.
- Autan noir:**
vent pluvieux venu d'Espagne.
- Austru:**
vent soufflant en Roumanie.
- Badisad obistroz:**
vent soufflant en Afghanistan.
- Barber:**
vent violent du Canada apportant de l'air extrêmement froid et humide, gelant tout ce qu'il touche incluant les cheveux et la barbe.
- Baguio:**
typhon des Philippines.
- Bhoot:**
vent soufflant en Inde
- Bise:**
vent froid soufflant du nord ou du nord-ouest.
- Blizzard:**
vent glacial.
- Bolon:**
vent soufflant à Sumatra. Il porte aussi les noms de "Tamboen" et "Nirta".
- Bora:**
vent froid et sec venant de l'Europe centrale soufflant l'hiver en direction de l'Adriatique.
- Borée:**
vent du nord. (en grec ancien Boréas, littéralement « le vent du nord »), dans la mythologie grecque, est le fils d'Éos (l'Aurore) et d'Astraéos. Il est la personification du vent du nord, un des quatre vents directionnels.
- Bouffée:**
mouvement passager de l'air.
- Bourrasque:**
coup de vent bref et violent.
- Bréva:**
brise de vallée sur les lacs italiens.
- Brise:**
petit vent frais peu violent.
- Brickfielder:**
vent d'été d'Australie équivalent au "zonda" d'Argentine. Il est causé par un mouvement d'air tropical en provenance du nord amenant des températures de plus de 100 degrés F, des nuages et de la poussière.
- Buran:**
appellation locale donné à un blizzard (vent fort accompagné de neige et de glace) voir aussi "Burga" et "Purga".
- Burga:**
appellation locale donné à un blizzard (vent fort accompagné de neige et de glace) voir aussi "Buran" et "Purga".
- Burle:**
vent du nord soufflant sur le Massif Central.
- Canterbury Northwester:**
vent soufflant en Nouvelle-Zélande.
- Cape Doctor:**
vent fort sans direction définie, soufflant dans la région de Cape Town en Afrique du Sud.

Catabatique:

type de vent à composante verticale descendante.

Cers:

vent du nord sec et froid qui souffle en hiver sur le Massif Central.

Chamsin:

vent de sable en Egypte, également khamsin.

Chergui:

vent d'est du Maroc.

Chinook:

vent chaud et sec qui descend des Montagnes Rocheuses.

Chocolatero:

vent chaud chargé de sable dans le golfe du Mexique

Contre-alizé:

courant aérien supérieur de direction opposée aux vents alizés.

Cyclone:

tourbillon de vents violents.

Dzhari:

vent soufflant dans le Sahara et en Lybie.

Elephanta:

vent soufflant en Afrique (si vous possédez plus d'informations, veuillez me les communiquer)

Étésien:

vent qui souffle du nord en Méditerranée orientale l'été.

Euraquilo:

vent froid et fort du nord-est soufflant sur la Méditerranée centrale et occidentale particulièrement près de Malte. Voir aussi "Euroclydon", "Gregale" et "Grigale".

Euroclydon:

vent froid et fort du nord-est soufflant sur la Méditerranée centrale et occidentale particulièrement près de Malte. Voir aussi "Euraquilo", "Gregale" et "Grigale".

Eurus:

vent d'est de la mythologie Grecque

Foeh: probablement la foehn original à partir duquel les autres ont été nommés. Souffle en France et en Autriche

Foehn ou Föhn:

vent du sud, chaud et sec, qui souffle dans les vallées alpines suisses.

Freemantle Doctor:

vent soufflant de la mer vers Perth, capitale de l'ouest de l'Australie. Ce vent contribue à faire de Perth la capitale avec le vent le plus constant au monde. Il prend la forme d'une brise de mer qui vient refroidir la plage entre 12h et 15h pratiquement tous les jours de l'année.

Galerie:

vent du nord-ouest, froid et humide qui souffle en rafales sur l'Ouest de la France.

Garigliano:**Ghibli:**

vent soufflant dans le Sahara et en Lybie. Décrit comme un vent chaud et violent.

Grain:

vent violent et de peu de durée qui s'élève soudainement et qui vient généralement accompagnée de précipitation.

Gregale ou Grigale:

vent froid et fort du nord-est soufflant sur la Méditerranée centrale et occidentale particulièrement près de Malte. Voir aussi "Euraquilo" et "Euroclydon".

Haboob:

la racine de ce nom provient de l'arabe et veut dire "phénomène". C'est plutôt un mur de poussière qu'un vent comme tel. On retrouve aussi ce phénomène en Arizona. Il est quelques fois appelé mousson et se proude de la fin avril jusqu'à septembre. C'est une tempête de poussière qui peut atteindre 80 km/h et pouvant excéder 3000 pieds de hauteur. Sa durée peut être de trois heures et il remodèle la forme du terrain. Ce phénomène se produit aussi de mai à septembre au Soudan et en Égypte. Il y a deux types de Haboobs dans le Sahara. Celui du sud est fort, chaud et humide, résultant généralement en tempête de sable. Celui du nord est froid et humide avec beaucoup moins de poussière.

- Halny Wiatr:**
vent soufflant en Pologne.
- Harmattan:**
vent d'est, chaud et sec, originaire du Sahara et soufflant sur l'Afrique occidentale.
- Hégoa:**
vent du sud, chaud et sec, suivi de pluie dans le pays basque.
- Helm:**
vent soufflant dans le English Lake District.
- Hurle:**
vent du nord, sec et froid, qui souffle en hiver sur le Massif Central.
- Hurricane:**
cyclone.
- Joran:**
vent frais du nord-ouest qui souffle sur le sud du Jura et du lac Léman.
- Kaikias:**
vent mentionné dans la mythologie Grecque.
- Karaburan:**
vent de Mongolie soufflant sur l'Asie.
- Khamsin:**
vent de sable analogue au Sirocco, en Égypte.
- Knik:**
vent résultant du déplacement de l'air froid descendant du flanc des montagnes dans les régions à haute altitude. Ils sont souvent appelés vent d'Alaska. Comme la plupart des vents, ils ne connaissent pas de frontières. On les retrouve en Patagonie, en Sibérie et sur les côtes de la Terre de Feu. Ils peuvent souffler à plus de 110 noeuds à l'heure. (voir aussi : Matanuska, Pruga, Stikine, Takn, Take, Turnagain, Williwaw)
- Kona:**
vent provenant du sud-ouest soufflant à Hawaii.
- Kuban:**
vent de l'Ile de Java
- Largue**
vent oblique par rapport à l'axe d'un navire.
- Leste:**
vent chaud soufflant de l'est dans la région de Madère.
- Levant:**
vent d'est tiède et humide qui souffle sur la Provence, les Alpes du sud, le Roussillon et la Corse.
- Léveché:**
vent du sud-ouest soufflant par rafales sur l'Espagne du Sud.
- Libeccio (lebecchio):**
vent du sud-ouest soufflant sur la Côte d'Azur, la Corse et l'Italie.
- Lips:**
vent mentionné dans la mythologie Grecque.
- Ljuka:**
vent soufflant en Yougoslavie.
- Lombarde:**
vent du sud-est (venant de Lombardie), en Savoie.
- Loo:**
vent Indien.
- Maloja:**
un des vents catabatiques des Alpes Suisse.
- Marin:**
vent du sud-est, chaud et humide, soufflant de la Méditerranée vers le Languedoc et les Cévennes.
- Matanuska:**
vent résultant du déplacement de l'air froid descendant du flanc des montagnes dans les régions à haute altitude. Ils sont souvent appelés vent d'Alaska. Comme la plupart des vents, ils ne connaissent pas de frontières. On les retrouve en Patagonie, en Sibérie et sur les côtes de la Terre de Feu. Ils peuvent souffler à plus de 110 noeuds à l'heure. (voir aussi : Knik, Pruga, Stikine, Takn, Take, Turnagain, Williwaw)
- Matinière:**

brise nocturne de montagne dans les Alpes du Nord.

Mauka:

vent d'Hawaii.

Meltem:

vent du nord violent qui souffle l'été sur la mer Égée.

Mistral:

vent violent, turbulent, froid et sec qui souffle du secteur nord sur la France et la Méditerranée.

Mousson:

vent saisonnier qui souffle surtout dans l'Asie méridionale.

Nirta:

vent soufflant à Sumatra. Il porte aussi les noms de "Bolon" et "Tamboen"

Nordet:

vent soufflant de la direction du nord-est.

Noroit:

vent soufflant du nord-ouest.

Norther:

vent qui peut être très violent. Du Golfe du Mexique. Il impose à l'occasion des vagues de froid jusqu'au Mexique oriental.

Notus:

le vent du sud de la mythologie Grecque.

Passat:

un vent de l'Atlantique nord.

Pitera ou Piterak:

vent à composante verticale descendante (catabatique) qui s'écoule sur les flancs de la calotte glaciaire du Groenland et de l'Islande.

Pampero:

vent froid et violent de la pampa.

Ponant:

vent d'ouest dans le midi.

Pruga:

vent résultant du déplacement de l'air froid descendant du flanc des montagnes dans les régions à haute altitude. Ils sont souvent appelés vent d'Alaska. Comme la plupart des vents, ils ne connaissent pas de frontières. On les retrouve en Patagonie, en Sibérie et sur les côtes de la Terre de Feu. Ils peuvent souffler à plus de 110 noeuds à l'heure. (voir aussi : Knik, Matanuska, Stikine, Takn, Take, Turnagain, Williwaw)

Puelche:

vent soufflant sur les Andes.

Puna:

vent froid et sec soufflant au Pérou.

Purga:

appellation locale donné à un blizzard (vent fort accompagné de neige et de glace) voir aussi "Buran" et "Burga".

Pyrn:

vent soufflant dans la région du haut Danube.

Rafale:

coup de vent violent et momentané.

Reshabar:

vent catabatique du sud du Caucase.

Revolin:

vent qui tourne lorsqu'il rencontre un obstacle.

Risée:

renforcement passager et localisé du vent.

Roger:

vent d'East Anglia en Angleterre.

Rotetur:

vent soufflant en Roumanie.

Samiel:

fort vent suffocant d'Afrique du nord, toujours accompagné de sable. Très similaire au Simoun.

Santa Ana:

vent Californien chaud et sec, soufflant du nord ou du nord-est dans la vallée de Santa-Ana. C'est un fléau printannier pour les arbres fruitiers de la vallée et est connu pour être très violent.

Shamal:

vent de l'Iraq et du golfe Persique qui est à son plus fort les après-midi d'été. Il souffle aussi les matin d'été, mais est beaucoup moins fort. Il est absent de ces régions le reste de l'année.

Sharav:

vent qui souffle au Moyen-Orient. Ce nom est dérivé de l'Hébreu et signifie chaleur brûlante ou vague de chaleur.

Simoun ou Simoon ou Simoom:

vent chaud et violent du désert.

Sirocco:

vent sec et chaud du Sahara, également siroco.

Skiron:

vent mentionné dans la mythologie Grecque

Sky Sweeper:

vent soufflant à Majorque (désirerais avoir l'appellation française de ce nom de vent)

Solano:

voir Léveché et Libeccio

Sonora:

vent chaud se déplaçant du Mexique vers la région sud-ouest des États-Unis

Southerly Buster:**Stikine:**

vent résultant du déplacement de l'air froid descendant du flanc des montagnes dans les régions à haute altitude. Ils sont souvent appelés vent d'Alaska. Comme la plupart des vents, ils ne connaissent pas de frontières. On les retrouve en Patagonie, en Sibérie et sur les côtes de la Terre de Feu. Ils peuvent souffler à plus de 110 noeuds à l'heure. (voir aussi : Knik, Matanuska, Pruga, Takn, Take, Turnagain, Williwaw)

Suhali:**Sumatra:****Sures:**

Vent sud-américain soufflant au Chili

Suroit:

vent du soufflant du sud-ouest.

Take:

vent résultant du déplacement de l'air froid descendant du flanc des montagnes dans les régions à haute altitude. Ils sont souvent appelés vent d'Alaska. Comme la plupart des vents, ils ne connaissent pas de frontières. On les retrouve en Patagonie, en Sibérie et sur les côtes de la Terre de Feu. Ils peuvent souffler à plus de 110 noeuds à l'heure. (voir aussi : Knik, Matanuska, Pruga, Stikine, Takn, Turnagain, Williwaw)

Takn:

vent résultant du déplacement de l'air froid descendant du flanc des montagnes dans les régions à haute altitude. Ils sont souvent appelés vent d'Alaska. Comme la plupart des vents, ils ne connaissent pas de frontières. On les retrouve en Patagonie, en Sibérie et sur les côtes de la Terre de Feu. Ils peuvent souffler à plus de 110 noeuds à l'heure. (voir aussi : Knik, Matanuska, Pruga, Stikine, Take, Turnagain, Williwaw)

Tamboen:

vent soufflant à Sumatra. Il porte aussi les noms de "Bolon" et "Nirta"

Tauem:**Techuantepecer:****Tivano:**

brise de montagne sur les lacs italiens.

Tourbillon:

vent très fort qui souffle en tournant.

Tramontane:

vent froid, sec et violent, qui souffle de nord-ouest dans le Languedoc et le Roussillon. La tramontane s'accélère en passant entre les Pyrénées et le sud du Massif central. On parle de tramontane en Languedoc et dans le Roussillon et de mistral en Provence, mais ce ne sont là que deux noms différents pour le même vent. Mistral et tramontane ont les mêmes causes météorologiques et sensiblement les mêmes effets. Cependant, les couloirs montagneux utilisés sont différents entre les deux vents : tramontane: entre les Pyrénées et le sud du Massif central. .

Tunagain:

vent résultant du déplacement de l'air froid descendant du flanc des montagnes dans les régions à haute altitude. Ils sont souvent appelés vent d'Alaska. Comme la plupart des vents, ils ne connaissent pas de frontières. On les retrouve en Patagonie, en Sibérie et sur les côtes de la Terre de Feu. Ils peuvent souffler à plus de 110 noeuds à l'heure. (voir aussi : Knik, Matanuska, Pruga, Stikine, Takn, Take, Williaw)

Typhon:

cyclone tropical très violent.

Vaudaire:

vent du sud-est en Suisse.

Vent der Midi:

vent soufflant à Lyon

Williwaw:

vent résultant du déplacement de l'air froid descendant du flanc des montagnes dans les régions à haute altitude. Ils sont souvent appelés vent d'Alaska. Comme la plupart des vents, ils ne connaissent pas de frontières. On les retrouve en Patagonie, en Sibérie et sur les côtes de la Terre de Feu. Ils peuvent souffler à plus de 110 noeuds à l'heure. (voir aussi : Knik, Matanuska, Pruga, Stikine, Takn, Take, Turnagain)

Willy-Willy:

typhon dans le nord de l'Australie.

Xlokk:

vent soufflant du sud-ouest sur Malte et emmène parfois de la poussière rouge en provenance du Sahara

Yamaoroshi:**Zef:**

vent en argot.

Zéphyr:

vent doux et agréable.

Zéphiros:

vent d'ouest de la mythologie grecque

Zoboa:**Zonda:**