

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

*Université Mouloud MAMMERY de Tizi-Ouzou*



*Faculté de Génie de la construction*

*Département de génie mécanique*

*Filière : Électromécanique*



*Mémoire de Fin de siècle*

*En vue de l'Obtention du Diplôme de Master*

*Spécialité : Maintenance Industrielle*

## **Thème**

***Etude Préliminaire et Analyse du Potentiel Eolien en vue d'une  
Planification Energétique dans la Région de Tizi Ouzou***

***Réaliser par:***

***Mr. CHALAL Sofiane & Mr. SLIMANI Mohamed***

***Soutenu le 15/07/2021 devant le jury compose de :***

***Président: Mr. SI-AHMED.H (UMMTO)***

***Examineur: Mr. BELGAID.H (UMMTO)***

***Promoteur: Mr. MEZIANE .F (CDER/Alger)***

***Co-promoteur: Mr. YAMANI.N (UMMTO)***

**Promotion 2019/2020**

# *Remerciements*

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné courage, volonté et patience afin d'élaborer ce modeste travail jusqu'à son terme.

Nous remercions vivement en premier lieu notre promoteur Monsieur Fares MEZIANE, chercheur permanent au CDER, qui nous a encadré et qui par sa compétence, ses encouragements, ses critiques constructives et son soutien moral a su nous informer, nous conseiller et nous rendre de plus en plus autonome pour bien réaliser ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers tous nos professeurs pour nous avoir inculqué leur savoir et leur savoir-faire, en particulier notre copromoteur Monsieur Nourdine YAMANI, pour ses enseignements et ses conseils.

Nos plus vifs remerciements s'adressent aussi à messieurs les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nous remercions infiniment nos très chers parents, puisse Dieu les protéger, sans omettre nos frères et sœurs pour leurs sacrifices et leur aide précieuse.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.





# *Dédicaces*

*On tient à dédier ce modeste travail*

*A ceux qui nous ont donné la vie et qui ont toujours veillé à  
notre bien-être, nos très chers parents*

*A ceux qui sont la source de notre inspiration et notre courage,*

*A qui nous devons de l'amour et de la reconnaissance :*

*Nos chères sœurs et nos chers frères*

*A toute la famille*

*Aussi à nos très chères amies*

*A tous ceux que nous aimons*

*A tous ceux qui contribuent pour l'évolution*

*Sofiane & Mohamed*



## *Etude Préliminaire et Analyse du Potentiel Eolien en vue d'une Planification Énergétique dans la Région de Tizi Ouzou*

**Résumé :** *Le présent travail consiste à évaluer le potentiel éolien disponible sur la région de Tizi Ouzou, en exploitant les données du vent fournies par l'Office Nationale de Météorologie (O.N.M) s'étalant sur une période de 14 ans (2004-2018). L'intérêt principal est de mieux comprendre l'évolution et la répartition de la ressource éolienne, ainsi pour but d'envisager une éventuelle planification énergétique dans cette région. L'aspect économique et environnemental a permis de mettre l'accent sur l'avantage de l'utilisation de l'énergie éolienne en termes du gain en quantités de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) émis dans l'atmosphère, ainsi le cout de cette ressource énergétique qui devient de plus en plus compétitif.*

**Mots clés :** *Potentiel éolien, le vent, Tizi ouzou, CO<sub>2</sub>, Cout.*

**Abstract:** *The present study consists to evaluate the available wind potential over the region of Tizi Ouzou using wind data provided by the National Office of Meteorology (ONM) ranging from 2004 to 2018. The main objective is to better understand the wind resource evolution and distribution, and probably for an eventual energy planning over this region. The economic and environmental aspect made it possible to focus on the advantages of wind energy using in terms of avoided dioxide carbon (CO<sub>2</sub>) rate emitted to the atmosphere, as well as the cost of this energy resource which is becoming more and more competitive.*

**Key words:** *wind potential, wind, Tizi Ouzou, CO<sub>2</sub>, Cost.*

**المخلص:** تتكون الدراسة الحالية من تقييم إمكانات الرياح المتاحة في منطقة تيزي وزو باستخدام بيانات الرياح المقدمة من المكتب الوطني للأرصاد الجوية (ONM) التي تتراوح من 2004 إلى 2018. الهدف الرئيسي هو فهم أفضل لتطور موارد الرياح وتوزيعها ، وربما للتخطيط النهائي للطاقة في هذه المنطقة. مكن الجانب الاقتصادي والبيئي من التركيز على مزايا استخدام طاقة الرياح من حيث تجنب معدل ثاني أكسيد الكربون (CO<sub>2</sub>) المنبعث في الغلاف الجوي ، فضلاً عن تكلفة مورد الطاقة هذا الذي أصبح أكثر وأكثر تنافسية.

**الكلمات المفتاحية:** طاقة الرياح ، الرياح ، تيزي وزو ، ثاني أكسيد الكربون ، التكلفة.

# SOMMAIRE

\*\*\*\*\*

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE VENT

1. INTRODUCTION.....	3
2. DEFINITION DU VENT .....	3
2.1. Les forces de pression .....	4
2.2. Les forces de Coriolis.....	4
2.3. Les Forces de frottement .....	4
2.4. La force gravitationnelle .....	4
3. TYPES DE VENT .....	4
3.1. Les vents globaux (géostrophiques).....	4
3.2. Les vents locaux .....	5
3.3. Les vents de surfaces.....	6
4. CLASSIFICATION DE VENT .....	6
5. MESURE DES PARAMETRES DE VENT .....	7
5.1. La girouette .....	7
5.2. La manche à air (manche à vent) .....	8
5.3. Anémomètre .....	8
6. STRUCTURE VERTICALE DE L'ATMOSPHERE .....	9
6.1. La troposphère.....	9
6.2. La stratosphère .....	10
6.3. La mésosphère.....	10
6.4. La thermosphère.....	10
6.5. L'exosphère.....	10
7. LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE .....	11
7.1. La couche d'Ekman.....	11
7.2. La couche de surface .....	11
7.3. La sous-couche rugueuse .....	11
8. MODELISATION MATHEMATIQUE DE LA DISTRIBUTION DES FREQUENCES DU VENT .....	12
8.1. Distribution de weibull.....	12

8.2. Méthode de la vitesse moyenne et de l'écart type.....	13
9. LA ROSE DES VENTS .....	14
10. EXTRAPOLATION VERTICALE DE LA VITESSE DU VENT .....	15
10.1. Modèle de Mikhail et Justus .....	15
10.2. Modèle de Spera et Richards .....	16
10.3. Modèle de Mikhail .....	16
10.4. Loi de puissance .....	17
11. EXTRAPOLATION VERTICALE DES PARAMETRES DE WEIBULL.....	17
11.1. Modèle d'extrapolation de Justus et Mikhail1976 .....	18
11.2. Modèle modifié d'extrapolation de Justus1978.....	18
11.3. Modèle modifié d'extrapolation de Mikhaïel1985 .....	18
11.4. Modèle d'extrapolation de Spéra.....	19
12. ENERGIE EOLIENNE.....	19
12.1. Densité de puissance .....	19
13. POTENTIEL EOLIEN EN ALGERIE .....	20
14. CONCLUSION.....	21
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	22

## **CHAPITRE II : LES GÉNÉRATEURS ÉOLIENS**

1. INTRODUCTION.....	25
2. HISTORIQUE .....	25
3. DEFINITION D'UN GENERATEUR EOLIEN .....	27
4. PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE .....	28
5. LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES .....	30
5.1. Selon la conception mécanique .....	30
5.1.1. Eolienne à axe verticale .....	30
5.1.2. Eoliennes à axe horizontal .....	31
5.2. Selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice .....	32
6. COURBE CARACTERISTIQUES DE L'EOLIEN .....	33
7. MODELISATION DU ROTOR EOLIEN .....	34
8. CONCLUSION .....	36
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	37

## **CHAPITRE III : EVALUATION ET ANALYSE DU POTENTIAL EOLIEN DE LA REGION**

### **DE TIZI OUZOU**

1. INTRODUCTION .....	38
2. DESCRIPTION DE LA REGION D'ETUDE .....	38
3. ANALYSE DU POTENTIEL EOLIEN A 10 M .....	39
3.1. Etude annuelle .....	39
3.2. Etude mensuelle .....	40
3.3. Etude saisonnière.....	42
4. VARIATION AVEC LA HAUTEUR.....	44
5. LE COUT DU KWH PRODUIT PAR UNE EOLIENNE .....	45
6. ESTIMATION DE TAUX DE CO2 EMIS DANS L'ATMOSPHERE .....	48
7. CONCLUSION .....	50
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	52
CONCLUSION GENERALE.....	53

# LISTE DES FIGURES

\*\*\*\*\*

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE VENT

Figure I-1. Mouvement de l'air en atmosphère. ....	5
Figure I-2. Vents locaux .....	5
Figure I-3. Girouette .....	8
Figure I-4. Manche à air.....	8
Figure I-5. (a) Ensemble Anémomètre Girouette - (b) Mât de mesure avec Anémomètres et Girouettes.....	9
Figure I-6. Structure verticale de l'atmosphère .....	10
Figure I-7. Structure verticale de la couche limite atmosphère .....	12
Figure I-8. Histogramme de vitesse du vent ajusté par la distribution de Weibull.....	13
Figure I-9. La rose des vents.....	15
Figure I-10. Carte des vents de l'Algérie à 10 m du sol. ....	21

## CHAPITRE II : LES GÉNÉRATEURS ÉOLIENS

Figure II-1. Moulin à vent.....	26
Figure II-2. Première éolienne crée par Charles et Brush.....	26
Figure II-3. Éolienne de Poule La Cour.....	27
Figure II-4. Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	27
Figure II-5. Structure d'une éolienne à axe horizontal .....	29
Figure II-6. Types d'éoliennes à axe verticale.....	31
Figure II-7. Eoliennes à axe horizontal.....	31
Figure II-8. Types d'éoliennes à axe horizontal .....	32
Figure II-9. Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent. ....	33
Figure II-10. Modèle d'une turbine éolien.....	34

## CHAPITRE III : EVALUATION ET ANALYSE DU POTENTIEL EOLIEN DE LA REGION DE TIZI OUZOU

Figure III-1. Situation géographique de Tizi Ouzou.....	39
Figure III-2. Distribution Weibull à 10 m.....	39

Figure III-3. La rose des vents à 10 m .....	40
Figure III-4. variation mensuelle de la vitesse du vent à 10 m du sol.....	41
Figure III-5. Distribution Weibull saisonnière à 10 m.....	42
Figure III-6. Roses des vents saisonnières à 10 m .....	43
Figure III-7. Variation de la vitesse en fonction de la hauteur .....	44
Figure III-8. Variation de la densité de puissance et énergétique .....	45

---

## **LISTE DES TABLEAUX**

\*\*\*\*\*

### **CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE VENT**

Tableau I-1. L'échelle de Beaufort .....	7
--	---

### **CHAPITRE II : LES GÉNÉRATEURS ÉOLIENS**

Tableau II-1. Classification des turbines éoliennes .....	32
---	----

### **CHAPITRE III : EVALUATION ET ANALYSE DU POTENTIEL EOLIEN DE LA REGION DE TIZI OUZOU**

Tableau III-1. Coordonnées géographiques de site de Tizi Ouzou.....	39
Tableau III-2. Variation mensuelle des différents paramètres à 10m du sol .....	41
Tableau III-3. Variation saisonnière des différents paramètres à 10m du sol .....	42
Tableau III-4. Variation annuel des différents paramètres en fonction des différentes hauteurs .....	44
Tableau III-5. Gamme de coût spécifique des éoliennes en fonction de la puissance nominale .....	46
Tableau III-6. Données techniques des différentes éoliennes commerciales utilisées dans l'analyse .	47
Tableau III- 7. Analyse des coûts de différents modèles d'éoliennes (\$ / kWh).....	48
Tableau III-8. Emissions de CO2 pour kWh produit.....	49
Tableau III- 9.Taux de Co2 évité par l'éolien Enercon E 115 (3000kw) .....	50

# NOMENCLATURE

\*\*\*\*\*

Parc PV : Parc photovoltaïque

ONM : L'office Nationale de Météorologie

CLA : La couche limite atmosphérique

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

$f(v)$ : Densité de probabilité de Weibull

-

$k$  : Paramètre de forme de weibull

$c$  : Paramètre d'échelle de weibull

[m/s]

$\sigma$  : L'écart type

-

$\bar{V}$  : La vitesse moyenne du vent

[m/s]

$\Gamma$  : La fonction Gamma

-

$V_1$  : La vitesse du vent à la hauteur  $Z_1$

[m/s]

$V_2$  : La vitesse du vent à la hauteur  $Z_2$

[m/s]

$Z_0$  : La longueur de la rugosité

[m]

$Z_1$  : Hauteur de référence

[m]

$Z_2$  : Hauteur à laquelle on désire calculer la vitesse du vent

[m]

$\alpha$  : Le coefficient de friction

-

$K_1$  : Paramètre de forme de Weibull à hauteur de mesure

-

$K_2$  : Paramètre de forme de Weibull à hauteur désirée

-

$C_1$  : Paramètre d'échelle de Weibull à hauteur de mesure

[m/s]

$C_2$  : Paramètre d'échelle de Weibull à hauteur désirée

[m/s]

$Z_r$  : Etant la hauteur de référence égale à 10m

[m]

$V_h$  : La vitesse du vent homogène

[m/s]

$P_v$  : Puissance du vent à l'entrée de la voilure

[w]

$V^3$  : Vitesse cubique moyenne du vent

[m<sup>3</sup>/s<sup>3</sup>]

$P$  : La puissance d'une éolienne

[w]

$C_p$  : Le coefficient de puissance

-

$\rho$  : La masse volumique de l'air

[kg/m<sup>3</sup>]

$S$  : La surface balayée par le rotor

[m<sup>2</sup>]

$V$  : La vitesse du vent

[m/s]

$\lambda$  : Ratio de la Vitesse

-

$R$  : Le rayon de la turbine,

[m]

$\Omega_{rot}$  : La vitesse de rotation de la turbine

[rad/s]

N : Vitesse de rotation	[tr/mn]
$\beta_i$ : L'angle de l'orientation des pâles	[°C]
$P_{\text{éol}}$ : La puissance maximale récupérable	[w]
$P_n$ : La puissance nominale	[w]
$V_D$ : La vitesse de démarrage (d'enclenchement) de l'éolienne	[m/s]
$V_n$ : La vitesse moyenne nominale de l'éolienne	[m/s]
$V_M$ : La vitesse d'arrêt ou de coupure de l'éolienne	[m/s]
DE : La densité énergétique	[MWh/an/m <sup>2</sup> ]
DP : La densité de puissance	[W/m <sup>2</sup> ]
$V_{\text{moy}}$ : Vitesse moyenne	[m/s]
PVC : La valeur actuelle des coûts	[\$]
$I_c$ : Le coût d'investissement	[\$]
$C_{\text{OMR}}$ : Le coût d'exploitation, de maintenance et de réparation.	[\$]
i : Le taux d'inflation	[%]
d: Le taux d'intérêt	[%]
t: La durée de vie de la machine (t=20 ans)	
S: La valeur de récupération	-
CPU : Le coût unitaire de l'énergie	[\$ / kWh]
AEP : Représentent le coût annualisé total	[KWh/an]
$P_r$ : Puissance nominale propre au l'éolienne	[kW]
CF : Représentent le facteur de capacité	[%]
$V_{\text{cin}}$ : Vitesse d'enclenchement de l'éolienne	[m/s]
$V_r$ : Vitesse nominale de l'éolienne	[m/s]
$V_{\text{out}}$ : Vitesse coupure de l'éolienne	[m/s]

## INTRODUCTION GENERALE

==+== ==+== ==+== ==+== ==+== ==+== ==+==

L'énergie électrique est un facteur essentiel pour le développement et l'évolution des sociétés que ce soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie que sur le développement des activités industrielles. Elle est devenue une forme d'énergie indispensable par sa souplesse d'utilisation et par la multiplicité des domaines d'activité où elle est appelée à jouer un rôle primordial. Ses modes de production ainsi que les moyens de distribution associés sont amenés à subir de profonds changements au cours de prochaines décennies.

En effet, jusqu'à présent la production d'électricité provenait essentiellement de la filière nucléaire et de la transformation de ressources naturelles fossiles. Ces deux modes de production posent des problèmes dont l'importance est croissante au fil des années. Il s'agit du stockage des déchets nucléaires non retraitables et de la disparition prévue des principales sources d'énergie fossile.

Les contraintes environnementales concernant les rejets dans l'atmosphère des gaz à effet de serre renforcent également l'idée d'une production d'énergie électrique propre, économe et durable. Ainsi, les modes de production reposant sur la transformation d'énergie renouvelable (éolien, solaire, etc.) sont appelés à être de plus en plus utilisés dans le cadre du développement durable.

Vu l'emplacement géographique et le climat de l'Algérie, le pays dispose d'un potentiel en termes de ressources énergétiques renouvelables considérables. Alors que le nouveau programme gouvernemental en 2015 s'est engagé à produire 22GW à l'horizon 2030 de sources renouvelables, le pays comprend actuellement quelques projets pilotes, dont la centrale hybride de Hassi R'mel d'une capacité de 30MW, la ferme éolienne de Adrar de 10MW, mise en service en 2014 ainsi qu'un parc PV d'une puissance de 1,1MW sis à Ghardaia.

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

Toutefois, l'utilisation de l'énergie 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.

La vitesse du vent étant un des paramètres les plus importants du potentiel éolien, sa variation annuelle et saisonnière à long terme influe énormément sur le rendement d'un investissement. Même si l'étude annuelle de la vitesse du vent d'une zone, la donne comme marginale. L'étude en fonction des mois et des saisons peut classer cette zone comme apte à recevoir une implantation éolienne sur une grande partie de l'année.

D'où le but du présent travail qui mène à évaluer pleinement la ressource éolienne disponible sur la région de Tizi Ouzou en fonction des mois, des saisons et de l'année. Cela a été fait à partir de données météorologiques fournies par l'office Nationale de Météorologie (ONM) mesurées durant la période de 14 ans (2004-2018).

Dans le premier chapitre, nous définirons le vent avec ses caractéristiques, les paramètres qui le régissent, ses deux variabilités et sa mesure ; une présentation générale de l'atmosphère terrestre et ses différentes parties tout en se concentrant sur la couche limite atmosphérique. Le modèle utilisé pour la modélisation de la vitesse du vent et une extrapolation verticale de la vitesse du vent, qui nous permettra d'évaluer le potentiel éolien pour l'estimation de la production énergétique d'une éolienne.

Le deuxième chapitre comprendra des généralités sur le dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en une énergie mécanique. Nous présenterons la machine éolienne, ses différents composants, types d'éoliennes et un rappel sur les systèmes éoliens à travers les équations et les concepts physiques régissant leur fonctionnement.

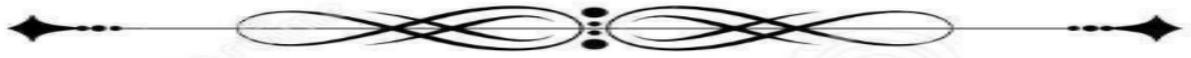
Le dernier chapitre de ce travail consiste à présenter les résultats obtenus à l'étude du potentiel éolien dans la région de Tizi-Ouzou en termes de vitesse, densité de puissance moyenne ainsi que les deux paramètres de Weibull seront donnés à 10m du sol, afin qu'on puisse prédire la puissance disponible sur le site en question. L'extrapolation verticale de la vitesse du vent nous permettra quant à elle d'évaluer le potentiel éolien.

Le chapitre comprendra à sa fin une estimation du coût du kWh de l'énergie produite par une éolienne et finalement l'émission de CO<sub>2</sub> pour 1 kWh produit.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.



**CHAPITRE I**  
**GÉNÉRALITÉS SUR LE VENT**



# CHAPITRE I

## GENERALITES SUR LE VENT

====+====+====+====+====+====+====+====+====+====

### 1. INTRODUCTION

Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones d'air chaud et d'autre d'air froid qui possèdent également des différences de pressions atmosphérique. Ces différences de pressions engendrent des mouvements d'air nommés vent. Le vent constitue une source d'énergie qui est continuellement renouvelée par des phénomènes naturels. Le vent est donc une variable atmosphérique tout à fait fondamentale à mesurer [1].

Dans ce premier chapitre nous donnerons une présentation générale du vent et ses caractéristiques. Dans nous parlerons de la nature du vent, des différentes forces qui le régissent, les différents types vent, classification de vent et La mesure des paramètres du vent. Après une présentation générale de l'atmosphère et sa structure tout en se focalisant sur la couche limite atmosphérique. Ensuite nous aborderons la modélisation mathématique de la distribution des fréquences du vent ; puis l'extrapolation verticale de la vitesse du vent et les modèles d'extrapolation. Enfin nous passerons en revue les différents travaux relatifs à l'évaluation du potentiel éolien en Algérie.

### 2. DEFINITION DU VENT

Le vent est le déplacement de l'air au sein de l'atmosphère. Il est naît sous l'effet des différences de températures et de pressions. Ainsi, lorsqu'il existe une différence de pression entre deux points, l'air circule de l'endroit où la pression est la plus élevée (où l'air est froid) vers l'endroit où elle est la moins élevée (où l'air est chaud). En d'autres termes, l'air se déplace de la haute pression vers la basse pression.

Le grand responsable de ce phénomène est le soleil. Il chauffe les mers et les continents mais pas au même rythme (matin et soir). Une fois réchauffés, ces derniers chauffent à leur tour les masses d'air qui les surplombent. Par ailleurs, il est à noter que l'air est sous l'action de quatre forces, qui sont :

### **2.1. Les forces de pression**

Ces forces génèrent les déplacements des masses d'air constituant le vent. Elles proviennent des différences locales de pression dues aux différences de température en fonction de la latitude, et des influences continentales et océaniques. Elles sont perpendiculaires aux surfaces isobares et dirigées des hautes vers les basses pressions. [2]

### **2.2. Les forces de Coriolis**

Cette force est liée à la rotation de la terre sur son axe. Elle est perpendiculaire et proportionnelle à la vitesse du vent et est orientée vers l'est (la droite) dans l'hémisphère nord et vers l'ouest (la gauche) dans l'hémisphère sud. Elle n'est significative que pour les déplacements atmosphériques de haute altitude (les vents géostrophiques que nous appelons aussi vents globaux) en raison de la négligence des autres forces à ce niveau [3].

### **2.3. Les Forces de frottement**

Ces forces traduisent la friction turbulente de l'air sur le sol dans les basses altitudes. Elles interviennent dans la couche limite atmosphérique [4].

### **2.4. La force gravitationnelle**

Elle est la conséquence de l'attraction mutuelle des corps, cette force intervient à cause de la grande masse de la terre. Elle est dirigée vers le centre de la terre [3].

## **3. TYPES DES VENTS**

Il existe plusieurs types de vent ; parmi eux, nous citons trois genres, qui sont :

### **3.1. Les vents globaux (géostrophiques)**

Les vents causés par la différence de température due au réchauffement inhomogène de l'air de l'atmosphère sont connus par les vents géostrophiques ou bien les vents globaux ; ces vents concernent les hautes altitudes composées de deux forces, celle Coriolis et la force de pression [3].

La Figure (I-1.a) présente le mouvement global de l'air en atmosphère, en réalité, l'air est déjà refroidi à 30° de latitude, alors il redescend au sol. De la, un autre cycle de 30° est formé est ainsi de suite (figure I.1.b). Dans le cas de l'Algérie, la bande de la différence de pression est localisée dans le sud entre Bechar, Tindouf et Adrar.

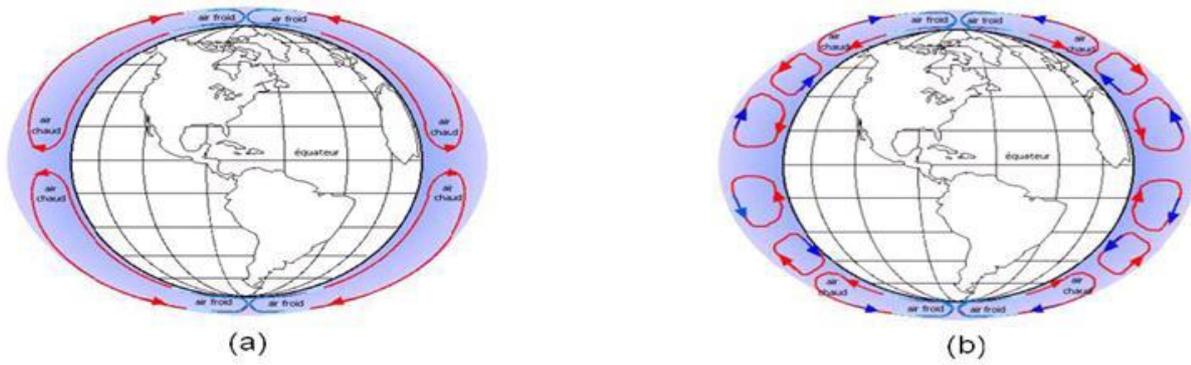
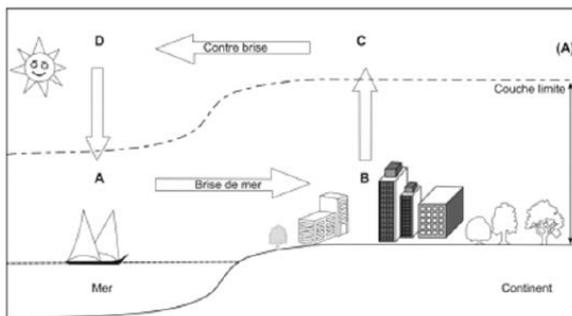


Figure I-1. Mouvement de l'air en atmosphère.

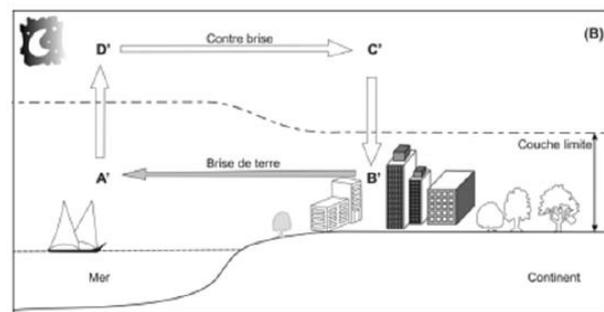
L'air s'étend vers les deux hémisphères nord et sud dans la haute atmosphère, il ya création d'une zone de basse pression au niveau du sol à l'équateur. Cet air commence à redescendre sous l'effet de la force de Coriolis ce qui crée une zone de haute pression (anticyclone) qui se crée aussi aux deux pôles à cause de refroidissement de l'air [5]

3.2. Les vents locaux [5]

Les vents locaux sont toujours superposés aux vents dominants, lorsque les vents globaux sont faibles, les vents locaux tendent à dominer le régime des vents. La force de pression et la force de frottement peuvent donner naissance à des vents locaux. La figure suivante montre les différents types des vents locaux.



(a) Brise de mer



(b) Brise de terre



(c) Brise montante



(d) Brise descendante

Figure I-2. Vents locaux

- **Les brises de mer et de terre** : la différence de température entre la terre et la mer provoque un soulèvement de l'air chaud qui s'étend ensuite vers la mer. L'air froid provenant de la mer est tout de suite attirée par la dépression créée au niveau de la terre à cause de son réchauffement : c'est la brise de mer Figure (I-2.a). Au crépuscule, le phénomène se stabilise car les températures sur terre et sur mer deviennent plus au moins égales. La nuit, la direction de cette brise prend le chemin inverse (brise de terre) Figure (I-2.b). [5]
- **Les vents de montagne** : les reliefs favorisent beaucoup de phénomènes climatologiques intéressants. La brise de vallée en est un exemple. Dans l'hémisphère nord elle active sur les versants exposés au sud (au nord dans l'hémisphère Sud). Le réchauffement des versants et de l'air avoisinant font diminuer la densité de l'air, alors ce dernier commence à s'élever vers le sommet de la montagne, produisant ce que l'on appelle une « brise montante » figure (I.3.c). La nuit, le phénomène s'inverse et une « brise descendante se produit » figure (I.3.d). Comme exemples de vents locaux, le Mistral qui pénètre dans la vallée du Rhône pour s'étendre ensuite vers la mer Méditerranée, et le Sirocco soufflant du Sud de Sahara vers la Méditerranée. [5]

### 3.3. Les vents de surfaces

Les vents sont moins forts en surface qu'en altitude tout ça est résulté par l'influence de la rugosité de terrain les obstacles naturels ou artificiels. Les vents de surface présentent le plus grand intérêt pour l'énergie éolienne [3].

## 4. CLASSIFICATION DES VENTS [6]

Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses. L'échelle de Beaufort est une échelle de mesure empirique, comportant 13 degrés (de 0 à 12), de la vitesse moyenne du vent. Initialement, le degré Beaufort correspond à un état de la mer associé à une « fourchette » de la vitesse moyenne du vent. Même si, de nos jours, cette vitesse peut être mesurée avec une bonne précision à l'aide d'un anémomètre, il reste commode, en mer, d'estimer cette vitesse par la seule observation des effets du vent sur la surface de la mer. Le Tableau (I-1) donne la classification des vents avec l'échelle de Beaufort qui décrit les différentes natures du vent en fonction de leurs vitesses.

Tableau I-1. L'échelle de Beaufort

Le degré Beaufort	Description de vent	Vitesse de vent (km/h)
0	Calme	<1
1	Très légère brise	1 - 5
2	Légère brise	6 - 11
3	Petite Brise	12 - 19
4	Jolie brise	20 - 28
5	Bonne brise	29 - 38
6	Vent frais	39 - 49
7	Grand frais	50 - 61
8	Coup de vent	62 - 74
9	Fort coup de vent	75 - 88
10	Tempête	89 - 102
11	Violente tempête	103 - 117
12	Ouragan	>118

## 5. MESURE DES PARAMETRES DU VENT

La mesure directe du vent se fait dans des stations météorologiques, où deux grandeurs variables par rapport au temps servent à la caractériser : sa vitesse et sa direction. La direction du vent est toujours donnée par la direction d'origine. Un vent d'ouest est un vent qui souffle de l'ouest, un vent du nord est un vent qui souffle du nord. Son indication est donnée en utilisant des girouettes. La vitesse vent mesurée peut être exprimée par différentes unités: Mètre par seconde (m/s), Kilomètre par heure (km/h) où Nœud, dont il existe entre ces diverses unités la relation suivante :  $1\text{m/s} = 3,6\text{km/h} = 1,94\text{noeud}$ . [2/3]

### 5.1.La girouette

La girouette est un instrument qui nous indique l'origine du vent (la direction de vent). C'est un pointeur (une flèche, un coq etc....) qui est monté sur un axe rotatif. Le pointeur peut tourner librement autour de son axe et s'aligne donc parallèlement au vent. C'est la partie la plus mince du pointeur (la pointe de la flèche, le bec du coq etc.) qui nous indique la provenance du vent.

Unités de mesure : Les points cardinaux ou les degrés d'orientation par rapport au nord géographique



Figure I-3. Girouette

### 5.2. La manche à air (manche à vent)

La manche à air est un instrument qui nous indique l'origine du vent et nous donne aussi une approximation de la vitesse du vent. C'est un tube de toile souple fermé à l'une des extrémités que l'on appelle manchon et fixé à un mât. Le vent s'engouffre par l'ouverture et soulève le manchon. Il y a toujours au moins trois bandes rouges et deux bandes blanches qui s'alternent. Ces bandes nous permettent une approximation de la vitesse du vent. Chaque bande correspond à une vitesse de 5 nœuds (environ 9 km/h). Alors quand il y a cinq bandes du tube de toile complètement à l'horizontal on peut dire qu'il y a un vent d'au moins 25 nœuds (environ 45 km/h). Le tube de toile peut aussi pivoter sur son axe alors il nous permet de connaître la direction du vent. Le manchon pointe vers où le vent se dirige [7/3].

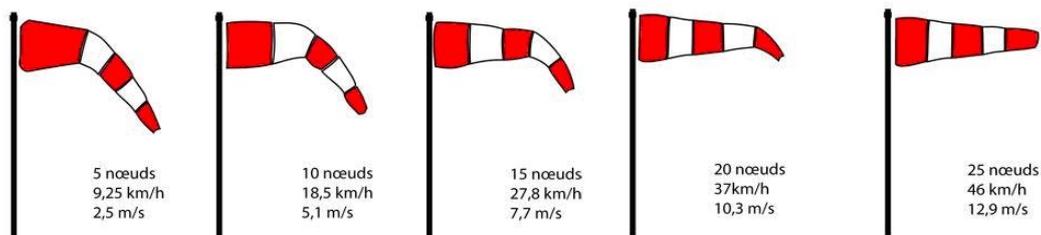
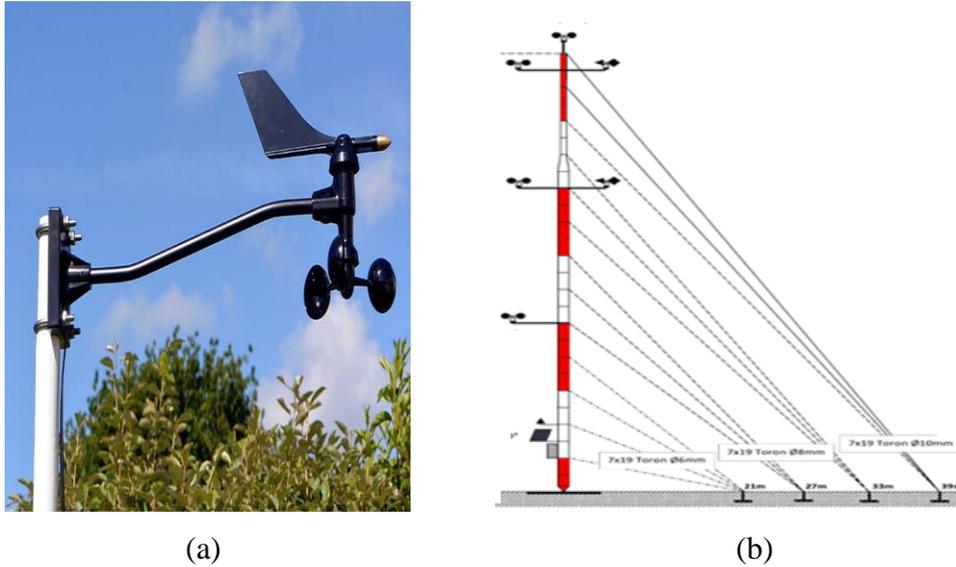


Figure I-4. Manche à air

### 5.3. Anémomètre

A l'heure actuelle, la méthode la plus répandue est l'utilisation d'un mât de la taille souhaitée sur lequel sont positionnés un ou plusieurs anémomètres. Un anémomètre est un instrument qui nous indique la vitesse du vent. Il se compose en général de trois demi-sphères vides orientées dans le même sens, disposées à 120 degrés, d'un dispositif de compteur de tours et d'un appareil d'enregistrement de données électronique. De plus, la fonction première de l'anémomètre est

associée une seconde fonction qui est la mesure de la direction du vent grâce à la girouette associée. D'où la dénomination (Anémomètre Girouette) [8/3].



**Figure I-5.** (a) Ensemble Anémomètre Girouette - (b) Mât de mesure avec Anémomètres et Girouettes

Les avantages de cet anémomètre sont sa simplicité et l'absence de limitation dans la gamme de vitesse du vent mesurée. Les données sont enregistrées et stockées pendant plusieurs mois ou années. Ces données permettent ensuite de déterminer les fonctions de densité de probabilité de la vitesse du vent.

## 6. STRUCTURE VERTICALE DE L'ATMOSPHERE [9/10]

L'atmosphère est la couche d'air qui entoure la Terre. C'est une enveloppe de gaz et de poussières microscopiques. L'atmosphère terrestre est constituée de plusieurs couches de gaz et de particules en suspension, d'environ 500 km d'épaisseur que la Terre retient à sa surface. Sa densité et sa température diminuent avec l'altitude. Seule la couche la plus basse de l'atmosphère, renferme des êtres vivants et se trouve brassée par les courants atmosphériques à l'origine des phénomènes climatiques. L'atmosphère se compose de 5 couches superposées qui sont séparées par 3 zones respectivement: la tropopause, la stratopause et la mésopause, comme présenté sur la Figure (I-6).

### 6.1.La troposphère

C'est la couche la plus proche de la surface de la Terre et concentrant la majeure partie de la masse de l'air et des phénomènes météorologiques. Sa température diminue de 6,5°C par km d'altitude. Son épaisseur moyenne est de 13 km.

## 6.2. La stratosphère

Elle représente la couche qui monte jusqu'à une altitude de 50 km, où la température est proche de celle de la surface terrestre. La température augmente progressivement dans la stratosphère car la couche d'ozone absorbe le rayonnement solaire.

## 6.3. La mésosphère

Cette dernière se situe entre 50 et 85 km d'altitude. La température diminue jusqu'à  $-140^{\circ}\text{C}$ .

## 6.4. La thermosphère

La thermosphère s'étend entre 80 et 600 km d'altitude. Les molécules d'air deviennent très rares et les températures à l'intérieure sont très élevées (jusqu'à  $1200^{\circ}\text{C}$ ).

## 6.5. L'exosphère

L'exosphère s'étend jusqu'à 10 000 km d'altitude, là où s'arrête l'atmosphère et où commence l'espace.

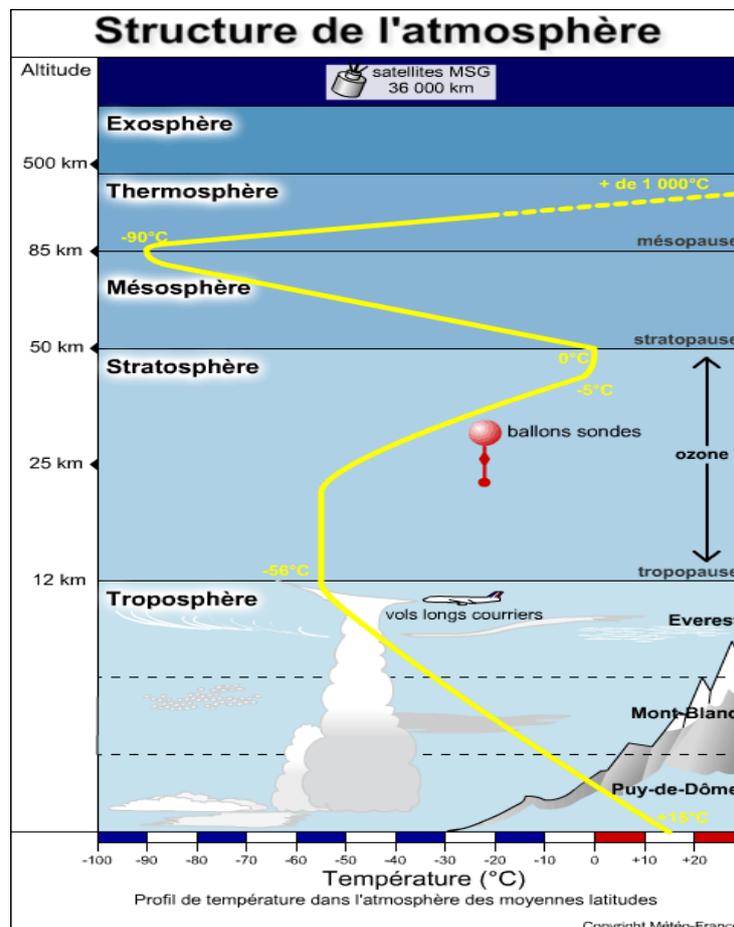


Figure I-6. Structure verticale de l'atmosphère

## 7. LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE

La couche limite atmosphérique CLA est définie comme étant la zone de la troposphère où l'écoulement du fluide est influencé par l'interaction avec la surface terrestre directement. C'est là où les températures subissent le plus, l'influence de l'ensoleillement durant la journée et du refroidissement radiatif durant la nuit, avec les vents sous l'influence du frottement sur la surface.

Dans l'atmosphère située près de la surface terrestre, les variations importantes du vent, de la température et de l'humidité se produisent dans la direction verticale. C'est un lieu d'échanges d'énergie entre la surface et l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau et de quantité de mouvement. Son épaisseur varie de quelques mètres à plusieurs kilomètres en fonction de la vitesse du vent, de la rugosité de surface et de l'ensoleillement local.[9/2/3]

La structure verticale de la couche limite atmosphérique est décomposée en trois sous couche :

### 7.1.La couche d'Ekman

C'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. [11]

### 7.2.La couche de surface

Elle 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. [11]

### 7.3.La sous-couche rugueuse

C'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 instationnaire. Ceci est caractérisé par le paramètre de longueur de rugosité aérodynamique globale  $Z_0$ . Ce paramètre est défini par "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. [12]

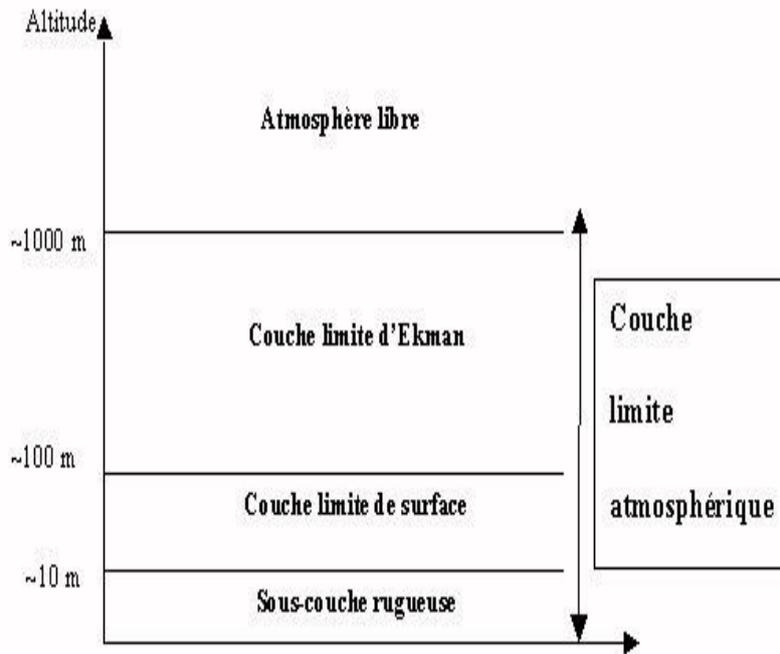


Figure I-7. Structure verticale de la couche limite atmosphère

## 8. MODELISATION MATHÉMATIQUE DE LA DISTRIBUTION DES FREQUENCES DU VENT

### 8.1. Distribution de weibull

Afin d'évaluer le potentiel de l'énergie éolienne d'un site, il est important d'exprimer la distribution de la fréquence de la vitesse du vent. Le modèle le plus utilisé pour caractériser la distribution des vitesses du vent est la distribution de probabilité de Weibull. La fonction de distribution de Weibull est une fonction exponentielle à deux paramètres, un paramètre d'échelle  $c$  (m/s) renseigne sur la moyenne du vent caractéristique du site, et un paramètre de forme  $k$  (sans unité) qui caractérise la dissymétrie de la distribution de fréquence. La distribution de Weibull s'exprime mathématiquement par sa fonction de densité de probabilité  $f(V)$  pour que le vent souffle à une vitesse  $V$  est donnée par (Justus et al, 1978):

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

La Figure I-8 illustre un exemple d'un histogramme de la vitesse du vent, ajusté par la distribution de Weibull avec les valeurs des deux paramètres pour un site donné.

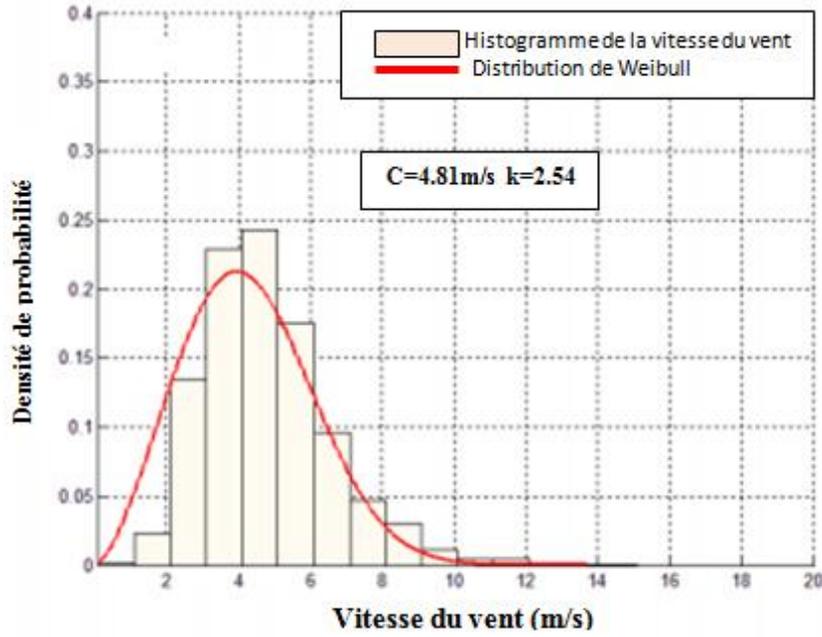


Figure I-8. Histogramme de vitesse du vent ajusté par la distribution de Weibull [18]

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer les coefficients  $k$  et  $c$  de la distribution de Weibull ajustée à des données brutes de la vitesse de vent prises sur une période déterminée. La détermination de ces paramètres permet la connaissance de la distribution des vents pour un site donné. Parmi les méthodes les plus utilisées, on peut retenir : la méthode de l'écart type de la variation des vitesses et leur vitesse moyenne que nous allons définir dans la section suivante.

**8.2.Méthode de la vitesse moyenne et de l'écart type**

La méthode de la vitesse moyenne et de l'écart type appelée aussi la méthode des moments a été proposée par Justus et all [36] Si la vitesse moyenne  $\bar{V}$  et l'écart type  $\sigma$  sont connus, le facteur de forme  $k$  et le facteur d'échelle  $c$  sont déterminés par les équations suivantes [37]:

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{V}}\right)^{-1.086} \quad 1 \leq K \leq 10 \tag{I-2}$$

$$c = \frac{\bar{V}}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad c > 0 \tag{I-3}$$

Avec: 
$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \tag{I-4}$$

$$\sigma = \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2 \right]^{0.5} \quad (\text{I-5})$$

Et  $\Gamma(x)$  la fonction Gamma définie par :

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \exp(-t) t^{x-1} dt \quad (\text{I-6})$$

D'où

$$t = \frac{1}{k} + 1 \quad (\text{I-7})$$

## 9. LA ROSE DES VENTS [3]

Les vents les plus forts soufflent en général d'une direction particulière. Afin de mieux se faire une idée de la distribution des vitesses et des directions du vent, on peut construire une rose des vents à partir des observations météorologiques faites dans une région donnée.

La rose des vents peut être divisée en plusieurs secteurs angulaires. Pour chaque secteur, sont présentés :

- La fréquence du vent, c'est à dire le pourcentage du temps durant lequel le vent souffle dans ce secteur ;
- La vitesse moyenne du vent multiplié par sa fréquence ;
- La puissance disponible dans le vent.

Comme elle donne la répartition du vent pour les différentes directions. La distribution des vitesses et des directions peut-être divisée en 8, 12, 16 ou 32 secteurs qui représentent les différentes directions. Voir Figure (I-9).

Les sections marquées en rouge et en orange sont les plus importantes car l'énergie du vent varie avec le cube de sa vitesse, et dans la Figure (I-9) nous voyons que les directions dominantes sont l'ouest et l'ouest-nord-ouest de la rose. Par ailleurs, cette rose des vents de 16 directions est construite selon une échelle, où chaque cercle présente un pourcentage de 2%; par exemple pour la plus direction prédominante, on trouve un pourcentage d'environ 9%.

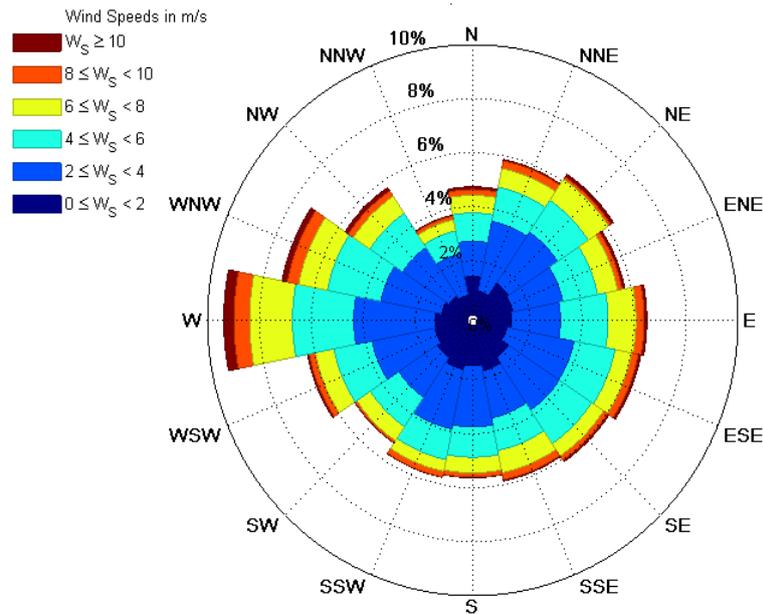


Figure I-9. La rose des vents

## 10. EXTRAPOLATION VERTICALE DE LA VITESSE DU VENT

Pour retrouver la vitesse du vent à un niveau différent du point de mesure, on procède à une extrapolation verticale des données du vent, on distingue généralement deux cas :

- L'extrapolation verticale de la vitesse du vent à court terme, qui passe par l'extrapolation de la mesure de la vitesse du vent quasi instantanée, moyennée sur une minute ou une heure
- L'extrapolation verticale de la vitesse du vent à long terme est liée aux résultats de l'étude statistique en l'occurrence par l'extrapolation des paramètres de Weibull. Toutefois, ces expressions sont établies à partir de l'analyse du profil vertical du vent.

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 étudièrent la variation de la vitesse du vent ainsi que les paramètres de Weibull en 1976. Nous allons citer dans ce qui suit les différents modèles proposés en la littérature. Toutefois, ces expressions sont établies à partir de l'analyse du profil vertical du vent [10].

### 10.1. Modèle de Mikhail et Justus [13]

La mesure de la vitesse du vent est effectuée généralement à des hauteurs manométriques égales à 10 mètres du sol. Toutefois, il sera plus intéressant de pouvoir les produire à des altitudes dignes d'intérêt telles que les hauteurs des éoliennes. Plusieurs auteurs ont proposé des formules

empiriques permettant l'extrapolation verticale de la vitesse du vent. La plus connue est la loi de la puissance de Mikhaïel et Justus. Ayant montré que pour des hauteurs inférieures à 100 m, l'effet de rugosité du sol ne peut être négligé lors de l'extrapolation de la vitesse du vent, Mikhaïel et Justus. Ont développé une seconde formule empirique, nommée la loi de puissance modifiée.

Soit une vitesse  $V_1$  extrapolée d'une altitude  $Z_1$  vers une altitude  $Z_2$ , suivant la formule suivante :

$$V_2 = V_1 \left[ \frac{Z_2}{Z_1} \right]^{\alpha_1} \quad (\text{I.8})$$

Où l'exposant  $\alpha_1$  est donné par la relation suivante :

$$\alpha_1 = \frac{1}{\ln \frac{Z_G}{Z_0}} - \left[ \frac{0.0881}{1 - 0.0881 * \ln \left( \frac{Z_1}{10} \right)} \right] \ln \left( \frac{V_1}{V_0} \right) \quad (\text{I.9})$$

Avec :

$$Z_G = \exp[\ln(Z_1) + \ln(Z_2)]/2 \quad (\text{I.10})$$

### 10.2. Modèle de Spera et Richards [13]

D'après l'étude de Spera et Richards, le coefficient peut être calculé en fonction de la rugosité du terrain et de la vitesse de référence comme suit :

$$\alpha = \left( \frac{Z_0}{Z_1} \right)^{0.2} [1 - 0.55 * \log (V_1)] \quad (\text{I.11})$$

Ce modèle a été dérivé d'un certain nombre d'observations faites à travers plusieurs endroits des Etats Unis. De plus il fut utilisé au centre de recherche Lewis de la Nasa pour concevoir des éoliennes à grande échelle.

### 10.3. Modèle de Mikhail [13]

En 1985 Mikhail a repris le modèle de modifié et a proposé un modèle qui prend en considération des conditions de stabilité moyenne. Le modèle est basé sur le modèle de la loi de puissance et le modèle de similitude où le coefficient modifié est donnée par :

$$\alpha_{m_2} = \alpha_m + b * \ln (V_1) \quad (I-12)$$

Avec :

$$\alpha_m = \frac{1}{\ln\left(\frac{Z_G}{Z_0}\right)} + \left[ \frac{0.088}{1-0.088*\ln\left(\frac{Z_1}{10}\right)} \right] \quad (I-13)$$

L'expression du coefficient modifié devient ainsi :

$$\alpha_{m_2} = \frac{1}{\ln\left(\frac{Z_G}{Z_0}\right)} + \left[ \frac{0.088-0.088*\ln(V_1)}{1-0.088*\ln\left(\frac{Z_1}{10}\right)} \right] \quad (I-14)$$

#### 10.4. Loi de puissance [13]

Pour tenir compte des différentes valeurs de la rugosité du terrain, Knidiri et Laouina lors de l'établissement de l'atlas éolien du Maroc en 1986, ont proposé d'écrire l'expression sous la forme suivante :

$$\alpha = \frac{x-0.088*\ln(V_1)}{1-0.088*\ln\left(\frac{Z_1}{10}\right)} \quad (I-15)$$

Où le coefficient  $x$  varie en fonction de la classe de rugosité comme suit :

- $x=0.25$  pour  $0.005 \geq Z_0 > 0m$
- $x=0.31$  pour  $0.05 \geq Z_0 > 0.005m$
- $x=0.37$  pour  $0.5 \geq Z_0 > 0.05m$
- $x=0.48$  pour  $4 \geq Z_0 > 0.5m$

### 11. EXTRAPOLATION VERTICALE DES PARAMETRES DE WEIBULL

L'extrapolation verticale des données de vent à long terme, comprenant entre autres l'extrapolation verticale des deux paramètres de Weibull,  $c$  et  $k$  qui sont respectivement facteur d'échelle en m/s et le facteur de forme (sans dimension) et qui se fait suivant le modèle de la loi de puissance. Ainsi, pour des valeurs de  $c_1$  et  $k_1$  calculées à hauteur  $Z_1$ , les valeurs  $c_2$  et  $k_2$  à une autre hauteur  $Z_2$ . En 1976, Justus et Mikhail ont proposé, pour une référence d'altitude initiale égale à 10m, les formules d'extrapolation suivantes: [10/2]

**11.1. Modèle d'extrapolation de Justus et Mikhail1976**

$$\frac{K_2}{K_1} = \left[ \frac{1-0.0881 \cdot \ln\left(\frac{Z_1}{10}\right)}{1-0.0881 \ln\left(\frac{Z_2}{10}\right)} \right] \quad (\text{I.16})$$

Et

$$\frac{c_2}{c_1} = \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^{\alpha_1} \quad (\text{I.17})$$

Avec

$$\alpha_1 = \left[ \frac{0.37-0.0881 \ln(c_1)}{1-0.0881 \ln\left(\frac{Z_1}{10}\right)} \right] \quad (\text{I.18})$$

**11.2. Modèle modifié d'extrapolation de Justus1978**

$$\frac{K_2}{K_1} = \left[ \frac{1}{1-0.0881 \ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)} \right] \quad (\text{I.19})$$

Et

$$\frac{c_2}{c_1} = \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^{\alpha_2} \quad (\text{I.20})$$

Avec

$$\alpha_2 = \frac{1}{\ln\left(\frac{Z_g}{Z_0}\right)} - 0.0881 * \ln\left(\frac{c_1}{6}\right) \quad (\text{I.21})$$

**11.3. Modèle modifié d'extrapolation de Mikhaïel1985**

Pour une extrapolation à partir d'un niveau quelconque, Mikhail en 1985, reprend les expressions d'extrapolation des paramètres proposés en 1976, en modifiant l'exposant  $\alpha$  tel que:

$$\alpha = \frac{1}{\ln\left(\frac{Z_g}{Z_0}\right)} + \frac{0.0881(1-\ln c_1)}{1-0.0881 \cdot \ln\left(\frac{Z_1}{10}\right)} \quad (\text{I.22})$$

**11.4. Modèle d’extrapolation de Spéra**

En 1985, expose la formule de Spéra et Richardson qui introduit le paramètre de rugosité du sol  $Z_0$ , en proposant une extrapolation du paramètre de forme qui se présente sous la forme :

$$K_2 = K_1 \frac{1 - \alpha_0 * \frac{\ln(\frac{Z_1}{Z_r})}{\ln V_h}}{1 - \alpha_0 * \frac{\ln(\frac{Z_2}{Z_r})}{\ln V_h}} \tag{I.23}$$

Avec 
$$\alpha_0 = \left(\frac{Z_0}{Z_r}\right)^{0.2} \tag{I.24}$$

$Z_r$  étant la hauteur de référence égale à 10m et  $V_h$  la vitesse du vent homogène égal à  $V_l$ . Par ailleurs, l’exposant  $\alpha$  de l’extrapolation du facteur d’échelle est donné par :

$$\alpha = \alpha_0 \frac{1 - \frac{\ln c_1}{\ln V_h}}{1 - \frac{\alpha_0 * \ln(\frac{Z_1}{Z_2})}{\ln V_h}} \tag{I.25}$$

**12. ENERGIE EOLIENNE**

**12.1. Densité de puissance [3]**

La densité de puissance de l’énergie éolienne est la caractéristique la plus importante du vent. Elle représente la quantité d’énergie produite par le vent. La puissance du vent à l’entrée d’une voilure est donnée par la relation suivante :

$$P_V = \frac{1}{2} * \rho * S * V^3 \tag{I.26}$$

Par unité de surface on obtient, la densité de puissance d’un site qui est donnée par la relation suivante :

$$P_V = \frac{1}{2} * \rho * V^3 \tag{I.27}$$

### 13. POTENTIEL EOLIEN EN ALGERIE [14/5]

L'estimation de l'énergie éolienne disponible sur un site donné est sans doute l'étape la plus importante lorsqu'il s'agit d'envisager l'implantation d'un système d'exploitation de cette énergie. Plusieurs travaux de recherche portant sur l'étude de gisement éolien et l'établissement de l'atlas éolien algérien sont menés, les premiers travaux en Algérie datent de 1984 dont on peut distinguer trois approches. La première est l'établissement des atlas et des cartes du vent de l'Algérie. Dans ce cadre on peut citer les travaux de Saïd et al [15]. en 1984, suivis par Benssad, qui a élaboré, en 1985, une expertise sur la politique de l'énergie éolienne en Algérie en se basant sur l'analyse du potentiel de deux sites notamment Alger et Oran [16]. Ensuite un atlas vent de l'Algérie a été minutieusement réalisé en 1990 par Hammouche en se basant sur les données météorologiques enregistrées entre 1977 et 1988 de 37 stations de l'ONM [17]. Afin de permettre une vue globale de la répartition géographique des ressources éoliennes, l'atlas éolien de l'Algérie a été cartographié en 2000 par Kasbadji Merzouk [18]. Cette première carte a permis de localiser des régions intéressantes en termes d'énergie éolienne telles que les régions d'Adrar et de Tiaret.

La deuxième est l'évaluation du potentiel éolien et le dimensionnement des systèmes de conversion de l'énergie éolienne dont des études techniques et technico-économiques ont été réalisées. Dans ce sujet, on peut citer les études de Himri et al sur l'évaluation du potentiel éolien dans les régions Sud et Sud-Ouest [19/20], les travaux de Koussa et al pour la région d'Adrar [21] et les travaux de Helal et al pour la région de Beni-Saf [22] .

La troisième approche est la modélisation de la vitesse du vent. Dans ce cadre, trois études ont été réalisées. Une modélisation de la vitesse du vent par des processus Markovien a été réalisée par Ettoumi et al [23]. La deuxième a pris comme sujet la modélisation du profil vertical du vent en Algérie réalisé par Kasbadji Merzouk en 2006 [24]. Finalement une étude détaillée du comportement stochastique du vent a été menée par Chellali en 2011 [25] et en 2013 par Boudia [26]. En 2017 un nouvel atlas a été établi par Daaou et Haddouche [27] en utilisant des bases de données de vitesses moyennes tri-horaires de 74 stations météorologiques de l'ONM.

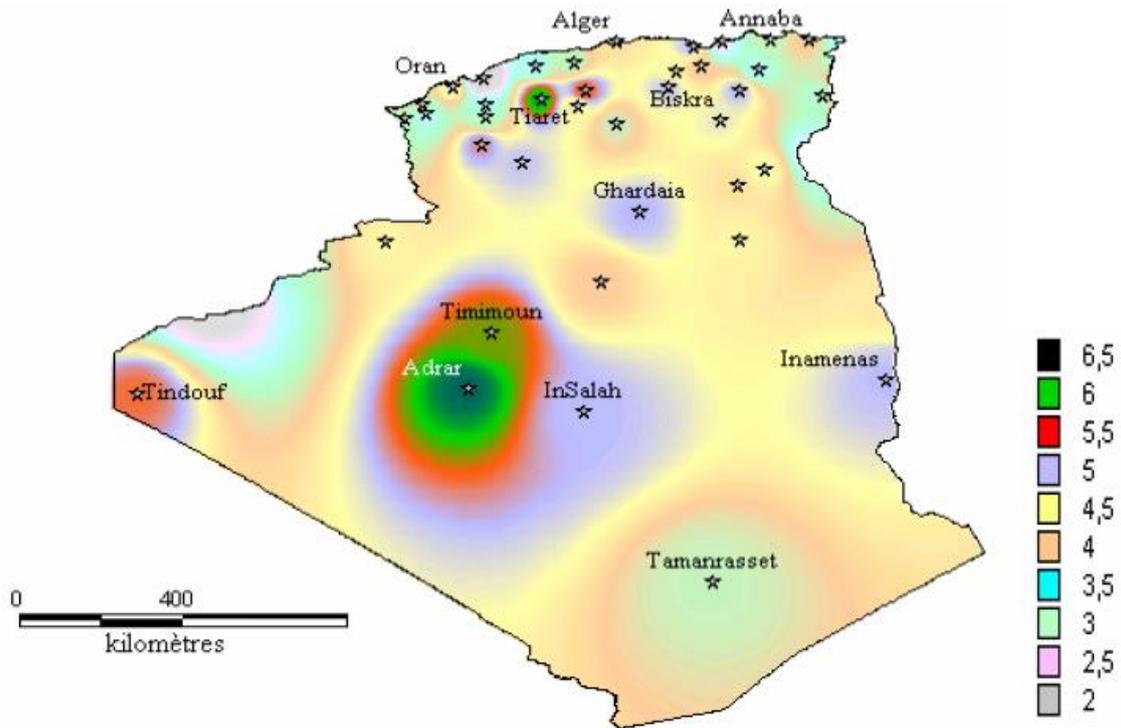


Figure I-10. Carte des vents de l'Algérie à 10 m du sol.

#### 14. CONCLUSION

L'étude bibliographique de ce premier chapitre a permis de passer en revue un grand nombre de compréhensions sur le vent :

- Le vent en tant que phénomène atmosphérique évolue en fonction des différentes parties qui constituent la couche limite atmosphérique.
- Deux données sont intéressantes dans la connaissance du vent : sa vitesse et sa direction. Pour les connaître en un endroit donné, on peut soit effectuer des mesures physiquement, soit les estimer en les calculant numériquement grâce à des modèles mathématiques.
- Pour la connaissance de la distribution de la vitesse du vent. Il a été question de définir la distribution de Weibull avec ses deux paramètres à savoir les différentes méthodes présentes dans la littérature pour extrapoler verticalement la vitesse du vent et les deux paramètres de Weibull.

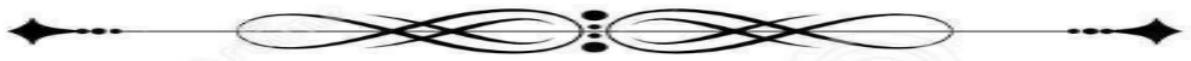
Ce chapitre va nous permettre dans un premier temps d'avoir une bonne connaissance des phénomènes régissant le vent et dans une deuxième étape de prendre en charge le problème posé à savoir l'optimisation de la rentabilité de l'utilisation de l'énergie éolienne.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

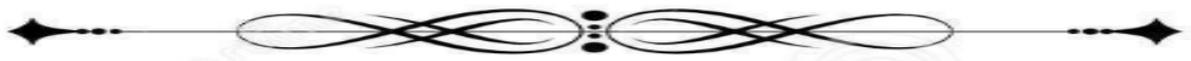
- [1] : Khalfouni Hayet, Seddiki Ferroudja, « Étude et simulation d'une installation éolienne ». Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri à Tizi-Ouzou. (2018)
- [2] : BOUDIA Sidi Mohammed. « Optimisation de l'évaluation temporelle du gisement énergétique éolien par simulation numérique et contribution a la réactualisation de l'atlas des vents en Algérie ». Thèse doctorat, Université de Tlemcen Abou-Bakr Blekaïd. (2013)
- [3] : Achouri Mahdia, Khelfa Sara, « évaluation du gisement éolien dans deux régions de l'est de l'Algérie, Jijel et Tebessa ». Mémoire de master, Université m'hamed Bougara, Boumerdès. (2017)
- [4] : DAAOU NEDJARI Hafida, « Etude Numérique du Gisement Eolien - Modélisation de la Turbulence Autour d'un Obstacle - Application à un Site Algérien ». Mémoire de magister, Université Houari Boumediene, Alger. (2010)
- [5] : MEZIANE Fares, « Étude et dimensionnement d'un système éolien-électrolyseur-pile à combustible pour l'alimentation électrique d'un site isolé ». Mémoire de magister, Université M'hamed Bougara, Boumerdes. (2011)
- [6]: <http://meteo-villabe.amys.fr/index.php/infos-meteo/21-classification-des-vents-et-des-ouragans>. Consulté le 13/02/2021.
- [7] : TOUAMA Nour el Houda, «Évaluation du gisement éolien en algérien à l'aide du logiciel retscreen». Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila. (2018)
- [8] :M.LAHBIB, M.BILLAH, « étude de performance d'une éolienne dans un milieu saharien en particulier station éolienne de kabertene ». Mémoire de master, Université Ahmed Draya, Adrar. (2016)
- [9] : Saïdou Madougou, «Étude du potentiel éolien du jet nocturne dans la zone sahélienne à partir des observations de radars profileurs de vent». Thèse doctorat, Université de Toulouse. (2010)
- [10] : ALLAL Fatima. « Étude des modèles d'évaluation verticale de la vitesse du vent ». Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila. (2018)

- [11] : Nicolas Fichaux, « Évaluation du potentiel éolien offshore et imagerie satellitale ». Thèse doctorat, École nationale supérieure des mines de paris. (2003)
- [12] : M. F. Benatallah, « Étude du potentiel éolien sur quelques sites algériens ». Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas, Sétif.
- [13] : M.HADJJI, A.BENFEKIR, L.ZOUBIDA, « étude comparative entre les différentes méthodes extrapolations verticales de la vitesse du vent de la loi à coefficient de puissance avec le langage python ». International journal of scientific research & engineering technology (ijset) vol.11pp.32-37, Université d'oran-2 Mohamed ben Ahmed.
- [14] : DAAOU NEDJARI Hafida, « L'énergie éolienne en Algérie ». Division Energie Eolienne – CDER, Bulletin des Energies Renouvelables N°46-2018.
- [15]: M.Said et A. Ibrahim, « Energy in the Arab World ». Energy, N° 9-3, pp.217-38, 1984.
- [16]: H.Bensaid , « The Algerian Program on Wind Energy ». Proceeding of WEAC,pp. 21-27, Oxford, 1985.
- [17]: R.Hammouche , « Atlas Vent de l'Algérie/ONM ». Office des Publications Universitaires (OPU), Alger 1990.
- [18]: N. kasbadji Merzouk, « Wind energy potential in Algeria ». Renewable energy 21 (2000) 553-562.
- [19]: Y. Himri, S. Himri, A. Boudghene Stambouli, « Wind power resource in the south-western region of Algeria ». Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 554–556.
- [20]: Y. Himri , A. Boudghene Stambouli , B. Draoui , S. Himri , « Review of wind energy use in Algeria ». Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 910–914.
- [21]: D. Saheb-Koussa , M. Haddadi, M. Belhamel, « Economic and technical study of a hybrid system (wind–photovoltaic–diesel) for rural electrification in Algeria ». Applied Energy 86 (2009) 1024–1030.
- [22]: M. A. Tabet Helal et N. Ghellai, « Le Gisement Eolien à Beni-Saf Région Côtière de l'Ouest Algérien ». Rev. Energ. Ren.: ICPWE (2003)143-146.
- [23]: F. Youcef Ettoumi, H. Sauvageot et A.-E.-H. Adane, « Statistical bivariate modelling of wind using first-order Markov chain and Weibull distribution ». Renewable Energy 28 (2003) 1787–1802.

- [24]: N. Kasbadji Merzouk, « Evaluation du gisement énergétique éolien contribution a la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie ». Thèse, L'université Abou bekr Belkaid Tlemcen. (2006)
- [25]: F.Chellali, A. Khellaf, A.Belouchrani, « Etude du comportement stochastique du vent en Algérie », ENP Alger (2011).
- [26] : S. M .Boudia, S. Adjiri, « Analyse technico-économique des systèmes de conversion d'énergie éolienne-région de Sétif ». Revue des Energies Renouvelables SIENR 14 Ghardaïa (2014) 115 – 120



**CHAPITRE II**  
**LES GÉNÉRATEURS ÉOLIENS**



## **CHAPITRE II**

# **LES GÉNÉRATEURS ÉOLIENS**

====+====+====+====+====+====+====+====+====+====

### **1. INTRODUCTION**

Ces dernières années, l'intérêt dans l'utilisation des énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux.

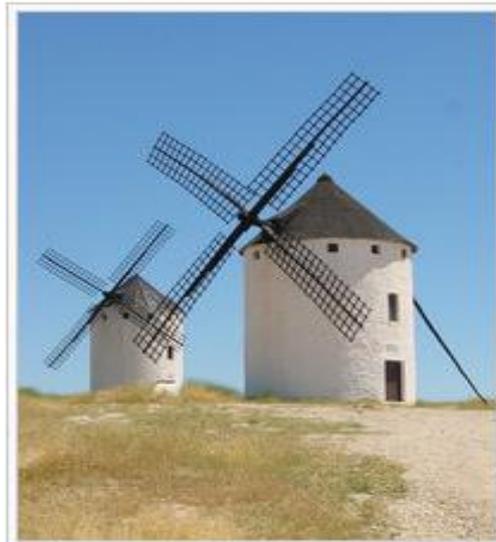
Une énergie renouvelable est une énergie qui se renouvelle pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique). Les sources renouvelables d'énergie, permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique, ne pouvant ainsi satisfaire aucun besoin même minime et améliorer ses conditions de vie.

Parmi ces sources d'énergie, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes mais pour palier à l'accroissement de la demande de plus en plus galopante. [1]

Ainsi dans ce qui suit nous allons énoncer un état de l'art sur les générateurs éoliens.

### **2. HISTORIQUE**

Depuis des siècles, l'homme utilise l'énergie du vent pour faire avancer des bateaux, moudre du grain ou pomper de l'eau. Le moulin à vent, l'ancêtre de l'éolienne permettait de remplacer le travail des hommes et des animaux. La Figure (II-1) présente le moulin à vent. [2]

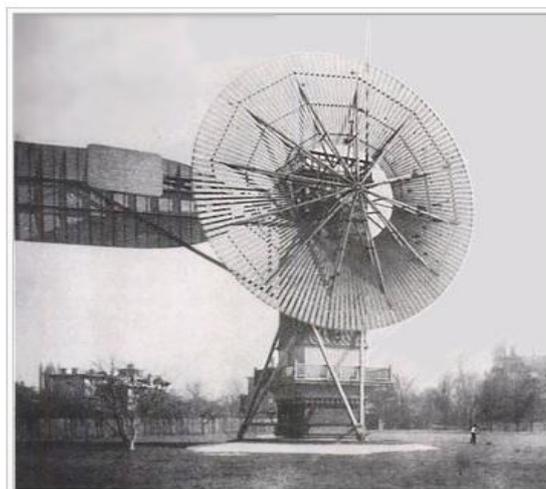


**Figure II-1.** Moulin à vent

En moyen âge, les Perses furent les premiers à utiliser des éoliennes très simples à axe vertical pour irriguer leurs cultures et aider au meulage du grain. Au 16eme siècle, elles sont utilisées pour pomper de l'eau et couper du bois. [2]

La première éolienne destinée à produire de l'électricité (voir figure II-2) fut construite par Charles F. Brush en 1887. Composée de 144 pâles et d'un diamètre de 17 m, elle ne produisait que 12 kW.

Le météorologiste danois Poule La Cour qui voyait dans l'électricité une des techniques qui auraient le plus d'importance dans l'avenir, avait mené des recherches pour améliorer l'efficacité des moulins à vent et améliorer l'invention de Charles F.Brush. Il conclut ainsi qu'une éolienne à rotation rapide (voir Figure 1-2) ayant un nombre de pales limité produisait plus d'électricité. Ceci a été possible grâce à ses recherches dans une soufflerie aérodynamique. [3]



**Figure II-2.** Première éolienne crée par Charles et Brush



Figure II-3. Éolienne de Poule La Cour

En Algérie, la première éolienne a été installée à Adrar en 1953. A l'époque, cette éolienne faisait partie des trois premières grandes éoliennes dans le monde et la 1ère installée en Afrique avec une capacité de pompage de 50 litres par seconde (à trois hélices avec une forme aérodynamique de 15 m de diamètre). Cette éolienne se trouve hors d'usage depuis 1969.

Entre temps, plusieurs pompes éoliennes multi-pales, ont été mises en place dans les zones isolées pour l'intérêt des agriculteurs et des éleveurs, notamment à Djelfa, M'sila, Laghouat et Ghardaïa. La plupart de ces pompes éoliennes ont été fabriquées en Algérie par deux usines situées au niveau de Laghouat et El-Berouaguia. [3]

### 3. DEFINITION D'UN GENERATEUR EOLIEN

Un générateur éolien ou aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure II.4). [4]

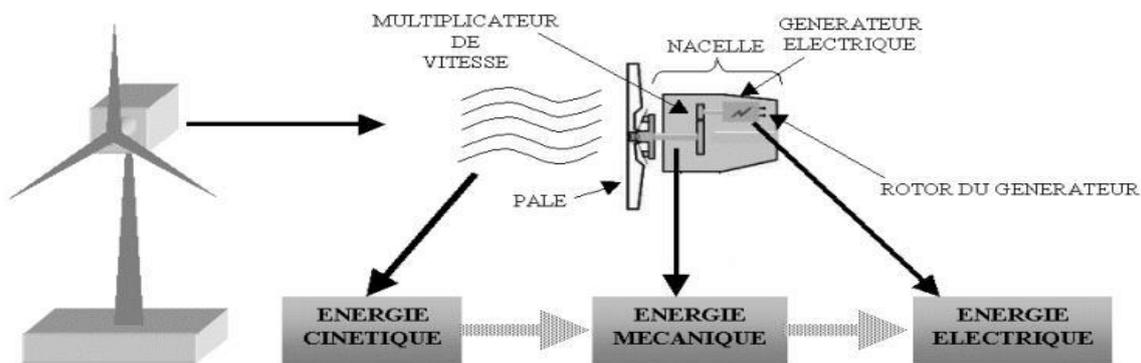


Figure II-4. Conversion de l'énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible).

Les installations peuvent être réalisées sur terre (fermes éoliennes on shore) mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes off shore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores. [4]

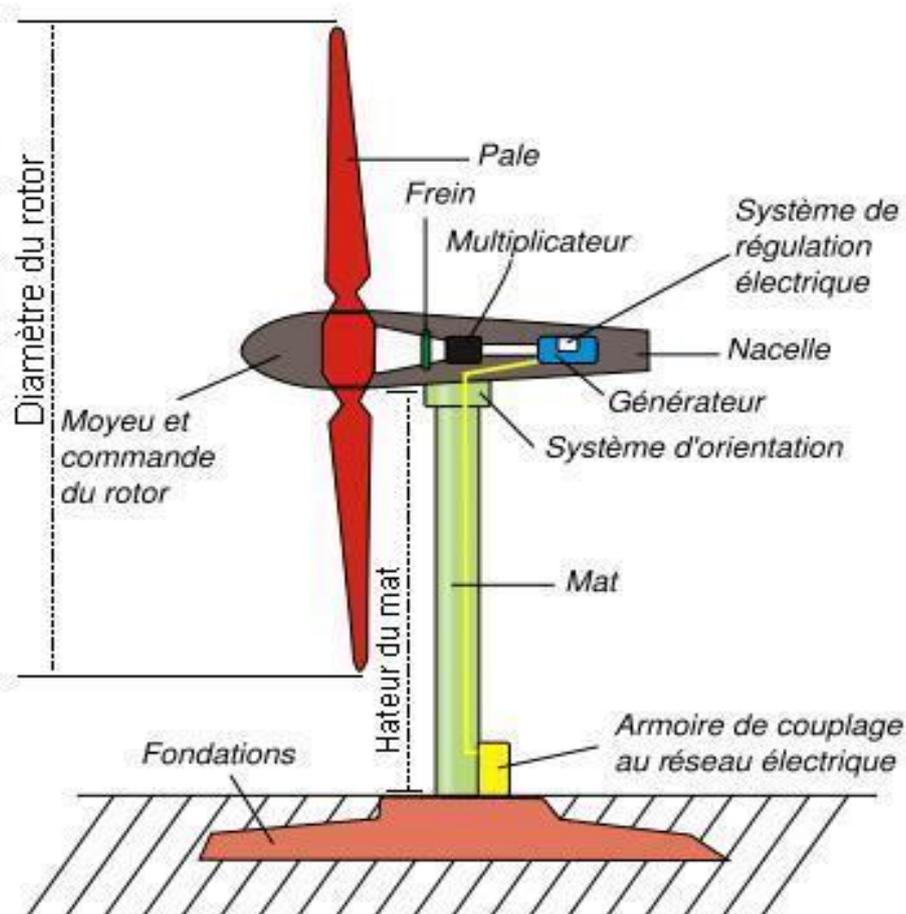
#### **4. PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE**

L'éolienne se compose d'un mât, d'une nacelle, d'un rotor. La fabrication de ces différents éléments est d'une technologie avancée, ce qui les rend par conséquent onéreux. Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux:

- **Le mât ou la tour :** C'est un élément porteur, doit soutenir le poids de l'appareil et résister aux vibrations pendant toute sa durée de vie. Elle est généralement construite sous forme d'un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation des puissances nominales des éoliennes, le mât devient de plus en plus haut en générale de 10 à 100m de hauteur pour éviter les perturbations près du sol mais aussi permettre l'utilisation de pales plus longues. Il est fixé sur une fondation implante dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne, la tour a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle. [5]
- **La nacelle :** Est une structure en acier ou en fonte montée au sommet du mât ; regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent).

A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne. [4]

- **Le rotor ou l'hélice :** Est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. C'est un ensemble constitué des pales montées sur un moyeu tournant, cela forme la partie mécanique la plus importante de l'éolienne. Les pales sont en réalité le véritable capteur de l'énergie présente dans le vent. Elles doivent être légères, solides et durables, elles sont construites habituellement en matériaux composites (polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone). Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle). Le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. [2/6/4]



**Figure II-5.** Structure d'une éolienne à axe horizontal

## 5. LES DIFFERENTS TYPES D'ÉOLIENNES

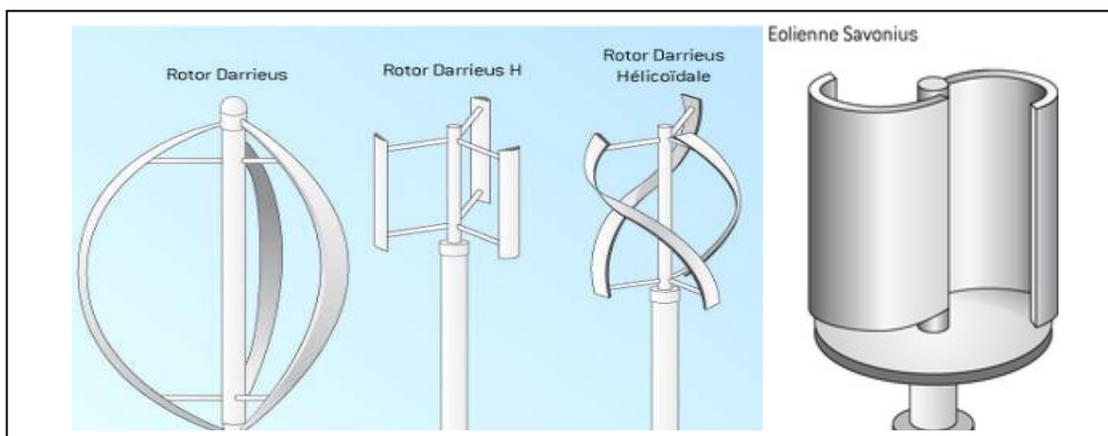
### 5.1. Selon la conception mécanique

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir la turbine éolienne. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical et à axe horizontal :

#### 5.1.1. Eolienne à axe verticale

Ce type d'éoliennes est très peu répandu, les éoliennes à axe vertical ont été les premières à être utilisées pour la production d'électricité. Elle présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder tous les organes de commande, le multiplicateur et le générateur au niveau du sol, donc facilement accessibles, ce que facilite les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs ont pratiquement abandonné ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit des éoliennes à axe horizontal. De plus la présence du capteur d'énergie près du sol exposé aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. En ce qui concerne leur implantation, elles occupent une surface très importante ce qui représente un grand inconvénient surtout dans les sites agricoles. Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de savonius et le rotor de Darrieus. [7]

- **Rotor de Savonius** : Du nom de son inventeur (breveté en 1925) le rotor de savonius dont le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle, qui formule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure. [7]
- **Rotor de Darrieus** : Inventé par l'académicien français Darrieus au cours des années 1925-1935. Ce type d'éolienne est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil. La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif. [2]



**Figure II-6.** Types d'éoliennes à axe verticale

### 5.1.2. Eoliennes à axe horizontal

Beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pâles, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Outre l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles. Leurs nuisances sonores sont de plus relativement faibles. Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne.

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité.[4]



**Figure II-7.** Eoliennes à axe horizontal

Il existe deux types de configuration d'éolienne à axe horizontal (Figure II-8) : [2]

- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pâles en partant de la nacelle. Le rotor est flexible et auto orientable. L'effet de masque est plus important dans ce type de configuration.
  
- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pâles en direction de la nacelle. Les pâles sont rigides pour éviter tout risque de collision avec la tour, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif spécifique. La disposition turbine en amont est la plus utilisée pour les grandes puissances du fait que la stabilité est meilleure, et les efforts de manœuvre sont moins importants.

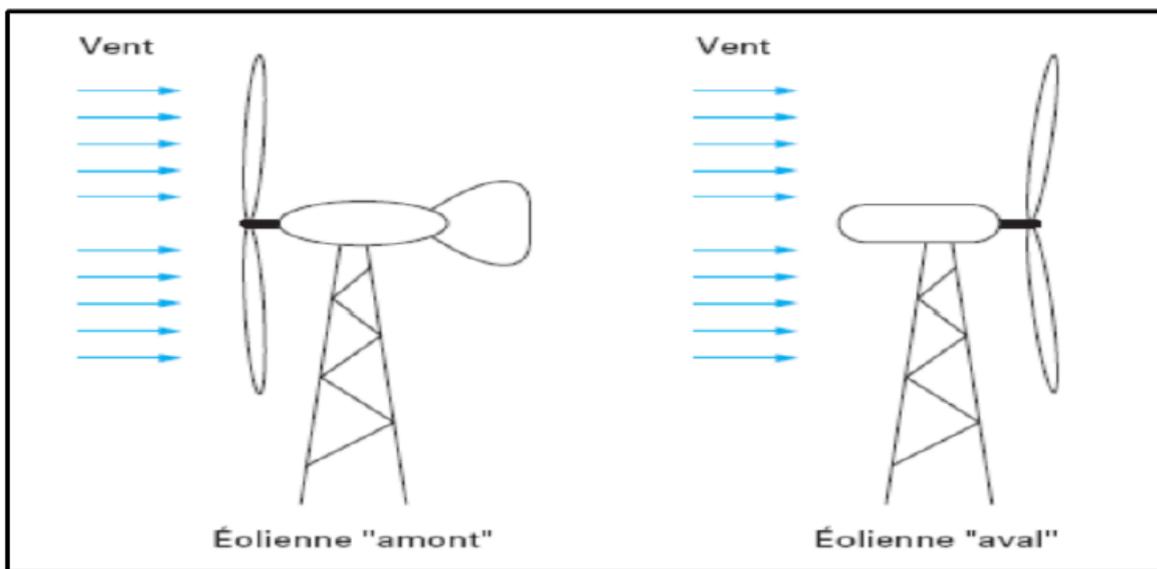


Figure II-8. Types d'éoliennes à axe horizontal

5.2.Selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [6]

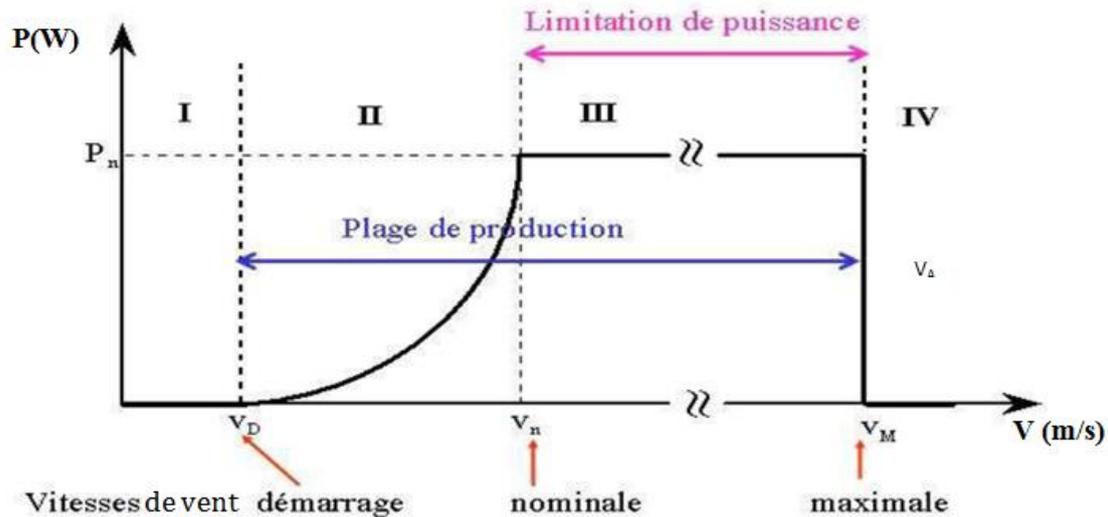
Le tableau (II.1) propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice.

Tableau II-1. Classification des turbines éoliennes

Echelle	Diamètre des pales	Valeurs de puissance
Petite puissance	<12 m	< 40 kW
Moyenne puissance	12 à 45 m	40 kW à 1 MW
Grande puissance	> 46 m	> 1 MW

## 6. COURBE CARACTERISTIQUES DE L'ÉOLIEN [3/8/9]

Un aérogénérateur est caractérisé par sa courbe de puissance en fonction de la vitesse du vent, généralement fournie par les constructeurs. La figure II.9 montre les différentes vitesses et puissance récupérable pour l'exploitation d'une éolienne.



**Figure II-9.** Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.

La courbe montre que la puissance énergétique récupérable par une éolienne varie très rapidement avec la vitesse du vent.

$P_n$  : la puissance nominale

$V_D$  : la vitesse de démarrage où l'éolienne commence à produire l'énergie. En deçà de ce seuil l'éolienne ne produit aucune énergie.

$V_n$  : la vitesse moyenne nominale à partir de laquelle, l'éolienne atteint son seuil maximal de production d'énergie. Ce seuil reste constant jusqu'à la vitesse d'arrêt.

$V_M$  : la vitesse d'arrêt ou de coupure à partir de laquelle l'éolienne arrête de produire de l'énergie pour cause d'arrêt automatique des pales par sécurité.

La courbe de puissance d'un aérogénérateur présente quatre zones:

- la zone I : où  $P = 0$  (la turbine ne fonctionne pas),
- la zone II : le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent.
- la zone III : où la vitesse de rotation des pales est maintenue constante et  $P = P_n$ ,
- la zone IV : dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

En effet, une éolienne ne délivre sa puissance nominale que dans un intervalle de vitesses du vent restreint.

## 7. MODELISATION DU ROTOR EOLIEN [3/6/9]

Le comportement électrique et dynamique d'un système quelconque ne peut être étudié que s'il est possible de le définir par un modèle mathématique, c'est ce qu'on appelle modélisation, il est donc évident que cette étape de modélisation est un passage indispensable pour concevoir des systèmes de commande performants.

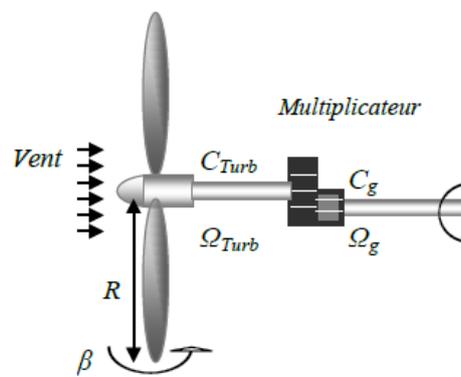


Figure II-10. Modèle d'une turbine éolien.

La modélisation du rotor éolien exige la connaissance de la caractéristique  $C_p(\lambda)$  dépendant des caractéristiques géométriques et du profil des pales. Cette expression peut être obtenue à partir de mesures en soufflerie ou par calcul numérique en utilisant la théorie de l'élément de pale.

- **La puissance du vent:** l'Énergie disponible dans l'air est :

$$P_V = \frac{1}{2} * \rho * S * V^3 \quad (\text{II.1})$$

- **La puissance récupérée:** la quantité d'énergie du vent récupérable (La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du la turbine) est donnée par :

$$P_{éol} = \frac{1}{2} * C_p * \rho * S * V^3 \quad (\text{II.2})$$

D'où  $C_p$  le coefficient de puissance représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. Cette dernière dépend du ratio de la Vitesse  $\lambda$  et de l'angle de l'orientation des pâles  $\beta$ .

Le ratio de la vitesse est défini comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_{rot} * R}{V} \quad (II.3)$$

Avec :

$$\Omega_{rot} = \frac{2 * \pi * N}{60} \quad (II.4)$$

- **Le coefficient de puissance  $C_p$**  : est souvent issu de mesures pratiques. L'étude d'une éolienne particulière a permis de déduire la formule empirique :

$$C_p(\lambda, \beta_i) = (0.44 - 0.0167\beta_i) * \sin\left(\pi \frac{\lambda - 3}{15 - 0.3\beta_i} - 0.00184(\lambda - 3)\beta_i\right) \quad (II.5)$$

- **La puissance maximale récupérée (Limite de Betz) :**

On peut estimer la valeur maximale de rendement  $C_p$ , par la formule de Betz . Cette dernière démontre qu'indépendamment du modèle de turbine, seuls 16/ 27 ièmes (59 %) de l'énergie cinétique du vent peuvent être transformés en énergies mécanique. Représentant ainsi la puissance maximale qui peut être récupérée par une éolienne. C'est la valeur maximale de ce coefficient qui correspond à la limite dénommée limite de Betz du coefficient de puissance:

$$C_p = \frac{16}{27} \quad (II.6)$$

Albert Betz a démontré que la puissance maximale récupérable  $P_{éol}$  est égale aux 16/27 de la puissance incidente  $P_v$ . Par la relation suivante:

$$P_{éol} = C_p * P_v = \frac{8}{27} * \rho * S * V^3 \quad (II.7)$$

D'où :

$\rho$  : La masse volumique de l'air [kg/m<sup>3</sup>],

$S$  : La surface balayée par le rotor [m<sup>2</sup>],

$V$  : La vitesse du vent [m/s],

$R$  : le rayon de la turbine,

$\Omega_{\text{rot}}$  : la vitesse de rotation de la turbine [rad/s],

$N$  : vitesse de rotation [tr/mn],

$\beta_i$  : l'angle de l'orientation des pâles [°C]

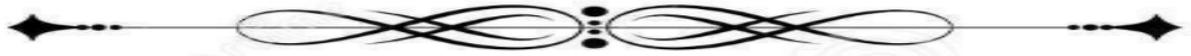
## 8. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté la machine éolienne, en donnant les généralités sur son évolution, son utilisation, les principaux composants d'une éolienne, les deux grandes familles des aérogénérateurs. Dans une deuxième partie, les différentes caractéristiques de l'énergie éolienne ont été présentées en définissant plusieurs.

Ce deuxième chapitre nous permettra de mieux cerner le choix de l'aérogénérateur approprié pour un site avec un potentiel éolien donné.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] : Khalfouni Hayet, Seddiki Ferroudja, « Étude et simulation d'une installation éolienne». Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri à Tizi-Ouzou. (2018)
- [2] : Achouri Mahdia, Khelfa Sara, « évaluation du gisement éolien dans deux régions de l'est de l'Algérie, Jijel et Tebessa ». Mémoire de master, Université m'hamed Bougara, Boumerdès. (2017)
- [3] : TOUAMA Nour el Houda, «Évaluation du gisement éolien en algérien à l'aide du logiciel retscreen». Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila. (2018)
- [4] : M. F. Benatallah, «Étude du potentiel éolien sur quelques sites algériens». Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas, Sétif.
- [5] : CHERFIA NAÏM, « Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens ». Mémoire de magister, Université Mentouri, Constantine. (2010)
- [6] : REDJEM Radia, « Étude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne ». Mémoire de Master, Universite Mentouri, Constantine. (2009)
- [7] : ALLAL Fatima. « Étude des modèles d'évaluation verticale de la vitesse du vent». Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila. (2018)
- [8] : Saïdou Madougou, «Étude du potentiel éolien du jet nocturne dans la zone sahélienne à partir des observations de radars profileurs de vent». Thèse doctorat, Université de Toulouse. (2010)
- [9] : MEZIANE Fares, « Étude et dimensionnement d'un système éolien-électrolyseur-pile à combustible pour l'alimentation électrique d'un site isole ». Mémoire de magister, Université M'hamed Bougara, Boumerdes (2011).



## **CHAPITRE III**

# **EVALUATION ET ANALYSE DU POTENTIEL EOLIEN DE LA REGION DE TIZI OUZOU**



## **CHAPITRE III**

### **EVALUATION ET ANALYSE DU POTENTIEL ÉOLIEN DE LA REGION DE TIZI OUZOU**

==== +==== +==== +==== +==== +==== +==== +====

#### **1. INTRODUCTION**

L'objectif de ce chapitre est l'évaluation et l'analyse du potentiel éolien disponible sur la région de Tizi Ouzou, en faisant appel aux données météorologiques fournies par l'office Nationale de Météorologie (ONM) s'étalant sur une période de 14 ans (2004-2018), la première partie consiste à évaluer le gisement éolien disponible à 10 m qui est la hauteur de mesure de standard, et ce en déterminant la distribution de Weibull, la rose des vents, ainsi la variation mensuelle des vitesses du vent. La seconde partie dans sa globalité dédiée à l'étude de la variation des caractéristiques du vent en fonction de la hauteur, la chose qui nous permettra de bien estimer la puissance et l'énergie qui peut être fournie par un générateur éolien donné.

#### **2. DESCRIPTION DE LA REGION D'ETUDE**

La région de Tizi Ouzou se situe au Nord de l'Algérie en plein cœur du massif du Djurdjura, délimitée de l'ouest par la wilaya de Boumerdès, au sud par la wilaya de Bouira, à l'est par la wilaya de Béjaïa, au nord par la mer Méditerranée (Figure 1.3). S'étend sur une superficie de 2 992,96 km<sup>2</sup>. La population résidente telle qu'évaluée lors du recensement de 2008 est de 1 127 607 habitants. La densité atteint 381,21 habitants au km<sup>2</sup>.



Figure III-1. Situation géographique de Tizi Ouzou

Elle est caractérisée par une topographie complexe, avec des altitudes qui se situent en général entre 800 et 1 000 mètres. Lors de la dernière décennie, la pluviométrie annuelle moyenne de la Wilaya a varié entre 500 et 800 mm. Les étés sont très chauds, les hivers sont doux et pluvieux, l'ensoleillement est très élevé. Le réseau hydrographique renferme deux grands bassins versants à savoir le bassin de l’Oued Sebaou et le bassin côtier.

Les coordonnées géographiques de la station de mesure de l’Office National de Météorologie sont données en Tableau III-1.

Tableau III-1. Coordonnées géographiques de site de Tizi Ouzou.

Site	Latitude	Longitude	Altitude
Tizi Ouzou	36.70° N	4.05° E	189 m

### 3. ANALYSE DU POTENTIEL EOLIEN A 10 M

#### 3.1. Etude annuelle

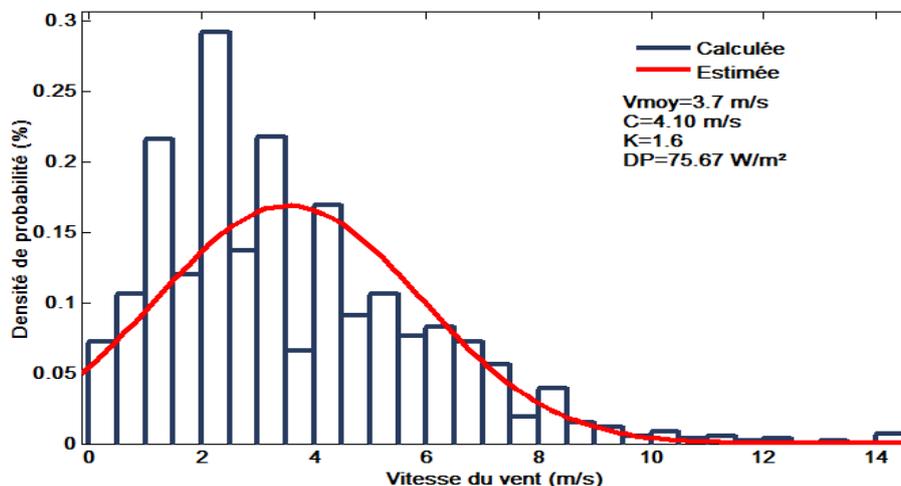
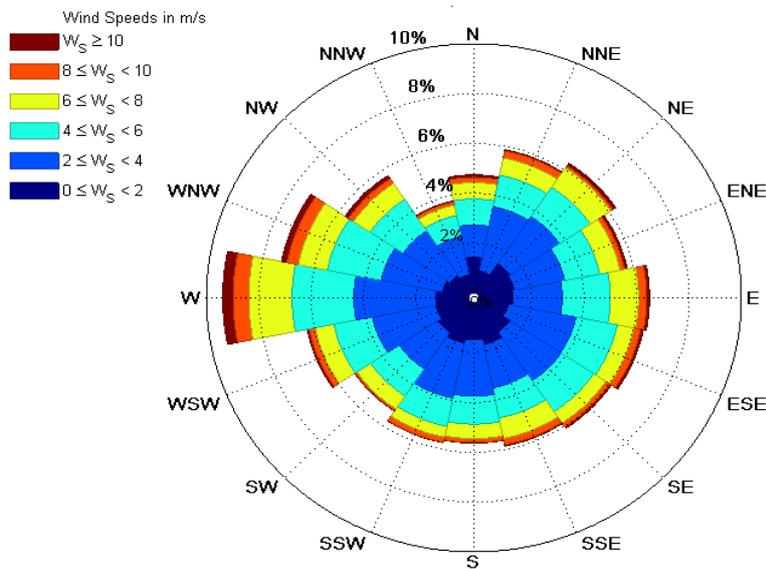


Figure III-2. Distribution Weibull à 10 m

L’histogramme annuel des vitesses du vent de Tizi Ouzou à 10 m ajusté par la distribution de Weibull à deux paramètres représenté en Figure III-2, indique également que les vitesses du vent couvrent une plage de variation atteignant 14 m/s. La valeur faible du paramètre d'échelle ( $C = 4.10$  m/s) signifie que ce site est moyennement venté. On remarque aussi que la valeur du paramètre de forme de Weibull  $k$  est de l'ordre de 1.6 correspondant à des vents probablement stables et réguliers, les deux paramètres de Weibull induisent ainsi une vitesse moyenne annuelle du vent égale à 3, 7 m/s, et une densité de puissance moyenne annuelle de 75.67 W/m<sup>2</sup> et une densité énergétique moyenne annuelle de 290 kWh/m<sup>2</sup>. Ce qui nous permet de constater que le gisement éolien dans ce site est faible.



**Figure III-3.** La rose des vents à 10 m

Quant à la rose des vents, d'après la Figure III-3, il y a une prédominance des vents dans la direction Ouest (W) soufflant avec une fréquence de 9 %. Cette direction du vent est le plus important contributeur à l'énergie totale pour le site de Tizi Ouzou.

Les vitesses du vent les plus fréquentes sont réparties sur l'intervalle variant de (2 à 4 m/s) avec une fréquence de 4%, et l'intervalle de (4 à 6 m/s) avec 3%. Cependant, les autres directions ne sont pas négligeables puisqu'elles ont des vitesses appréciables aux fréquences inférieures.

**3.2. Etude mensuelle**

Le Tableau III.2 résume les résultats de l'étude mensuelle, regroupe les différents paramètres, à savoir, la vitesse moyenne, les deux paramètres de Weibull ( $K, c$ ), la densité de puissance (DP), et la densité énergétique (DE).

Tableau III-2. Variation mensuelle des différents paramètres à 10m du sol

Mois /Paramètres	Vmoy (m/s)	K	C (m/s)	DP (W/m <sup>2</sup> )	DE (MWh/an/m <sup>2</sup> )
JAN	3.93	1.34	4.28	120.92	0.026
FEV	3.91	1.55	4.35	94.68	0.019
MAR	3.69	1.99	4.16	59.02	0.016
AVR	3.14	1.62	3.51	46.20	0.022
MAI	3.75	1.62	4.19	79.03	0.026
JUN	4.43	1.96	5.00	103.67	0.038
JUL	3.61	1.68	4.04	67.27	0.025
AOU	4.71	1.76	5.29	140.89	0.040
SEP	4.8	1.99	5.42	130.35	0.046
OCT	3.19	1.54	3.54	52.05	0.013
NOV	2.9	2.03	3.27	28.12	0.012
DEC	3.01	1.62	3.36	40.65	0.009
ANNEE	3.68	1.60	4.11	75.67	0.289

Les résultats du Tableau III-2 donnent des vitesses moyennes mensuelles assez faibles. Nous remarquons que la vitesse moyenne varie considérablement en fonction des mois. La variation de vitesse entre les mois atteint 3.68 m/s. Notons aussi que le mois de Septembre correspond à la valeur de la vitesse moyenne maximale avec 4,8m/s alors que la vitesse moyenne du vent minimale de 2,9 m/s est enregistrée en Novembre, avec différence retenue de 1,9m/s. Par ailleurs, la période qui a enregistré la vitesse du vent le plus important est clairement du mois de juin au mois de Septembre.

L'histogramme de la figure III.4 fait ressortir la vitesse moyenne en fonction des mois mesurés au niveau du mât de mesure à 10m du sol pour le site de Tizi Ouzou.

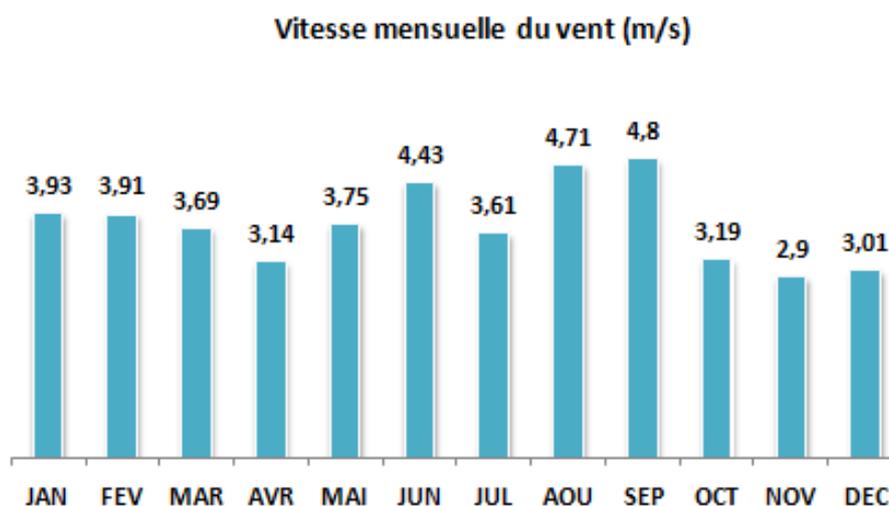


Figure III-4. variation mensuelle de la vitesse du vent à 10 m du sol

3.3. Etude saisonnière

Dans cette partie nous présentons les résultats relatifs à l'étude globale sur notre site d'étude, au niveau du mât de mesure à 10m de hauteur. L'étude comprend l'histogramme de la vitesse du vent ajustée par la distribution de Weibull (Figures III-5) et la distribution saisonnière de la direction du vent (Figures III-6), ainsi que la vitesse moyenne, la densité de puissance, la densité énergétique et les valeurs des deux paramètres de Weibull données dans le Tableau III-3

Tableau III-3. Variation saisonnière des différents paramètres à 10m du sol

Paramètres/saison	Printemps	Eté	Automne	Hiver
Vmoy (m/s)	3,46	4,21	3,61	3,61
K	1,68	1,76	1,68	1,44
C (m/s)	3,88	4,72	4,04	3,98
DP (W/m <sup>2</sup> /saison)	59,06	100,17	66,86	83,19
DE (MWh/saison)	0,063	0,108	0,072	0,089

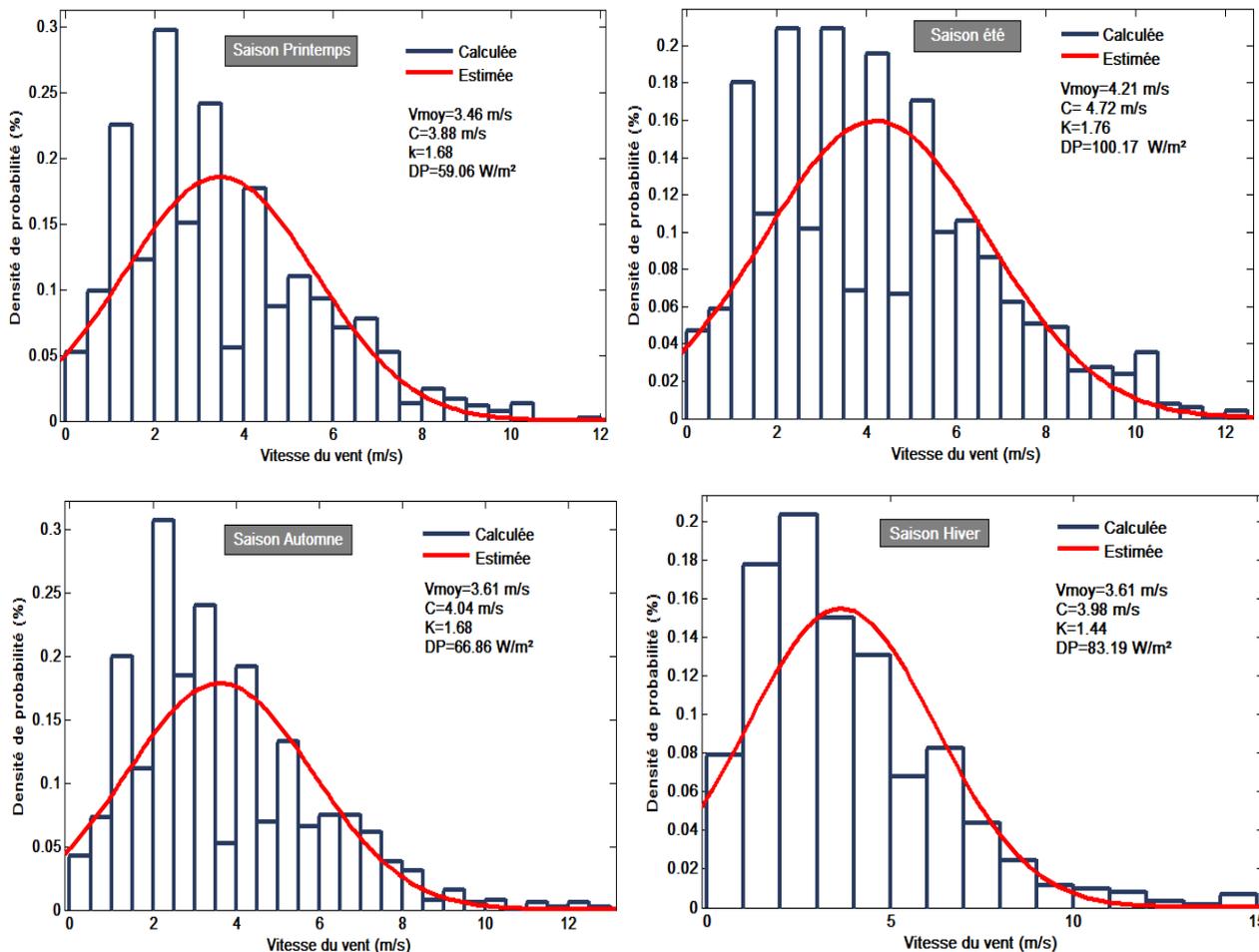


Figure III-5. Distribution Weibull saisonnière à 10 m

La vitesse moyenne du vent est en variation continue, elle atteint une valeur maximale en été égale à 4.21 m/s et une minimale de 3.46 m/s en Printemps, dégageant un écart de 0.75 m/s. Quant aux deux paramètres de Weibull, le facteur de forme k est important en été (1.76) et (1.68) au printemps et en Automne, et l'est minimal en Hiver avec 1.44.

Le facteur d'échelle atteint son maximum en été avec 4.72 m/s, et 4.04 m/s en Automne, puis se stabilise aux alentours de 3.98 m/s en Hiver, le printemps est caractérisé par un facteur d'échelle minimale de 3.88 m/s.

La vitesse du vent couvre une très large gamme qui s'étend jusqu'à 16 m/s pour l'Hiver et 12 m/s pour les autres saisons. Nous remarquons que la densité de puissance varie sensiblement d'une saison à une autre, le maximum est donné en été avec 100.17 W/m<sup>2</sup> et le minimum est enregistré durant la saison du Printemps avec seulement 59.06 W/m<sup>2</sup>.

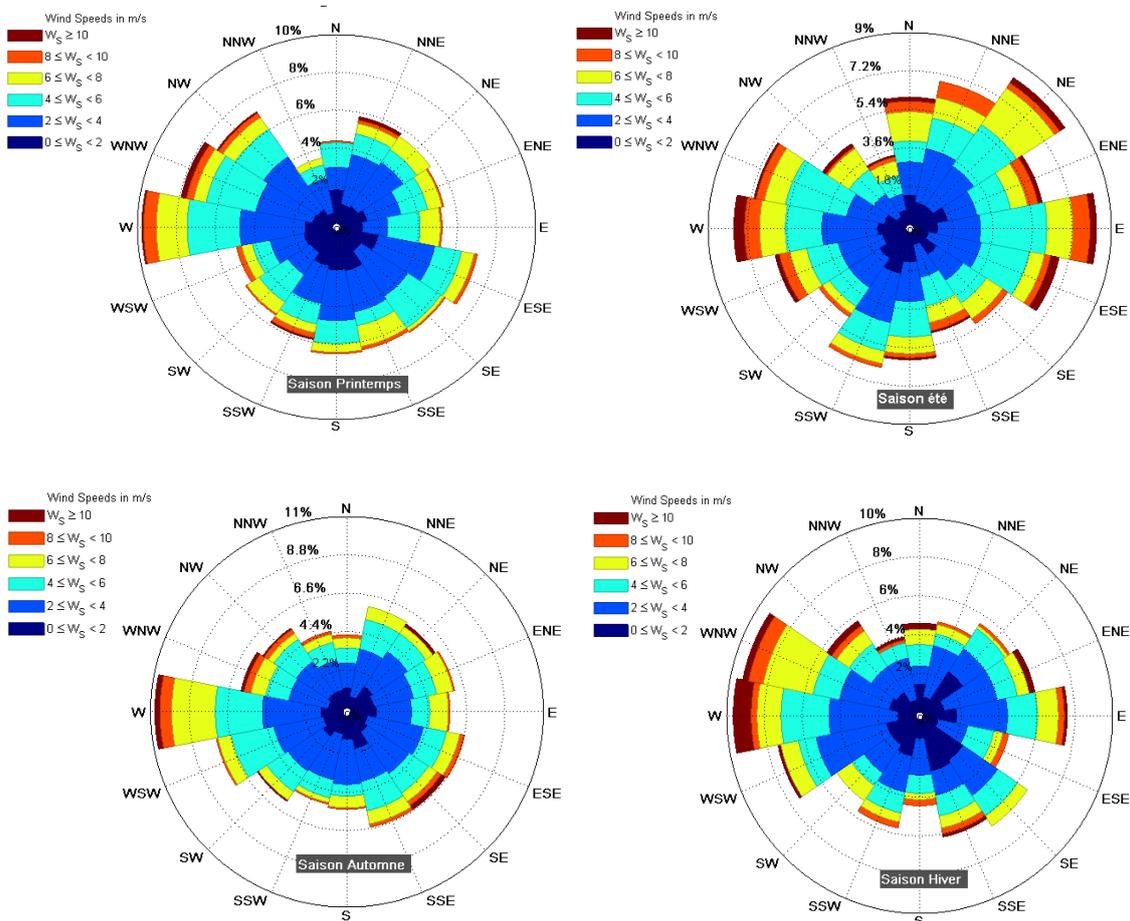


Figure III-6. Roses des vents saisonnières à 10 m

La Figure III-8 indique une prédominance des vents dans la direction Ouest (W), semblable pour toutes les saisons à l'exception de la saison de l'été qui est la saison la plus ventée, elle est caractérisée par plusieurs directions dominantes, à savoir l'Ouest, Nord-Est, et l'Est. En conclusion,

les résultats présentés en Figure III-8 permettent de bien choisir un générateur éolien convenable pour exploiter le maximum de l'énergie disponible sur le site.

**4. VARIATION AVEC LA HAUTEUR**

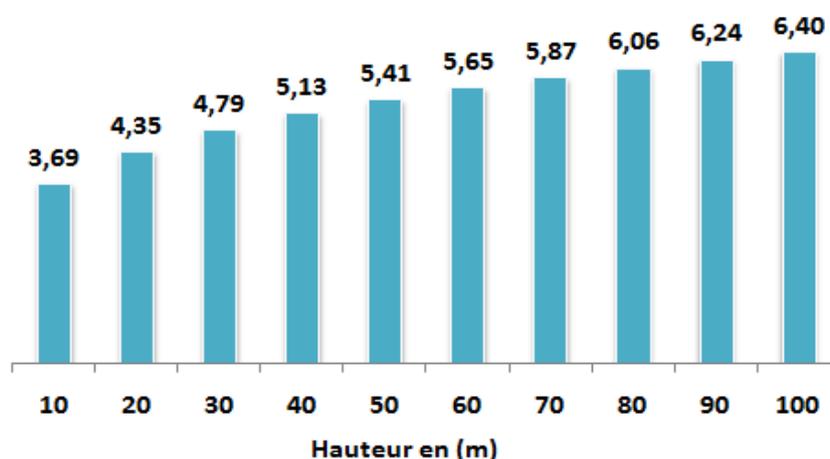
A 10m du sol l'éolien aura du mal à atteindre sa puissance nominale d'où la nécessité d'extrapolation afin d'obtenir les vitesses favorables. L'extrapolation verticale des vitesses de vent est ainsi faite pour des hauteurs de 10 m jusqu'à 100m d'un pas de 10m.

A partir des calculs effectués, on va déterminer les caractéristiques moyennes et statistiques du vent, à savoir : la vitesse moyenne annuel de vent, les deux paramètres de Weibull (K, c), la densité de puissance (DP), et la densité énergétique (DE).Voire le tableau III-4 ci-dessous

**Tableau III-4.** Variation annuel des différents paramètres en fonction des différentes hauteurs

<b>Paramètres/Hauteur</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>90</b>	<b>100</b>
<b>Vmoy (m/s)</b>	3.7	4.3	4.8	5.1	5.4	5.7	5.9	6.1	6.2	6.4
<b>K</b>	1.61	1.70	1.77	1.81	1.85	1.88	1.91	1.94	1.96	1.98
<b>C (m/s)</b>	4.11	4.87	5.38	5.77	6.09	6.37	6.61	6.83	7.03	7.22
<b>DP (W/m<sup>2</sup>/an)</b>	75.73	114.9	147.0	175.3	201.1	225.1	247.7	269.2	289.7	309.5
<b>DE (MWh/an)</b>	0.29	0.44	0.56	0.67	0.77	0.86	0.95	1.03	1.11	1.18

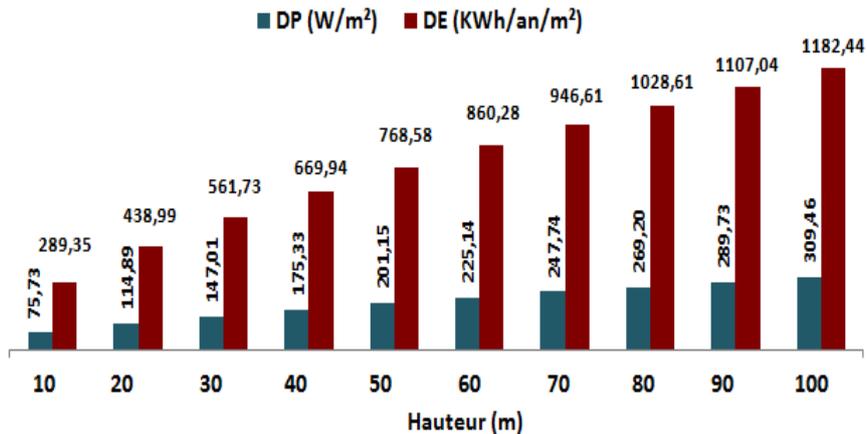
La Figure III-7 représente la variation de la vitesse moyenne du vent en fonction de la hauteur, nous remarquons que la vitesse est variable entre 3.69 m/s à 10 m et 6.4 m/s à 100 m, avec un écart de 2.71 m/s. un écart important 1.44 m/s est enregistré entre les hauteur de 40 m et 10 m, ce qui signifie que cette hauteur est plus intéressante pour l'installation des systemes de conversion de l'énergie éolienne. Par conséquent nous constatons de faibles écarts à partir de la hauteur de 50 m.



**Figure III-7.** Variation de la vitesse en fonction de la hauteur

La Figure III-8 illustre la variation de la densité de puissance et énergétique en fonction de la hauteur, il est à noter que la densité de puissance disponible est variable de 75.73 W/m<sup>2</sup> pour 10 m et 309.46 W /m<sup>2</sup> pour 100 m, induisant un écart de 233.73W/m<sup>2</sup>

Quant à la densité énergétique, nous constatons que la valeur maximale atteinte à 100 m est de l'ordre de 1182.44 kWh/m<sup>2</sup> tandis que la valeur minimale est de l'ordre de 289.35 kWh/m<sup>2</sup> à 10 m de hauteur, ce qui donne un écart de 893.09 kWh/m<sup>2</sup>.



**Figure III-8.** Variation de la densité de puissance et énergétique

**5. LE COUT DU KWH PRODUIT PAR UNE EOLIENNE [1/2]**

La viabilité économique des projets d'énergie éolienne dépend de sa capacité à produire de l'électricité à un faible coût d'exploitation par unité d'énergie. Le coût du kWh produit dépend des coûts d'investissement, de fonctionnement, d'entretien, de l'état de fonctionnement et de l'emplacement des éoliennes. Le calcul du coût de l'énergie éolienne est effectué à l'aide de la méthode du coût de la valeur actuelle (PVC) et de la méthode du coût énergétique unitaire (CPU).

L'estimation du coût du kWh d'énergie produite par une éolienne est exprimée comme la valeur actuelle des coûts (PVC) de l'investissement, divisée par la production d'énergie pendant la durée de vie de l'éolienne.

➤ La valeur actuelle des coûts PVC est donnée par la relation suivante

$$PVC = I_c + C_{OMR} \left( \frac{1+i}{d-i} \right) \left[ 1 - \left( \frac{1+i}{1+d} \right)^t \right] - S \left( \frac{1+i}{1+d} \right)^t \quad (\$) \quad (III.1)$$

Avec :

I<sub>c</sub> : Le coût d'investissement.

C<sub>OMR</sub>: Le coût d'exploitation, de maintenance et de réparation.

i : Le taux d'inflation.

d: Le taux d'intérêt.

t: La durée de vie de la machine (en années), supposée être de 20 ans

S: La valeur de récupération.

Par ailleurs, le calcul du coût peut être effectué sous les hypothèses suivantes :

- Le taux d'intérêt (d) et le taux d'inflation (i) sont estimés à 8 et 6% respectivement.
- Les coûts d'exploitation, de réparation et d'entretien ( $C_{OMR}$ ) sont estimés à 25% du coût annuel de la machine (prix machine / durée de vie).
- La valeur de récupération  $S$  est considérée comme représentant 10% de l'investissement des machines et du travail civil.
- Un investissement d'un montant  $I_c$  comprend le prix de la turbine majoré de 20% pour le travail civil, le raccordement des câbles au réseau et les autres coûts d'installation.

Comme donné dans le Tableau (III-5), le coût spécifique d'une éolienne dépend de la puissance nominale, néanmoins, il est à noter qu'il varie d'un fabricant à un autre. Par ailleurs, le prix de l'éolienne peut être déterminé comme le coût spécifique multiplié par la puissance nominale de l'éolienne. Enfin, le coût unitaire de l'énergie (CPU) représente le coût de la valeur actuelle (PVC) divisé par l'énergie totale produite par l'éolienne (AEP) pendant toute sa durée de vie.

**Tableau III-5.** Gamme de coût spécifique des éoliennes en fonction de la puissance nominale

Puissance de la turbine (KW)	Coût spécifique (\$/KW)	Coût spécifique moyen
<20	2200-3000	2600
20-200	1250-2300	1775
>200	700-1600	1150

➤ Le coût unitaire de l'énergie (CPU) est déterminé par

$$CPU = \frac{PVC}{AEP} \quad (\$/\text{kWh}) \quad (III.2)$$

Où (AEP) représentent le coût annualisé total est calculé par :

$$AEP = CF * P_r * 8760 \quad (\text{KWh/an}) \quad (III.3)$$

Avec:

8760 : nombre d'heures dans une année.

$P_r$ : Puissance nominale propre au l'éolienne (kW)

CF : représentent le facteur de capacité est déterminé par:

$$CF = \frac{\exp\left[-\left(\frac{V_{cin}}{c}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{V_r}{c}\right)^k\right]}{\left(\frac{V_r}{c}\right)^k - \left(\frac{V_{cin}}{c}\right)^k} - \exp\left[-\left(\frac{V_{out}}{c}\right)^k\right] \quad (\%) \quad (III.4)$$

D'où k et c sont respectivement les paramètres de forme et d'échelle du Weibull

$V_{cin}$  : Vitesse d'enclenchement de l'éolienne (m/s)

$V_r$  : Vitesse nominale de l'éolienne (m/s)

$V_{out}$  : Vitesse coupure de l'éolienne (m/s)

L'analyse suivante vise à nous aider à choisir l'éolienne la plus appropriée pour notre région étudiée. Dans ce contexte, cinq éoliennes commerciales [**Enercon E 82 (2050kw)** ; **Enercon E 92 (2350kw)** ; **Enercon E 115 (2500kw)** ; **Enercon E 115 (3000kw)** ; **Enercon E 82 (3020kw)**] avec une puissance nominale différente ont été sélectionnés, on se focalisant sur leurs vitesse d'enclenchement et énergie produite à cette vitesse (c-à-d l'éoliennes qui a la plus petite vitesse d'enclenchement et une grande production d'énergie à cette vitesse). Les données techniques des modèles d'éoliennes sélectionnés sont résumées dans le tableau III-6. [3]

**Tableau III-6.** Données techniques des différentes éoliennes commerciales utilisées dans l'analyse

Modèle de turbine (Enercon)	Vitesse d'enclenchement (m/s)	Vitesse nominale (m/s)	Vitesse coupure (m/s)	Puissance nominale (kW)	Hauteur du moyeu (m)	Diamètre du rotor (m)
<b>E 82</b>	2	13	25	2050	50	82
<b>E 92</b>	2	14	25	2350	50	92
<b>E 115</b>	2	12	25	2500	50	115.7
<b>E 115</b>	2	12	25	3000	50	115.7
<b>E 82</b>	2	17	25	3020	50	82

➤ Les résultats de l'analyse des coûts sont présentés dans le tableau III-7

**Tableau III- 7.** Analyse des coûts de différents modèles d'éoliennes (\$ / kWh).

Modèle de turbine (Enercon)	Énergie annuelle (MWh)	Facteur de capacité %	Coût par unité (\$ / kWh)
<b>E 82 (2050kw)</b>	3904.0	21.74	0.0230
<b>E 92 (2350kw)</b>	3914.9	19.02	0.0230
<b>E 115 (2500kw)</b>	5475.5	25	0.0200
<b>E 115 (3000kw)</b>	6570.6	25	0.0200
<b>E 82 (3020kw)</b>	3503.5	13.24	0.0378

D'après l'analyse des coûts, on constate que:

- Le coût du kWh dépend de l'éolien et varie entre 0,0200 \$ / kWh et 0,0378 \$ / kWh. Le coût minimum et maximum du kWh est obtenu pour l'Enercon E 115 (2500kw/3000kw) et l'Enercon E 82 (3020kw).
  - Le coût de l'électricité ne dépasse pas 0,0400 \$ / kWh ce qui est un prix très compétitif par rapport au prix de l'électricité payé par le consommateur du secteur domestique en Algérie (0,054 \$ / kWh) et le coût de l'électricité éolienne diminuera encore avec le développement de technologie de l'énergie éolienne. [2]
  - La production annuelle d'énergie varie entre un minimum de 3503.5 MWh/an avec Enercon E 82 (2050kw) et un maximum de 6570.6 MWh/an avec Enercon E 115 (3000kw).
  - Le facteur de capacité élevé de 25% est obtenu par les deux turbine Enercon E 115 (2500kw) et Enercon E 115 (3000kw) ; le plus faible facteur de capacité de 13.24 % a été obtenu par la turbine Enercon E 82 (3020kw).
- Les résultats de cette étude ; nous indique que l'éolienne la plus optimale recommandée pour notre site d'étude est la turbine **Enercon E 115 (3000kw)** vu que la valeur du facteur de capacité élevée et sa haute capacité à produire de l'électricité à un faible coût d'exploitation par unité d'énergie.

## 6. ESTIMATION DE TAUX DE CO2 EMIS DANS L'ATMOSPHERE

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable et non polluante. Une des raisons pour le développement de l'éolien réside dans ses effets positifs sur la qualité de l'air. En effet, la production d'électricité au moyen de l'énergie permet d'éviter l'utilisation de combustibles fossiles,

responsables de la majorité des pollutions atmosphériques à l'échelle de la planète ou d'un continent (selon ADEME):

- ✓ aucune émission de gaz à effet de serre, de poussières, de fumées et d'odeurs,
- ✓ aucune production de suie et de cendre,
- ✓ pas de nuisances (accidents, pollutions) de trafic liées à l'approvisionnement des combustibles,
- ✓ aucun rejet dans les milieux aquatiques (mer, rivière, nappe), notamment des métaux lourds,
- ✓ aucun dégât des pluies acides sur la faune et la flore, le patrimoine, l'homme,
- ✓ pas de stockage des déchets.

Même si ces effets positifs sont plus facilement quantifiables à l'échelle d'un pays qu'à l'échelle locale, des ratios de rejets de gaz évités ont été établis.

Les bénéfices de l'énergie éolienne sur la santé humaine et l'environnement sont réels, de nombreuses études détaillées existent à ce sujet. (Rappelons que l'installation du parc éolien est réversible).

A titre de comparaison et en prenant comme indicateur le CO2 (dioxyde de carbone, gaz à effet de serre), le tableau ci-après indique les ratios d'émissions de gaz par rapport au kWh produit :

**Tableau III-8.** Emissions de CO2 pour kWh produit [4]

Type de production	Emissions de CO2 en g/kWh électrique (analyse du cycle de vie)
Centrale à charbon	960 à 1050
Centrale au pétrole	664 à 778
Centrale au gaz naturel	443
Centrale nucléaire	66
Géothermie	38
Solaire photovoltaïque	29 à 35
Biomasse	14 à 41
Solaire thermique	13
Biogaz	11
Hydraulique	10 à 13
<b>Eolien</b>	<b>9 à 10</b>

- Le taux de CO<sub>2</sub> évité par notre éolienne choisie, **Enercon E 115 (3000kw)** en comparant aux autres types de production en prenant la même quantité de production annuelle d'énergie qu'est 6570.6 MWh/an pour chaque mode de production.

**Tableau III- 9.**Taux de Co2 évité par l'éolien Enercon E 115 (3000kw)

Type de production	Emission de Co2 à 6570.6 MWh/an de production (tonnes/an)	Taux de Co2 évité par l'éolien (tonnes/an)	Taux de Co2 évité par l'éolien En %
Centrale à charbon	6899.13	6833.43	99.05
Centrale au pétrole	5111.92	5046.22	98.71
Centrale au gaz naturel	2910.77	2845.07	97.74
Centrale nucléaire	433.65	367.95	84.85
Géothermie	249.68	183.98	73.68
Solaire photovoltaïque	229.97	164.27	71.43
Biomasse	269.39	203.69	75.61
Solaire thermique	85.41	19.71	23.08
Biogaz	72.27	06.57	9.09
Hydraulique	85.41	19.71	23.08
<b>Eolien</b>	65.70	/	/

Les résultats obtenus révèlent que le recours à une installation éolienne présente donc un choix stratégique, qui est justifié par une incidence positive que se soit sur le plan économique ou sur le plan environnemental.

Les émissions d'un parc éolien sont principalement liées à la fabrication des différents composants, et sont ainsi proportionnelles au nombre d'aérogénérateurs qui composent un parc, et par voie de conséquence, approximativement proportionnelles au nombre de kilowattheures produits. D'une façon générale, la répartition des émissions de CO<sub>2</sub> équivalent selon les phases du cycle de vie sont les suivantes : construction, assemblage, transport, exploitation et maintenance, démantèlement, recyclage et gestion des déchets.

## 7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats relatifs à l'évaluation et l'analyse du potentiel éolien disponible sur la région de Tizi Ouzou, en se basant sur des mesures de la vitesse moyenne durant 14 ans (2014-2018). Pour ce là nous avons déterminé la distribution de la vitesse moyenne du vent au niveau de site à 10m de hauteur. Par ailleurs, différents paramètres nécessaires dans l'étude du gisement éolien ont été calculés, tels que la rose des vents, l'histogramme de la vitesse du vent, les deux paramètres de Weibull, l'évolution de la vitesse moyenne du vent ainsi que la densité de puissance moyenne, en fonction des années, des mois, et

des saisons ; après une extrapolation vertical de la vitesse du vent a été réalisé au déférente hauteur. En suite une analyse technico-économique a été effectuée pour évaluer le coût du kWh produit par une éolienne. A la fin de l'étude, nous avons estimé le taux de co2 émis dans l'atmosphère.

Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

- L'étude annuelle au niveau du mât de mesure donne une vitesse moyenne annuelle du vent égale à 3.7m/s, une densité de puissance moyenne annuelle de 75.67W/m<sup>2</sup> et l'Ouest comme direction prédominante. Comme on a constaté que le potentiel éolien dans ce site est faible.
- L'étude mensuelle a permis de déduire que le vent est plus important du mois de Juin jusqu'au mois de Septembre. Par ailleurs, le paramètre de forme nous indique que le vent est plus stable durant les mois les plus chauds de l'année.
- L'étude saisonnière nous indique que l'été la saison la mieux ventée et présente plusieurs directions dominantes, à savoir l'Ouest, Nord-Est et l'Est. Par cantre les autres saisons la direction Ouest semblable la plus prédominante.
- L'extrapolation des résultats obtenus aux différentes hauteurs a montré que la variation de la distribution de la vitesse du vent et de la densité de puissance correspondante est notable avec la hauteur. Elle nous a primé de déterminer la hauteur nécessité afin d'obtenir les vitesses favorables pour notre site d'étude, auprès d'avoir un bon potentiel d'éolien et nous avons obtenu comme résultat une hauteur de 50m
- Le coût minimum moyen par kWh a été obtenu avec le modèle d'Enercon E115 (3000kw) de 0.0200 \$ / kWh; et celle qui produit le plus d'énergie de 6570.6 MWh/an et un facteur de capacité le plus élevé 25%.
- Et en fin l'estimation de taux de CO<sub>2</sub> émis dans l'atmosphère ; l'éolien représente la machine de production la plus écologique.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1]: Mohamed Douaka,, Noureddine Settou. « Estimation of hydrogen production using wind energy in Algeria ». International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES15. Energy Procedia 74 (2015) 981 – 990
- [2]: Said Diafa, Gilles Notton, Djamila Diaf. « Technical and economic assessment of wind farm power generation at Adrar in Southern Algeria ». The Mediterranean Green Energy Forum 2013, MGEF-2013. Energy Procedia 42 (2013) 53 – 62
- [3]: <https://wind-data.ch/tools/powercalc.php>. Consulté le 26/05/2021
- [4]: PROJET DE PARC EOLIEN DU « ROC DEL MOUNGE» centrale éolienne gramentes énergies / Labruguière énergies.  
Sur : [http://www.aude.gouv.fr/IMG/pdf/3\\_RdM\\_Etude\\_Impact\\_-\\_partie\\_2\\_cle09e4a6.pdf](http://www.aude.gouv.fr/IMG/pdf/3_RdM_Etude_Impact_-_partie_2_cle09e4a6.pdf).  
Consulté le 20/05/2021

## CONCLUSION GENERALE

==+== ==+== ==+== ==+== ==+== ==+== ==+==

Le travail que nous avons présenté dans ce document concerne les dispositifs d'alimentation électrique. Ces dispositifs sont appelés à connaître des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyens de production et d'un meilleur respect de l'environnement

Notre travail a donc porté sur une étude préliminaire et analyse du potentiel éolien en vue d'une planification énergétique à la région de tizi ouzou. En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger de la capacité de production d'une centrale éolienne.

L'étude bibliographique a permis d'acquérir certaines connaissances, à savoir ; l'origine du vent et ses différentes caractéristiques, l'utilisation d'une loi de distribution statistique (La distribution de Weibull) qui nous donne des facilités de manipulation et la méthode suivie pour l'extrapolation verticale de la vitesse du vent. Par ailleurs, nous avons défini et caractériser la machine éolienne qui transforme l'énergie cinétique du vent en une énergie mécanique de rotation.

Le traitement des relevés météorologiques complets sur le site, nous a permis de constater que notre région d'étude possède des ressources éoliennes appréciables. Non seulement il faut connaître la vitesse moyenne du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude. En effet Les vents les plus intéressants qui donnent le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers mesurer à l'altitude de 50m et que l'été représente la saison la plus ventée.

L'estimation du coût du kWh d'énergie produite par une éolienne, nous a bien permis à choisir le bon type d'aérogénérateur, performant à l'exploitation de l'énergie disponible dans ce site pour notre parc envisagé à l'avenir.

L'étude environnementale, nous a permis de mieux justifier l'intérêt des installations utilisant les énergies renouvelables, avec des réductions des émissions des gaz à effet de serre. Le recours à une installation éolienne présente donc un choix stratégique, qui est justifié par une incidence positive que se soit sur le plan économique ou sur le plan environnemental.

Ce choix devient très important si le critère environnemental passe en premier lieu, en vue de remédier au problème de la pollution atmosphérique et par suite au réchauffement climatique.

Nous espérons par ce travail avoir donné un aperçu concernant le potentiel éolien à Tizi-Ouzou et que ce mémoire reste un document important qui sera utilisé comme référence pour les promotions à venir.

