

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

UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR  
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE



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

## Thème

Évaluation du gisement énergétique éolienne de  
la région des hauts-plateaux

Soutenu : Mai 2017

Présenté par :

✎ Hamadha Latifa

✎ Slama Kaltoum

Encadré par :	Dr. MAOUEDJ Rachid	URER-MS. Adrar
Co-encadreur:	Dr. BENMEDJAHED Miloud	URER-MS. Adrar
Président :	Mr. OMARI Boumediene	Université d'Adrar
Examineur :	Mr. LARBI Ahmed Amine	URER-MS. Adrar

2016-2017

## **Remerciements**

*Avant toute chose, Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donnée courage, patience et force durant toutes ces années d'étude.*

*Le présent travail a été réalisé à l'Unité de recherche en énergies renouvelables au milieu saharienne (URMER) d'ADRAR, sous la direction du Docteur **Maouedj Rachid**.*

*Nous remercions en particulier notre Encadreur **Dr. Maouedj Rachid**, Maitre de recherche à l'unité de recherche des énergies renouvelables au milieu saharienne d'ADRAR, pour le soutien et pour tout le bagage scientifique qui nous a transmis durant ce projet.*

*Nous remercions le Co-encadreur **Dr. BENMEDJAHED Miloud** Maitre de recherche à l'unité de recherche des énergies renouvelables au milieu saharienne d'ADRAR (URER-MS) pour son aide à finaliser ce travail.*

*Nous exprimons nos reconnaissances et remerciements à **M. OMARI Boumediene** Maitre assistant "A" à l'Université Ahmed Draia Adrar, qui a accepté la présidence de l'éminent jury de cette mémoire.*

*Nous remercions profondément **M. LARBI Ahmed Amine**, chercheur à l'unité de recherche des énergies renouvelables au milieu saharienne d'ADRAR (URER-MS), d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Nous remercions l'ensemble des enseignants du département des sciences technologies pour leur patience durant notre étude.*



*Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*\*Mes parents*

*\*Mes frère et sœurs*

*\*Mes amies*

*\*Mes professeures*

*\*Mes collègues*

*À tous ma famille, que ce soit à l'intérieure ou  
l'extérieure*

*De la wilaya d'Adrar*

*Latifa*

*Hamadha*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

- Mes parents sont chers à mon cœur.*
- Mes Sœurs.*
- Enfants des mes Sœurs.*
- Ma tante et mes oncles.*
- Enfants de ma tante et à enfants de mes oncles.*
- Et à mes amis.*
- Mes professeurs.*
- Mes collègues.*

*Et À toute famille, que ce soit à l'intérieur ou à l'extérieur de la Daïra d'Inghare.*

*Kaltoum Slama*

## NOMENCLATURES ET ABREVIATIONS

<b>P<sub>N</sub></b> : Puissance nominale	(W)
<b>V<sub>D</sub></b> : Vitesse de démarrage	(m/s)
<b>V<sub>N</sub></b> : Vitesse nominale	(m/s)
<b>V<sub>M</sub></b> : Vitesse d'arrêt de la machine	(m/s)
<b>V<sub>m</sub></b> : Vitesse moyenne du vent	(m/s)
<b>P<sub>disp</sub></b> : Potentiel éolien moyen disponible	(W/m <sup>2</sup> )
<b>P<sub>rec</sub></b> : Puissance moyenne récupérable	(W/m <sup>2</sup> )
<b>k</b> : Facteur de forme	
<b>c</b> : Facteur d'échelle	(m/s)
<b>ρ<sub>0</sub></b> : Masse volumique de l'air dans les conditions standard	
<b>ρ</b> : Masse volumique de l'air	
<b>P</b> : Pression atmosphérique	(N/m <sup>2</sup> )
<b>R</b> : Constante des gaz, 287,04 J/kgK,	
<b>P<sub>w</sub></b> : Puissance annuelle disponible non corrigé,	
<b>P<sub>wext</sub></b> : Récupérable non corrigé	
<b>P<sub>c</sub></b> : Puissance annuelle disponible corrigée	
<b>P<sub>cwext</sub></b> : Puissance récupérable corrigée	
<b>C<sub>f</sub></b> : Facteurs de capacité	(%)
<b>f<sub>w</sub>(v)</b> : Fonction de distribution de Weibull	
<b>f<sub>R</sub>(v)</b> : Fonction de distribution de Rayleigh	

$\Gamma(x)$  : Fonction Gamma

$\langle v^3 \rangle$  : Vitesse cubique moyenne du vent

$\sigma^2$  : Variance

$E_c$  : Énergie cinétique du vent

$\beta$  : Angle de calage [°]

$C_T$ : Coefficient de couple [-]

$C_p$ : Coefficient de puissance [-]

# Sommaire

**Introduction générale** **1**

**Chapitre I : Généralités sur le vent**

1 .Introduction .....	3
2 .Le vent .....	3
3 .Caractéristiques du vent .....	3
3.1. Le vent géostrophique.....	4
3.2. Le vent thermique.....	5
3.3. Le vent solaire.....	5
4. Présentation générale de l’atmosphère.....	5
5. Les couches de l’atmosphère.....	6
1. La troposphère.....	7
2. La stratosphère.....	7
3. La mésosphère.....	7
4. La thermosphère.....	7
6. La Couche limite atmosphérique (CLA) .....	7
1. Définition. ....	7
2. La Couche limite de surface (CLS) .....	8
3. La Couche limite d’Eckerman.....	8
7. Mesurer la vitesse du vent et la direction du vent.....	8
7.1. Histoire de mesure du vent.....	8
7.2. Les instruments de mesure.....	8
1. Anémomètre.....	8
2. Girouette.....	9
3. Data logger.....	9
8. Origine de vent.....	9
9. La force du gradient de pression.....	10
10. Force de Coriolis.....	10
11. La force de frottement de la Terre.....	11
12. Les grands systèmes de vent.....	11
13. Les vents locaux.....	12
14. Les vents de vallée à grande échelle.....	13
1. La brise de pente.....	13
2. La brise de vallée.....	13
15. Inconvénients des brise-vent.....	14
16. La connaissance du vent en aéronautique.....	14
17. Conclusion.....	14
18. Références bibliographie.....	14

**Chapitre II : Etat de l’art des systèmes de conversion d’énergie éolienne**

1. Introduction.....	16
2. Définition de l’énergie éolienne.....	16





6. Conclusion.....	38
7. Références bibliographie.....	38

## **Chapitre IV :            Traitement des données et interprétation des résultats**

1. Introduction.....	39
I. Première partie.....	39
I.1. La fonction de distribution de Weibull.....	39
I.2. Roses des vents.....	41
a) Roses des distributions des vitesses du vent.....	41
b) Roses des fréquences d'occurrence des classes de vent.....	41
I.3. Méthodes de détermination des paramètres de Weibull k et c .....	41
3.1. Méthodes des moindres carrées.....	41
3.2. Méthode de la médiane et les quartiles.....	42
3.3. Méthode de la vitesse moyenne et la variance.....	42
3.4. Méthode de la vitesse moyenne et de la variabilité des vents.....	42
I.4. Extrapolation verticale de la vitesse de vent.....	42
4.1. Caractéristique vitesse –altitude.....	42
4.2. Loi logarithmique.....	43
4.3. Loi de puissance 1 /7.....	43
4.4. Loi de puissance.....	43
4.5. Loi à coefficient variable.....	44
I.5. Extrapolation des paramètres de Weibull.....	44
5.1. Model modifié d'extrapolation de Justus et Mikhail.....	44
5.2. Model modifié d'extrapolation de Justus.....	45
5.3. Model modifié d'extrapolation de Mikhaïel.....	45
I.6. Densité de l'air.....	45
6.1. Variation de la densité de l'air en fonction de la température et de la pression.....	45
6.2. Variation de la densité de l'air en fonction de la température et de l'altitude.....	46
I.7. Puissance moyenne annuelle fournie par un aérogénérateur.....	47
7.1. Potentiel éolien disponible.....	47
7.2. Puissance moyenne récupérable.....	47
7.3. Puissance utile.....	48
I.8. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.....	48
II. Deuxième partie : Etude du gisement éolien dans les sites.....	49
II.1. Interprétation des résultats .....	50
1. Vents horaires.....	50
2. Vents journaliers.....	50
3. Analyse des roses du vent pour les sites.....	54
II.2. Caractéristiques de l'aérogénérateur CALORIUS 37.....	57
2. Conclusion.....	60
3. Références Bibliographiques.....	61
<b>Conclusion générale</b>	<b>63</b>

# Liste des figures

## Chapitre I : Généralités sur le vent

Figure (1) : Séquence de vent mesuré sur le site du « Petit Canal » (Guadeloupe) et sa distribution de probabilité .....	3
Figure 2 : Le vent géostrophique .....	3
Figure 3 : Nomenclature des couches atmosphériques dans la basse et moyenne atmosphère sur base du profil vertical de la température .....	5
Figure 4 : les couches de l'atmosphère .....	6
Figure 5 : Une manche à air permet d'évaluer approximativement la vitesse du vent et sa direction.....	8
Figure 6 : Anémomètre .....	9
Figure 7 : Girouette .....	9
Figure 8 : Data logger.....	9
Figure 9: Anticyclones (A) et Dépressions (D) et mouvements de l'air .....	9
Figure 10: gradients de pression ;b) direction des vents. ....	10
Figure 11: Mouvement d'air à l'équateur .....	11
Figure 12: L'air équatorial .....	11
Figure 13: distribution des vents locaux .....	12
Figure 14: Les vents de vallée à grande échelle.....	13

## Chapitre II : Etat de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne

Figure 1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	16
Figure 2: Principaux organes du système de conversion éolien.....	16
Figure 3 : Moulins à vent dans la région de La Mancha, Espagne .....	17
Figure 4 : La première éolienne automatique.....	17
Figure 5 : Technologie éolienne à axe vertical .....	19
Figure 6 : technologie éolienne à axe horizontale .....	21
Figure7 : Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur. ....	21
Figure 8 : Les éléments d'une éolienne .....	22
Figure 9 : les composants de l'aérogénérateur.....	22
Figure 10: classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pale.....	22
Figure 11 : les types des mâts. ....	22

## Chapitre III : Présentation des caractéristiques des sites étudiés

Figure 1 : Situation géographique de la wilaya Batna .....	28
Figure 2 : Relief de wilaya Batna.....	29
Figure 3 : Les reliefs montagneux en Batna.....	29
Figure 4 : Les Hautes Plaines steppiques .....	30
Figure 5 : Situation géographique de la wilaya El-Bayadh.....	31
Figure 6: le schéma représente le relief dans l' Hautes Plaines .....	32
Figure 7 : le schéma représente le relief dans l' Atlas Saharien .....	33
Figure 8 : le schéma représente le relief dans le Prés Saharienne.....	33
Figure 9 : le schéma représente l'agriculture dans la wilaya .....	34
Figure 10 : Situation géographique de la wilaya Tiaret .....	34

Figure 11 : l'agriculture dans la wilaya Tiaret .....	35
Figure 12 : l'industriel dans la wilaya Tiaret .....	36
Figure 13 : Situation géographique de la wilaya M'sila .....	36
Figure 14 : Relief de wilaya M'sila	37
Figure 15: l'agriculture dans la wilaya M'sila .....	37

## **Chapitre IV : Traitement des données et interprétation des résultats**

Figure 1: Fonction de densité de probabilité de Weibull pour différentes valeurs du paramètre d'échelle C, pour k=2.....	40
Figure 2: Fonction de densité de probabilité de Weibull pour différentes valeurs de facteur de forme K, C=7.2m/s. ....	40
Figure 3: Fonction de distribution cumulative de Weibull pour différente valeur du facteur de forme K, C = 7.2 m/s. ....	40
Figure 4: Fonction de distribution cumulative de Weibull pour différentes valeurs du paramètre d'échelle C, pour k= 2. ....	40
Figure 5: Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent....	49
Figure 6: Vitesse moyenne pour les sites étudiés.....	51
Figure 7: Facteur d'échelle pour les sites étudiés .....	51
Figure 8: Facteur de forme pour les sites étudiés.....	51
Figure 9: Histogrammes des vitesses et courbes d'ajustement pour la fonction de Weibull .....	53
Figure 10 : Roses du vent pour les sites étudiés.....	54
Figure 11: Vitesse moyenne mensuelle du vent pour les sites étudiés .....	55
Figure 12 : Vitesse moyenne saisonnière du vent pour les sites étudiés.....	56
Figure 13 : Température moyenne mensuelle.....	56
Figure 14 : Température moyenne saisonnière du vent pour les sites étudiés .....	57
Figure 15 : Photo de l'aérogénérateur CALORIUS 37 .....	58
Figure 16: Courbe de la puissance de l'aérogénérateur CALORIUS 37.....	58
Figure 17 : Densité de puissance annuelle pour les sites étudiés .....	59
Figure 18 : Puissance moyenne pour les sites étudiés .....	59
Figure 19 : facture de capacité d'éolienne choies pour les sites étudiées .....	60

## **Liste des tableaux**

### **Chapitre IV : Traitement des données et interprétation des résultats**

Tableau 1 : Liste des stations météorologiques utilisées dans cette étude.....	49
Tableau 2 : représente les paramètres de forme et d'échelle et la vitesse moyenne du vent pour les sites étudiés .....	50
Tableau 3 : Caractéristiques de l'aérogénérateur CALORIUS 37 .....	57

# **INTRODUCTION GENERALE**

## **INTRODUCTION GENERALE**

La consommation d'énergie, dans le courant du siècle dernier, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive. Les prévisions des besoins en énergie pour les années à venir ne font que confirmer, voire amplifier, cette tendance, notamment compte tenu de l'évolution démographique et du développement de certaines zones géographiques, en Asie en particulier.

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

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

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

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire et éolienne. En effet, vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi que la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois et la vitesse du vent est très importante et dépasse 5m/s dans plusieurs régions de l'Algérie sur tout dans le sud, notre pays peut couvrir certains de ces besoins en énergie solaire et éolienne.

Notre étude s'intéresse à l'évaluation du gisement éolien de cinq régions du haut plateau Algérien (Msila, Batna, El Bayadh, Ksar Chellala et Bou Saada).

Notre travail est organisé de la façon suivante :

Le premier chapitre est consacré à des rappels sur le l'origine du vent, les instruments de mesure des caractéristiques du vent

Dans le deuxième chapitre, en premier lieu, nous avons établi une synthèse bibliographique à travers laquelle nous avons présenté une définition de l'énergie éolienne de manière générale, l'historique des éoliennes et leurs évolutions durant les dernières décennies et les différentes technologies des aérogénérateurs (éolienne à axe vertical et éoliennes à axe horizontal).

## **Evaluation du gisement énergétique éolien de la région des Hauts-Plateaux**

---

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de la situation géographique et les conditions climatiques de chaque site et leurs caractéristiques industrielles et de l'agriculture.

Enfin, Le quatrième chapitre est divisé en trois parties et porte sur l'établissement de l'atlas vent. La première partie présente les modèles mathématiques utilisés dans cette étude. La deuxième partie présente une étude du gisement éolien dans cinq sites Algérien. La vitesse du vent et puissance éolien ont été calculés par la distribution de Weibull, autrement les paramètres Weibull  $k$  et  $c$  ont été calculé par le logiciel WindPro et utilisés pour l'estimation de la vitesse annuelle moyenne du vent et la densité de puissance pour chaque site. La troisième partie porte sur la détermination du facteur de capacité et la puissance moyenne annuelle fournie par l'aérogénérateur, en fonction des caractéristiques du vent (paramètres de Weibull  $k$  et  $c$ ) et les caractéristiques du turbine (Puissance nominale  $P_N$ , vitesse de démarrage  $V_D$ , vitesse nominale  $V_N$  et la vitesse d'arrêt de la machine  $V_M$ ).

Notre travail est clôturé par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et expose quelques perspectives de recherche envisagées.

# **CHAPITRE I**

## **GENERALITES SUR LE VENT**

## 1 .Introduction :

Le vent est une force de la nature découverte par l'homme depuis les temps anciens, ce vent est capable de créer de l'électricité ou une force mécanique : c'est l'énergie éolienne. Le vent est une source d'énergie propre, renouvelable quasi instantanément et quasi infinie à l'échelle humaine et terrestre.

Ce chapitre sera consacré à la description de l'origine du vent, à l'introduction d'éléments de physique atmosphérique en définissant les couches ainsi que les forces qui régissent le mouvement des masses d'air et les causes principales des vents.

## 2 .Définition du vent :

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

## 3 .Caractéristiques du vent :

Le vent est causé par le déplacement de la masse d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres parties, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. C'est pourquoi, le vent est une grandeur stochastique, intermittente qui dépend d'un ensemble de facteurs tels que la situation géographique, l'altitude, la température et la hauteur de captage.

Les caractéristiques du vent déterminent non seulement la quantité d'énergie qui s'applique à la turbine mais également les contraintes de fonctionnement (turbulences, valeurs extrémales,...) qui jouent aussi sur la durée de vie.

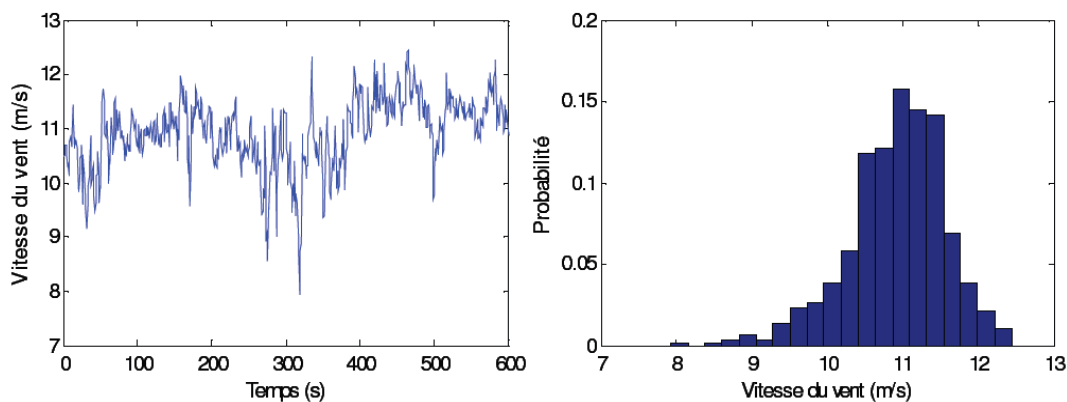


Figure (1) : Séquence de vent mesuré sur le site du « Petit Canal » (Guadeloupe) et sa distribution de probabilité [1]



Le vent possède des caractéristiques bien précises ; il y a en fait 2 types de vent : le vent géostrophique et le vent au sol (le vent tel que nous le ressentons) [1].

### 3.1. Le vent géostrophique :

Le vent géostrophique se définit comme le vent qui résulterait de l'équilibre géostrophique entre la force de Coriolis et la force du gradient de pression atmosphérique agissant sur une parcelle d'air. Ce vent soufflerait parallèlement aux isobares dans l'atmosphère. La plus grande partie de l'écoulement atmosphérique, au-dessus de la couche limite en dehors des tropiques, est proche de l'équilibre géostrophique, ce qui en fait une approximation communément utilisée en météorologie. Toutefois, cet équilibre est rarement exact, en raison d'autres forces qui agissent sur le vent comme la friction (près du sol) ou la force centrifuge dans un écoulement courbé.

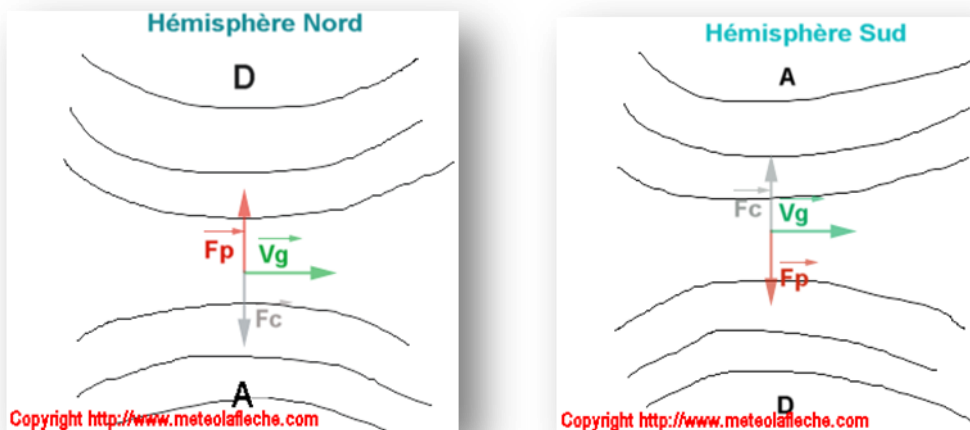


Figure 2: Le vent géostrophique [1]

Le vent géostrophique découvert par le mathématicien physicien français Pierre Simon Laplace (1749-1827) est une assez bonne approche de la vitesse du vent telle que nous le ressentons : le vent géostrophique se calcule à partir d'une carte d'isohypses (même altitude) et de la loi de Laplace selon la relation suivante [1]:

$$V_g = \left(\frac{g}{f}\right) \left(\frac{dz}{dl}\right)$$

Où :

**g** : intensité de pesanteur en  $m.s^{-2}$

**f** : paramètre de Coriolis non nul qui vaut  $2.\omega.\sin.F$

**Omega** : vitesse angulaire de rotation de la Terre en  $rad.s^{-1}$  :  $0,73.10^{-4}$

**F** : latitude du point considéré en  $^{\circ}$

**dz** : différence d'indice entre 2 isohypses

**dl** : distance entre deux isohypses en mètre

### 3.2. Le vent thermique :

Le vent thermique noté  $V_t$  est une approximation du vent géostrophique et est définie de la manière suivante [1]:

$$V_t = V_{gs} - V_{gb}$$

Où :

$V_{gs}$  : vent géostrophique au niveau de pression  $P_s$

$V_{gb}$  : vent géostrophique au niveau de pression  $P_b$

Or, la direction du vent géostrophique est dépendant de la composante z d'un repère élaboré par des vecteurs orthogonaux (x, y, z)

De plus, la loi de Laplace s'écrit

$$dp = -\rho g \cdot dz$$

$$D'où : \quad Z_a - Z_b = [(R_a \cdot T_{vm}) \ln \left( \frac{P_a}{P_b} \right)] / g$$

$Z_b$ : altitude b

$Z_a$  : altitude a

$P_a$  : masse volumique de l'air sec

$R_a$  : constante spécifique du gaz en présence d'un air sec

$T_{vm}$  : température virtuelle

$g$  : norme du champ de pesanteur

$$D'où : V_t = [(R_a \ln \left( \frac{P_b}{P_s} \right)) (K_{vectoriel} \text{ grad}(T_{vm}))] / f$$

### 3.3. Le vent solaire :

Le soleil émet en permanence près de 1 million de tonne de matière par seconde dans le milieu interplanétaire. C'est ce que l'on appelle le vent solaire. Le vent solaire est un plasma c'est-à-dire un gaz constitué principalement d'électron et de protons mais également d'ions (atomes ayant perdu un ou plusieurs électrons) tels que He<sup>2</sup> et d'autres plus lourds.

La vitesse du vent solaire lent est d'environ 300km.s<sup>-1</sup>. Il varie peu en fonction du cycle solaire et ne dépend pas de l'activité solaire. Le vent solaire rapide quant à lui est varié entre 500 et 800 km.s<sup>-1</sup>. Il dépend fortement du cycle et de l'activité solaire. Ce sont ses sursauts qui pourront avoir des conséquences sur Terre.

Il existe de deux types de vents un vent solaire lent, situé principalement dans le plan de l'écliptique (plan d'orbite de la terre) en période de minimum d'activité solaire, et un vent solaire rapide situé aux plus hautes latitudes. La figure ci-contre montre les vitesses d'échappement de la matière solaire, mesurées par la sonde Ulysse, en fonction de la latitude du soleil, en période de minimum solaire. La séparation entre vent rapide et lent a lieu à ± 15° [2].

### 4. Présentation générale de l'atmosphère :

L'atmosphère est une enveloppe gazeuse formant une couche d'air qui entoure la Terre. Bien que très mince en comparaison au rayon terrestre [3]. L'atmosphère terrestre est composée de plusieurs couches de gaz (78,09% d'azote, 20,95% d'oxygène, 0,93% d'argon et d'une variété de gaz en traces), et de particules en suspension, d'environ 500km d'épaisseur que la Terre

retient à sa surface. Sa densité et sa température diminuent avec l'altitude où 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 [4].

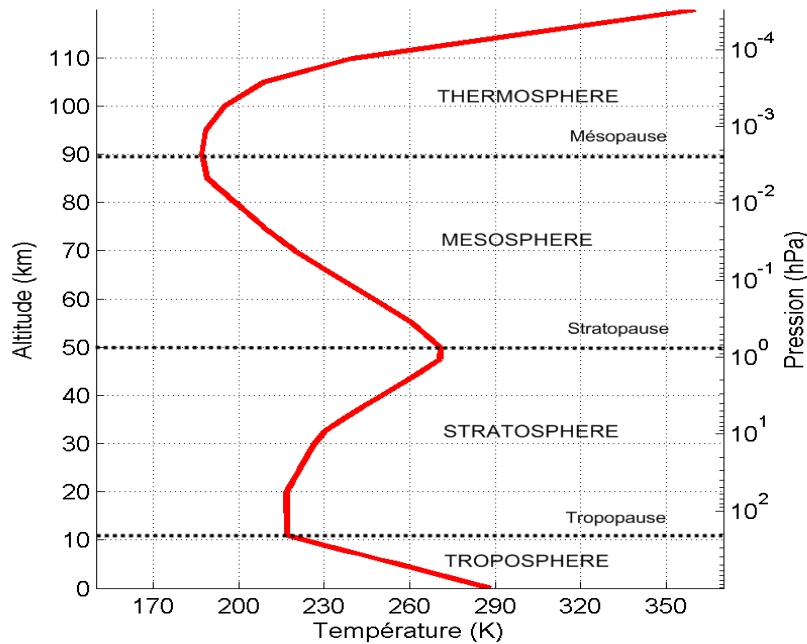


Figure 3 : Nomenclature des couches atmosphériques dans la basse et moyenne atmosphère sur base du profil vertical de la température [5].

### 5. Les couches de l'atmosphère :

L'atmosphère est subdivisée en plusieurs grandes parties en fonction du gradient vertical de température, l'atmosphère standard se compose essentiellement de deux grandes parties (figure 4) :

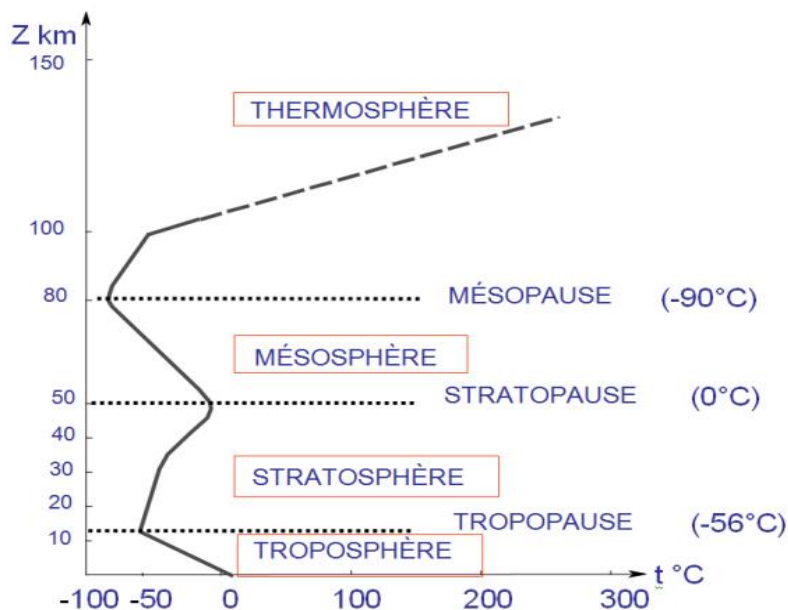


Figure 4: les couches de l'atmosphère

## 5. La troposphère :

La troposphère correspond à la couche atmosphérique la plus proche du sol terrestre [4]. Elle commence à la surface et s'étend entre 7 et 8 km aux pôles (température de  $-40\text{ °C}$ ) et de 13 à 16 km à l'équateur (température de  $-80\text{ °C}$ ), avec des variations dues aux conditions climatiques. Le mélange vertical de la troposphère est assuré par le réchauffement solaire. Ce réchauffement rend l'air moins dense, ce qui le fait remonter.

La densité de l'air y étant élevée, la masse de cette couche représente environ 80 p. 100 de la masse totale de l'atmosphère [6]. C'est dans cette couche qu'on retrouve la plus grande partie des phénomènes météorologiques. Plus on s'élève dans la troposphère, plus la température décroît de façon significative d'environ  $6\text{ °C}$  tous les 1000 mètres pour atteindre  $-56\text{ °C}$  à la tropopause. Cette dernière marque la séparation entre troposphère et la stratosphère [4].

## 6. La stratosphère :

La stratosphère se trouve au-dessus de la troposphère à une altitude d'environ 50 km. Et limitée en haut par l'ionosphère. La température reste constante dans la stratosphère inférieure [6].

Elle comprend la couche d'ozone. Cette dernière est essentielle à la vie sur Terre, car elle absorbe la majorité des rayons solaires ultraviolets qui sont extrêmement nocifs pour tout être vivant. Cette absorption provoque un dégagement d'énergie sous forme de chaleur. C'est pourquoi la température augmente lorsqu'on s'élève dans la stratosphère. S'agissant d'un environnement beaucoup plus calme, les mouvements de l'air y sont bien moindres [4].

## 7. La mésosphère :

La mésosphère se trouve au-dessus de la stratosphère, s'étend de 50 km à environ 80–85 km. La température décroît à nouveau avec l'altitude, atteignant  $-100\text{ °C}$  ( $173,1\text{ K}$ ) dans la haute mésosphère [6].

## 8. La thermosphère :

Est la couche atmosphérique commençant vers 80–85 km et allant jusqu'à 640 km d'altitude, la température y augmente avec l'altitude. Bien que la température puisse atteindre les  $1\ 500\text{ °C}$  [6].

## 6. La Couche limite atmosphérique (CLA) :

### 1. Définition :

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

La couche limite atmosphérique, peut être divisée en deux sous couches, la couche limite de surface et la couche limite d'Eckerman.

### 2. La Couche limite de surface (CLS) :

Cette couche dont l'épaisseur varie entre 50 et 100m, est la partie basse de la CLA. Elle est en contact direct avec la surface terrestre. Dans cette région, les effets de la force de Coriolis

sont négligeables devant les effets dynamiques engendrés par les frottements au sol ainsi que par la stratification thermique de l'air [7].

### 3. La Couche limite d'Eckerman :

La couche limite d'Eckerman est la partie supérieure de la couche limite atmosphérique. Le vent est alors influencé par le frottement au sol, la stratification thermique de l'air et la force de Coriolis. Avec l'altitude, les forces de frottement deviennent négligeables devant l'effet de la force de Coriolis, jusqu'à atteindre le vent géostrophique [7].

## 7. Mesurer la vitesse du vent et la direction du vent:

### 7.1. Histoire de mesure du vent :

Le premier instrument de mesure du vent est celui de la girouette, invention de la Grèce antique destinée à indiquer la direction du vent. Nous devons la première description scientifique des phénomènes éoliens à Evangelista Torricelli qui mit en évidence la pression atmosphérique de l'air avec son baromètre et à Blaise Pascal qui fut le premier à décrire le vent comme un mouvement de l'air, un courant d'air plus ou moins puissant ainsi que la diminution de pression avec l'altitude puis Robert Hooke construira le premier anémomètre. Benjamin Franklin se lancera lui dans les premières descriptions et analyses de vents dominants et de systèmes météorologiques [8].



Figure 5 : Une manche à air permet d'évaluer approximativement la vitesse du vent et sa direction.

### 7.2. Les instruments de mesure:

Le vent se caractérise par deux grandeurs variables : la vitesse et la direction.

### 4. Anémomètre :

Est un terme du XVIII<sup>e</sup> siècle, composé du préfixe « anémo » (en grec « *anemos* », en français « vent ») et du suffixe « mètre » (« mesure »). Il s'agit donc d'un appareil permettant de mesurer la vitesse ou la pression du vent. Il en existe plusieurs variantes qui peuvent être regroupées en deux types principaux : à mesure du déplacement de l'air et à variation de pression causé par ce mouvement. Les anémomètres sont le plus souvent disposés sur un pylône baptisé mât anémométrique dont la hauteur dépend à la fois de la nature du site d'observation (par exemple sur une bouée météorologique par rapport à une station météorologique terrestre) et de l'objectif des mesures (par exemple des recherches sur les échanges sol-atmosphère ou pour l'aviation [9].

## 5. Girouette :

Est un dispositif généralement métallique, la plupart du temps installé sur un toit, constitué d'un élément rotatif monté sur un axe vertical fixe. Sa fonction est de montrer la provenance du vent ainsi que, contrairement à la manche à air, son origine cardinale.

Ceci est permis par sa structure asymétrique, généralement matérialisée par une flèche ou un coq, dont la pointe ou la tête, plus courts que les éléments indicateurs (le corps), pointent vers la source du vent portant sur l'élément directeur de l'ouvrage.

L'axe fixe est généralement pourvu d'une croix directionnelle indiquant les quatre points cardinaux. Toutefois, les girouettes modernes ne sont plus équipées de cette croix cardinale, qui est remplacée par un dispositif électronique affichant le secteur du vent sur un écran [10].



Figure 6 : Anémomètre



Figure 7 : Girouette

## 6. Data logger :

Permet l'enregistrement des données mesurées sur un intervalle spécifié. Toutes les 10 minutes par exemple il calcule les données moyennes des mesures de chaque instrument et les stocke dans sa mémoire. Suite à la campagne de mesures, le data logger est connecté à un ordinateur afin d'en extraire les données sous format d'un tableau Excel [11].



Figure 8: Data logger

## 8. Origine de vent :

C'est un déplacement d'air horizontal généré par des différences de pression entre des masses d'air : l'air s'écoule des zones de hautes pressions (anticyclone) vers les zones de basses pressions (dépression). L'écoulement n'est pas rectiligne mais il prend une forme de « S », à cause de la force de Coriolis.

Cette force provoque une déviation qui entraîne l'air de l'hémisphère nord d'un mouvement horaire autour des anticyclones vers un mouvement antihoraire autour des dépressions et dans le sens inverse dans l'hémisphère sud [12].

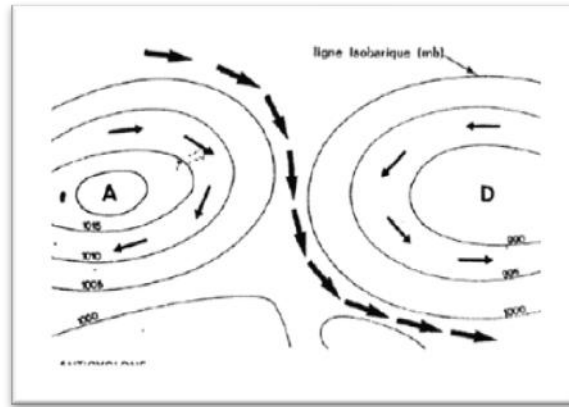


Figure 9: Anticyclones (A) et Dépressions (D) et mouvements de l'air.  
Source : Izard. J.L et Guyot. A, 1979.

### 9. La force du gradient de pression :

C'est la différence de pression entre 2 points qui crée une force nommée force du gradient de pression.

Mathématiquement, le gradient de pression est la différence de pression existant entre deux points divisée par la distance qui séparent ces deux points.

$$\text{gradient de pression} = \frac{(\text{Pression point 1} - \text{Pression point 2})}{(\text{Distance point 1 à point 2})}$$

Ainsi plus les isobares (lignes reliant entre eux les points de pression identiques) sont rapprochées, plus la force du gradient de pression sera forte.

Sa direction va de la haute pression à la basse pression. Plus la latitude s'élève, plus le vent sera faible [13].

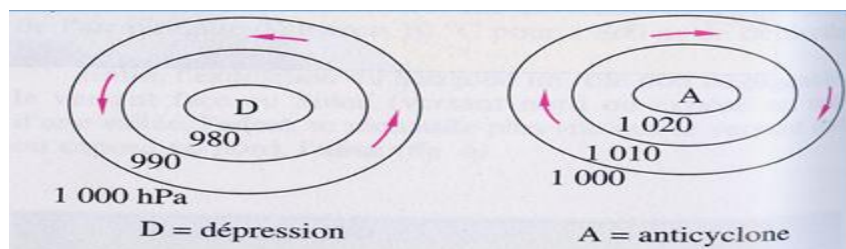


Figure 10 : gradients de pression ;b) direction des vents

### 10. Force de Coriolis :

Est une force inertielle agissant perpendiculairement à la direction du mouvement d'un corps en déplacement dans un milieu (un référentiel) lui-même en rotation uniforme, tel que vu par un observateur partageant le même référentiel. Cette force est nommée ainsi en l'honneur de l'ingénieur français Gaspard-Gustave Coriolis.

Elle n'est pas en fait une force au sens strict, soit l'action d'un corps sur un autre, mais plutôt une force fictive résultant du mouvement non linéaire du référentiel lui-même. C'est l'observateur qui change de position par l'action de l'accélération centripète du référentiel et qui interprète tout changement de direction de ce qui l'entoure comme une force inverse.

L'introduction de cette force permet de simplifier les équations du mouvement dans ce genre de repère, au même titre que celui de la force centrifuge [14].

### 11. La force de frottement de la Terre :

La terre n'est pas lisse, elle possède un relief et sa surface est courbe d'où une résistance au déplacement de l'air qui crée une friction réduisant l'influence de la force de Coriolis [13].

### 12. Les grands systèmes de vent :

Nous avons vu que les points situés à l'équateur sont plus chauffés que les points situés aux pôles. Ceci entraîne des différences de température et de pression entre l'air équatorial et l'air polaire. L'air équatorial s'échauffe et monte alors, poussé par de l'air plus froid. En s'élevant, il refroidit et redescend au niveau des pôles. Il en résulte donc une circulation à l'échelle de la planète entre l'air polaire et l'air équatorial.

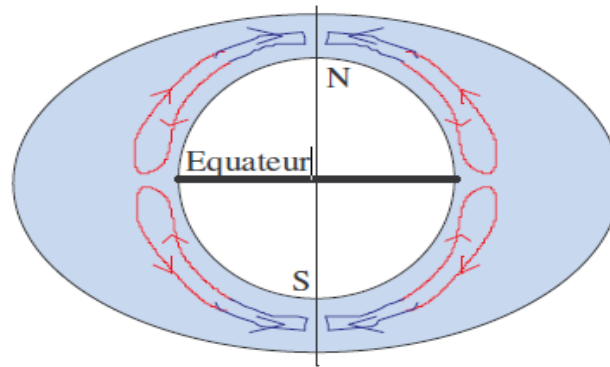


Figure 11 : Mouvement d'air à l'équateur

L'air en mouvement forme ce que l'on appelle une cellule convective. Si cette vision des choses n'est pas tout à fait fautive, elle est trop simple et il faut la préciser. Examinons ce qui se passe à l'échelle d'un quart de planète sur le schéma ci-contre. L'air équatorial n'atteint pas le pôle. Il se refroidit avant et redescend. De même, l'air polaire n'atteint pas l'équateur. Il se réchauffe en chemin et monte plus tôt. Il se forme donc 2 cellules convectives. Une d'air équatorial et une d'air polaire. En pratique, il en existe une troisième d'air tempéré entre les deux. Ce modèle de la circulation atmosphérique générale traduit assez correctement ce qui se passe à l'échelle de la planète. Les cellules convectives ainsi représentées sont appelées les cellules de HADLEY.

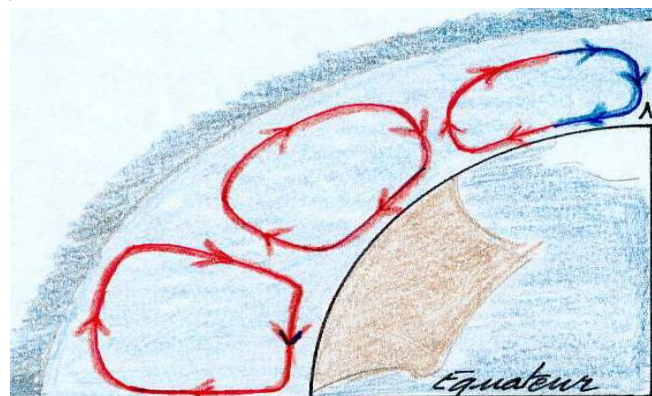


Figure 12 : L'air équatorial



En tenant compte de la force de CORIOLIS, on peut en déduire les vents dominants au sol au niveau de la planète et les zones plutôt anticycloniques ou plutôt dépressionnaires :

- au niveau des pôles les vents dominants soufflent de l'Est
- dans les zones tempérées les vents dominants sont d'Ouest
- dans la zone équatoriale, les alizés soufflent de l'Est
- les pôles sont sous l'influence de hautes pressions tandis qu'une ceinture de dépressions s'établit à environ 30° de latitude et une ceinture d'anticyclones à environ 60° de latitude.

Ces conclusions sont valables dans les deux hémisphères.

Il existe également un vent d'altitude très important : le jet stream. Ce vent souffle d'Ouest en est sur une bande de quelques centaines de kilomètres de largeur et à une altitude d'environ 10000 m.

Sa vitesse atteint fréquemment 200 à 300 km/h. Les pilotes de ligne en tiennent compte pour profiter de sa vitesse s'ils vont d'Ouest en est ou au contraire pour l'éviter si leur route est en sens inverse [15].

### 13. Les vents locaux :

Il y a énormément de noms de vent. L'harmattan est un vent froid chargé de poussières qui souffle de l'est ou du nord-est sur le Sahara. Il assèche les voies respiratoires chez l'homme. Il reste très sec car il ne traverse aucune étendue d'eau.

Le blizzard est un vent du grand Nord, glacial, violent et accompagné de neige qui souffle sur le Canada en hiver et au printemps.

Le sirocco se forme dans le désert du Sahara. Il souffle vers le sud de l'Europe.

Il est d'abord chaud et sec, puis il se charge d'humidité en traversant la mer Méditerranée. En Antarctique, le katabatique est un vent glacial des montagnes qui souffle vers les côtes.

Les vents qui viennent des régions chaudes et des déserts font monter la température de l'air. Le föhn est un exemple de vent chaud qui souffle en montagne. Il se forme quand l'air perd de son humidité en s'élevant le long d'un versant au vent. En Amérique du Nord, le föhn est connu sous le nom de chinook. Il souffle sur les versants est des montagnes Rocheuses. Il fait fondre la neige et peut faire monter la température de 20 °C en moins d'une heure.

En France, les vents les plus connus sont le mistral et la tramontane. Le mistral est un vent violent, froid et sec qui descend la Vallée du Rhône. Il est dû à des dépressions localisées sur la Méditerranée. La tramontane est un vent froid qui souffle sur la région du Languedoc et du Roussillon [16].

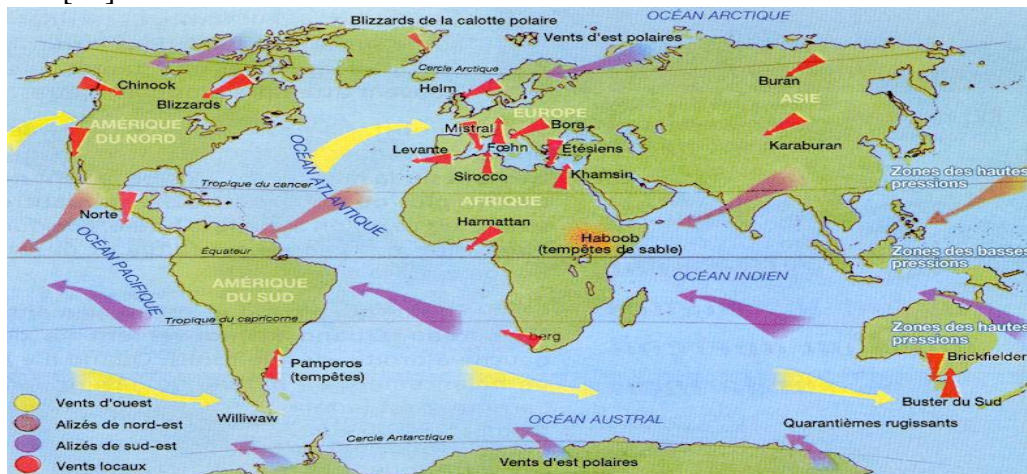


Figure 13 : distribution des vents locaux

#### 14. Les vents de vallée à grande échelle :

Sur une pente de montagne ensoleillée, l'air a tendance à s'élever durant la journée, c'est la brise de pente. Ce sont elles qui créent une dépression au pied des montagnes. La brise de vallée résulte de cet appel d'air des brises de pente présentes tout le long de la vallée qui, à un moment donné, ne peut plus être assuré par le seul milieu de la vallée.

Les brises, des vents nés du contraste de température produit par les effets du rayonnement solaire.

A la différence du vent qui est un phénomène de déplacement d'air horizontal à grande échelle, les **brises** naissent sous l'action du soleil et à l'échelle d'un paysage. Elles sont dues à l'existence d'un appel d'air frais généré par l'élévation d'un air plus chaud donc plus léger [17].

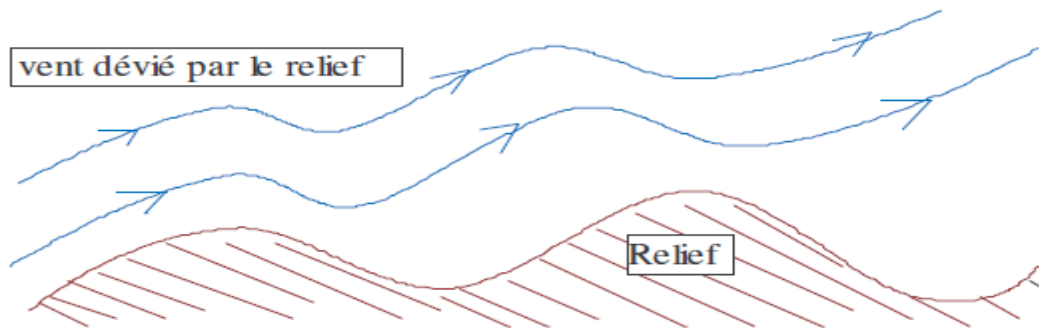


Figure 14 : Les vents de vallée à grande échelle [15].

##### 1. La brise de pente :

Sous l'action du rayonnement solaire, le sol se réchauffe et communique sa chaleur à l'air qui est à son contact. Cet air, devenu plus chaud que l'air environnant, plus léger, s'élève le long de la pente en créant un courant ascendant qui suit la pente de la montagne. C'est la brise de pente montante. Cet air ascendant est alors remplacé par de l'air plus froid, issu du milieu de la vallée ou d'un versant non exposé au soleil. Le soir, lorsque le sol se refroidit, le phénomène s'inverse. Les brises de pente peuvent atteindre une vitesse de 15 à 30 km/h et exister sur une épaisseur de 100 à 200 mètres de hauteur [17].

##### 2. La brise de vallée :

Comme précisé ci-dessus, les brises de pente montante créent une dépression au pied des montagnes. La **brise de vallée** résulte de cet appel d'air des brises de pente présentes tout le long de la vallée qui, à un moment donné, ne peut plus être assuré par le seul milieu de vallée, et cela d'autant plus vite si celle-ci est étroite. Cet appel d'air, qui communique de proche en proche jusqu'à l'embouchure de la vallée, aspire ensuite l'air dans les vallées environnantes et la plaine. Les brises de vallée souffleront donc des vallées de basse altitude vers les vallées de haute altitude en journée et inversement la nuit.

La vitesse d'une brise de vallée est donc variable selon le moment de la journée, la saison et le lieu (longueur, altitude et rétrécissement de la vallée).

En général, les brises de vallée sont plutôt faibles à modérées dans les larges vallées des massifs comme les Alpes. Dans les vallées étroites ou qui se rétrécissent, il peut y avoir des brises extrêmement violentes et dangereuses (plus de 50 km/h) [17].

### 15. Inconvénients des brise-vent :

Les brise-vent peuvent augmenter les risques de gel dans la zone protégée, surtout par nuit claire et vent léger, en réduisant le brassage d'air qui favorise le réchauffement des températures près de la surface du sol (Jensen, 1964) ou en bloquant le drainage d'air froid dans les pentes. Ces inconvénients peuvent être réduits si on installe des brise-vent de porosité plus élevée [18].

### 16. La connaissance du vent en aéronautique :

Pour les pilotes d'aéronefs le vent est très important. S'il est trop fort ou trop turbulent il est dangereux au cours du roulage entre la piste et le parking ou au cours de l'atterrissage et du décollage. En l'air un vent très turbulent peut entraîner la perte de contrôle de l'appareil ou le dépassement de résistance structurelle. D'autre part, en navigation, il induit une dérive pouvant amener le pilote à se perdre s'il n'en tient pas compte ou une surconsommation à ne pas négliger dans les branches vent de face. Il est donc primordial de se renseigner sur le vent avant tout vol.

Les services de météorologie aéronautique fournissent les informations suivantes sur le vent :

- la direction d'où il vient
- la vitesse du vent en noeud (1 kt = 1 noeud = 1 Nm/h = 1,852 km/h)
- si nécessaire, la vitesse des rafales

Sur les cartes aéronautiques, il est représenté par un drapeau dont l'extrémité libre du mât indique la direction dans laquelle le vent souffle. Le fanion est constitué de triangles pleins pour 50 kT de vent, de longues barres pour 10 kT et de demi-barres pour 5 kT [15].

### 17. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types du vent (le vent géostrophique, thermique et solaire) et les caractéristiques du vent (la vitesse et la direction).

Nous pouvons conclure que le vent c'est un phénomène naturel utilisé comme énergie renouvelable pour assuré les besoins en énergie.

### 18. Références bibliographie :

[1] <http://www.meteolafleche.com/vent>

[2] <http://lesia.obspm.fr/Caracteristiques-generales-du-vent.html>

[3] <http://bictel.ulg.ac.be/ETD-db/collection/available/ULgetd-06112009-111926/unrestricted/2Atmosphere.pdf>

[4] M. Boudia Sidi Mohammed ; « Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie » ; Thèse Doctorat ; Université de Tlemcen Abou-Bakr Blekaïd ; Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables URMER.

[5] <https://www.intellego.fr/soutien-scolaire--/aide-scolaire-svt/7-schemas-sur-la-structure-de-l-atmosphere-terrestre-avec-troposphere-stratosphere-mesosphere-et-thermosphere/54348>

[6] <http://georepere.e-monsite.com/medias/files/chap-11-structure-de-l-atmosphere.pdf>

[7] Ksentini Abdelhamid ; « Gestion et optimisation du site idéal des éoliennes en Algérie pour une zone autonome » ; thèse Doctorat.

[8] <http://www.techno-science.net/glossaire-definition/Vent.html>

[9] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Anémomètre>

[10] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Girouette>

- [11] <http://matdemesure.e-monsite.com/pages/comment-mesurer-le-vent.html>
- [12] Bouketta Samira ; « l'effet de la géométrie urbaine sur l'écoulement du vent et la ventilation naturelle extérieure » cas de la ville de Jijel ; Mémoire de magistère ; Université Mentouri Constantine ; page (8 et 9) ; 03/03/2011.
- [13] <http://tpeair.free.fr/Chapitre2.html>
- [14] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Force\\_de\\_Coriolis](https://fr.wikipedia.org/wiki/Force_de_Coriolis)
- [15] METEOROLOGIE - Brevet d'Initiation Aéronautique Calais  
*<http://www.biacalais.free.fr/cours/Meteorologie-V2.pdf>*
- [16] <http://www.icem-freinet.net~btj513ventvent05.htm.htm>
- [17] <http://paragliding.rocktheoutdoor.com/conseils/le-phenomene-des-brises-de-vallees>
- [18] [https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/Haies%20brise%20vent\\_OIFQ.pdf](https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/Haies%20brise%20vent_OIFQ.pdf)

## **CHAPITRE II**

# **ETAT DE L'ART DES SYSTEMES DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE**

1. Introduction :

L'utilisation des systèmes éoliens pour la production d'électricité est une solution pour satisfaire les besoins en électricité dans un site isolé bien venté. De tel système présente plusieurs avantages du fait de sa flexibilité et sa fiabilité.

Il existe deux types d'éoliennes modernes : le système à axe horizontal et à axe vertical. Les plus courants sont celles à axe horizontal [1].

2. Définition de l'énergie éolienne:

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [2].

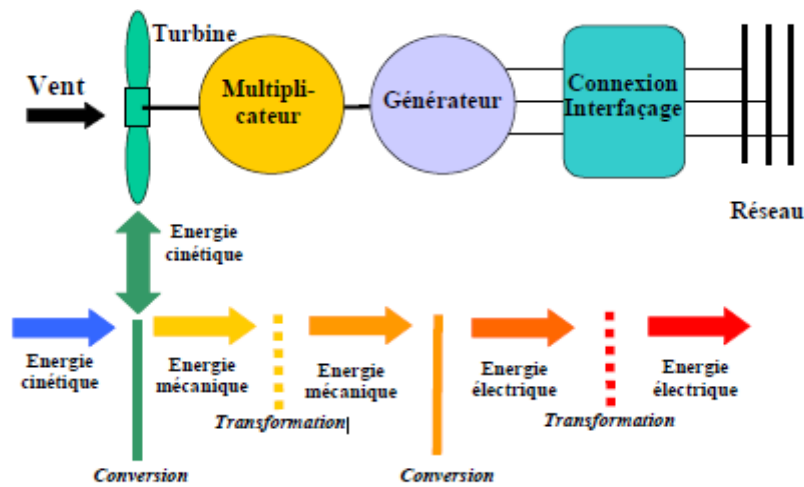


Figure 1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [3].

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. Selon la Fig. 2 [4].

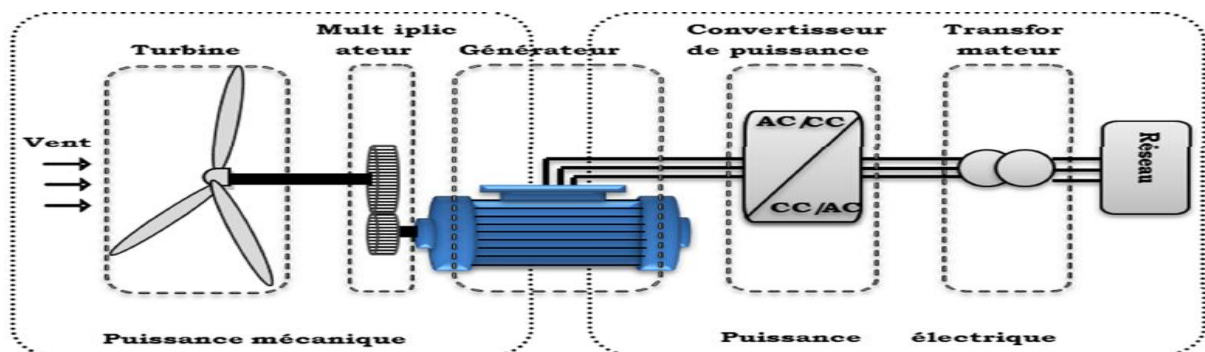


Figure 2: Principaux organes du système de conversion éolien [4].

### 3. Histoire de l'énergie éolienne :

- **VII<sup>e</sup> siècle** : Utilisation en Perse (Iran actuel) de roues à énergie éoliennes rudimentaires composées d'une simple tour supportant des pales faites à partir de roseaux attachés en paquets servant à l'irrigation des terres cultivées et pour écraser du grain
- **1100** : En Europe, les premières éoliennes sont construites et utilisées pour pomper l'eau et moudre le blé, ces moulins à vent sont composés de quatre pales qui tournent autour d'un axe horizontal
- **XIV<sup>e</sup> siècle** : Des améliorations sont apportées progressivement aux moulins à vent européens afin d'augmenter la portance aérodynamique (la « poussée ») et la vitesse du rotor. Ces améliorations permettent d'obtenir une meilleure mouture et une irrigation plus efficace. Développement en Europe et plus particulièrement aux Pays-Bas du moulin à vent pour le meulage du grain, l'irrigation des terres agricoles, le pompage de l'eau de mer, le sciage du bois, la fabrication du papier et de l'huile et le meulage de divers matériaux.
- **1700** : Les turbines éoliennes font leur apparition au Canada grâce aux colons qui les utilisent pour moudre le grain.
- **Fin des années 1700** : Les moulins à vent sont l'équivalent du moteur électrique de l'Europe pré-industrielle. Ils fournissent environ 1 500 mégawatts (un niveau qui n'a été atteint par la suite que vers la fin des années 1980). Cette énergie éolienne est utilisée pour irriguer les terres, moudre le grain, scier le bois d'œuvre et pour traiter des produits comme les épices et le tabac.



Figure 3 : Moulins à vent dans la région de La Mancha, Espagne

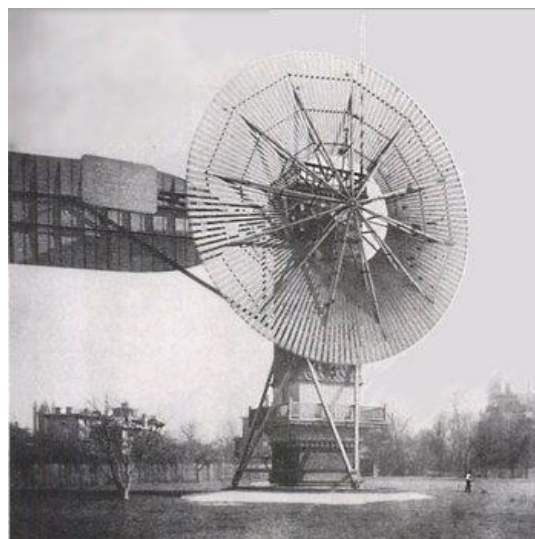


Figure 4 : La première éolienne automatique, fabriquée à Cleveland en 1887 par Charles F. Brush. haute de 18 m, pesant 3,6 tonnes alimentant une génératrice de 12 kW

- **1800** : Les homesteaders américains utilisent les moulins à vent pour pomper de l'eau pour alimenter leurs fermes et leurs ranchs lors de leur établissement dans l'Ouest. Les pales de ces premiers moulins à vent de ferme étaient de simples palettes de bois.
- **1887-1888** : L'américain Charles F. Brush, un scientifique de Cleveland en Ohio, construit la première éolienne entièrement automatisée qui produit du courant pour 12

- batteries, 350 lampes à filament, 2 lampes à arc à charbon et 3 moteurs. Haute de 17 mètres et composée de 144 pales en cèdre, elle avait une puissance de 12 kW. Jusqu'en 1920, la quasi-totalité des éoliennes seront munies de rotors à pales multiples.
- **1890** : La première éolienne dite « industrielle » permettant de générer de l'électricité est mise au point par le Danois Poul La Cour, permettant de fabriquer de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Dans les années suivantes, il crée l'éolienne Lykkegard, dont il vend soixante-douze exemplaires en 1908.
- **1891** : l'inventeur danois Poul La Cour conçoit plusieurs éoliennes expérimentales et mène des recherches en soufflerie. Il découvre que des turbines à rotation rapide composées d'un nombre moins grand de pales génèrent davantage d'électricité que des turbines plus lentes composées de nombreuses pales. Il met au point les premières éoliennes conçues à partir des principes modernes de l'aérodynamique. D'une puissance 25 kW grâce à des rotors à quatre pales elles affichent une plus grande efficacité. À la fin de la Première Guerre mondiale, l'utilisation de ces machines était largement répandue au Danemark. Cette éolienne expérimentale existe toujours à Askov (Danemark).
- **1920** : L'inventeur français Georges J.M. Darrieus développe le concept d'un rotor à axe vertical : éoliennes Darrieus.
- **1920** : Albert Betz poursuit des recherches sur la physique et l'aérodynamique des éoliennes. Il formule la loi qui porte son nom, selon laquelle l'énergie cinétique du vent peut être exploitée au maximum à 59,3%. Sa théorie sur le façonnage des ailes est encore appliquée de nos jours.
- **1930** : Développement de petites éoliennes dans les régions rurales des grandes plaines américaines. D'une puissance de 1 à 3 kW, elles permettaient d'éclairer les fermes et de recharger les batteries des radios à cristal. Les éoliennes sont par la suite utilisées pour alimenter des appareils électroménagers et de l'équipement de ferme. Les fermes canadiennes utilisent les éoliennes pour produire de l'électricité et pour pomper l'eau des puits destinée aux auges pour le bétail
- **Première moitié du XX<sup>e</sup> siècle** : Les éoliennes sont confrontées à la concurrence croissante des centrales au charbon et du réseau électrique au niveau national. En raison des pénuries de charbon et de pétrole pendant les deux guerres mondiales, la demande en énergie éolienne se maintient.
- **1955** : En France à Nogent-le-Roi dans la Beauce, une éolienne expérimentale de 800 kVA fonctionne de 1955 à 1963. Elle avait été conçue par le Bureau d'études scientifiques et techniques de Lucien Romani et exploitée pour le compte d'EDF.
- **1957** : Johannes Juul crée la turbine Gedser pour la compagnie d'électricité SEAS au Danemark qui sert de modèle aux éoliennes modernes, elle se compose d'un générateur et de trois Pales à pivot.
- **1960** : Ulrich Hutter met au point des plans élaborés de turbines à axe horizontal en Allemagne. Ces turbines sont dotées de pales en fibre de verre et possèdent un angle d'attaque ajustable afin d'en augmenter l'efficacité.
- **1971** : Premier parc d'éoliennes en mer au large du Danemark d'une puissance totale de 5 MW.
- **1973** : La crise pétrolière ravive l'intérêt pour le grand éolien et incite les gouvernements de l'Allemagne, de la Suède, du Canada, du Royaume-Uni et des États-Unis à financer des projets de recherche sur les énergies renouvelables. Ces programmes sont à l'origine de la conception et de la mise en œuvre de nouveaux designs d'éoliennes qui réduisent de façon significative le cout de l'énergie éolienne



- au cours des deux décennies suivantes. Des parcs éoliens sont construits durant les années 1970 aux États-Unis ainsi qu'en Europe.
- **1980** : L'état de Californie décide que d'ici l'an 2000, 10 % de son alimentation énergétique proviendra de l'énergie éolienne et favorise l'installation de 17 000 éoliennes de 20kW à 350 kW entre 1981 et 1990.
- **1984** : Projet Éole, la plus grande éolienne de type Darrieus au monde.
- **2002** : Mise en service du plus grand parc éolien offshore au monde (en 2002) au Danemark (Horns Rev)
- **2004** : La capacité mondiale d'énergie éolienne dépasse les 39 000 MW [5].

#### 4. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne:

Tous systèmes de production d'énergie à ses avantages et ses inconvénients [6-9] :

##### 1. Avantages :

- ✚ Énergie propre non polluant, gratuite, abondante et inépuisable
- ✚ Elle peut être complémentaire aux filières traditionnelles
- ✚ Elle ne consomme pas de combustibles
- ✚ Elle permet que le terrain occupé par les parcs éoliens soit utilisé à d'autres fins, par exemple : agricoles
- ✚ Bas impact environnemental
- ✚ Ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et venté.
- ✚ Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre à vos besoins en matière d'électricité.
- ✚ Temps de réalisation d'une centrale éolienne minimum.
- ✚ Ils ont une longue durée de vie.
- ✚ On élimine les frais et les risque de transport associé des énergies fossiles.

##### 2. Inconvénients :

- ✚ Instable, elle est sujette à des variations du vent et à des périodes de calme
- ✚ Difficulté de stockage de l'énergie
- ✚ Les équipements sont chers et produisent du bruit
- ✚ Impact visuel (effets d'ombre dus au mouvement et réflexions intermittentes)
- ✚ Interférences électromagnétiques.

#### 5. Les différents types d'éoliennes:

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéroturbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal [2].

##### 5.1. Eolienne à axe vertical :

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux [2].

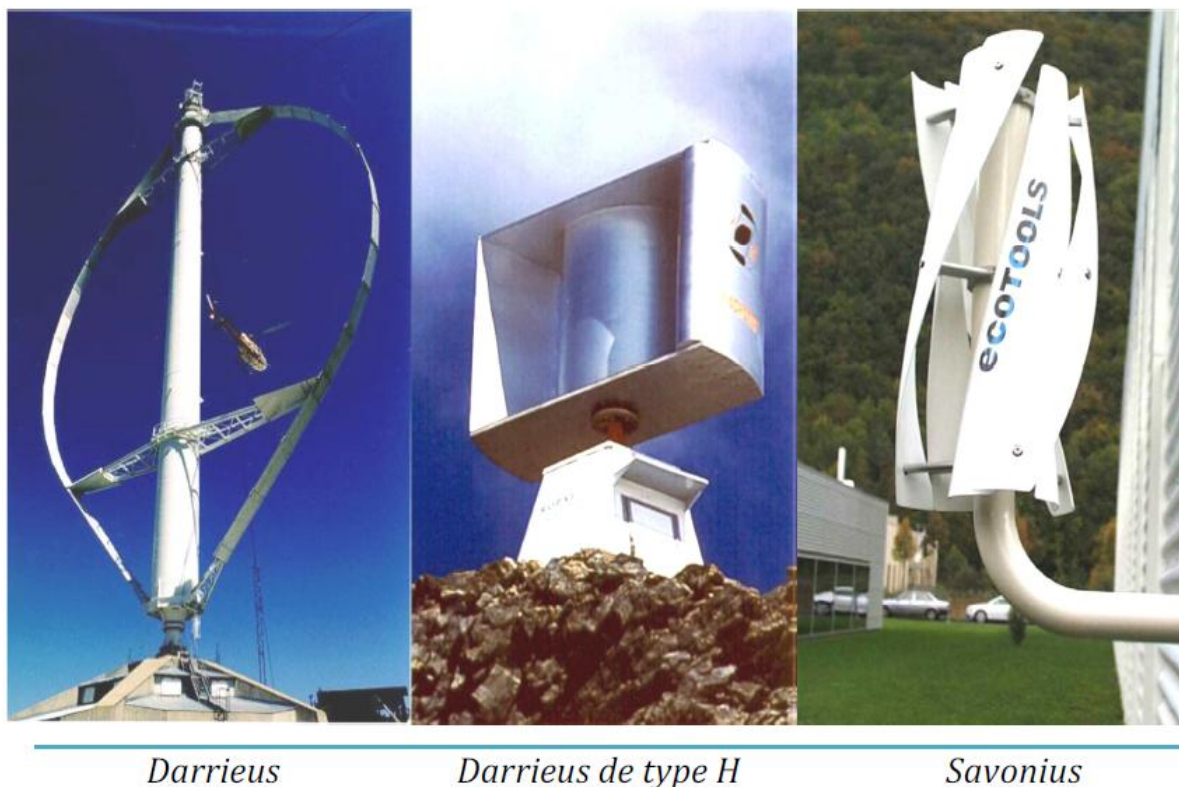


Figure 5 : Technologie éolienne à axe vertical.

A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit [2].

#### 5.1. a. Avantages:

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

#### 5.1. b. Inconvénients :

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

## 5.2. Eoliennes à axe horizontal :

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent [2].



Figure 6 : technologie éolienne à axe horizontale

### 5.2. a. Avantages :

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

### 5.2. b. Inconvénient :

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

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

Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [2].

Dans le reste de notre étude nous nous intéressons à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales à pas variable (variable pitch) [2].

## 6. Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Héritiers des moulins à vent, les aérogénérateurs - plus souvent appelés éoliennes - utilisent la force du vent pour la transformer en électricité.

La machine se compose de pales (3 en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé sur une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter la nacelle afin que le rotor soit toujours face au vent.

Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute.

Le générateur transforme l'énergie mécanique ainsi créée en énergie électrique injectée dans le réseau en conformité aux normes électriques applicables [10].

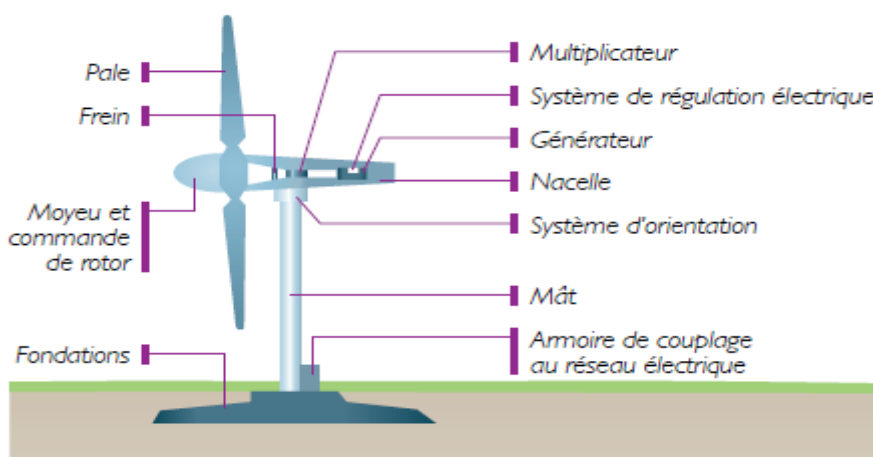


Figure7 : Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur

Les éoliennes fonctionnent pour des vitesses de vent généralement comprises entre 14 et 90 km/h. Au-delà, elles sont progressivement arrêtées pour sécuriser les équipements et minimiser leur usure.

La probabilité d'occurrence de vents plus forts étant faible, il n'est pas économiquement rentable de dimensionner les machines pour résister et produire à des vitesses de vents supérieures à 25 m / s [10].

### 7. Principes et éléments constitutifs d'une éolienne :

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne «classique» est généralement constituée de trois éléments principaux [11].

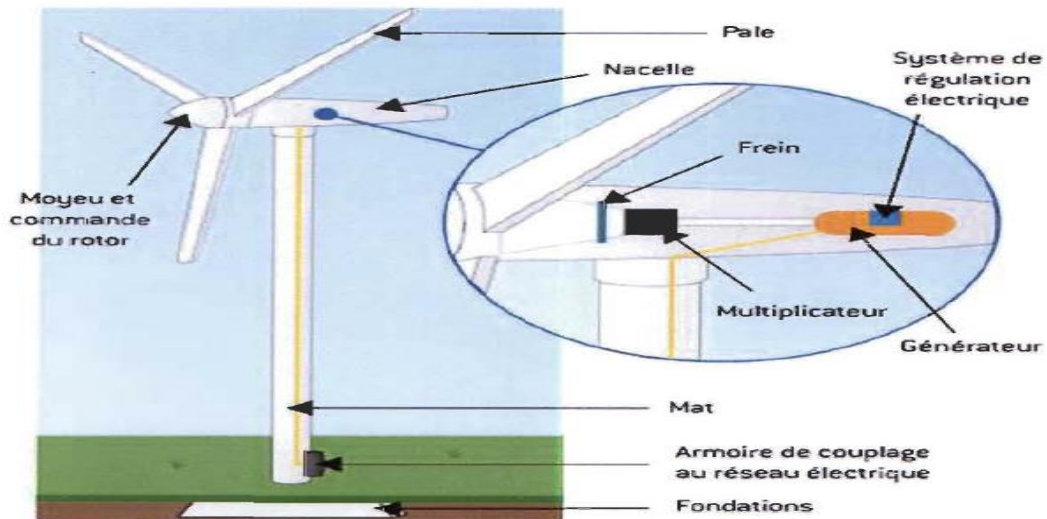


Figure 8 : Les éléments d'une éolienne

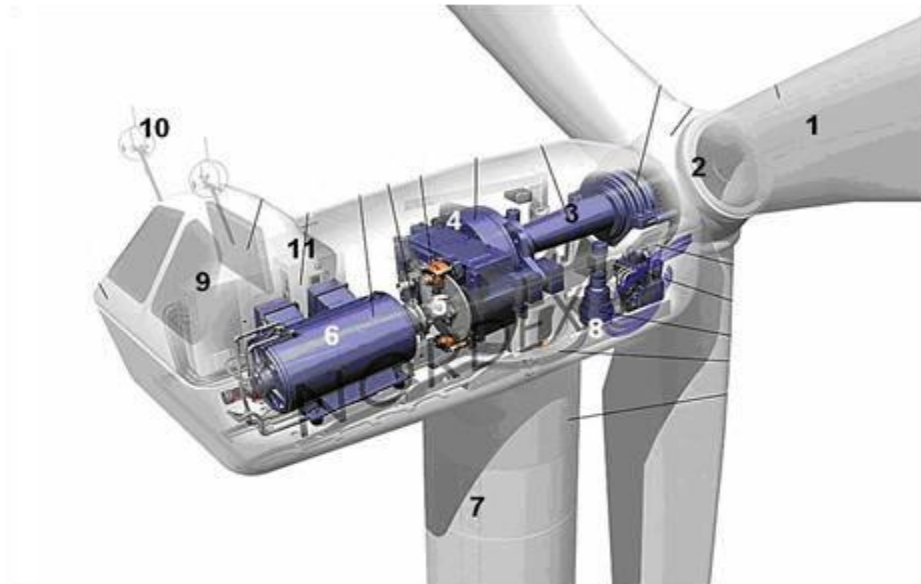


Figure 9 : les composants de l'aérogénérateur

- 1. Les pales** : ce sont les **capteurs de l'énergie cinétique** qui **transmettent l'énergie au rotor**. Elles sont en fibres de verre et matériaux composites. Leur profil est le fruit d'études **aérodynamiques complexes** [12].

Les éoliennes à marche rapide sont généralement bipales ou tripales. La roue bipale est la plus économique et la plus simple mais elle est génératrice de vibrations qui peuvent être importantes. La roue tripale présente moins de risques de vibrations, d'où fatigue et bruit plus faibles, mais elle est plus compliquée et plus lourde [13].

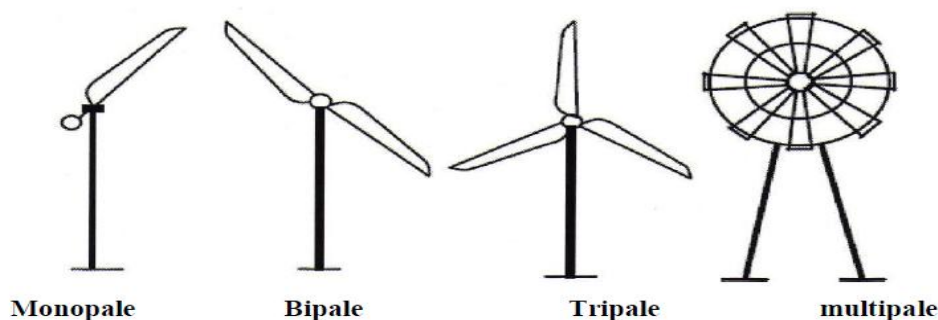


Figure 10: classification des éoliennes à axe horizontal  
Selon le nombre de pale [14]

2. **Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
3. **L'arbre primaire** (ou arbre lent) : il relie les pales au multiplicateur.
4. **Le multiplicateur** : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
5. **L'arbre secondaire** : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
6. **Le générateur électrique** : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
7. **Le mât** : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante: plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales [12].

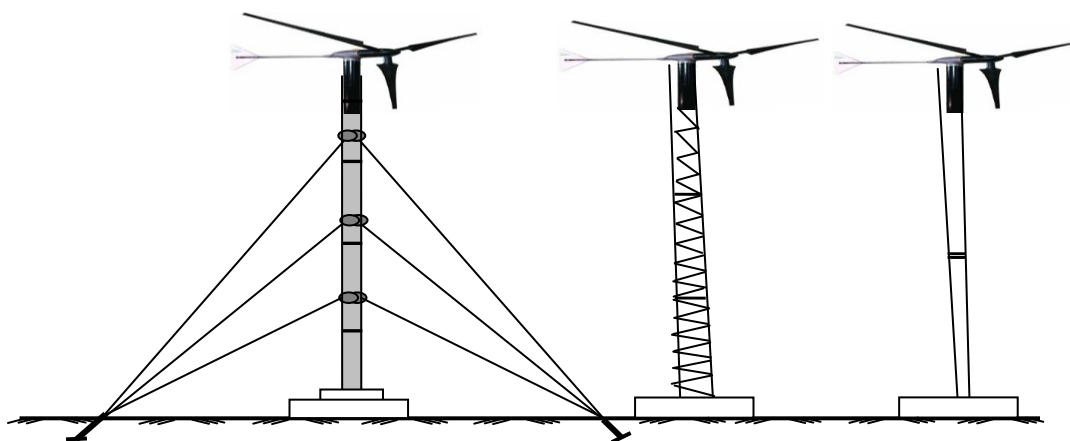


Figure 11 : les types des mâts. Pour les petites éoliennes, les mâts haubanés (à gauche) sont les plus économiques. Les mâts en treillis autoportant (au centre) et les mâts tubulaires en porte-à-faux (à droite) sont plus coûteux, mais restent des options possibles [13].

**8. Le système d'orientation de la nacelle** : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.

**9. Le système de refroidissement** : il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.

**10. Les outils de mesure du vent** : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.

**11. Le système de contrôle électronique** : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.

12. Au pied du mât se trouve un **transformateur** [12].

## 8. Critères de choix pour les sites éoliens :

Les critères de choix de l'implantation des éoliennes dépendent de la taille, puissance et du nombre d'unités. Les rendements d'une éolienne dépendent de la régularité et de la puissance du vent. Les sites les plus intéressants sont généralement situés au bord de la mer ou aux sommets de collines et de montagnes bien dégagées. Elle peut être aussi une solution dans les pays où les lignes d'interconnexion ne parviendront pas du fait de la faible densité de population même si les vents ne sont pas optimums.

### A-Critères Naturels :

**Le vent:** La puissance fournie par une éolienne augmente avec le cube de la vitesse du vent, raison pour laquelle les sites sont d'abord choisis en fonction de la vitesse et la fréquence des vents présents (site avec vents de 30 km/h huit fois plus productif qu'un site avec vents de 15 km/h).

Le vent doit être constant, pas trop fort. Idéalement compris entre 15 km/h et 90km/h. Au-delà, le vent devient trop fort, l'éolienne s'arrête et se met en drapeau.

Un autre critère important est la turbulence du vent (la constance de la vitesse et de la direction du vent). Une direction de vent la plus stable possible pour obtenir un rendement optimal et tout obstacle naturelle ou non (arbres, bâtiments, escarpements complexes, etc.) peut causer des turbulences et des variations de vitesse du vent importantes.

Certains sites bien spécifiques augmentent la vitesse du vent et sont donc plus propices à une installation éolienne :

- L'effet Venturi : lorsque l'air s'engouffre entre deux obstacles comme deux montagnes ou deux grands bâtiments, il est accéléré par effet venturi. De même, lorsqu'il rencontre un une colline, l'air est accéléré au niveau du sommet. Ils sont cependant le plus souvent de surface restreinte.
- La mer et les lacs (à proximité d'une côte non escarpée) sont aussi des emplacements de choix : il n'y a aucun obstacle au vent, et donc, même à basse altitude, les vents ont une vitesse plus importante et sont moins turbulents.
- L'altitude: Le vent est engendré par une différence de température ou de pression. Il est ralenti par les obstacles, et la rugosité du sol, et est généralement plus fort en altitude. Les plaines ont des vents forts parce qu'il y a peu d'obstacles. Les cols de montagne ont eux aussi des vents forts, parce qu'ils canalisent les vents de haute

- altitude. Dans certains cols, les vents proviennent de l'écart de température entre les deux versants.

### Autres critères:

D'autres critères sont pris en compte pour le choix du site.

- La nature du sol : il doit être suffisamment résistant pour supporter les fondations de l'éolienne. Ce critère n'est pas déterminant car dans le cas d'un sol meuble, des pieux seront alors enfoncés sous les fondations de l'éolienne il existe aussi des éoliennes haubanées.
- L'accessibilité du site doit permettre le transport des gros éléments de l'éolienne (pales, tour, nacelle) et des grues nécessaires au montage.
- La connexion au réseau électrique: Pour cela, les fermes d'éoliennes sont le plus souvent situées à proximité d'un poste de transformation haute tension afin de diminuer le coût de raccordement.
- La taille: Les éoliennes, selon leur taille, vitesse de rotation et positionnement peuvent avoir un impact sur les oiseaux ou chauve-souris, les réserves naturelles, les routes migratoires importantes sont des lieux à éviter pour la sauvegarde des oiseaux.
- L'impact sonore sur les habitations avec une réglementation (émergence maximale de 5 dBA le jour et 3 dBA la nuit). La distance entre les éoliennes et les habitations est généralement de 300 m. À environ 500 m, elles sont inaudibles ou très peu audibles et leur bruit est généralement couvert par le bruit du vent [15-16].

### 9. Conclusion:

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, non polluante avec un grand potentiel de développement. En effet, les éoliennes ne rejettent aucun gaz ou substance dangereuse dans l'environnement et n'entraînent pas de production de déchets. Des architectes comme Vincent Callebaut et un de son projet: PARIS EN 2050 souhaite intégrer à son projet des énergies renouvelables.

### 10. Références bibliographie :

- [1] S. Lazaar, « Contribution à l'étude d'une station éolienne pour la production de l'électricité. Application aux sites de Tlemcen, Djelfa et Ghardaïa », Mémoire de Magister Université de Tlemcen, Tlemcen 2009.
- [2] Mohammed Tahar LATRECHE, « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien », Mémoire de Magister; Université Ferhat Abbas de Sétif , UFAS –ALGERIE ; Pages (4 et 5), 24 /06 /2012.
- [3] Kelkoul Bahia, « Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation », Mémoire Magister API Option: Automatique université de Tlemcen 2011.
- [4] Tir Zoheir, « Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade », mémoire de magister Université de Sétif, 2010.
- [5] [http://eolienne.f4jr.org/histoire\\_energie\\_eolienne](http://eolienne.f4jr.org/histoire_energie_eolienne)



- [6] T.J. Hammons, M. Willingham, K.N. Mak, M. Silva, M. Morozowski, B.K. Blyden, « Generation and Transmission Improvements in Developing Countries », IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, N<sup>o</sup>. 3, pp. 760-765. Septembre 1999.
- [7] Liuchen Chang, « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne », IEEE Canadian Review - Summer / Été, pp. 1-5. 2002.
- [8] H. Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable », Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, N<sup>o</sup> d'ordre 22 ; Décembre 2003.
- [9] Site Internet, [www.rncan.gc.ca/penser](http://www.rncan.gc.ca/penser). Programme d'encouragement aux systèmes d'énergie renouvelables.
- [10] [http://ademe.typepad.fr/files/guide\\_ademe\\_energie\\_eolienne-1.pdf](http://ademe.typepad.fr/files/guide_ademe_energie_eolienne-1.pdf)
- [11] Abdoulayb Mamadie Sylla « Modélisation d'un émulateur éolien a base de machine asynchrone a double alimentation » l'université du Québec à Trois-Rivières ; pages (8 et 9) hiver 2013.
- [12] <http://www.networkhaiti.com/resource/energy/eolienne3.pdf>
- [13] Paul Gipe. Le grand livre de l'éolien : Editions Le Moniteur. Paris. France.
- [14] M. Sathyajith, « Wind Energy », Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Inde, 2006
- [15] <http://texsud.e-monsite.com/pages/i-l-eolienne-une-energie-nouvelle/3-criteres-de-choix-pour-les-sites-eoliens.html>
- [16] <https://www.voseconomiesdenergie.fr/faqs/eolienne/quelles-sont-les-conditions-requises-pour-installer-une-eolienne>

## **CHAPITRE III**

### **PRESENTATION DES CARACTERISTIQUES DES SITES ETUDIES**

## 1. Introduction :

L'estimation des ressources en énergie éolienne présente une difficulté majeure. Contrairement aux réserves en combustible fossile, la quantité d'énergie disponible varie avec la saison et l'heure du jour. L'énergie éolienne est d'avantage influencée par la topographie que l'énergie solaire. De plus, la quantité totale d'énergie éolienne convertible sur le territoire d'une nation, dépend de façon significative des caractéristiques, du rendement espéré, du dimensionnement et de la répartition horizontale des éoliennes.

L'énergie éolienne a connu une très forte croissance au cours de la dernière décennie grâce aux avantages qu'elle présente pour l'environnement, aux percées technologiques connexes et aux programmes d'encouragement gouvernementaux dans le monde [1].

## 2. Situation géographique de la wilaya de Batna :

Assise sur une superficie de 12.038,76 Km<sup>2</sup>; la Wilaya de Batna est située dans la partie orientale de l'Algérie (Nord Est du pays). Entre les « 4° et 7° » de longitude Est et les « 35° et 36° de latitude Nord.

### -Elle est limitée :

- Au Nord : par les Wilaya d'Oum El Bouaghi de Mila et de Sétif.
- A l'Est : par la Wilaya de khenchela.
- Au Sud : par la Wilaya de Biskra.
- Et à l'Ouest : par la Wilaya de M'sila [2].

## 1. Population et activités :

La population totale de la wilaya est estimée à 1 149 623 habitants (RGPH 2008), soit une densité de 95 habitants par Km<sup>2</sup>.

\* Taux de croissance de la population : 1.6 %/an [3].



Figure 1: Situation géographique de la wilaya Batna.

## 2. Climat :

Le Climat des hauts plateaux est de type semi-aride, avec quatre saisons bien distinctes. Les températures moyennes varient de 4 °C en janvier à 35 °C en juillet. En hiver, la température descend en dessous de zéro la nuit, avec de fréquentes gelées. En été, la température peut atteindre les 45 °C à l'ombre. Le total annuel des précipitations est de 210 mm, le taux moyen d'humidité est de 97 %, la neige ne fait son apparition que pendant quelques jours et surtout au mois de mars [4].

## 3. Relief :

La jonction des deux Atlas (Tellien et Saharien) constitue la particularité de la Wilaya et organise en même temps la répartition des différents milieux physiques définis comme suit:

### -Les hautes plaines telliennes :

Au Nord, nous distinguons le domaine des hautes plaines telliennes qui matérialisent la limite Nord de la Wilaya, particulièrement avec la série des petits " chotts " tels que Chott Beida, chott Taricht, Sebkhet Ez Zemoul...etc. Dans cette partie de la Wilaya les altitudes varient de 800 à 1000 m et les pentes excèdent rarement 3 %.

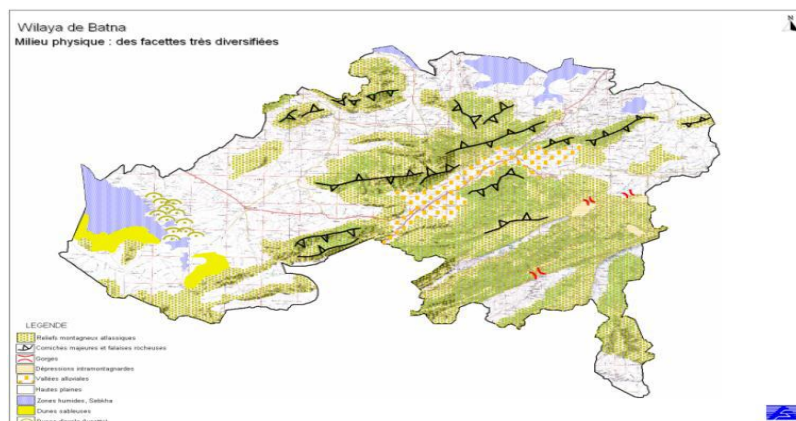


Figure 2 : Relief de wilaya Batna.

### -Les reliefs montagneux :



Figure 3 : Les reliefs montagneux en Batna.

Les altitudes varient de 700 m à 2326 m  
**-Les Hautes Plaines steppiques. 3.764 Km<sup>2</sup> (31%) :**

Encadrée au Nord par les Monts du Hodna, à l'Est par les Monts du Bellezma et Dj Metlili et au Sud par versant Nord des Monts du Zab (Dj Ammar- Bouzokhma).

\*Altitude moyenne inférieure à 500 m.

\*Précipitations inférieures à 300mm.

Cette région peut être scindée en 3 zones :

Wilaya de Batna : Régions Naturelles

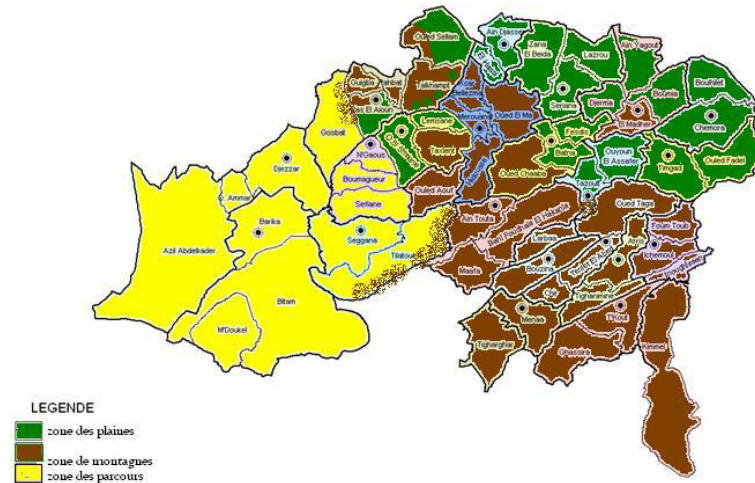


Figure 4 : Les Hautes Plaines steppiques.

-La zone des Glacis immédiatement en contrebas des reliefs montagneux (N'Gaous- El Djezzar- Sefiane- Boumagueur et Gosbat)

-La Plaine du Hodna

(M'Doukel –Barika – Bitam – Ouled Ammar)

-La zone des Chotts (Azil abdelkader) [5].

#### 4. Secteur de l'Agriculture :

La wilaya est à vocation agro-sylvo-pastorale avec une prédominance pour la céréaliculture qui est la principale spéculation effectuée dans la Wilaya.

La superficie qui lui est affectée est de 165810 Ha soit 38,08 % de la SAU totale de la Wilaya.

L'élevage ovin est conjugué avec l'apiculture et l'aviculture. L'industrie n'occupe que 6% de la population active et reste quelque peu marginale. Mais il n'en demeure pas moins que des opportunités existent et restent à développer notamment dans les industries agro-alimentaires. Au niveau du secteur agricole, il est intéressant de s'orienter vers la revalorisation de l'arboriculture: abricotiers, oliviers, pommiers...etc.

Il est à signaler que l'aviculture est devenue d'envergure nationale puisqu'elle participe avec un taux appréciable à la production nationale [5].

## 5. Activités Industrielles :

### -Projets locaux inscrits:

L'économie de la wilaya est surtout axée sur l'agriculture. L'industrie est en plein développement due en partie à la présence d'importantes ressources minières : mines d'agrégats dolomite, calcaire, marbre et des sites de production de plâtre Gypse [6]. Création d'une nouvelle zone industrielle à Ain Yagout d'une superficie de 85 ha [7].

### -Données climatiques à Batna :

Le climat de la wilaya est de type semi-aride. L'hiver est froid avec des températures allant de 0°C à 5°C et l'été est très chaud avec des températures pouvant aller jusqu'à 45°C à l'ombre.[8]

## 3. Situation géographique de la wilaya El-Bayadh :

Elle s'étend sur une superficie de 71 697 km<sup>2</sup>, soit 3 % du territoire national. Elle s'étend du Chott Echergui à l'Erg Occidental et est dominée par les trois monts du djebel Amour de la chaîne Atlas Saharien, le Boudergua 1873 mètres, majestueux par sa masse avec ses vestiges du poste optique, El Ouastani 1878 mètres et le grand Ksel avec 2008 mètres.

### 1. Limitées géographiques:

Conformément à la loi n° 09/1984 du 04 Février 1984 relative à l'organisation territoriale des wilayas, elle est limitée :

- \* Au Nord : Saida et Tiaret.
- \* A l'Est : Laghouat – Ghardaïa.
- \* A l'Ouest : Sidi Bel Abbés – Naama.
- \* Au Sud-ouest : Bechar.
- \* Au Sud-est : Adrar [9].



Figure 5 : Situation géographique de la wilaya El-Bayadh.

## 2. Structure de la Population :

La population de la Wilaya à fin 2010 est de 278 100 habitants, cette situation traduit une évolution importante de la population dans la mesure où en 44 ans, elle a doublée à un rythme moyen annuel absolu de 5.167 habitants selon les différents recensements de la population effectués depuis l'indépendance.

La population ayant un âge inférieur à 15 ans représentant 38% du total de la population, constitue dans les années à venir une importante ressource humaine. [9].

## 3. Le relief :

Le relief de la Wilaya est constitué en grande partie de :

\*Montagnes: 6.111 km<sup>2</sup>

\*Collines et piémonts:10.422 km<sup>2</sup>

\*Plaines:47.254 km<sup>2</sup>

\*Autres: 7.910 km<sup>2</sup>

Wilaya d'El-Bayadh est constituée aussi de (03) zones distinctes qui sont [9]:

### -Zone - I - Hautes Plaines :



Figure 6: le schéma représente le relief dans l' Hautes Plaines

Les Hautes Plaines composées de 06 communes: Bougtob, El Kheiter, Tousmouline, Rogassa, Kef Lahmar, Cheguig et une partie de Mehara. Les altitudes varient entre 900 m à 1.400 m à Hassi Ben Hadjam (Mehara). Cette zone se caractérise par l'amplitude élevée (34 à El Kheiter), la faiblesse et l'irrégularité des précipitations (208 à El Kheiter), la gelée (40 à 60 jour) et la présence de vents chauds (sirocco) avec des périodes sèches. Sur le plan bioclimatique, cette zone fait partie de l'étage aride frais [9].

### -Zone - II - Atlas Saharien :

L'Atlas Saharien composé de 13 communes : El-Bayadh - Boualem - Sidi Amar - Sidi Taiffour - Sidi Slimane - Stitten - Ghassoul - Krakda - Ain El Orak - Arbaouet - Chellala - Mehara et Boussemgoun. Elle présente une situation bioclimatique (semi aride froid) relativement plus avantageuse par rapport à celle de la partie Saharienne de la Wilaya. Elle bénéficie de l'apport en eau et alluvions provenant des sommets et versants des reliefs montagneux dont les altitudes varient entre 1300 mètres et 2000 mètres (2008 m Djebel Ksel à l'Ouest de la localité de Stitten. Les précipitations sont relativement plus importantes par

rapport aux autres zones l'hiver et plus rigoureux et l'enneigement dépasse 10 jours par an [9].



Figure 7 : le schéma représente le relief dans l'Atlas Saharien

#### **-Zone - III - Prés Saharienne:**

La Prés - Saharienne est constituée uniquement de Trois communes qui sont : Brezina - El Abiodh Sidi Cheikh et Bnouid. Partie la plus désavantagée, elle représente la superficie la plus importante de la Wilaya (71 % de la superficie totale) [9].



Figure 8 : le schéma représente le relief dans le Prés Saharienne

#### **4. Le climat :**

Sur le plan climatologique, la Wilaya est caractérisée par deux périodes principales qui expriment le contraste important durant l'année à savoir:

- Un Hiver rigoureux avec de fréquentes chutes de neige.
- Un Eté chaud et très sec. Ce qui favorise l'apparition des plantes résistantes à la sécheresse.

La situation dont découle des écarts thermiques brusques et importants :

Pluviométrie : est très irrégulière et varie de 200 à 300 mm durant l'année.

Température : un Hiver froid de température moyenne de 6° C et un Eté chaud de 36° C [9].



### 5. Secteur de l'Agriculture :

La wilaya d'El-Bayadh a un potentiel agricole non négligeable qui peut être accompagné par le développement de petite industrie dans le domaine de l'agroalimentaire (huilerie, transformation de fruits et légumes...) et les entreposages frigorifiques.

D'autre part la culture de plantes aromatiques et médicinales (excellente qualité) pourra se développer en raison des facteurs naturelles favorables à savoir (Altitude, Pauvreté des sols, Bon drainage, Sécheresse, Ensoleillement) [9].



Figure 9 : le schéma représente l'agriculture dans la wilaya.

### 6. Secteur de l'Industrie :

Le tissu industriel est quasiment inexistant, l'emploi industriel ne représente que 1,67 % de la population occupée de la Wilaya. La Wilaya d'El-Bayadh possède d'importantes richesses naturelles dont l'exploitation reste ouverte aux divers investisseurs intéressés pour l'utilisation en l'état (sels, sable de construction) ou après transformation (granulats routiers) ou comme matière première (cimenterie, briqueteries, verreries...) [9].

### 3. Situation géographique de la wilaya Tiaret (kaser chellala)

La wilaya est située au Nord-ouest du pays. Elle est limitée par les wilayas suivantes :

- Au nord : TISSEMSILT et RELIZANE
- Au sud : LAGHOUAT et EL-BAYADH
- A l'ouest : MASCARA et SAIDA
- A l'est : DJELFA

La wilaya s'étend sur une superficie de **20 050 km<sup>2</sup>** [10].

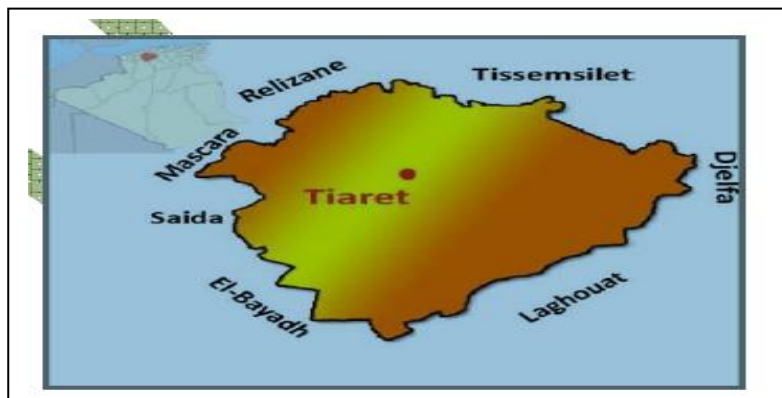


Figure 10 : Situation géographique de la wilaya Tiaret.

### 1. Population et activités :

La population totale de la wilaya est estimée à 902 672 habitants (2012), soit une densité de 45 habitants par Km<sup>2</sup> [10].

### 2. Relief :

La wilaya de Tiaret présente sur le plan physique trois grandes zones distinctes :

- Au nord : une zone montagneuse de l'Atlas tellien.
- Au centre : les hauts plateaux.
- Au sud : des espaces semi arides [11].

### 3. Climat :

La wilaya se caractérise par un climat continental dont l'hiver est rigoureux et l'été est chaud et sec, elle reçoit 300 à 400 mm de pluies en moyenne par an [11].

### 4. Agriculture et forêts :



Figure 11 : l'agriculture dans la wilaya Tiaret.

Par ailleurs, l'évolution d'autres indicateurs témoignent des résultats positifs obtenus grâce aux aides de l'état apportées au secteur de l'agriculture ayant généré une augmentation nettement appréciable de la production des Céréales, Maraîchages, Viandes rouges, Viandes blanches et la production laitière.

Compte tenu de la place stratégique qu'occupe ce secteur dans la politique de réduction de la dépendance alimentaire, pouvant même contribuer à la création de richesse à travers les exportations hors hydrocarbures et s'agissant d'un secteur générateur d'emplois, un intérêt particulier doit lui être consacré [12].

### 5. Industrie :

Durant les années 1990, la wilaya de Tiaret disposait d'un tissu industriel assez conséquent qui employait environ 6.000 personnes. Malheureusement les mesures de privatisation et de liquidation ont réduit cette base industrielle à sa plus simple expression, il n'est dénombré actuellement que quelques unités encore opérationnelles telles que SOTRAFIT, BATISIC, GIPLAIT, ALFET, le complexe BTK SNVI, l'unité de batteries ENPEC Sougueur et quelques autres unités privées [12].



Figure 12 : l'industriel dans la wilaya Tiaret.

### 5. Situation géographique de la wilaya M'sila :

La wilaya est située dans les Hauts-plateaux du centre du pays. Elle est limitée par :

- \*Les wilayas de Bouira et Bordj-ou-Argeridj au nord.
- \*Les wilayas de Sétif et Bouira à l'est.
- \*Les wilayas de Médéa et Djelfa à l'ouest.
- \* La wilaya de Biskra au sud.

La wilaya s'étend sur une superficie de 18 175 km<sup>2</sup> [13]



Figure 13 : Situation géographique de la wilaya M'sila.

#### 1. Population :

La population totale de la wilaya est estimée à 1.094000 habitants en 2011, contre 1.03173.000 habitants en 31/12/2010, soit une augmentation absolue d'environ 21.000 hab. et un taux d'accroissement de l'ordre de 2.04%, la densité est de 60 hab. /km<sup>2</sup> [14].

#### 2. Climat :

Le climat de la Wilaya est de type continental soumis en partie aux influences sahariennes. L'été y est sec et très chaud alors que l'hiver y est très froid.

Sur le plan pluviométrique, la zone la plus arrosée est située au nord elle reçoit plus de 480mm par an (Djebel Ech Chouk - Chott de Ouenougha); quant au reste du territoire, la zone la plus sèche est située à l'extrême sud de la Wilaya et reçoit moins de 200 m/an.

Les précipitations moyennes annuelles de la wilaya en 2010 sont de 153 mm par an.

Les températures moyennes mensuelles de l'année sont de 20 C°, enregistrées au mois plus chaud (Août) sont de 32 C° et le mois plus froid (Janvier) sont de 11 C°. Les températures min et max, enregistrées (-0,2) C° mois de janvier et (45,7) C° en juillet [14].

### 3. Relief :



Figure 14 : Relief de wilaya M'sila.

Le territoire de la Wilaya constitue une zone charnière et de transition entre les deux grandes chaînes de montagnes que sont l'Atlas Tellien et l'Atlas Saharien. La configuration géographique y est comme suit :

- Une zone de montagnes de part et d'autre du Chott El Hodna
- Une zone centrale constituée essentiellement de plaines et de hautes plaines.
- Une zone de chotts et de dépression avec le Chott El Hodna au Centre
- Est et le Zahrez Chergui au Centre Ouest.
- Une zone de dunes de sable éolien [14].

### 4. Secteur de l'Agriculture :

La wilaya de M'Sila est pourvue d'un potentiel agro –pastoral très important où l'ensemble des populations situées en zones rurales tirent l'essentiel de ces ressources.

La superficie agricole totale avoisine 1.817 500 Ha, avec une superficie agricole utile de 275 711 Ha dont 29 410 Ha en irrigués. Les parcours quant à eux occupent une vaste étendue des territoires soit 1.175 770 ha.

Ses territoires se divisent en trois zones :

- \*La zone steppique qui représente 65 % du territoire, caractérisée par des parcours dégradés.
- \*La zone de plaine du Hodna qui représente 23 %, où se concentre toute l'activité agricole.
- \*La zone de montagne qui représente 7 % des territoires, réservée à une agriculture de montagne [14].



Figure 15: l'agriculture dans la wilaya M'sila.

### 5. Activités Industrielles :

M'Sila dispose d'un potentiel industriel varié : ISMMEE, Agro alimentaire, Industrie du verre, Plastique et Bois, matériaux de construction [14].

### 6. Conclusion :

Nous avons étudié dans ce chapitre la situations géographiques de quatre sites en haut plateaux ( Batna , El-Bayadh , ksar-Chellala et M'sila ) où nous avons apprend la population , le climat , le relief , l'agriculture , et l'activités industrielles de chaque wilaya.

### 7. Références bibliographie :

- [1] Brika Abdelkader, Herma Abderrahmane ; « Evaluation du gisement énergétique éolien au sud Algérien ». Mémoire de master. Université d'Adrar 2014.
- [2][<http://www.wilaya-batna.gov.dz/fr/content/aspect-physique-et-situation-g%C3%A9ographique>]
- [3][<http://decoupageadministratifalgerie.blogspot.com/2014/10/monographie-de-la-wilaya-de-batna.html>]
- [4][https://wikimonde.com/article/G%C3%A9ographie\\_de\\_Batna](https://wikimonde.com/article/G%C3%A9ographie_de_Batna)
- [5] <http://www.andi.dz/PDF/monographies/Batna.pdf>
- [6] [www.algerie-monde.com/wilayas/batna/](http://www.algerie-monde.com/wilayas/batna/)
- [7] Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière ; « rubrique monographie wilaya de Batna » ; Page : 5 ; ANIREF 27/07/2011.
- [8] [www.algerie-monde.com/wilayas/batna](http://www.algerie-monde.com/wilayas/batna)
- [9] [www.andi.dz/PDF/monographies/Bayadh.pdf](http://www.andi.dz/PDF/monographies/Bayadh.pdf)
- [10] Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière ; Rubrique Monographie Wilaya de Tiaret ; ANIREF 17/07/2011.  
<http://decoupageadministratifalgerie.blogspot.com/2014/09/monographie-de-la-wilaya-de-tiaret.html>
- [11] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Wilaya\\_de\\_Tiaret](https://fr.wikipedia.org/wiki/Wilaya_de_Tiaret)
- [12] Agence Nationale de Développement de l'Investissement ; Mr. M. BOUSMAHA le Wali de Tiaret ; Janvier 2014.
- [13] Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière, " Rubrique Monographie Wilaya M'SILA " ; 29/07/2011
- [14] <http://www.andi.dz/PDF/monographies/Msila.pdf>

# **CHAPITRE IV**

**TRAITEMENT DES DONNEES ET  
INTERPRETATION DES RESULTATS**

### 1.Introduction :

Dans ce travail on a utilisé les données météorologiques horaires du vent des stations Météorologiques des régions de Msila, Batna, El Bayadh, Ksar Chellala et Bou Saada (la vitesse et la direction du vent, la température). La méthode utilisée est celle de la Distribution de Weibull avec estimation de la puissance effective d'une éolienne implantée dans cette région.

Pour la détermination les deux paramètres de Weibull K et C pour chaque site, on a utilisé le Logiciel de simulation WindPRO.

Ce chapitre est divisé en deux parties :

#### I. Première partie :

La première partie de ce chapitre présente les modèles mathématiques utilisés dans cette étude.

##### I.1. La fonction de distribution de Weibull :

La distribution de Weibull, donnée par l'équation (1), est une distribution à deux paramètres (c et k), qui permet de se rendre compte de quelques propriétés importantes de la distribution du vent en fonction de ces deux paramètres [1-3].

$$f_w(V) = \left(\frac{k}{C}\right) \cdot \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right] \quad \text{pour } V > 0 \quad (1)$$

Où le paramètre c est dénommé facteur d'échelle, représentatif de la valeur pour laquelle la fonction admet un maximum, (de dimension [m/s]), et k est le facteur de forme, sans dimension, caractérisant la dissymétrie de la fonction.

La probabilité pour que la vitesse du vent soit inférieure à un certain seuil donné  $V_x$  est représentée par l'équation (2) :

$$P(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} P(V) \cdot dV = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V_x}{C}\right)^k\right] \quad (2)$$

De même façon, la probabilité pour que la vitesse du vent soit supérieure à cette valeur donnée  $V_x$  est donnée par l'équation (3) :

$$P(V \geq V_x) = \int_{V_x}^{\infty} P(V) \cdot dV = \exp\left[-\left(\frac{V_x}{C}\right)^k\right] \quad (3)$$

La probabilité pour que la vitesse du vent V soit comprise entre deux valeurs  $V_x$  et  $V_y$  données est :

$$P(V_x \leq V \leq V_y) = \int_{V_x}^{V_y} P(V) \cdot dV = \exp\left[-\left(\frac{V_x}{C}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{V_y}{C}\right)^k\right] \quad (4)$$

La vitesse moyenne du vent est donnée par la distribution de WEIBULL [3,4] :

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} f(V) \cdot dV = C \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (5)$$

Où la fonction GAMMA  $\Gamma$  est définie par la relation suivante :

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \exp(-t) \cdot t^{x-1} \cdot dt \quad \text{avec } x > 0 \quad (6)$$

La vitesse cubique moyenne du vent est donnée par la relation suivante [3,4] :

$$\langle V^3 \rangle = \int_0^{\infty} V^3 \cdot P(V) \cdot dV = C^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (7)$$

La variance [3,4] :

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (V - \langle V \rangle) \cdot f(V) \cdot dV = C^2 \cdot \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{K}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{K}\right) \right] \quad (8)$$

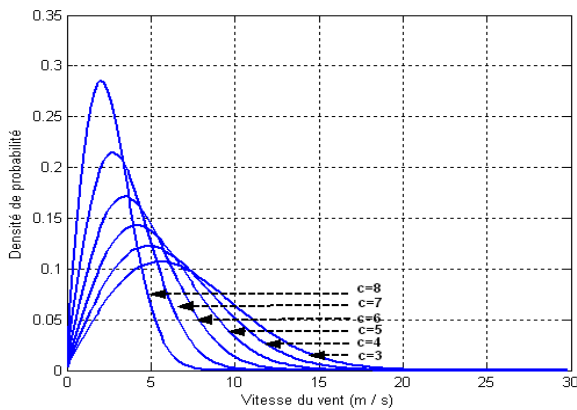


Figure 1 : Fonction de densité de probabilité de Weibull pour différentes valeurs du paramètre d'échelle C, pour k=2.

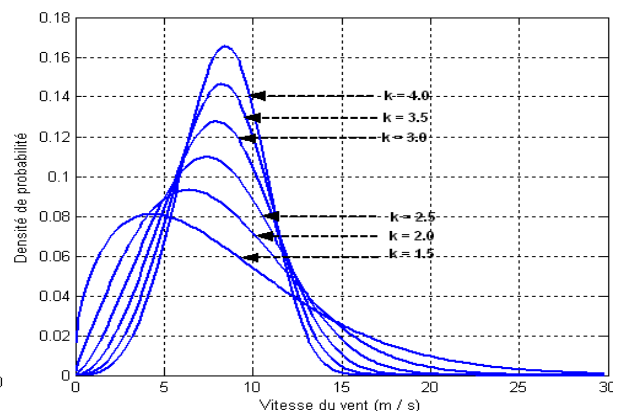


Figure 2 : Fonction de densité de probabilité de Weibull pour différentes valeurs de facteur de forme K, C=7.2m/s.

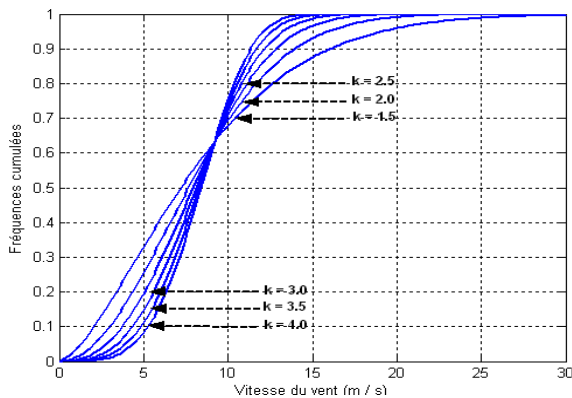


Figure 3 : Fonction de distribution cumulative de Weibull pour différente valeur du facteur de forme K, C = 7.2 m/s.

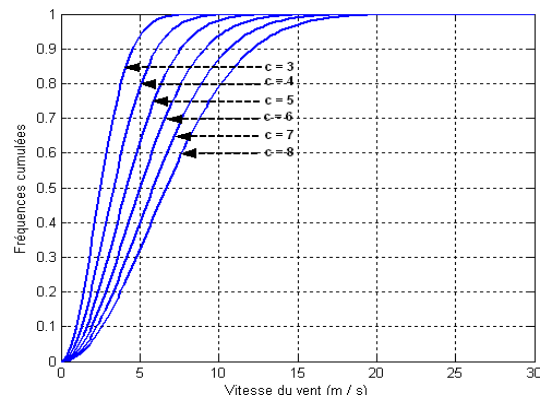


Figure 4 : Fonction de distribution cumulative de Weibull pour différentes valeurs du paramètre d'échelle C, pour k= 2.



## I.2. Roses des vents :

La rose des vents est la distribution statistique de la fréquence des vitesses de vent sur la zone, pour une période donnée, et par secteur de direction.

### a.) Roses des distributions des vitesses du vent :

Les roses des distributions des vitesses du vent sont des distributions des vitesses du vent en module (en  $\text{ms}^{-1}$ ) par secteur de direction donnée. La rose des vents se compose généralement de  $p$  secteurs de  $q$  degrés chacun (avec  $pq=360^\circ$ ).

### b.) Roses des fréquences d'occurrence des classes de vent :

Les roses des fréquences d'occurrence des classes de vent sont des distributions des vitesses du vent en fréquence d'occurrence (% de temps pendant lequel le vent souffle dans une direction). Le rayon de chacun des secteurs coniques indique la fréquence relative du vent dans cette direction.

## I.3. Méthodes de détermination des paramètres de Weibull $k$ et $c$ :

Plusieurs méthodes sont utilisées pour déterminer les paramètres de Weibull  $c$  et  $k$  à partir des données statistiques du vent. Parmi les plus utilisées, on peut retenir :

### 3.1. Méthodes des moindres carrés :

La plus simple est la méthode des moindres carrés qui après hiérarchisation passe par le calcul de fréquence cumulée de la distribution de Weibull qui s'écrit [3,5-7] :

$$P(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} f(V) dV = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k\right) \quad (9)$$

$$P(V \geq V_x) = \int_{V_x}^{\infty} f(V) dV = \exp\left(-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k\right) \quad (10)$$

La relation 10 peut être linéarisée en écrivant :

$$\log[-\log P(V \geq V_x)] = k \log V_x - k \log c$$

Et en posant :

$$Y = \log[-\log f(V \geq V_x)] \quad \text{et} \quad X = \log V_x$$

Il vient :

$$Y = aX + b$$

Avec :

$$k = a \quad \text{et} \quad b = -k \log c \quad (11)$$

D'où :

$$c = \exp\left(-\frac{b}{a}\right) \quad (12)$$

### 3.2. Méthode de la médiane et les quartiles :

Une autre méthode, pratique si l'on connaît la médiane  $V_{m\acute{e}}$  et les quartiles  $V_{0.25}$  et  $V_{0.75}$  des vitesses de vent, consiste à écrire [3] :

$$k = 1.573 \ln \frac{V_{0.75}}{V_{0.25}} \quad (13)$$

$$c = \frac{V_{m\acute{e}}}{(\ln 2)^{\frac{1}{k}}} \quad (14)$$

Les quartiles sont définis par  $p(V \leq V_{0.25}) = 0.25$  et  $p(V \leq V_{0.75}) = 0.75$ .

### 3.3. Méthode de la vitesse moyenne et la variance :

Si la vitesse moyenne  $\langle V \rangle$  et la variance  $\sigma$  d'un site, sont connus, (on peut les déterminer à partir de la distribution statistique), le paramètre de forme,  $k$  est déterminé en posant l'approximation suivante, [3,8-10] :

$$k = \left( \frac{\sigma}{\langle V \rangle} \right)^{-1.086} \quad (15)$$

Le facteur d'échelle est alors déterminé par :

$$c = \frac{\langle V \rangle}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (16)$$

### 3.4. Méthode de la vitesse moyenne et de la variabilité des vents :

Cette approche empirique, consiste à estimer  $k$ , à partir de la variabilité du vent et de la vitesse moyenne, à savoir, [3] :

$$k = \begin{array}{ll} 1.05 \langle V \rangle^{0.5} & \text{variabilité du vent faible} \\ 0.94 \langle V \rangle^{0.5} & \text{variabilité du vent moyenne} \\ 0.73 \langle V \rangle^{0.5} & \text{variabilité du vent élevée} \end{array} \quad (17)$$

Dans ce cas, il faudrait connaître la variabilité du vent.

## I.4 Extrapolation verticale de la vitesse de vent :

### 4.1. Caractéristique vitesse -altitude :

La vitesse du vent augmente avec l'altitude. Cette dépendance s'exprime par la loi (empirique) de Davenport et Harris, 1963 [11] :

$$\left(\frac{V}{V_0}\right) = \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^\alpha \quad (18)$$

Où  $V$  et  $V_0$  sont les vitesses aux hauteurs respectives  $Z$  et  $Z_0$ .

$\alpha$  comprise entre 0,1 et 0,4 (0,1 correspond à la mer, 0,16 à une plaine, 0,28 à une forêt et 0,4 à une zone urbaine), la modélisation est valable s'il n'y a pas de changement de rugosité en amont ( $\alpha$  constant).

#### 4.2. Loi logarithmique :

Le profil logarithmique est déduit à partir du rapport du profil vertical du vent. L'extrapolation de la vitesse mesurée  $V_1$  en un point  $z_1$  vers un niveau  $z_2$ , s'écrirait [12,13] :

$$V_2 = V_1 \frac{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)} \quad (19)$$

$z_0$  : Rugosité du sol, m.

#### 4.3. Loi de puissance 1 /7 :

La loi e puissance qui permet l'extrapolation verticale de la vitesse du vent d'un niveau  $z_1$  à un niveau  $z_2$ , se met sous la forme [14] :

$$V_2 = V_1 \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^{1/7} \quad (20)$$

#### 4.4. Loi de puissance :

L'extrapolation de la vitesse moyenne du vent ainsi que des paramètres de la distribution de Weibull peuvent se faire au moyen du modèle de puissance développé par Justus et Mikhail [15] :

$$V_2 = V_1 \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^\alpha \quad (21)$$

$\alpha$  dépend de la vitesse de la hauteur de mesure.

$$\alpha = a + b \ln V_1 \quad (22)$$

Avec :

$$a = \frac{0.37}{\left(1 - 0.088 \ln\left(\frac{Z_1}{10}\right)\right)} \quad (23)$$

$$b = \frac{-0.088}{\left(1 - 0.088 \ln\left(\frac{Z_1}{10}\right)\right)} \quad (24)$$

Sachant que la hauteur anémométrique de mesure est 10 m, le coefficient de cisaillement  $\alpha$  se simplifie à :

$$\alpha = 0.37 - 0.088 \ln V_1 \quad (25)$$

#### 4.5. Loi à coefficient variable :

A travers leurs travaux sur le potentiel éolien au Maroc, H. Nfaoui al [16] optent pour l'utilisation d'une formule empirique dont l'exposant est à coefficient variable, fonction de la rugosité. Cette expression a été proposée lors de l'établissement de l'atlas marocain, [17], soit :

$$n = \frac{x - 0.0881 \ln V_1}{1 - 0.0881 \ln\left(\frac{Z_1}{10}\right)} \quad (26)$$

Pour :

$$z_0 = 0 - 0.005m \quad x = 0.25$$

$$z_0 = 0.005 - 0.05m \quad x = 0.31$$

$$z_0 = 0.05 - 0.5m \quad x = 0.37$$

$$z_0 = 0.5 - 4m \quad x = 0.48$$

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

### I.5. Extrapolation des paramètres de Weibull :

#### 5.1. Model modifié d'extrapolation de Justus et Mikhail :

En 1976, Justus et Mikhail ont proposé, pour une référence d'altitude initiale égale à 10 m ; les formules suivantes qui donne la variation des paramètres de Weibull en fonction de l'altitude [15] :

$$\frac{K_2}{K_1} = \frac{\left[1 - 0.088 \cdot \ln\left(\frac{Z_1}{10}\right)\right]}{\left[1 - 0.088 \cdot \ln\left(\frac{Z_2}{10}\right)\right]} \quad \text{et} \quad \frac{C_2}{C_1} = \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^m \quad (27)$$

Où  $m$  est donné par

$$m = \frac{\left[0.37 - 0.0881 \cdot \ln(C_1)\right]}{\left[1 - 0.0881 \cdot \ln\left(\frac{Z_1}{10}\right)\right]} \quad (28)$$

### 5.2. Model modifié d'extrapolation de Justus :

Justus a modifié en 1978, l'expression d'extrapolation des paramètres de Weibull en introduisant la rugosité de sol, tel que [8, 18] :

$$\frac{k_2}{k_1} = \left[ \frac{1}{1 - 0.0881 \cdot \ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)} \right] \text{ et } \left( \frac{C_2}{C_1} \right) = \left( \frac{z_2}{z_1} \right)^m \quad (29)$$

Avec :

$$m = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_g}{z_0}\right)} - 0.0881 \cdot \ln\left(\frac{C_1}{6}\right) \text{ et } z_g = (z_1 \times z_2)^{1/2} \quad (30)$$

### 5.3. Model modifié d'extrapolation de Mikhaïel :

Pour une extrapolation à partir d'un niveau quelconque, Mikhaïel en 1985, reprend les expressions d'extrapolation des paramètres proposés en 1976, en modifiant l'exposant tel que [19] :

$$m = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_g}{z_0}\right)} + \frac{0.0881(1 - \ln c_1)}{1 - 0.0881 \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)} \quad (31)$$

### I.6. Densité de l'air :

Pour les éoliennes dont les caractéristiques sont établies pour une valeur donnée de la masse volumique de l'air (en général on prend la valeur  $\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$  qui correspond à la masse volumique de l'air pour l'atmosphère standard au niveau de la mer) et qui sont installées sur un site où la masse volumique de l'air est  $\rho$ , l'équation donnant la puissance fournie doit être corrigée par le facteur  $\rho/\rho_0$  [3].

#### 6.1. Variation de la densité de l'air en fonction de la température et de la pression :

Il est facile de calculer la densité de l'air en fonction des variations de température et de pression à partir de la formule suivante [20-23] :

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (32)$$

Où :

P est la pression atmosphérique en  $\text{N/m}^2$  ou en pascals, R la constante des gaz, 287,04 J/kgK, et T la température en Kelvins.

La variation de la valeur de la pression atmosphérique et de la température ont une influence importante sur la densité de l'air, et donc sur la puissance éolienne récupérable pour une même vitesse du vent.

La pression atmosphérique moyenne est inversement proportionnelle à l'altitude.

Jusqu'à environ 5 000 m d'altitude, la pression atmosphérique moyenne,  $P$  (kPa), à une altitude de  $z$  mètres au-dessus du niveau de la mer, peut être estimée utilisant l'équation suivante [22] :

$$P = P_0 \cdot \exp\left(\frac{-Z}{8200}\right) \quad (33)$$

Où  $P_0$  représente la pression atmosphérique au niveau de la mer (c.-à-d. 101.3 kPa). Plus la température est élevée, moins l'air est dense et, donc, moins l'énergie du vent est grande.

La baisse de la température généralement associée à l'altitude complique l'évolution de l'impact des variations thermiques sur la densité de l'air. La température diminue normalement de 6,5°C tous les 1000 mètres. Il s'agit du gradient thermique vertical ( $\Gamma$ ) normal.

L'équation hydrostatique permet de calculer la pression atmosphérique ( $P$ ) à une altitude donnée. Une fois que l'on a déterminé la pression, il est possible de trouver la densité de l'air en intégrant la variation thermique due au gradient thermique vertical [21] :

$$P = P_0 \left[ \frac{(T_0 - \Gamma Z)}{T_0} \right]^{\frac{g}{R\Gamma}} \quad (34)$$

Où  $P_0$  est la pression atmosphérique au niveau de la mer,  $T_0$  est égal à 288,15 K,  $Z$  représente l'altitude au-dessus du niveau de la mer et  $g$  l'accélération due à la gravité 9,807m/s<sup>2</sup>.

La température normale à  $Z$  mètres d'altitude ( $T_Z$ ) est égale à [21] :

$$T_Z = T_0 - \Gamma Z \quad (35)$$

Le gradient thermique vertical normal ne reflète pas toujours les véritables changements thermiques dus à l'altitude ; il est donc parfois nécessaire de calculer la densité de l'air pour une température et une altitude données. Afin de déterminer la densité de l'air, nous devons d'abord connaître la pression atmosphérique. Pour calculer les changements de pression dus à l'altitude, nous utiliserons l'équation hypsométrique dans laquelle ( $\exp$ ) représente la fonction exponentielle de base  $e$ , soit environ 2,71828 [21] :

$$P = P_0 \cdot \exp\left(\frac{-Zg}{RT}\right) \quad (36)$$

## 6.2. Variation de la densité de l'air en fonction de la température et de l'altitude :

Les variations saisonnières de la masse volumique de l'air provoquées par les variations de pression ont une faible influence par rapport à celle de la température.

Si la pression et la température ne sont pas connues à un moment donné, la correction de la masse volumique peut être établie, de manière approchée, à partir de la température moyenne mensuelle  $T$  et de l'altitude au niveau considéré [22]:

$$\rho = \rho_0 \cdot \exp\left(-\frac{Z}{H}\right) - \frac{T-15}{288} \quad (37)$$

Où :

T est exprimé en °C,  $H = 8,435m$  et Z est l'altitude de l'éolienne au dessus du niveau de la mer.

La variation de la masse volumique de l'air  $\rho$  en fonction de la température et de l'altitude est donnée par [22,23] :

$$\rho(T, Z) = \frac{353.049}{T} \cdot \exp\left(-0.034 \cdot \frac{Z}{T}\right) \quad (38)$$

Où

Z l'altitude du site au dessus du niveau de la mer (m).

T la température moyenne mensuelle (°K)

## I.7. Puissance moyenne annuelle fournie par un aérogénérateur :

### 7.1. Potentiel éolien disponible :

L'énergie cinétique d'une masse d'air m qui se déplace avec la vitesse v, est [24,25]

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (39)$$

Si cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface A ( $A = \pi \cdot R^2$ ), situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance éolienne instantanée serait alors [24-25] :

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (40)$$

Le potentiel éolien moyen disponible sur un site est donné par [26] :

$$\langle P_{disp} \rangle = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \langle V^3 \rangle \quad (41)$$

### 7.2. Puissance moyenne récupérable :

En réalité, le dispositif de conversion (la turbine éolienne) extrait une puissance  $P_{rec}$  inférieure à la puissance disponible  $P_{disp}$ . [26,27]

$$P_{rec} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \rho A V^3 \quad (42)$$

$C_p(\lambda, \beta)$  est le coefficient de puissance ; un paramètre sans dimension qui exprime l'efficacité de l'aéroturbine dans la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, et sa valeur ne peut pas dépasser (16/27) limite de Betz [28]. Il en résulte que :

$$C_{p \max} = C_p\left(\frac{1}{3}\right) = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (43)$$

Enfin la densité d'énergie moyenne annuelle récupérable exprimée en kWh/m<sup>2</sup>,  $\langle E \rangle$  est égale à [29,30] :

$$\langle E \rangle = 3,25 \cdot \langle V^3 \rangle \quad (44)$$

La puissance utile est donnée par :

$$\langle P_u \rangle = \frac{1}{2} \rho A \langle V_u^3 \rangle \quad (45)$$

### 7.3. Puissance utile :

La densité de puissance est donnée par [31-34] :

$$P_u = \begin{cases} 0 & \text{pour } V_D > V \\ a + b.v^k & \text{pour } V_D \leq V \leq V_N \\ P_N & \text{pour } V_N \leq V \leq V_M \\ 0 & \text{pour } V_M \leq V \end{cases} \quad (46)$$

Avec :  $a = \frac{P_N \cdot v_D^k}{v_D^k - v_N^k}$  et  $b = \frac{P_N}{v_N^k - v_D^k}$

$V_D$  : la vitesse de démarrage,

$V_N$  : la vitesse nominale,

$V_M$  : la vitesse maximale du vent,

$P_N$  : puissance nominale

On obtient après intégration de la relation (68) [35] :

$$P = \int_0^{\infty} P_u \cdot f(v) \cdot dv \quad (47)$$

$$P = \int_{v_D}^{v_N} (a + b.v^k) \cdot f(v) \cdot dv + P_N \int_{v_N}^{v_M} f(v) \cdot dv \quad (48)$$

$$P = P_N \cdot (F_C) \quad (49)$$

Où  $F_C$  est le facteur de forme donné par la relation suivante [31,36-38] :

$$F_C = \left( \frac{\exp[-(v_D/C)^k] - \exp[-(v_N/C)^k]}{(v_N/C)^k - (v_D/C)^k} - \exp\left[-\left(\frac{v_M}{C}\right)^k\right] \right) \quad (50)$$

### 1.8. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne :

Les objectifs de la régulation sont d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts et délimiter la puissance. D'après l'équation (42) on peut remarquer que la puissance produite est indéfiniment croissante en fonction de la vitesse du vent, ce qui n'est pas le cas dans la réalité.

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance dénommée puissance nominale  $P_N$ . La puissance  $P_N$  est obtenue à partir d'une vitesse du vent  $V_N$ , dénommée vitesse nominale. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à  $V_N$  la turbine



éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante.

A coté de la vitesse nominale  $V_N$ , on spécifie aussi [39,40] :

- la vitesse de démarrage,  $V_D$ , à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie
- la vitesse maximale du vent,  $V_M$ , pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

Les vitesses  $V_N$ ,  $V_D$  et  $V_M$  définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent [39,40] :

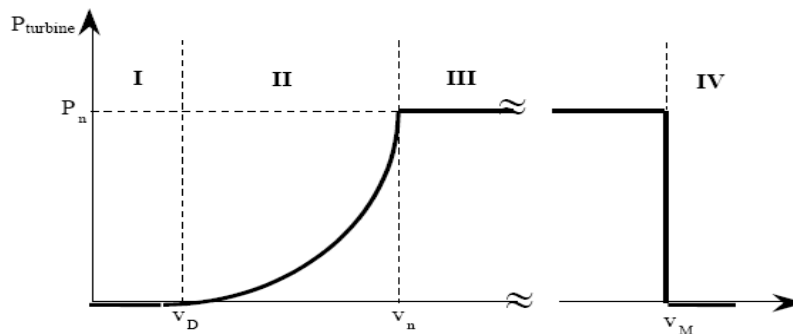


Figure 5 : Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent

- **la zone I**, où  $P = 0$  (la turbine ne fonctionne pas),
- **la zone II**, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent  $v$ ,
- **la zone III**, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance  $P$  fournie reste égale à  $P_N$ ,
- **la zone IV**, dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

**II. Deuxième partie : Etude du gisement éolien dans les sites :**

La deuxième partie de ce chapitre présente une étude du gisement éolien dans des sites Algériens.

Tableau 1 : Liste des stations météorologiques utilisées dans cette étude.

Sites	Longitude (°)	Latitude (°)	Altitude (m)	Situation topographique
1   El Bayadh	01° 00' E	33° 40' N	1341	Hauts plateaux
2   Msila	04° 30' E	35° 40' N	441	Hauts plateaux
3   Tiaret	01° 28' E	35° 21' N	977	Hauts plateaux
4   Ksar Chellala	02°19'E	35°10'N	800	Hauts plateaux
5   Bou Saada	04°00'E	35°10' N	461	Hauts plateaux
6   Batna	06° 11' E	35° 33' N	1052	Hauts plateaux

## II.1. Interprétation des résultats :

### 1. Vents horaires :

Les données horaires de la vitesse et de la direction du vent, depuis le 1er janvier 2015 jusqu'au 31 décembre 2015, ont été analysées.

### 2. Vents journaliers :

À partir des données horaires quotidiennes, les vitesses moyennes journalières du vent ont été calculées. Cette étape a été entreprise dans le but de réduire la taille de la série de données et pour faciliter certaines analyses et interprétations.

La rose des vents a été établie en considérant l'ensemble des données horaires de la direction et de la vitesse des vents enregistrées depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2015 jusqu'au 31 décembre 2015. La rose des vents a été d'abord établie pour l'année moyenne. Seize (16) classes de direction ont été choisies (20 degrés comme intervalle de classe) et 23 classes de vitesses.

Tableau 2 : représente les paramètres de forme et d'échelle et la vitesse moyenne du vent pour les sites étudiés

	<b>V (m/s)</b> <b>Vitesse moyenne</b>	<b>C (m/s),</b> <b>Paramètre d'échelle</b>	<b>K</b> <b>Paramètre de forme</b>
Kaser Chelala	4,2	4,7	1,39
El Bayadh	3,9	4,4	1,81
Batna	4,6	5,2	1,69
Boussaâda	3,5	3,5	0,95
M'sila	4,6	5,2	1,69

- La vitesse du vent varie entre un minimum 3.5 m/s (site de Boussaâda) et un maximum 4.6m/s (site de Batna et de Msila).
- Le paramètre d'échelle C varie entre un minimum 3.5 m/s (site de Boussaâda) et un maximum 5,2m/s (site de Batna et de Msila).
- Les valeurs des paramètres de forme k varis 0,95 (Boussaâda) à 1,81 (El-Bayadh) ce qui montre que la distribution il n'est pas stable pour tout les sites étudiés, due aux fréquences calme important.
- L'analyse des paramètres d'échelle C, montre que les sites les plus venté sont Batna et M'sila avec facteurs d'échelle C de l'ordre de 5,2 m/s. Pour les autres sites C varis de 3,5(Boussaâda) à 4,7 m/s (Kaser Chelala), ce qui montre que sont aussi venté.

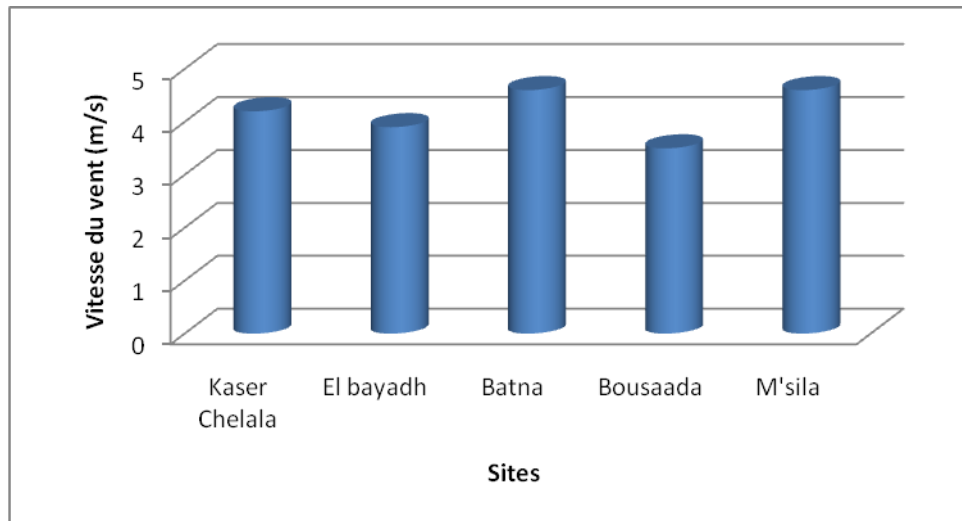


Figure 6: Vitesse moyenne pour les sites étudiés

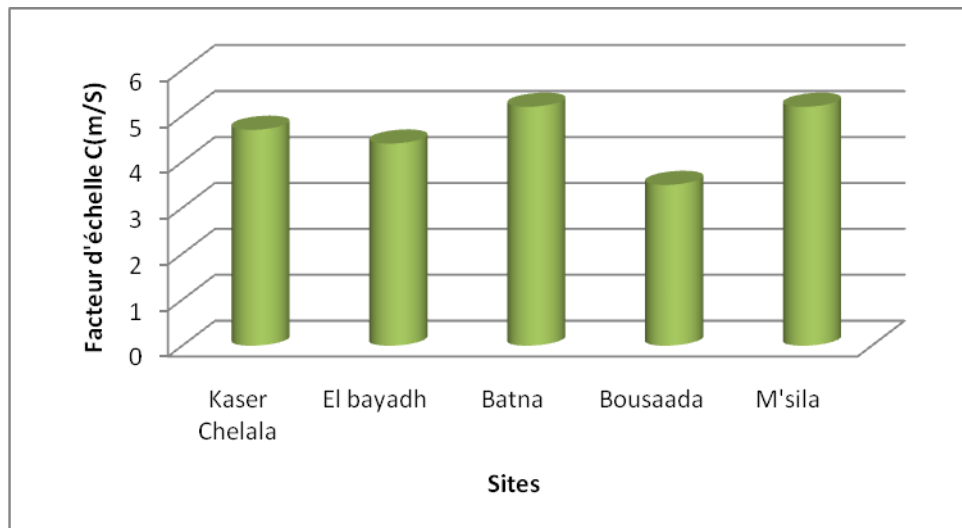


Figure 7: Facteur d'échelle pour les sites étudiés

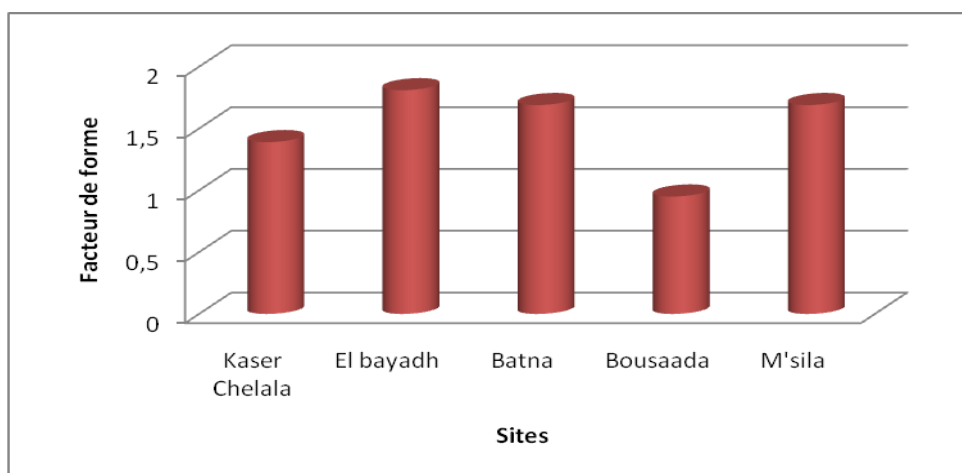
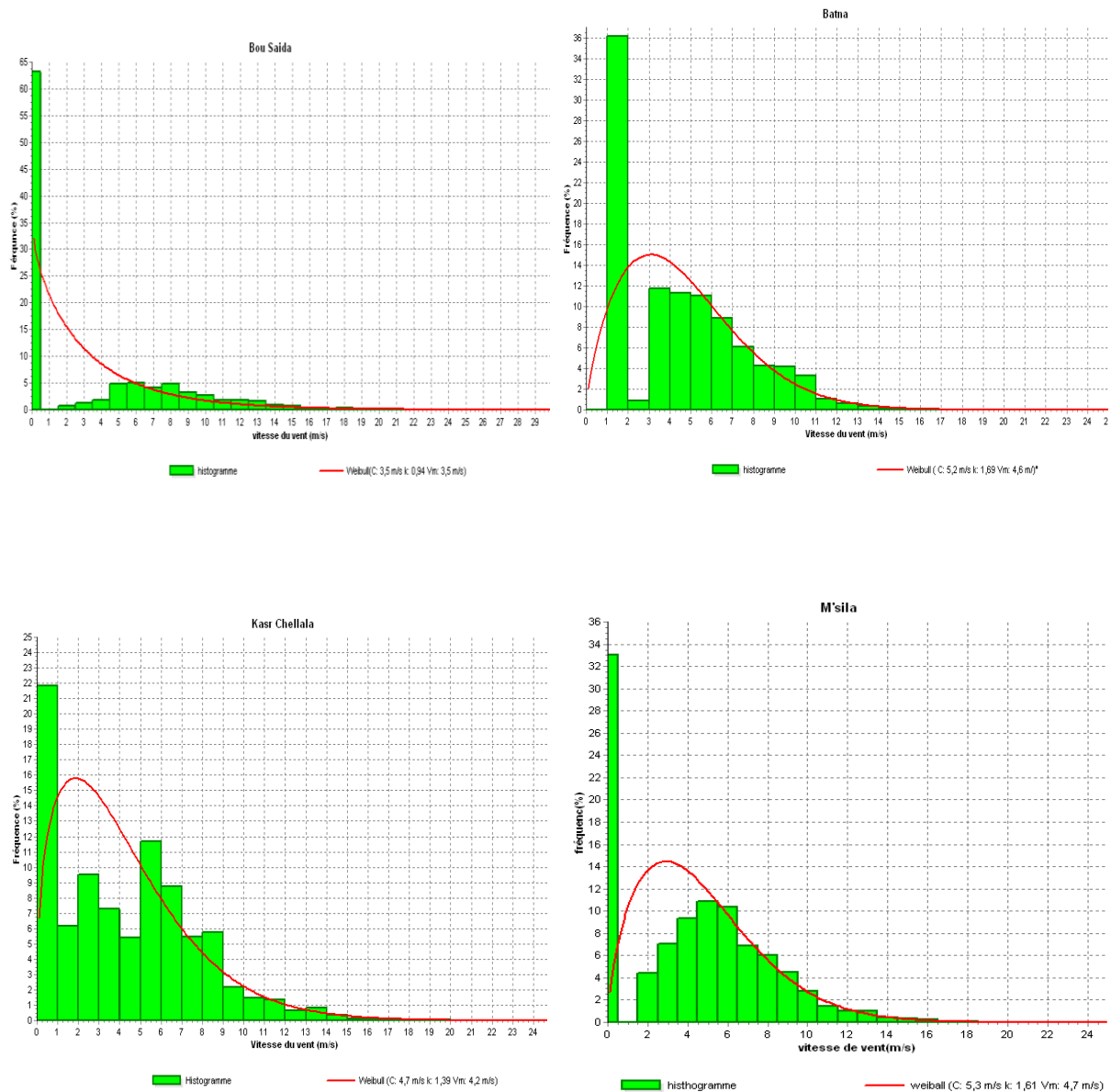


Figure 8: Facteur de forme pour les sites étudiés

- D'après l'analyse des résultats dans les 05 régions des hauts plateaux, on peut déduire :
- Les sites de Batna et de Msila ont les plus grandes valeurs de vitesse moyenne du vent annuelle et saisonnière par rapport les autres sites.
  - Les valeurs des paramètres de forme et d'échelle sont proportionnelles à la vitesse moyenne du vent.
  - Les saisons de Printemps et l'Eté sont les plus ventées à pour toute les sites étudiés.
  - Les mois de Mars et Février sont les mois plus ventées au cours de l'année pour tous les sites étudiés.



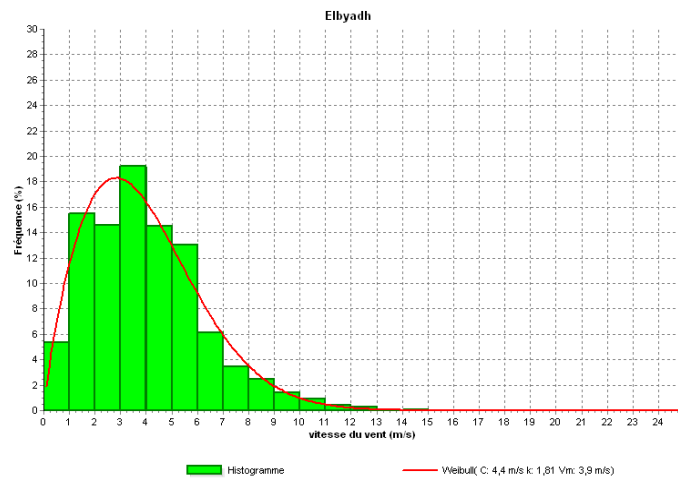
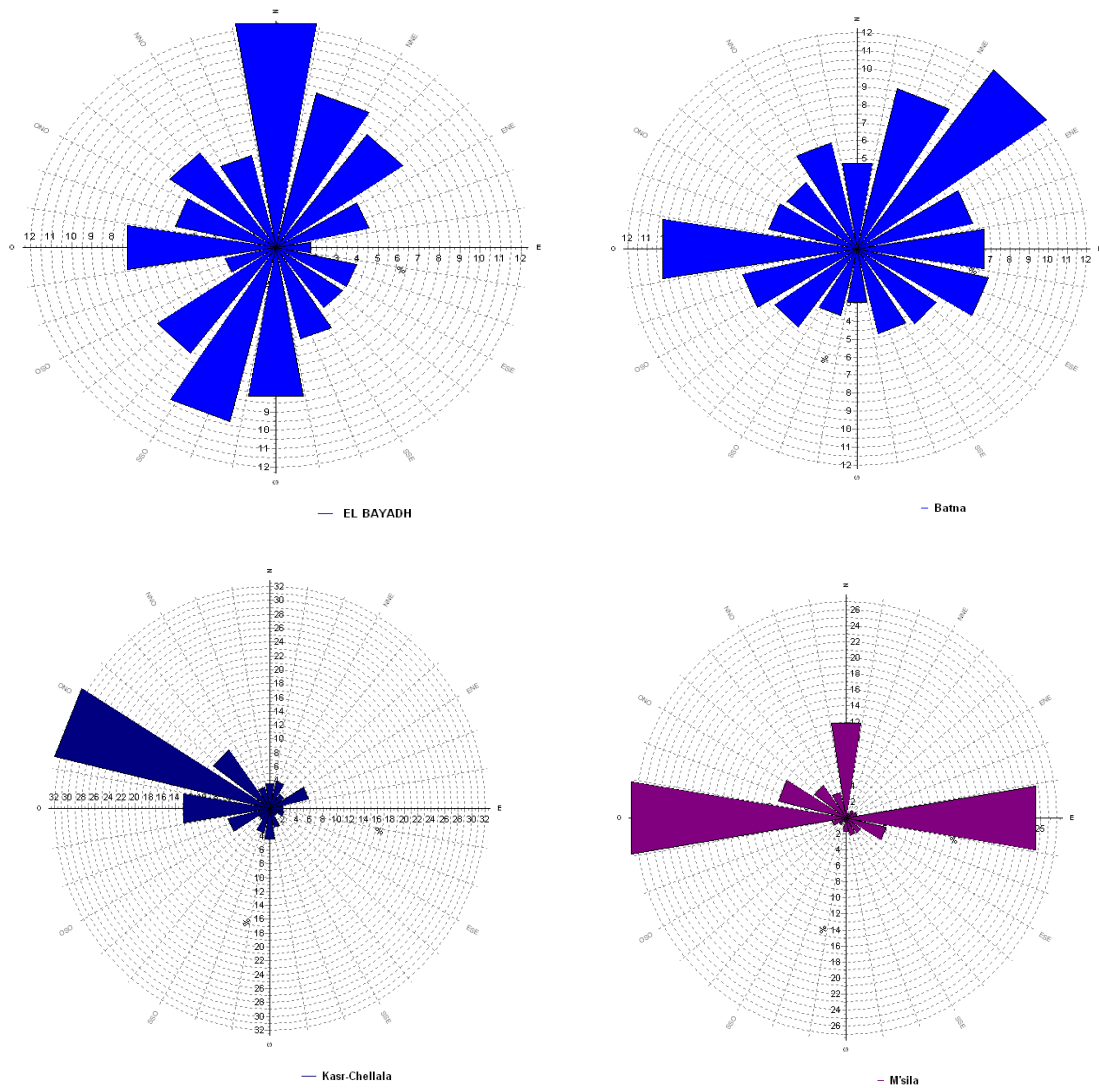


Figure 9: Histogrammes des vitesses et courbes d’ajustement pour la fonction de Weibull



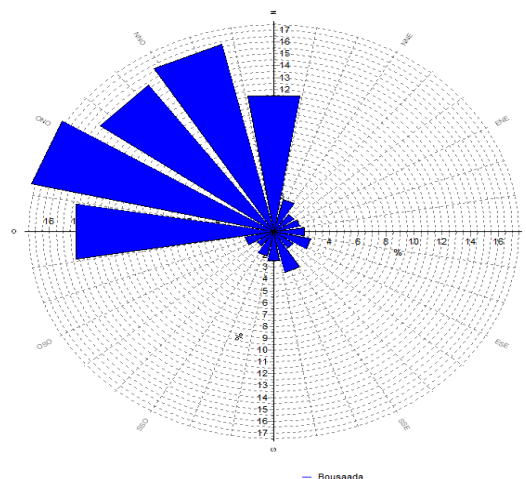


Figure 10 : Roses du vent pour les sites étudiés

### 3. Analyse des roses du vent :

#### 1. La région de Batna :

##### ➤ Le secteur dominant est :

- le secteur Nord-Est avec un pourcentage de 12%.

##### ➤ Le secteur prédominant est:

- Le secteur Ouest avec un pourcentage de 10 %.

##### ➤ Le secteur faible est:

- Le secteur Sud – Sud- Ouest(SSO) représente 4% de vent et Sud avec un pourcentage 3%

#### 2. La région d'El-Bayadh:

##### ➤ Le secteur dominant est :

- le secteur Nord avec un pourcentage de 13%

##### ➤ Le secteur prédominant est:

- le secteur Sud-sud-ouest (SSO) avec un pourcentage de 10%.

##### ➤ Les faibles secteurs sont :

- le Sud -Sud -Ouest(SSO) pesant 4% de vent et Sud avec un pourcentage 3%

- le secteur Ouest-Sud-ouest et le secteur Est compte respectivement 3% et 2%.

#### 3. La région Kasr chellala :

##### ➤ Le secteur dominant est :

-le secteur Ouest-Nord-Ouest présent le pourcentage de 33%

##### ➤ Le secteur prédominant est:

-le secteur Ouest présent le pourcentage de 13%

➤ **Les secteurs faibles sont :**

- les secteurs Est et Est-Sud-est présentent le pourcentage de 2%
- le secteur Sud-est avec un pourcentage de 1%

**4. La région M'sila :**

➤ **Le secteur dominant est :**

- Le secteur Ouest avec 27%.

➤ **Le secteur prédominant est:**

- Le secteur Est avec 24%.

➤ **Les faibles secteurs sont :**

- Les secteurs Sud – Ouest(SO), Ouest-Sud-ouest et Sud-Sud-est avec 2% de vent et Sud-Sud-ouest, Nord-Nord-Est, Nord-Est et Est-Nord-Est avec 1%

**5. La région de Boussada:**

➤ **Le secteur dominant est :**

- le secteur Ouest-Nord-Ouest de pourcentage 18%

➤ **Le secteur prédominant est:**

- le secteur Nord-Nord-Ouest de pourcentage 16%

➤ **Les faibles secteurs sont :**

- Les secteurs Sud, Sud-Sud- Ouest, Ouest-Sud-Ouest, Est, et Sud-Est avec un pourcentage de 2%
- Le secteur Sud-ouest avec 1%

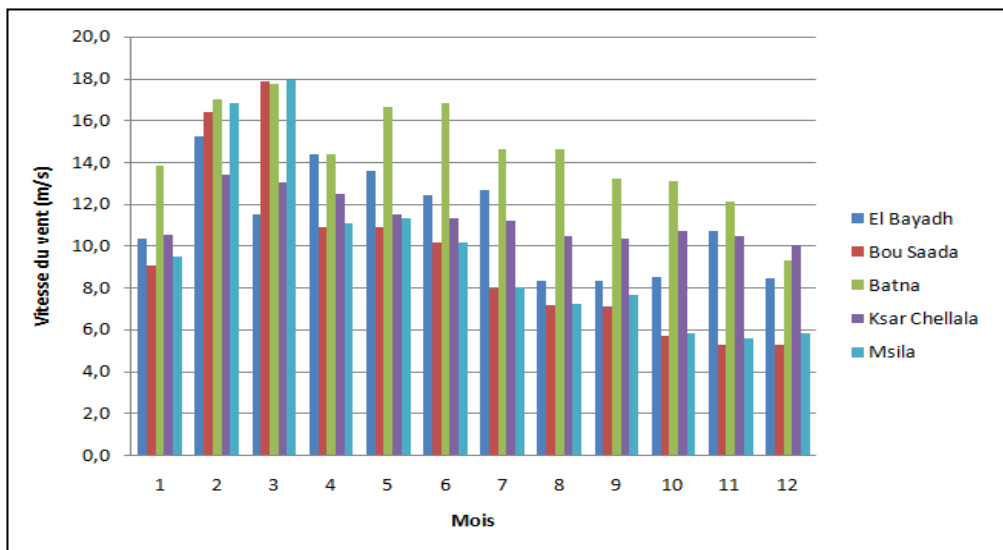


Figure 11 : Vitesse moyenne mensuelle du vent pour les sites étudiés

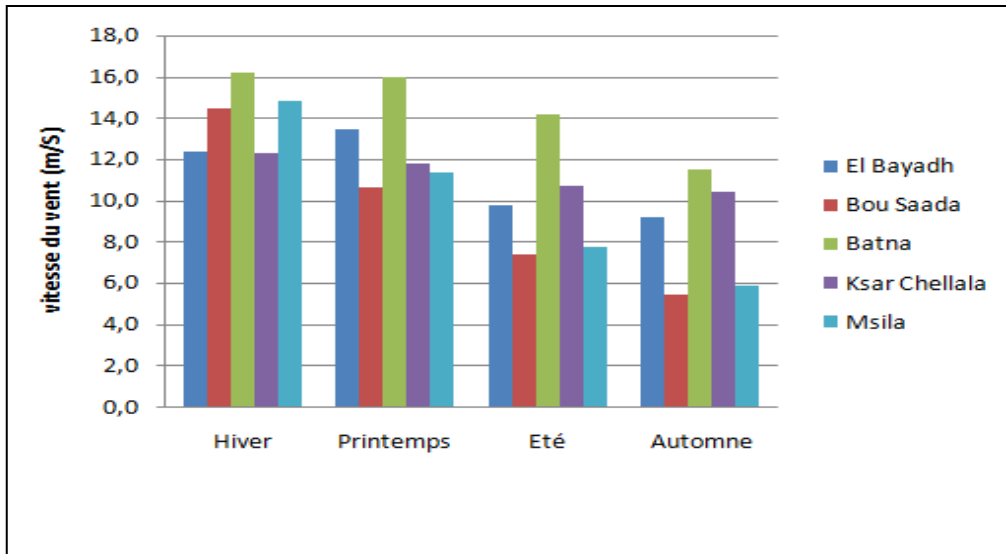


Figure 12 : Vitesse moyenne saisonnière du vent pour les sites étudiés

On constate que :

- la vitesse moyenne mensuelle du vent est élevée pendant les deux mois février et mars par rapport les autres mois.
- la vitesse moyenne saisonnière du vent est élevée pendant les deux saisons de l’hiver et le printemps par rapport les deux autres saisons.

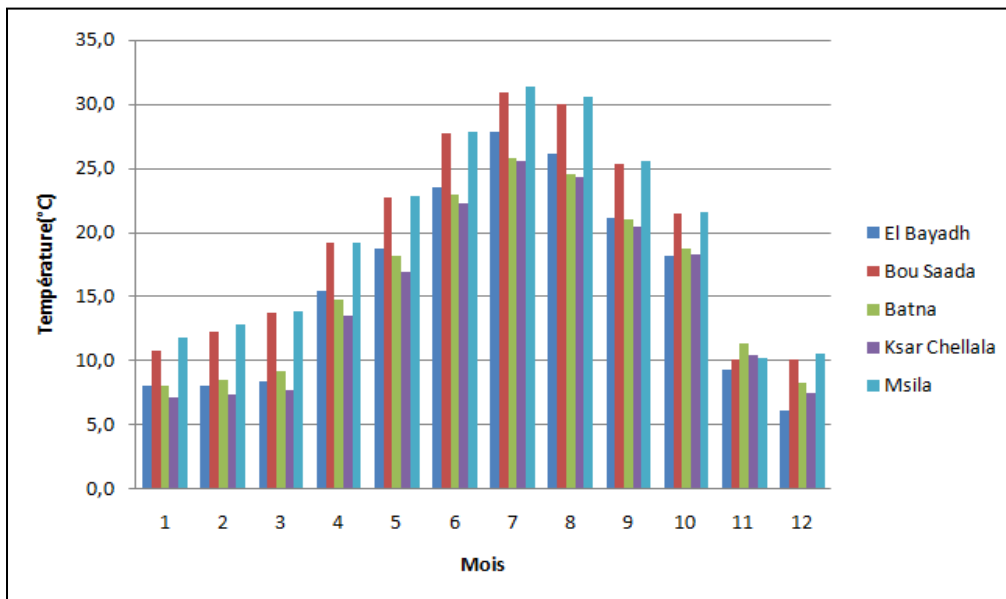


Figure 13 : Température moyenne mensuelle



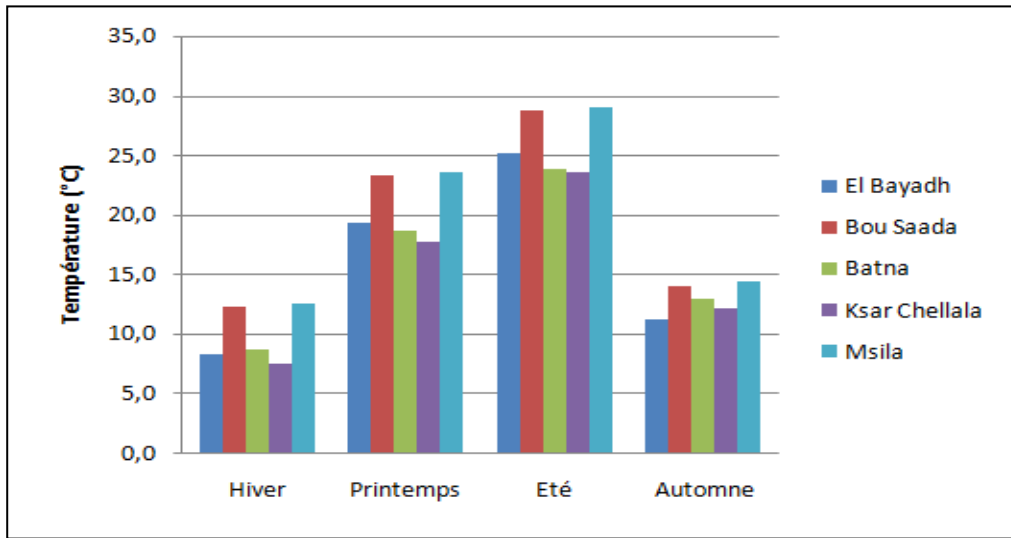


Figure 14 : Température moyenne saisonnière du vent pour les sites étudiés

On constate que :

- la température moyenne mensuelle est élevée pendant les mois de juin et juillet par rapport les autres mois.
- la température saisonnière est élevée pendant les deux saisons de l'été et le printemps par rapport les deux autres saisons.

#### 4. Caractéristiques de l'aérogénérateur CALORIUS 37 :

Tableau 3 : Caractéristiques de l'aérogénérateur CALORIUS 37

Société	CALORIUS
Modèle	37
Puissance nominale	5,0 kW
Diamètre du rotor	5,0 m
Mât	Tubulaire
Raccordement au réseau	50 Hz
Pays d'origine	DK



Figure 15 : Photo de l'aérogénérateur CALORIUS 37

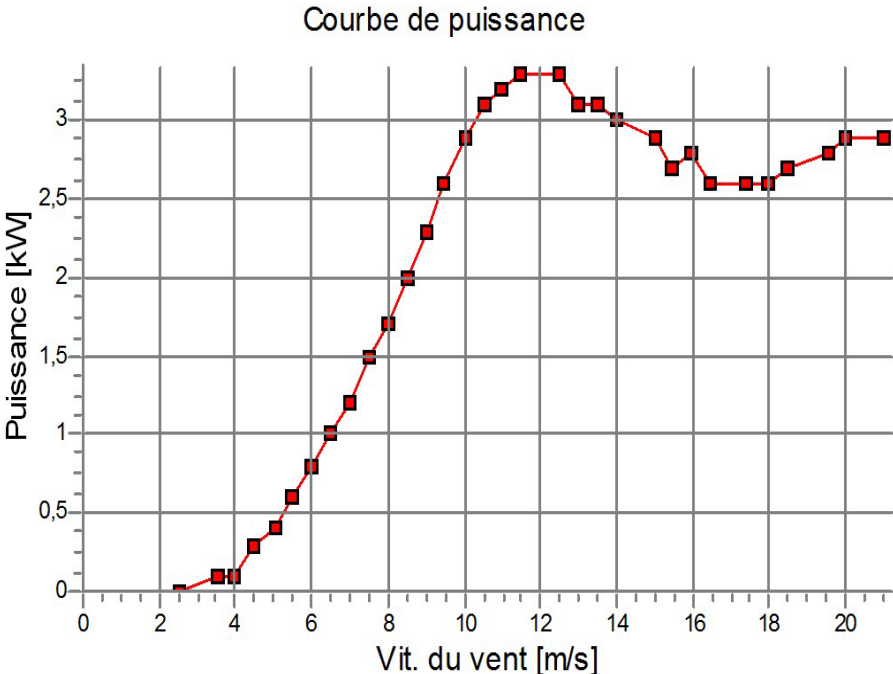


Figure 16: Courbe de la puissance de l'aérogénérateur CALORIUS 37

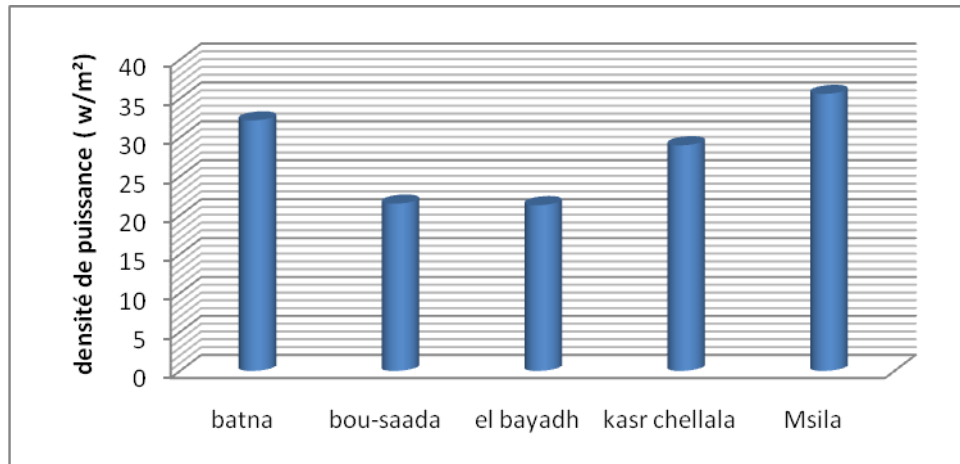


Figure 17: Densité de puissance annuelle pour les sites étudiés

D'après la figure 17, la valeur maximale de la densité de puissance moyenne annuelle enregistrée à Msila  $35,7 \text{ W/m}^2$  pour une vitesse moyenne mensuelle maximale de  $4,87 \text{ m/s}$ . Et pour le site de Batna, la densité de puissance moyenne annuelle est de  $32.3 \text{ W/m}^2$ . A Kasr chellala la densité de puissance est estimée à  $29 \text{ W/m}^2$ . A Bousaada la densité de puissance est  $21.6 \text{ W/m}^2$ , en fin la valeur minimale de la densité de puissance moyenne annuelle est  $21.5 \text{ W/m}^2$  enregistrée à El-Bayad.

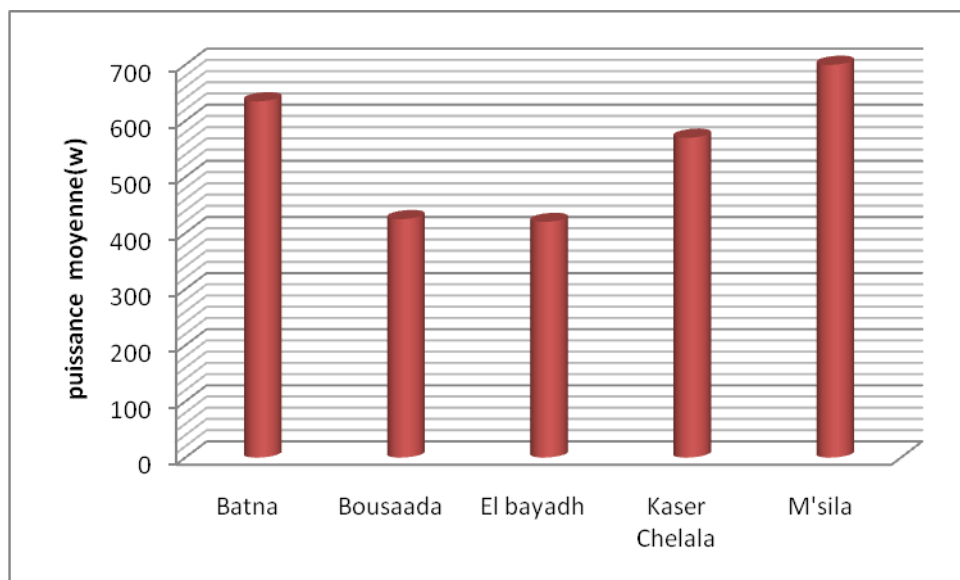


Figure 18 : puissance moyenne pour les sites étudiés

D'après la figure 18, la valeur moyenne de la puissance moyenne annuelle enregistrée pour une éolienne de type CALORIUS 37 varie de  $420 \text{ W}$  (El-Bayad) à  $700 \text{ W}$  (M'sila), On constate que la puissance dépend des conditions climatiques du site (vitesse du vent et température) ainsi que de l'efficacité et le diamètre de l'éolienne.

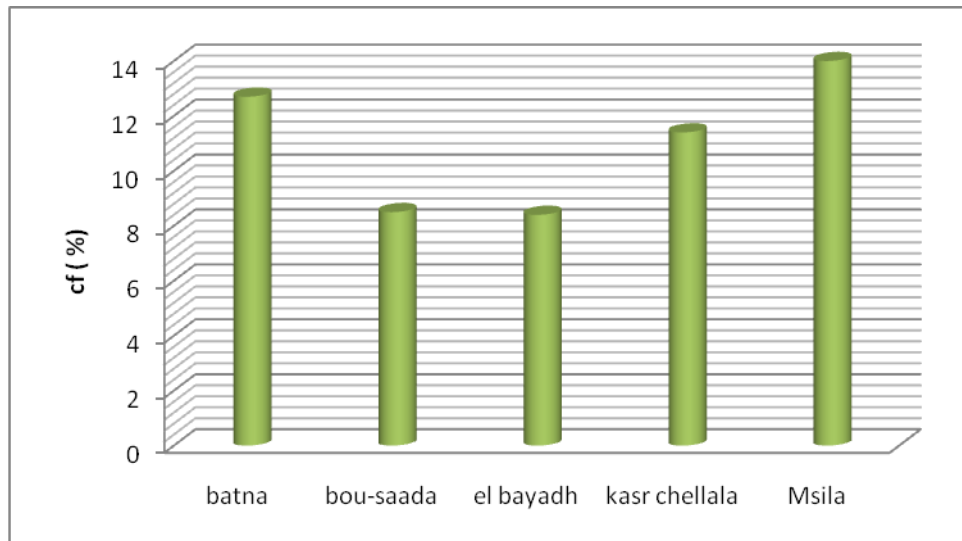


Figure 19 : facture de capacité d'éolienne choisie pour les sites étudiés

D'après la figure 19, l'éolienne de type CALORIUS 37 possède le meilleur facteur de capacité à M'sila égale à 14% donc cette éolienne fonctionne bien dans ce site. Pour les autres sites, le facteur de capacité varie de 8,4 % (El-Bayad) à 12,7% (Batna).

### 1. Conclusion :

Alors d'après tous les résultats discutés, on peut conclure que :

- Les sites de Batna et de Msila ont les plus grandes valeurs de vitesse moyenne du vent annuelle et saisonnière par rapport les autres sites.
- La vitesse du vent varie entre un minimum 3.5 m/s (site de boussaada) et un maximum 4.6m/s (site de Batna et de Msila).
- Les valeurs des paramètres de forme et d'échelle sont proportionnelles à la vitesse moyenne du vent.
- Les saisons de Printemps et l'Eté sont les plus ventées à pour toute les sites étudiés.
- Les mois de Mars et Février sont les mois plus ventées au cours de l'année pour tous les sites étudiés.
- la vitesse moyenne mensuelle du vent est élevée pendant les deux mois février et mars par rapport les autres mois.
- la vitesse moyenne saisonnière du vent est élevée pendant les deux saisons de l'hiver et le printemps par rapport les deux autres saisons.
- la température moyenne mensuelle est élevée pendant les mois de juin et juillet par rapport les autres mois.
- la température saisonnière est élevée pendant les deux saisons de l'été et le printemps par rapport les deux autres saisons.
- la valeur maximale de la densité de puissance moyenne annuelle enregistrée à Msila 35,7 W/m<sup>2</sup> et la valeur minimale de la densité de puissance moyenne annuelle est 21.5 W/m<sup>2</sup> enregistrée à El-Bayad.

### 3. Références Bibliographiques:

- [1] I. Troen, E. L. Petersen, « European wind atlas ». Risoe National Laboratory, Roskilde, Danemark, pp. 656. 1989.
- [2] Solari G., « Wind Speeds Statistics », Collège on atmospheric Boundary Layer and Air Pollution. ICTP, Trieste, Italie 1994.
- [3] C.G. Justis / Traduit et adapté par J. L. Plazy, « Vent et performances des éoliennes », édition S.C.M, Paris.1982.
- [4] Stevens M. J. M, Smulders PT, « The estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy utilization purposes ». Wind Engineering; 3,132–45. 1979.
- [5] Kasbadji N. M. « Evaluation du gisement énergétique éolien contribution a la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie ». Thèse doctorat en physique énergétique, Tlemcen. Mai 2006.
- [6] Justus, C.G., W.R Hargraves., A. Mikhail and D. Graber, « Methods for estimating wind speed frequency distributions ». J. Appl. Meteor. 17, 350 - 553. 1978.
- [7] Garcia A, Torres J. L, Prieto E, de Francisco A, « Fitting wind speed distributions: a case study ». Solar Energy; 62, 139–144. 1998.
- [8] Ulgen K., A. Hepbasli, « Determination of Weibull parameters for wind energy analysis of Izmir», Turkey. Int J. Energy Res., 26, 495-506. 2002.
- [9] Justus, C.G., W.R Hargraves., A. Mikhail and D. Graber, « Methods for estimating wind speed frequency distributions ». J. Appl. Meteor. 17, 350 - 553. 1978.
- [10] Weisser, D., « A wind energy analysis of Grenada: an estimation using the ‘Weibull density function ». Renew. Energ., 28, 1803–1812. 2003.
- [11] Gokcek M, Bayulken A, Bekdemir S, « Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kirklareli, Turkey ». Renew. Energy; 32, 1739–52. 2007.
- [12] Bernard Multon, Olivier Gergaud, Hamid Ben Ahmed, Xavier Roboam, Stéphan Astier, Brayima Dakyo, Cristian Nichita ; Extrait du rapport de synthèse ECRIN « L’Electronique de Puissance Vecteur d’Optimisation Pour les Energies Renouvelables », ISBN 2-912154-8-1 ECRIN 32, Paris. Mai 2002.
- [13] Tennekes A., « The logarithmic wind profile ». J. of Atmospheric sciences, vol. 30, pp: 234: 238, 1973.
- [14] Zoumakis NM. « The dependence of the power-law exponent on surface roughness and stability in a neutrally and stably stratified surface boundary layer ». Atmo’sfera; 6:79–83. 1993.
- [15] C. G. Justus, W.R., Mikhail, « Height variation of wind speed and wind distributions statistics », Geophysical Research Letters, vol.3, No.5, pp261-264, 1976.
- [16] Nfaoui H., J. Bahraoui Buret and A.A.M. Sayigh, « Wind Characteristics and Wind Energy Potential in Marocco », Solar Energy, N°1, pp 51-60, 1998.
- [17] Knidiri F, A. Laaouina, M. Fabre et A. Wyatt, « L’énergies éolienne au Maroc » rapport interne au CDER, 1986.
- [18] Poje S. et B. Cividini, « Assessment of Wind Energy Potential in Croatia » Solar Energy vol.41 N°6 pp 543 554, 1988.
- [19] Mikhail A.S, « Height Extrapolation of Wind Data ». Transaction of ASME, vol. 107, pp. 10- 14, 1985.
- [20] Aslan Z, Mentés S, Yükselen MA, Tolun S. « Global wind energy assessment of Turkey and a case study in the northwest ». Int. Energy Symp. In 21<sup>st</sup> Century, Istanbul, 28-30 April ; 1994.

- [21] Paul Gipe, « Le grand livre de l'éolien » ; Editions Le Moniteur. Paris. France. Janvier 2007.
- [22] Sathyajith Mathew, « Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics ». Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.
- [23] Hou Yanyun; « Air Density Calculation in Wind Resource Assessment of Wind Farm ». Beijing GrandTrend International Economic and Technical Consulting Co., Ltd
- [24] Wolde-Ghiorgis W. « Wind energy survey in Ethiopia ». Solar & Wind Technology; 5(4): 341-51, 1988.
- [25] Ahmed Shata AS. « Site potential of Egypt for wind energy applications ». M.Sc. thesis submitted to physics department, Faculty of Science, Zagazig University, Egypt; 2000.
- [26] M.M. Pandey, P. Chandra, Solar & Wind Technology, Central Institute of Agricultural Engineering, Bhopal, India, Vol.3, N°2, pp. 135-140. 1986.
- [27] EH. Lysen, « Introduction to wind energy ». Edition C.W.D, Amersfoort, Netherlands.1983.
- [28] M. Budinger, D. Leray, et Y. Deblezer, « Eoliennes et vitesse variable », La revue 3EI, vol. 21, pp. 79-84, 2000.
- [29] Technical note of WMO, « Meteorological Aspect of the Utilisation as Energy Sources », N°175, 1981.
- [30] Maouedj R, Deliou A. and Benyoucef B. « Estimation du potentiel énergétique éolienne sur les sites de Tlemcen et d'Adrar ». Revue internationale d'héliotechnique énergie-environnement. N°36 B. 37-42. 2007.
- [31] Powell WR. « An analytical expression for the average output power of a wind machine ». Solar Energy; 26: 77–80. 1981.
- [32] Chedid R, Akiki H, Rahman S. « A decision support technique for the design of hybrid solar–wind power systems ». IEEE Trans Energy Convers; 13(1):76–83. 1998.
- [33] Stevens MJM, Smulders PT. « The estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy utilization purposes ». Wind Eng.; 3:132–45. 1979.
- [34] Pallabazzer R. « Provisional estimation of the energy output of wind generators ». Renew Energy; 29: 413–20. 2004
- [35] Ssu-yuan Hu and Jung-ho Cheng. « Performance evaluation of paring between sites and wind turbine ». Renewable energy 32. 1934-1947. 2007.
- [36] Nfaoui H, Bahraui J. « Wind energy potential in Morocco ». Renewable Energy; 1:1–8. 1991.
- [37] El-Mallah A, Soltan AM. « A nomogram for estimating capacity factors of wind turbines using site and machine characteristics ». Sol Wind Technol; 6: 633–5. 1989.
- [38] Torres JL, Prieto E, Garcia A, De Blas M, Ramirez F, De Francisco A. « Effects of the model selected for the power curve on the site effectiveness and the capacity factor of a pitch regulated wind turbine ». Solar Energy; 74: 93–102. 2003.
- [39] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nikita, « Etat de l'art dans les aérogénérateurs », L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables, Ed. Novelect- Ecrin, , pp.97-154. mai 2002.
- [40] C. Nichita, E. Ceanga, A. Piel, J.J. Belhache, L. Protin, « Real Time Servosystem for a Wind Turbine Simulator », IEEE 3<sup>rd</sup> International. Workshop on Advanced Motion Control, USA, pp. 1039-1048, 1994.

# **CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES**

## CONCLUSION GENERALE

Les énergies renouvelables participent à la lutte contre le changement climatique et à la maîtrise de l'approvisionnement énergétique propre. C'est aussi à la lutte contre les gaz à effet de serre et la prise de conscience collective d'un environnement plus « propre » qui conduit notre pays pour développer d'autres sources d'énergies dites « vertes », parmi elles l'énergie éolienne.

Dans ce cadre; et afin de diversifier ces choix énergétiques, notre pays s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables, et commence à s'intéresser à la filière éolienne.

Le vent est la source d'énergie éolienne, provoqués par le déplacement des masses d'air, accuse de réchauffement inégalement réparti de la surface de la planète par l'énergie solaire et la rotation de la planète, ensuit l'éolienne transforme grâce à ses pâles l'énergie du vent en énergie mécanique puis grâce au contenu de la nacelle (modulateur, multiplicateur, générateur ....) en énergie électrique.

Dans ce travail on a basé sur des données de la vitesse du vent pour la détermination des paramètres de Weibull (k, c) nécessaires pour la connaissance des potentialités énergétiques éoliennes d'un site donné.

Les valeurs des paramètres de forme k varis 0,95 (Boussaâda) à 1,81 (El-Bayadh) ce qui montre que la distribution il n'est pas stable pour tout les sites étudiés, due aux fréquences calme important.

L'analyse des paramètres d'échelle C, montre que les sites les plus venté sont Batna et M'sila avec facteurs d'échelle C de l'ordre de 5,2 m/s. Pour les autres sites C varis de 3,5 (Boussaâda) à 4,7 m/s (Kaser Chellala), ce qui montre que sont aussi venté.

L'analyse des ressources éoliennes dans les sites sélectionnés montrent que les zones étudiées ont un potentiel d'énergie éolienne qui peut être effectivement exploité. En effet, le traitement statistique des données a permis d'évaluer les caractéristiques du potentiel éolien de cinq sites dans notre étude pour installer une éolienne de type CALORIUS 37.

Le site de M'sila et Batna ont les plus grandes valeurs de vitesse moyenne du vent annuelle et saisonnière, donc la valeur maximale de la densité de puissance moyenne annuelle enregistrée à Msila 35,7 W/m<sup>2</sup>.

La valeur puissance moyenne annuelle enregistrée pour une éolienne de type CALORIUS 37 varie de 420 W (El-Bayad) à 700 W (M'sila), On constate que la puissance dépend des conditions climatiques du site (vitesse du vent et température) ainsi que de l'efficacité et le diamètre de l'éolienne.

L'éolienne de type CALORIUS 37 possède le meilleur facteur capacité à M'sila qui égale 14% donc cette éolienne fonctionne bien dans ce site et pour les autres sites, le facture de capacité varie de 8,4 % (El-Bayad) à 12,7% (Batna).



## **Evaluation du gisement énergétique éolien de la région des Hauts-Plateaux**

---

Pour affiner ce travail, il faudrait faire une analyse de l'impacte éolienne sur l'environnement dans les sites étudiés, les mesures doivent être faites sur chaque site avec des fréquences plus importantes et à la hauteur de éolienne.

# Evaluation du gisement énergétique éolien de la région des Hauts-Plateaux

## Résumé :

Ce travail porte sur l'étude du gisement éolien, de l'énergie éolienne disponible et de la densité énergétique moyenne de la région des Hauts-Plateaux (Batna, Msila, El Bayadh, Ksar Chellala et Bou Saada). L'étude est divisée en deux parties: La première partie présente les modèles mathématiques utilisés dans l'étude du gisement éolien des 05 sites Algériens. Cette étude est basée sur des données météorologiques des sites (vitesse et direction du vent, température, Altitude) à 10m du sol.

La deuxième partie porte sur la détermination du facteur de capacité et la puissance moyenne annuelle fournie par l'aérogénérateur, en fonction du six paramètres : les caractéristiques du vent (paramètres de Weibull  $k$  et  $c$ ) et les caractéristiques de la turbine (Puissance nominale  $P_N$ , vitesse de démarrage  $V_D$ , vitesse nominale  $V_N$  et la vitesse d'arrêt de la machine  $V_M$ ).

**Mots clés :** gisement éolien, vitesse du vent, direction du vent, paramètres de Weibull, facteur de capacité.

## ملخص :

هذا العمل يقوم على دراسة موارد الرياح ، طاقة الرياح الموفرة والكثافة الطاقوية المتوسطة في منطقة الهضاب العليا (باتنة، بوسعادة، البيض، المسيلة وقصر الشلالة ) . وهذه الدراسة مقسمة إلى جزئيين :

-الجزء الأول تطرقنا فيه إلى عرض النماذج الرياضية المستخدمة في موارد الرياح لخمس (05) مناطق جزائرية. و تستند هذه الدراسة على معطيات الأرصاد الجوية لهذه المناطق (سرعة الرياح، اتجاه الرياح، درجة الحرارة و الارتفاع ) على 10 متر من سطح الأرض.

-الجزء الثاني يعتمد على تحديد عامل القدرة ومتوسط الطاقة السنوي اللذان توفره ما توربينات الرياح بدلالة ستة معاملات : خصائص الرياح (معاملات ويبيل) وخصائص التوربين (الاستطاعة المنتظمة، السرعة الابتدائية، السرعة المنتظمة و سرعة توقف الآلة).

**الكلمات المفتاحية :** موارد الرياح، سرعة الرياح، اتجاه الرياح، معاملات ويبيل ومعامل القدرة.