

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Département Electronique

Mémoire Master

En vue de l'obtention du diplôme de master en Electronique

# Le gisement éolien en Afrique

Meriem TAMART

Sous la direction de M. Mourad HADDADI Professeur à l'ENP

Présenté et soutenu publiquement le 10/10/2016

## Composition du Jury:

Président, M. Mohamed Salah AIT CHEIKH, Professeur, ENP

Encadreur, M. Mourad HADDADI, Professeur, ENP

Examineur, M. Cherif LARBES, Professeur, ENP



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Département Electronique

Mémoire Master

En vue de l'obtention du diplôme de master en Electronique

# Le gisement éolien en Afrique

Meriem TAMART

Sous la direction de M. Mourad HADDADI Professeur à l'ENP

Présenté et soutenu publiquement le 10/10/2016

## Composition du Jury:

Président, M. Mohamed Salah AIT CHEIKH, Professeur, ENP

Encadreur, M. Mourad HADDADI, Professeur, ENP

Examineur, M. Cherif LARBES, Professeur, ENP

## **Remerciements**

*Mes remerciements vont premièrement à Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il m'a donnée durant toutes ces années d'étude.*

*Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude et mes vifs remerciements à mon encadreur Mr HADDADI pour ses conseils judicieux et son soutien inconditionnel.*

*Mes sincères remerciements aux messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.*

*Enfin je tiens à remercier vivement toutes les personnes qui m'ont aidée de près ou de loin à élaborer et réaliser ce mémoire.*

تتمتع قارة افريقيا بطاقات متعددة لكن الكهرباء فيها نادرة. حاليا؛ تعاني عجلة الطاقة للبلدان الافريقية من عجز كبير رغم ان هذه البلدان تملك امكانيات مهمة في مجال الطاقات المتجددة. ان موارد الرياح في بلدان افريقيا غير معروفة نسبيا نظرا لوجود عدد ضئيل من أطالس الرياح الوطنية كما يعتبر استخدام خرائط الرياح ان وجدت لبعض بلدان افريقيا صعبا و ذلك لوجوب وجود معالم توافق بياناتها من اجل تقييم الطاقة القابلة للاسترداد في موقع معين.

**الكلمات المفتاحية:** أفريقيا، الطاقة المتجددة، موارد الرياح، موقع.

### Abstract

In Africa, the energy is plentiful but the electricity is rare. Indeed, the current energy balance of African countries is strongly overdrawn. Nevertheless, the country has an important potential in renewable energies. The wind potential of African countries is relatively unknown in the sense that there are still very few national wind atlases. Wind resource maps are much more difficult to operate when they exist in some African countries, because global data must be accompanied by a number of parameters to evaluate more rigorously the recoverable energy on a given site.

**Key words:** Africa, renewable energies, wind potential, site

### Résumé

En Afrique l'énergie est abondante mais l'électricité est rare. En effet, la balance énergétique actuelle des pays africains est fortement déficitaire. Et pourtant, les pays disposent d'un important potentiel en énergies renouvelables. Le potentiel éolien des pays africains est assez mal connu, au sens où il existe encore très peu d'atlas éoliens nationaux. Les cartes de gisement éolien sont beaucoup plus difficiles à exploiter quand elles existent dans certains pays africains, car les données globales doivent être assorties d'un certain nombre de paramètres pour apprécier avec plus de rigueur l'énergie récupérable sur un site donné.

**Mots clés :** Afrique, énergies renouvelables, gisement éolien, site

# TABLE DES MATIERES

## TABLE DES MATIERES

## LISTE DES FIGURES

## LISTE DES TABLEAUX

## LISTE DES NOTATIONS ET SYMBOLES

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>9</b>
<b>CHAPITRE 1 : ORIGINE DU VENT.....</b>	<b>11</b>
1.1. INTRODUCTION.....	11
1.2. L'ATMOSPHERE .....	11
1.3. LE CLIMAT .....	14
1.4. CONCLUSION .....	17
<b>CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DU POTENTIEL EOLIEN.....</b>	<b>19</b>
2.1. INTRODUCTION.....	19
2.2. CARACTERISTIQUES DE REPARTITION DE LA VITESSE DU VENT.....	19
2.3. DISTRIBUTIONS DES VITESSES .....	19
2.4. DETREMINATION DES PARAMETRES DE WEIBULL.....	21
2.5. INFLUENCE DES PARAMETRES DE WEIBULL SUR LA QUALITE DU POTENTIEL EOLIEN .....	22
2.6. CONCLUSION.....	23
<b>CHAPITRE 3 : ÉVALUATION DU GISEMENT EOLIEN DE L'AFRIQUE.....</b>	<b>25</b>
3.1. INTRODUCTION.....	25

<b>3.2. LE GISEMENT EOLIEN DE L'AFRIQUE .....</b>	<b>25</b>
<b>3.3. ANALYSES DES PAYS A BON POTENTIEL .....</b>	<b>27</b>
<b>3.4. CONCLUSION.....</b>	<b>34</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>35</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>36</b>

## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1: LES COUCHES DE L'ATMOSPHERE [5].....	12
FIGURE 1.2: VUE SCHEMATIQUE DE LA COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE [3]...	14
FIGURE 1.3: REPRESENTATION DE GRADIENT DE PRESSION [8].....	15
FIGURE 1.4: REPRESENTATION DE LA FORCE DE CORIOLIS [9].....	15
FIGURE 1.5: L'ACTION DES TROIS FORCES SUR LA DIRECTION DU VENT [8].....	16
FIGURE 1.6A: ANEMOMETRE A HELICE [10].....	16
FIGURE 1.6B: ANEMOMETRE A COUPELLES [10].....	16
FIGURE 1.7 : ROSE DES VENTS [3].....	17
FIGURE 2.1 : EXEMPLES DE FONCTIONS DE WEIBULL POUR C FIXE A 3 M/S ET DIFFERENTES VALEURS DU PARAMETRE DE FORME K, VARIANT DE 1 A 4.....	21
FIGURE 3.1: REPARTITION DU POTENTIEL DE L'AFRIQUE EN MATIERE D'ENERGIES RENOUVELABLES [13].....	25
FIGURE 3.2 : CARTOGRAPHIE DES VENTS DE L'AFRIQUE [14].....	26
FIGURE 3.3: CARTE ANNUELLE DES VENTS A 10M DU SOL [15].....	28
FIGURE 3.4 : CARTE DU GISEMENT EOLIEN DU MAROC [16] .....	29
FIGURE 3.5 : CARTE DES VENTS DE LA TUNISIE [18].....	30
FIGURE 3.6 : EVALUATION QUALITATIVE ET NIVEAU DE CONNAISSANCE DES GISEMENTS EOLIENS EN AFRIQUE SUBSAHARIENNE [20].....	32
FIGURE 3.7 : DISTRIBUTION DU POTENTIEL EOLIEN AU SENEGAL [21].....	33

## **LISTE DES TABLEAUX**

TABLEAU 3.1 : PROJETS EOLIENS REALISES AU MAROC [17].....	29
TABLEAU 3.2 : PROJETS EOLIENS REALISES EN TUNISIE [18].....	31
TABLEAU 3.3: DATE DE MISE EN SERVICE DES PRINCIPAUX PROJETS EOLIENS ET SOURCES D'APPUI FINANCIER EN EGYPTE [19].....	31
TABLEAU 3.4: POTENTIEL EOLIEN DES GRANDES VILLES DU SENEGAL [21].....	34

## LISTE DES NOTATIONS ET SYMBOLES

$V1$	Vitesse
$V2$	Vitesse
$h1$	Altitude
$h2$	Altitude
$n$	Paramètre
$F(v)$	Fonction de répartition
$f(v)$	Fréquence d'occurrence des vitesses du vent;
$k$	Facteur de forme
$c$	Facteur d'échelle
$f_{hW}(v)$	Distribution hybride de Weibull
$F_0$	Fréquence des vents calmes
$f_R(v)$	Distribution de Rayleigh
$F_i$	Fréquence cumulée
$k$	Paramètre
$k_0$	Paramètre
$\Gamma(x)$	Fonction Gamma
$P_{\text{turbine}}$	Puissance théorique de la turbine
$C_p$	Coefficient aérodynamique de puissance de la turbine
$\rho$	Masse volumique de l'air
$R_p$	Rayon de la turbine

## Introduction générale

L'Afrique est dotée d'importantes ressources en énergies renouvelables qui, pleinement exploitées, peuvent transformer l'image de l'Afrique d'un continent souffrant d'une pauvreté endémique en une puissance économique capable de stimuler l'ensemble de l'économie mondiale.

Une grande partie de l'Afrique est à cheval sur les zones équatoriales et tropicales du globe, et seules les régions du nord et du sud bénéficient du régime des vents d'ouest des latitudes tempérées. Aussi, les vitesses de vent sont généralement faibles dans beaucoup de pays de l'Afrique subsaharienne, particulièrement dans les pays enclaves. L'Afrique du Sud, l'Afrique du Nord et le littoral de la Mer Rouge disposent de certains des meilleurs potentiels éoliens de la région [1].

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée dès l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent.

Lorsqu'on utilise l'énergie éolienne, il n'y a pas de consommation de matière mais seulement utilisation d'un flux d'énergie dont les caractéristiques essentielles sont ses variabilités quotidiennes et saisonnières aux effets prévisibles et calculables, alors que ses variations d'origine climatiques sont complètement aléatoires.

Le but de ce travail est de contribuer à l'étude du gisement éolien en Afrique et de sélectionner les sites prometteurs pour l'utilisation de l'énergie éolienne.

Afin d'accomplir au mieux cette étude, le présent mémoire en trois principaux chapitres en plus de l'introduction générale et de la conclusion générale.

Dans le premier chapitre un rappel sur la présentation générale de l'atmosphère, les propriétés de la couche limite atmosphérique ainsi que quelques notions sur le vent ont été faits.

Le deuxième chapitre concerne la modélisation mathématique des distributions des fréquences de la vitesse du vent grâce à la distribution de Weibull.

Le troisième chapitre traitera ensuite les caractéristiques du gisement éolien en Afrique avec une étude spécifique pour les sites venteux et un aperçu sur les projets des parcs éolien dans la région.

Enfin, une conclusion générale faisant un bref résumé des principaux résultats du travail.

# **Chapitre 1 :**

# **Origine du vent**

# Chapitre 1 : Origine du vent

## 1.1. Introduction

L'atmosphère est un gigantesque moteur solaire qui transfère la chaleur d'une partie du globe à l'autre. Sous l'action des rayons du soleil, des courants de convection de grande ampleur transportent la chaleur des latitudes basses vers les pôles. On appelle "vent" les courants aériens qui parcourent la surface de la terre sous l'effet de cette circulation terrestre [2]. C'est le fluide actif du moteur thermique atmosphérique. Ce chapitre introductif rappelle la présentation générale de l'atmosphère, il définit les propriétés de la couche limite atmosphérique ainsi que quelques notions sur le vent.

## 1.2. L'atmosphère

L'atmosphère est un mélange de gaz et de particules qui entourent le globe. Vue de l'espace, elle forme une fine couche de lumière bleue foncée sur l'horizon. Elle est constituée de couches qui forment des anneaux autour de la Terre et s'étend sur quelques centaines de kilomètres d'altitude, mais confinée en majeure partie sur une hauteur de 50 kilomètres au-dessus de la surface terrestre [3].

On considère que sa constitution est la suivante [4] :

- 78 % d'azote (N<sub>2</sub>)
- 21% d'oxygène (O<sub>2</sub>)
- 1 % de gaz divers (Ar, CO<sub>2</sub>, ...)

### 1.2.1. Les couches de l'atmosphère

L'atmosphère de la terre n'est pas une masse continue, mais elle est constituée de couches superposées les unes sur les autres, dont chacune est caractérisée par une densité particulière. A cet effet, on peut les classer en sept couches telles que figurées ci-dessous :

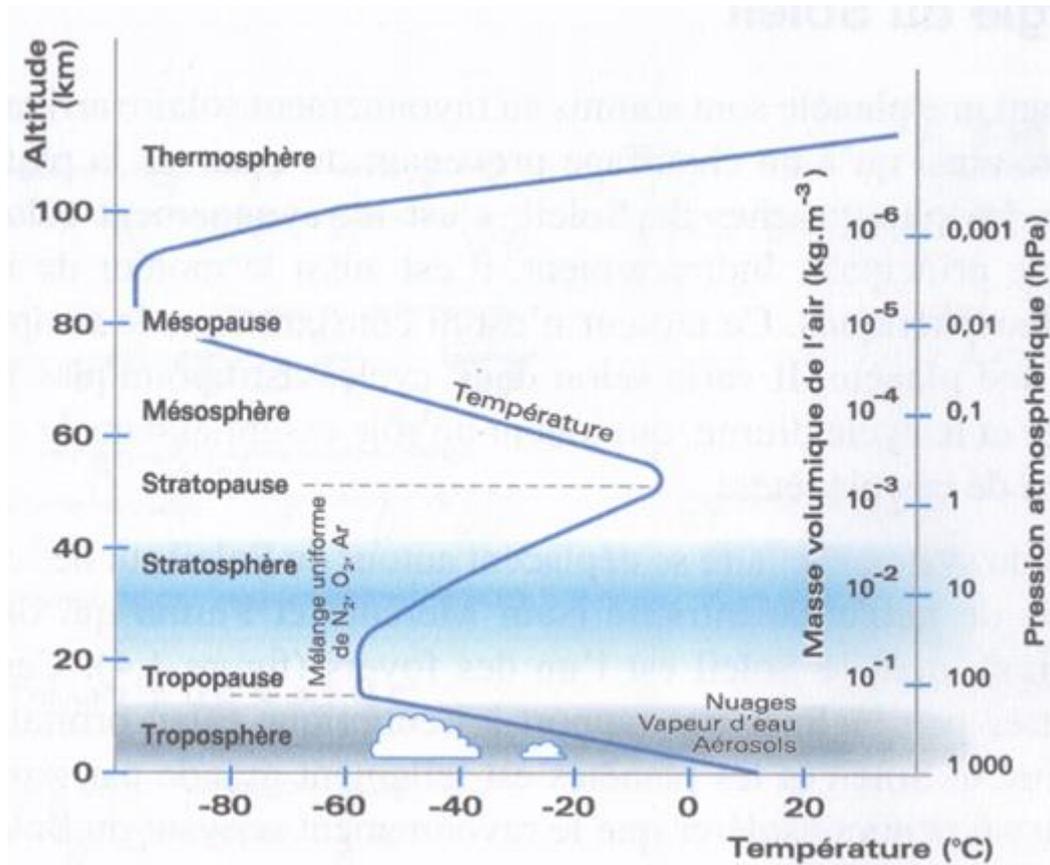


Figure 1.1: Les couches de l'atmosphère [5]

➤ La troposphère

La troposphère est la couche atmosphérique la plus proche du sol terrestre. Elle s'étend jusqu'à environ 15 kilomètres d'altitude. C'est dans cette couche qu'on retrouve la plus grande partie des phénomènes météorologiques. Au fur et à mesure qu'on s'élève dans la troposphère la température décroît de façon régulière d'environ 6 degrés Celsius tous les 1000 mètres pour atteindre -56 °C à la tropopause (zone séparant la troposphère de la stratosphère). L'air près du sol est plus chaud qu'en altitude car la surface réchauffe cette couche d'air [3].

➤ Stratosphère

La stratosphère est au-dessus de la troposphère. C'est dans la stratosphère qu'on trouve 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. Les mouvements de l'air y sont beaucoup moindres. Il s'agit d'un environnement beaucoup plus calme. La stratopause sépare la stratosphère de la mésosphère [3].

### ➤ Mésosphère

La mésosphère est au-dessus de la stratosphère. Dans cette couche, la température recommence à décroître avec l'altitude pour atteindre  $-80\text{ °C}$  à une altitude d'environ 80 km. Les poussières et particules qui proviennent de l'espace (les météores) s'enflamment lorsqu'elles entrent dans la mésosphère à cause de la friction de l'air [3]. Ce phénomène nous apparaît sous la forme « d'étoiles filantes ».

### ➤ Thermosphère

La couche la plus haute est la thermosphère. Dans cette zone, la température augmente avec l'altitude et peut atteindre environ 100 degrés Celsius. La thermosphère atteint des milliers de kilomètres d'altitude et disparaît graduellement dans l'espace. La partie inférieure de la thermosphère est appelée l'ionosphère. L'ionosphère réfléchit les ondes courtes (ondes radio) [3].

## 1.2.2. La couche limite atmosphérique

La couche limite atmosphérique (CLA) est la zone d'interactions entre l'atmosphère et la surface terrestre. C'est un lieu d'échanges d'énergie entre la surface et l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau et de quantité de mouvement. Son épaisseur varie de quelques mètres à plusieurs kilomètres, en fonction de la vitesse du vent, de la rugosité de surface et de l'ensoleillement local [3]. La CLA se divise en trois parties distinctes :

### ➤ La couche d'Eckerman

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

### ➤ La couche de surface

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

### ➤ La sous-couche rugueuse

C'est la partie inférieure de la couche de surface, juste au-dessus de la surface du sol. Son épaisseur varie de quelques dizaines de millimètres sur une surface de mer plane à quelques dizaines de mètres en ville. L'écoulement de l'air est alors fortement turbulent non homogène et instationnaire.

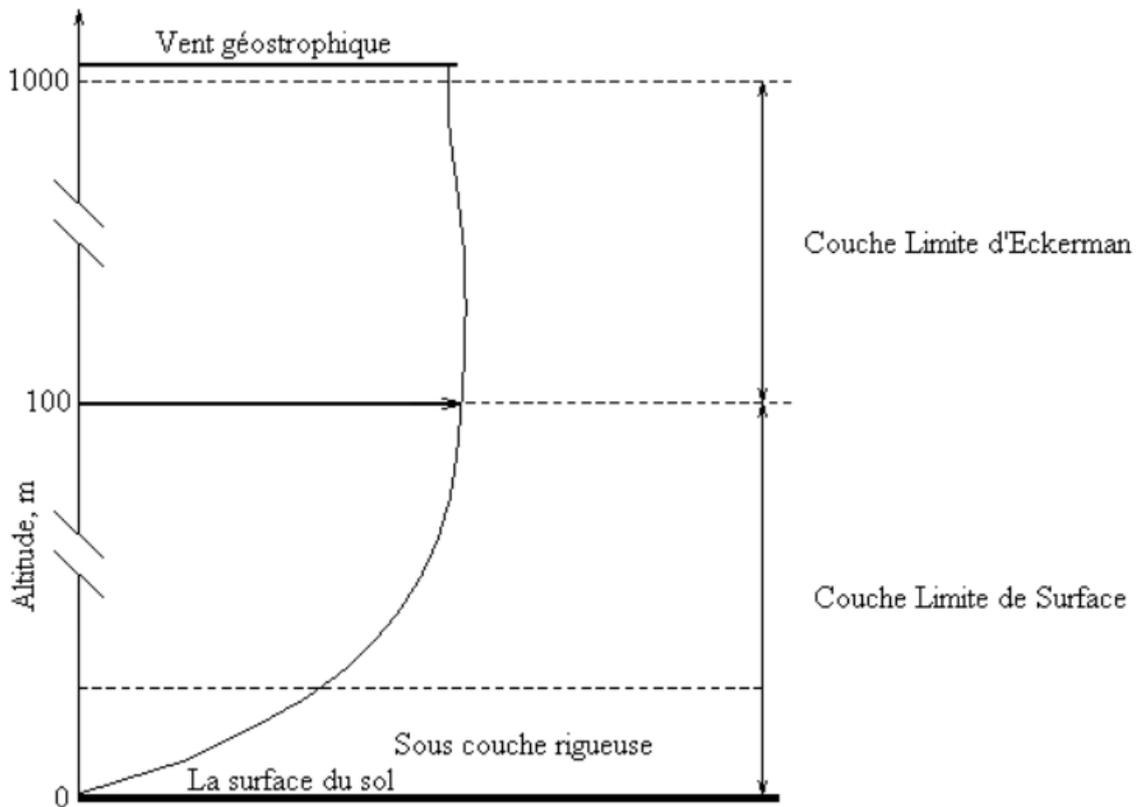


Figure 1.2: Vue schématique de la couche limite atmosphérique [3]

### 1.3. Le climat

Le climat est souvent assimilé aux conditions météorologiques moyennes (températures, ensoleillement, humidité de l'air, vitesse des vents, etc.) qui règnent sur une région donnée durant une longue période (au moins 30 ans) [6].

#### 1.3.1. La météorologie

C'est l'étude des phénomènes atmosphériques tels que les nuages, les dépressions et les précipitations pour comprendre comment ils se forment et évoluent. C'est une discipline qui permet donc d'établir des prévisions météorologiques en s'appuyant sur des modèles mathématiques à court comme à long terme. Elle est également appliquée pour la prévision de la qualité de l'air, pour les changements climatiques et pour l'étude dans plusieurs domaines de l'activité humaine (construction, trafic aérien) [3]

#### 1.3.2. Le vent

Le vent correspond au déplacement d'une masse d'air consécutif à des différences locales de température et de pression. Il est le résultat de la mise à l'équilibre d'un ensemble de forces qui sont: la résultante du gradient de pression, la force de Coriolis et les forces de frottements au sol [7].

➤ La force du gradient de pression

Lorsque le soleil éclaire la Terre, l'angle d'incidence du rayonnement solaire varie de l'équateur où il est perpendiculaire à la surface, aux pôles où il est rasant. Cette variation angulaire provoque un réchauffement inégal de la surface terrestre. Ce réchauffement différentiel du globe ainsi que la nature des sols et la répartition des océans et des terres produisent des différences de pression à la surface de Terre.

Le gradient de pression est perpendiculaire aux surfaces isobares et il entraîne l'air des hautes vers les basses pressions. Plus les différences de pression sont importantes et plus cette force est importante [3].

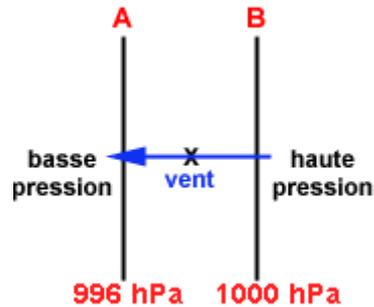


Figure 1.3: Représentation de gradient de pression [8]

➤ La force de Coriolis

La force de Coriolis est issue de la rotation de la Terre autour de son axe. Elle est perpendiculaire à la vitesse du vent et orientée vers la droite (sens horaire) dans l'hémisphère nord et vers la gauche (sens antihoraire) dans l'hémisphère sud.

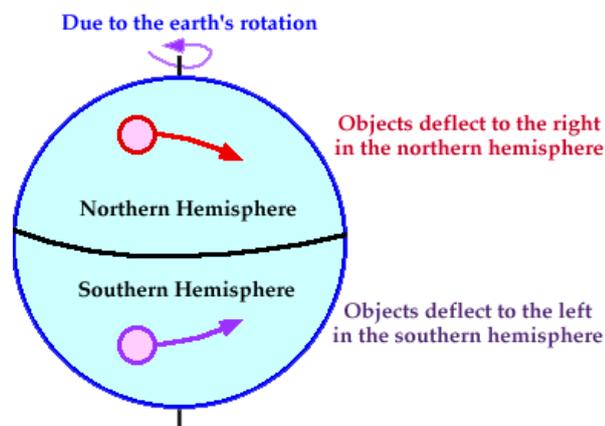


Figure 1.4: Représentation de la force de Coriolis [9]

➤ Les forces de frottement au sol

Comme la terre n'est pas lisse et possède un relief à sa surface, cette configuration exerce une résistance aux déplacements des masses d'air près du sol. Ces forces de frottement traduisent la friction turbulente de l'air avec le sol.

L'effet de ces frottements réduit au voisinage du sol l'influence de la force de Coriolis ainsi que la vitesse du vent. Au-delà de la couche limite, cet effet disparaît et les vents circulent parallèlement aux isobares.

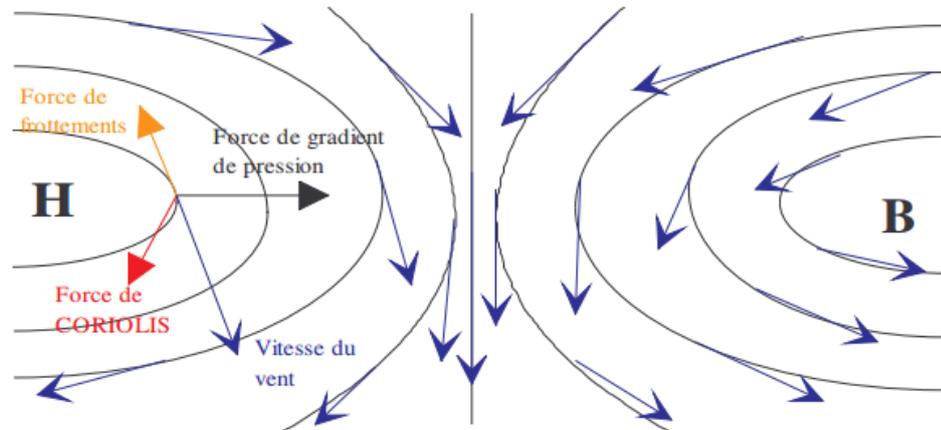


Figure1.5: L'action des trois forces sur la direction du vent [8]

### 1.3.3. Mesure de la vitesse du vent

La mesure de la vitesse du vent se fait le plus souvent par l'emploi d'un anémomètre à coupelles. Un tel anémomètre est muni d'un rotor de trois coupelles qui, sous l'effet du vent, se met à tourner autour d'un axe vertical. En général, l'anémomètre est également doté d'une girouette indiquant la direction du vent. Au lieu de coupelles, l'anémomètre peut être muni d'une hélice, une solution qui est cependant assez rare [10].



Figure 1.6a: Anémomètre à hélice [10]

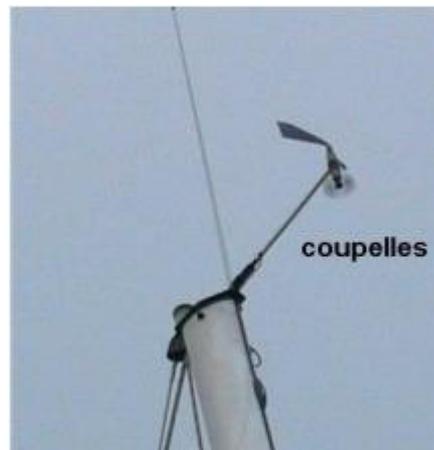


Figure 1.6b: Anémomètre a coupelles [10]

La vitesse du vent augmente avec l'altitude. Cette relation s'exprime comme suit [1]:

$$\frac{V1}{V2} = \left(\frac{h1}{h2}\right)^n \quad (1)$$

Avec :

- $V_1$  et  $V_2$  sont respectivement les vitesses relatives aux altitudes  $h_1$  et  $h_2$ ;
- Le paramètre  $n$  dépend de la forme du relief du terrain considéré et varie entre 0.1 et 0.4 pour un terrain accidenté.

#### 1.3.4. La rose des vents

Les mesures de vent peuvent être présentées à l'aide d'une rose des vents. Elle est un peu comme un compas de navigation qui divise l'horizon en secteurs angulaires. Pour chaque secteur, sont présentés [3]:

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

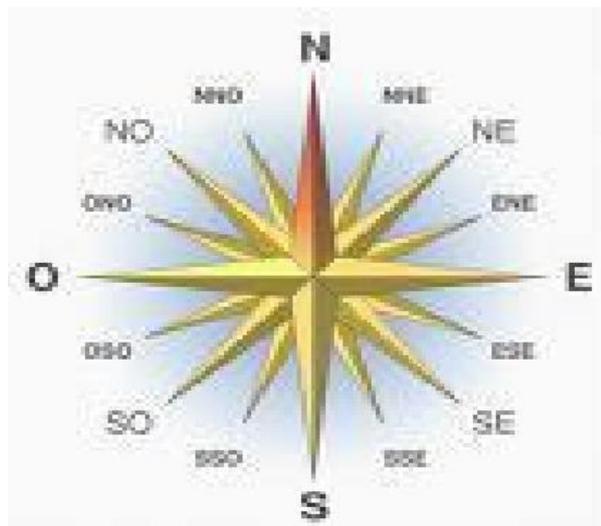


Figure 1.7 : Rose des vents [3]

Les roses des vents diffèrent d'une région à une autre. Elles constituent en fait une sorte d'empreinte climatologique. Elles servent à indiquer la distribution relative des directions du vent et non pas la vitesse réelle de ce dernier.

#### 1.4. Conclusion

La connaissance complète en un lieu donné des caractéristiques des vents est indispensable pour le choix d'un site pour l'implantation d'une éolienne.

**CHAPITRE 2 :**  
**Caractérisation du potentiel**  
**éolien**

## CHAPITRE 2 : Caractérisation du potentiel éolien

### 2.1. Introduction

Comme le vent présente un caractère aléatoire, son analyse doit se baser sur des méthodes statistiques. Ainsi, les paramètres qui vont caractériser le régime des vents sur un site seront la valeur de la vitesse moyenne et les lois statistiques permettant de représenter sa variation temporelle.

Parmi ces lois, on retrouve la loi de Weibull qui permet de caractériser la distribution des fréquences de vitesses de vent. L'analyse des deux paramètres qui caractérisent cette loi est à l'origine de nombreuses études. En effet, ces deux paramètres sont le facteur de forme  $k$  et le facteur d'échelle  $c$  qui dictent la manière dont la vitesse du vent varie statistiquement durant une période donnée et sont caractéristiques de chaque site.

### 2.2. Caractéristiques de répartition de la vitesse du vent

Dans le cas où nous disposons d'un ensemble de  $N$  valeurs mesurées de la vitesse du vent, on détermine l'histogramme de cette dernière que l'on appelle la courbe de distribution de fréquence de la vitesse du vent.

La fonction de répartition  $F(v)$  est la probabilité que la vitesse du vent soit inférieure à une certaine valeur  $v$  et que la densité de probabilité  $f(v)$  est obtenue en dérivant  $F(v)$  [1].

$$f(v) = \frac{\partial F(v)}{\partial v} \quad (2)$$

Parmi les distributions utilisées dans la littérature et qui se base sur cette théorie est celle de Weibull.

### 2.3. Distributions des vitesses

Divers modèles de distribution statistique ont été appliqués pour caractériser la distribution de probabilité de la vitesse moyenne du vent. Toutefois, le modèle le plus utilisé est celui de la distribution de Weibull qui s'avère approprié à la représentation des propriétés statistiques du vent.

#### 2.3.1. Distribution de Weibull

La distribution de Weibull s'exprime mathématiquement par sa fonction de densité de probabilité  $f(v)$  donnée par [11] :

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp \left[ - \left(\frac{v}{c}\right)^k \right] \quad (3)$$

La fonction de distribution de Weibull  $F(V)$  s'écrit :

$$F(v) = \int f(v)dv = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (4)$$

Où :

- $f(v)$  : la fréquence d'occurrence des vitesses du vent;
- $k$ : facteur de forme sans dimension, il indique le caractère plus ou moins pointu de la distribution ;
- $c$ :facteur d'échelle (m/s), il renseigne sur la moyenne du vent caractéristique du site.

### 2.3.2. Distribution hybride de Weibull

La distribution hybride de Weibull, est utilisée lorsque la fréquence des vents calmes enregistrée, sur un site donné, est relativement importante. En effet, cette proportion ne peut pas être négligée et doit être prise en compte lors de la caractérisation d'un site du point de vue éolien. Cette distribution s'écrit [1] :

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{hW}(v) = (1-F_0) \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad \text{pour } V > 0 \quad (5.a) \\ f_{hW} = F_0 \quad \text{pour } V = 0 \quad (5.b) \end{array} \right.$$

Avec :  $F_0$  la fréquence des vents calmes.

### 2.3.3. Distribution de Rayleigh

La distribution de Rayleigh est un cas particulier de la distribution de Weibull pour le cas où le facteur de forme  $k$  est égal à 2. Sa densité de probabilité est donnée par :

$$F_R(v) = 2 \frac{v}{c^2} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right) \quad (6)$$

Toutefois la distribution de Weibull classique (fonction de deux paramètres) est la plus indiquée. L'utilisation de ces deux paramètres permet l'évaluation d'un nombre important de propriétés de la distribution, d'où une meilleure caractérisation des sites.

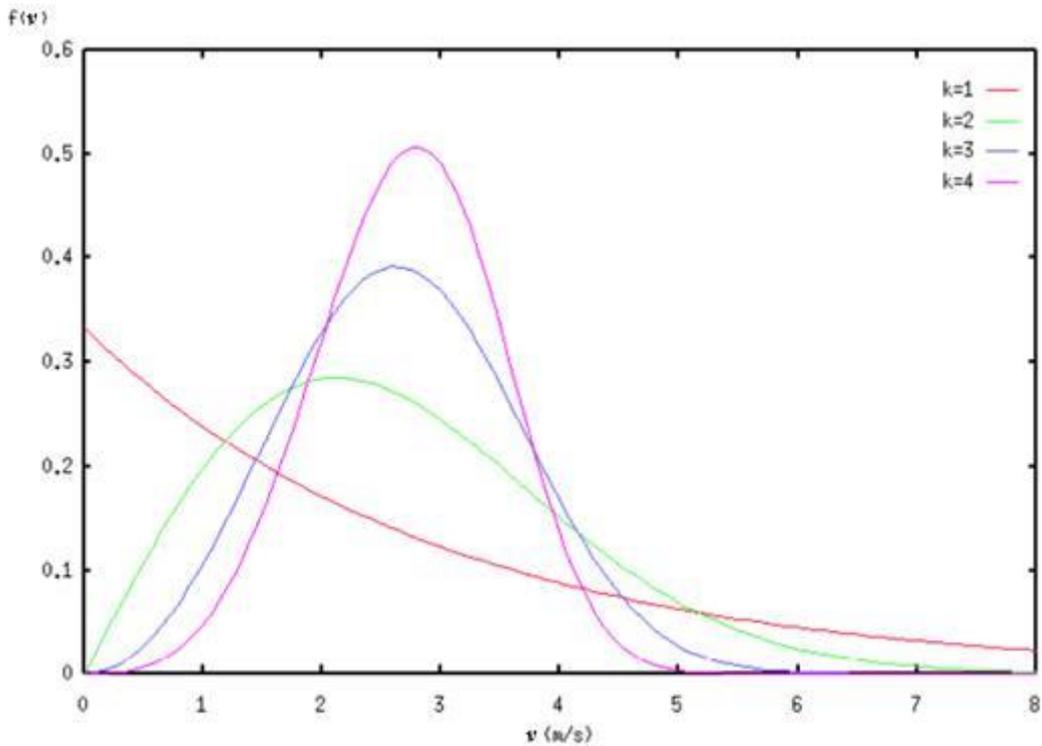


Figure 2.1 : Exemples de fonctions de Weibull pour  $c$  fixé à 3 m/s et différentes valeurs du paramètre de forme  $k$ , variant de 1 à 4.

## 2.4. Détermination des paramètres de Weibull

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 : la méthode des moindres carrés et celle utilisant l'écart type de la variation des vitesses et leur vitesse moyenne.

### 2.4.1. Méthode des moindres carrés

Cette méthode est souvent utilisée pour déterminer les paramètres de Weibull. Le calcul de  $c$  et  $k$  se fait en partant des diagrammes des fréquences cumulées, la fréquence cumulée s'exprime par [11]:

$$F_i = \text{prob}[v < v_i] = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{v_i}{c} \right)^k \right] \quad (7)$$

Ainsi :

$$1 - F_i = \exp \left[ - \left( \frac{v_i}{c} \right)^k \right] \quad (7.a)$$

En prenant les logarithmes, on obtient :

$$\log(1 - F_i) = - \left( \frac{v_i}{c} \right)^k \quad (7.b)$$

$$\log(-\log(1 - F_i)) = k \log(v_i) - k \log(c) \quad (7.c)$$

En utilisant le changement de variable suivant :

$$y = \log(-\log(1 - F_i)) ;$$

$$u = \log(v) ;$$

$$k_0 = -k \log(c).$$

On aura :

$$y = k u + k_0 \quad (7.d)$$

Les valeurs des paramètres  $k$  et  $k_0$  de l'équation (7.d) seront identifiées après l'établissement de la régression linéaire. Ainsi, les deux paramètres de la distribution de Weibull seront déterminés avec  $k$  étant la pente de la courbe et  $k_0$  étant l'ordonnée à l'origine ainsi, nous pourrions déterminer le paramètre  $c$  comme suit :

$$c = \exp\left(-\frac{k_0}{k}\right) \quad (7.e)$$

#### 2.4.2. Méthode de l'écart type et de la vitesse moyenne

Si l'on ne dispose que de la vitesse moyenne du vent et de l'écart-type, on peut calculer les paramètres  $k$  et  $c$  à partir des formulations suivantes [12] :

$$k = \left( \frac{\sigma}{\bar{v}} \right)^{-1.086} \quad (8.a)$$

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (8.b)$$

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

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \exp(-t) t^{x-1} dt \quad \text{et} \quad \Gamma(x+1) = x \Gamma(x) \quad (8.c)$$

#### 2.5. Influence des paramètres de Weibull sur la qualité du potentiel éolien

Les paramètres de Weibull  $c$  et  $k$  permettent d'accéder directement aux caractéristiques du potentiel éolien puisque la puissance théorique moyenne développée par une éolienne est directement proportionnelle au cube de la vitesse moyenne :

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2_T v^3 \quad (9)$$

Ou :

- $C_p$  est le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine;
- $\rho$  est la masse volumique de l'air;
- $R_p$  est le rayon de la turbine;
- $v$  la vitesse du vent.

Pour une rentabilité optimale des éoliennes, les valeurs de  $c$  devraient être comprises entre 6 et 15 m/s. Les valeurs optimales de  $k$  pour obtenir une forte puissance sont les valeurs proches de 1.5, de façon à ce que la distribution en puissance ait un étalement suffisant. A  $c$  constant, avec  $k > 1.5$ , les distributions étalées offriront un meilleur potentiel que les distributions pointues [1].

## 2.6. Conclusion

La distribution des fréquences du vent est un ensemble de données très important dans le calcul des performances d'un système éolien et l'estimation de l'énergie éolienne à des hauteurs différentes où les mesures sont prises.

**Chapitre 3 :**  
**Évaluation du gisement**  
**éolien de l'Afrique**

## Chapitre 3 : Évaluation du gisement éolien de l'Afrique

### 3.1. Introduction

Le gisement éolien est un ensemble de données décrivant l'évolution de la vitesse du vent, disponibles dans une région donnée et au cours d'une période donnée. Pour l'évaluer, il faut disposer de la distribution des vitesses de vent sur le site. Ce chapitre a pour but de fournir les informations nécessaires pour le dimensionnement des installations éoliennes et pour le choix des sites les plus productifs en Afrique.

### 3.2. Le gisement éolien de l'Afrique

Les sources d'énergie renouvelable sont nombreuses en Afrique. Elles se répartissent dans des zones distinctes. En terme de ressources éoliennes, la figure 3.1 montre que les meilleurs vents en Afrique se retrouvent en particulier au nord du continent, à ses extrémités à l'est, à l'ouest et au sud.

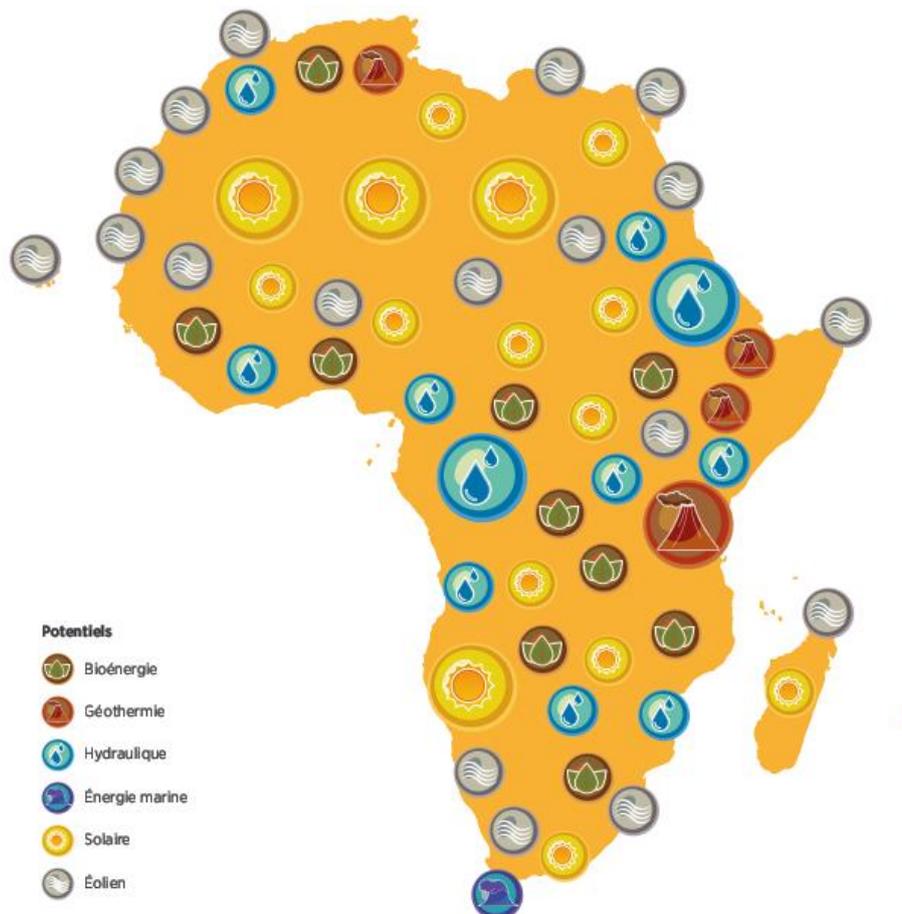


Figure 3.1: Répartition du potentiel de l'Afrique en matière d'énergies renouvelables [13]

En se référant à la cartographie des vents et en tenant compte de certaines considérations liées aux données climatologiques et météorologiques, on pourrait regrouper les 15 pays africains ayant les meilleurs gisements éoliens en Afrique, de la façon suivante [14]:

- Afrique australe (Afrique du Sud, Lesotho, Madagascar et Maurice) ;
- Afrique de l'est (Djibouti, Érythrée, Seychelles et Somalie) ;
- Afrique du nord (Algérie, Égypte, Maroc et Tunisie) ;
- Afrique de l'ouest (Cap Vert et Mauritanie).

À cela il faut ajouter le Tchad au centre de l'Afrique centrale qui doit son gisement éolien à des caractéristiques topographiques.

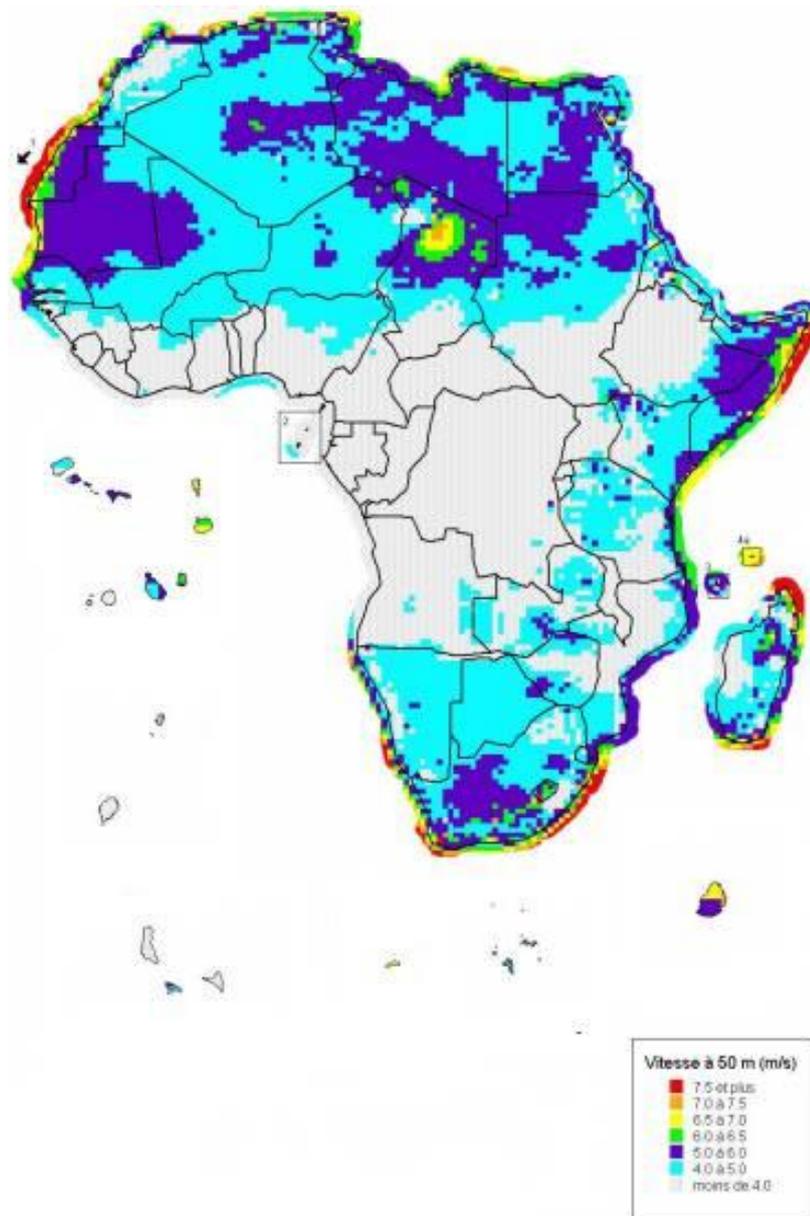


Figure 3.2 : Cartographie des vents de l'Afrique [14]

### 3.3. Analyse des pays à bon potentiel

En dépit des ressources éoliennes considérables en Afrique, la quasi-majorité des pays africains n'ont pas mis en place un cadre réglementaire approprié, ce qui constitue une importante barrière entravant le déploiement de l'énergie éolienne en Afrique. Une autre contrainte, de moins en moins importante, est le coût généralement élevé de l'énergie éolienne par rapport aux autres énergies conventionnelles.

Les différents pays africains ayant un bon gisement éolien peuvent être répartis dans des groupes ayant des contextes nationaux semblables:

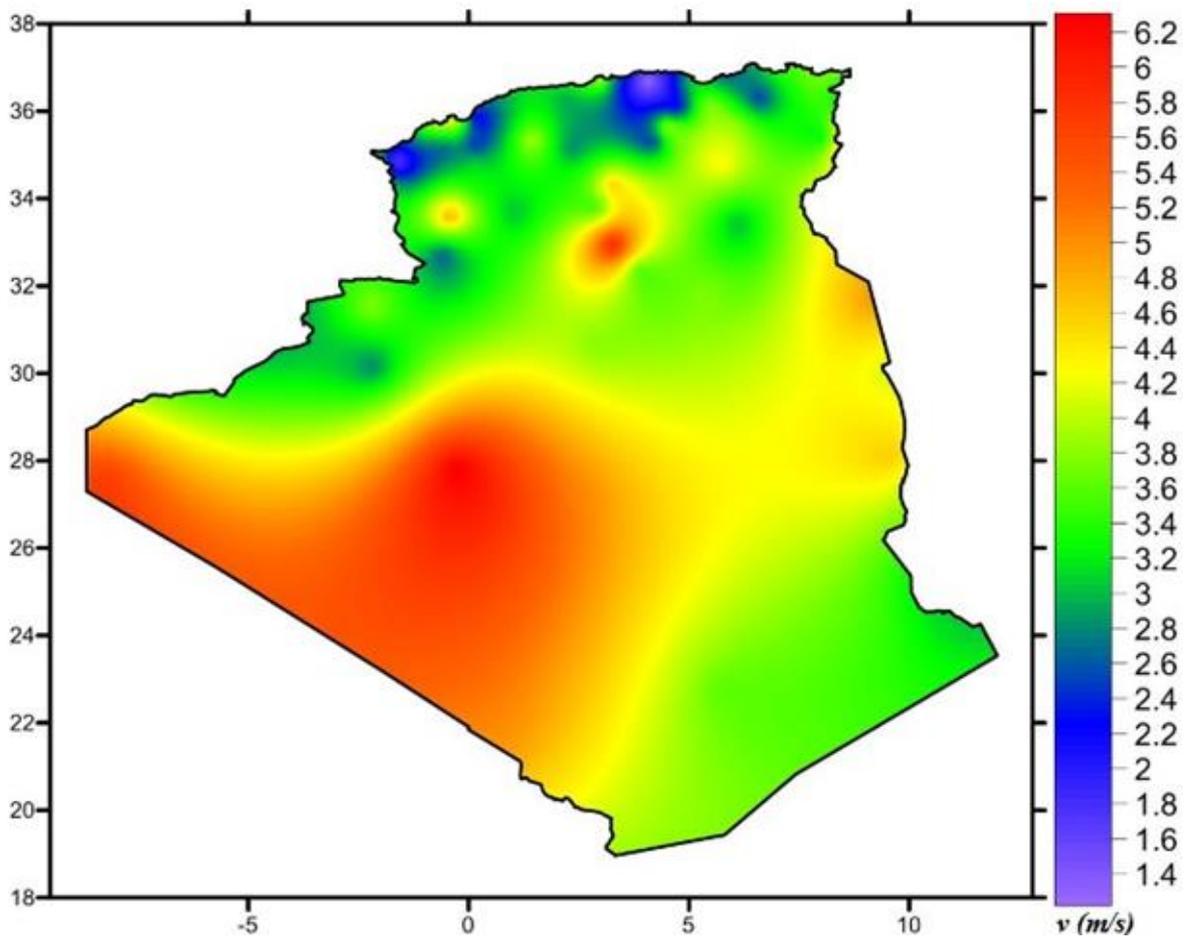
- Le premier groupe comprenant le Maroc et la Tunisie se distingue des autres groupes par l'adoption d'une politique prononcée en faveur de la production d'électricité d'origine éolienne. Cette politique est dictée particulièrement par le déficit de leurs balances énergétiques et leur dépendance en énergies primaires de l'étranger alors que la consommation électrique continue à croître à un taux élevé. Ces deux pays ont également mis en service des parcs éoliens reliés au réseau électrique.
- Le deuxième groupe renferme l'Afrique du Sud, l'Algérie et l'Égypte. Ces pays se distinguent des pays du premier groupe par les importantes sources d'énergie fossiles dont ils disposent, permettant la production d'électricité à des coûts très compétitifs. Dans de telles conditions, il semble que l'énergie éolienne ne pourrait pas présenter une option compétitive à court terme pour la production commerciale de l'électricité à grande échelle à moins de considérer les coûts environnementaux. En revanche, il est fort possible de concrétiser certains projets éoliens dans le cadre de la coopération internationale, à l'instar de l'Égypte.
- Le troisième groupe renferme Cap Vert, Érythrée, Madagascar, Mauritanie et Somalie. Ces pays semblent être assez concernés par des petits projets éoliens pour la production de l'électricité par des systèmes éoliens liés à des petits réseaux électriques isolés. Les pays de ce groupe semblent plus favorables aux projets éoliens de petite ou moyenne taille principalement en raison des caractéristiques de la demande en électricité et du réseau. Toutefois, plusieurs contraintes pourraient entraver l'émergence de projets éoliens, en particulier les contraintes à l'investissement, la méconnaissance du potentiel éolien et le manque de mains d'œuvre qualifiée.
- Le quatrième groupe renferme Djibouti, Lesotho, Maurice, Seychelles et Tchad. Il s'agit de pays disposant vraisemblablement d'un bon gisement éolien (à confirmer par des mesures de vent), mais leurs décisions politiques pour la promotion de l'énergie éolienne ne semblent pas prises. La raison pourrait être l'existence d'importantes contraintes techniques ou environnementales qui pourraient entraver la faisabilité des projets éoliens. Une autre raison possible est l'existence d'autres formes d'énergie renouvelables, projetées ou en cours d'exploitation, et qui semblent plus compétitives ou plus appropriées au contexte national de ces pays. À titre d'exemple, on pourrait citer l'énergie géothermique à Djibouti, l'énergie hydraulique au Lesotho, l'énergie photovoltaïque au Tchad et les biocombustibles à Maurice et à Seychelles.

### 3.3.1 Le potentiel éolien en Afrique du Nord

Bien que tous les pays disposent d'un potentiel non négligeable, les sites les plus intéressants et les plus importants se trouvent en Egypte, au Maroc et en Tunisie. Comparativement au Maroc, à la Tunisie et à l'Egypte, l'Algérie possède un potentiel éolien qui est assez faible.

#### ➤ Le gisement éolien en Algérie

En Algérie, le potentiel éolien est relativement modéré, les vitesses du vent varient entre 2 et 6 m/s. Ce potentiel énergétique est idéal pour pomper l'eau dans les Hauts Plateaux, mais il est marginal pour les grands projets commerciaux. Les sites prometteurs sont situés dans la région de l'Adrar, au sud, au nord-ouest d'Oran, la région s'étendant de Meghres à Biskra à l'Est et d'El Kheiter à Tiaret à l'ouest. L'Algérie avait réceptionné en 2014 la ferme éolienne pilote d'Adrar (10 MW).



➤ Le gisement éolien marocain

Le Maroc bénéficie d'un gisement éolien important avec des régions dépassant 10 mètres par seconde (10 m/s) de vitesse annuelle moyenne du vent. La mise en évidence de ce gisement a été réalisée par le Centre de Développement des Énergies Renouvelables avec l'aide de la coopération allemande (GTZ) qui a permis l'installation de plusieurs mâts de mesure sur différents sites et le suivi des données sur des périodes d'au moins une année [16].

Une première carte éolienne du pays a montré que la zone Nord (Tanger à Tétouan) et la bande côtière allant de Tarfaya jusqu'à Lagouira présentent des sites exceptionnels avec des vents réguliers et des vitesses moyennes suffisantes pour développer des projets rentables.

La figure 3.4 illustre la carte du gisement éolien marocain et le tableau 3.1 présente les projets éoliens réalisés au Maroc.

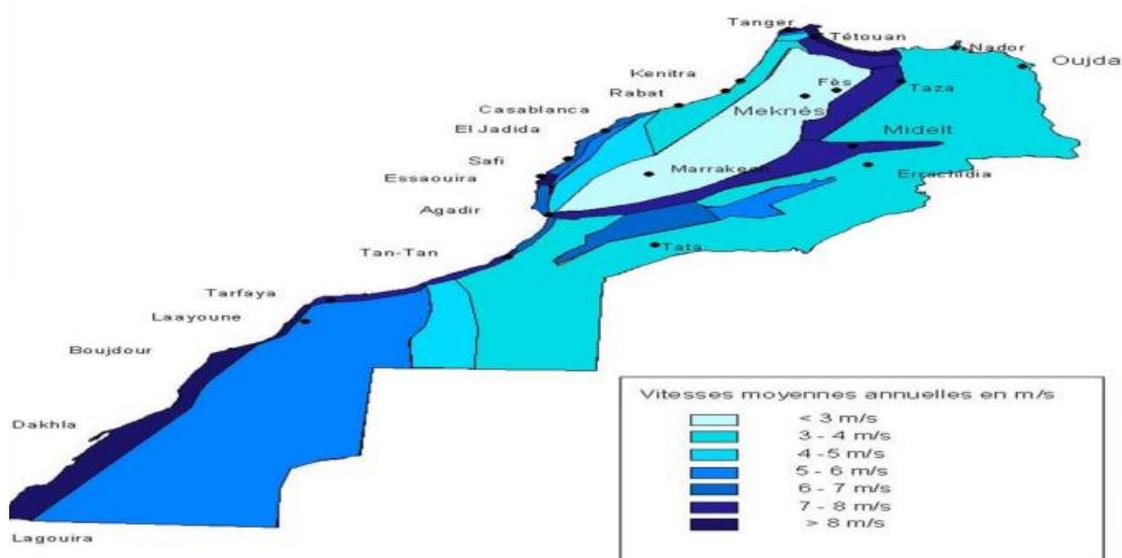


Figure 3.4 : Carte du gisement éolien du Maroc [16]

Tableau 3.1 : Projets éoliens réalisés au Maroc [17]

Projets	Puissance(MW)	Production (GWh/ans)	Date de production
Projet El Koudia El Baida - Tétouan	50	195	Aout 2000
Parc éolien ESSAOUIRA	60	210	Avril 2007
Projet de Lafarge	32	110	2009
Parc éolien de TANGER	140	526	2009
Projet Cimenterie de Laâyoune	5	-	2011

➤ Le gisement éolien en Tunisie

Selon les études menées par l'Agence Nationale pour la Maitrise de l'Energie, le potentiel éolien tunisien s'élève à 245 MW avec des zones ventées importantes [18]. Le tableau 3.2 présente les projets éoliens réalisés en Tunisie.

- De bons vents ( $V > 7$  m/s à 60m) peuvent être trouvés dans :
  - Nord et côte du nord-est : Bizerte et Nabeul ;
  - Partie centrale du pays : Kasserine ;
  - Sud-est : Tataouine, Médenine, Gabes.
- Quelques emplacements très bons ( $V > 8$  m/s à 60m peuvent être trouvés à l'intérieur des secteurs précédents).
- Vents intéressants ( $V > 6.5$  m/s à 60m) peuvent être trouvés dans :
  - Secteurs Est de Tozeur, de Kabilia et de Tataouine ;
  - Côte Est de Médenine ;
  - Région de Monastir.



Figure 3.5 : Carte des vents de la Tunisie [18]

Tableau 3.2 : Projets éoliens réalisés en Tunisie [18]

Projets	Puissance (MW)	Date de production
centrale éolienne de Sidi Daoued	53.6	2009
Centrale éolienne de Bizerte	190	2012

➤ Le gisement éolien en Egypte

L'Égypte a le potentiel éolien le plus élevé dans la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord.

Une série de projets de production d'énergie éolienne à grande échelle reliés au réseau ont été exécutés en Égypte, pour une capacité installée totale d'environ 550 MW en 2010. Le Tableau 3.3 ci-dessous présente les dates de mise en service des principaux projets éoliens, ainsi que des informations sur la source de l'aide internationale qui a permis l'exécution de chaque projet.

Tableau 3.3: Date de mise en service des principaux projets éoliens et sources d'appui financier en Egypte [19]

Date de mise en service	Capacité (MW)	Source de l'appui financier/technique	Type de turbine
2001	30	Danida 1	Nordex 600 Kw
2001	33	KfW 1	Nordex 600 kW
2003	30.36	Danida 2	Vestas 660 kW
2004	46.86	KfW 2 & 3	Vestas 660 kW
2006	85	Espagne	Gamesa 850 kW
2007	79.9	KfW 4	Gamesa 850 kW
2008/2009	120.7	Japon	Gamesa 850 kW
2010	120.7	Danida 3	Gamesa 850 kW

### 3.3.2. Le potentiel éolien des pays d'Afrique subsaharienne

Le potentiel éolien des pays d'Afrique subsaharienne est assez mal connu, au sens où il existe encore très peu d'atlas éoliens nationaux, même dans les pays disposant d'un potentiel a priori bon voire excellent (Figure 3.6).

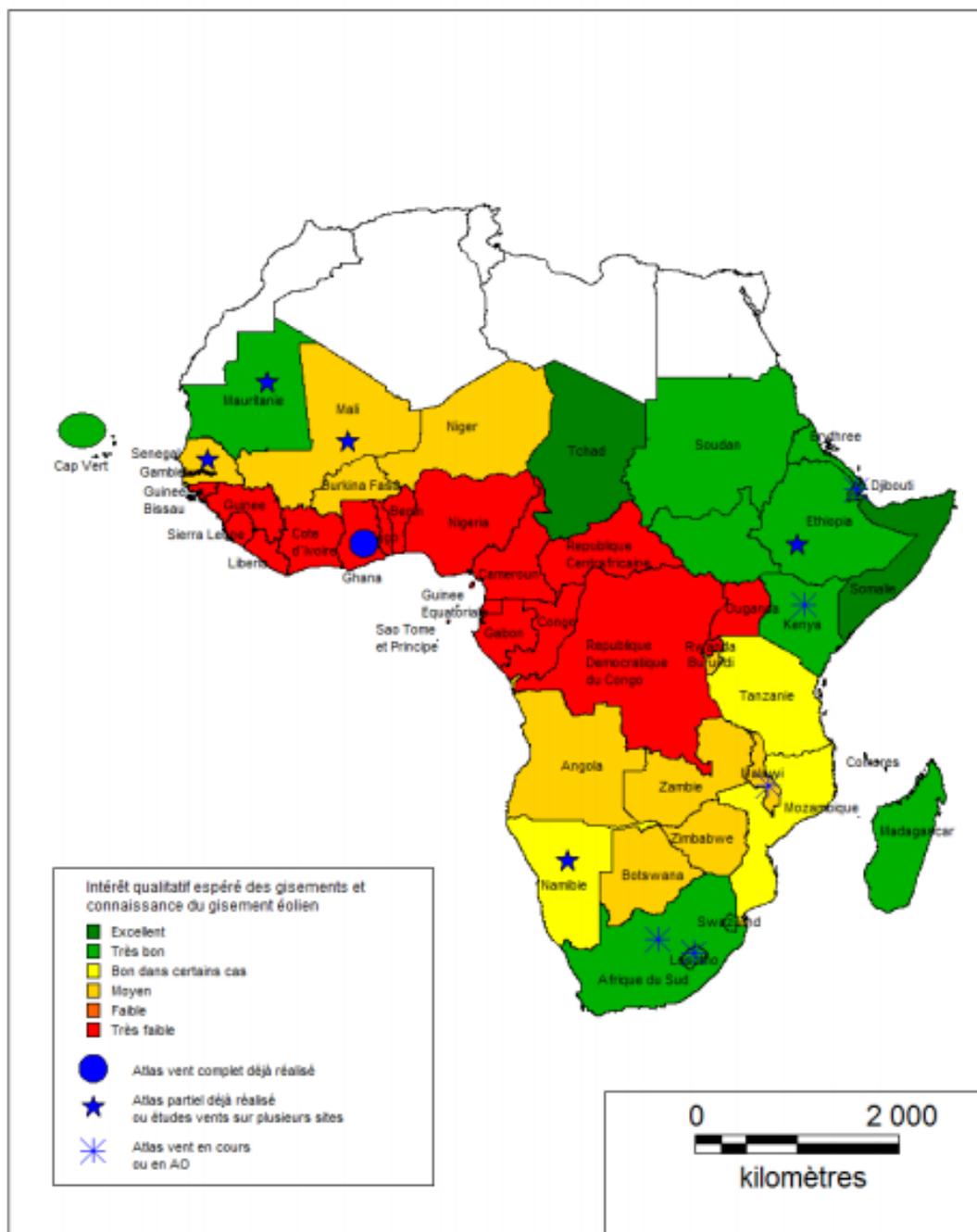


Figure 3.6 : Evaluation qualitative et niveau de connaissance des gisements éoliens en Afrique subsaharienne [20]

➤ Afrique de l'Ouest

En matière de développement des énergies renouvelables en Afrique de l'Ouest, le potentiel éolien est concentré dans les zones côtières où la vitesse moyenne annuelle des vents à 10 m de hauteur, est en moyenne de 4 m/s. De nouvelles mesures effectuées entre 30 m et 40 m de hauteur ont révélé l'existence de vitesses de plus de 6 m/s [20].

Pour valoriser ce potentiel, plusieurs projets et programmes ont été mis en œuvre.

- Le potentiel éolien du Cap Vert

L'expérience du Cap Vert en éolien est ancienne puisque les premières turbines (Vestas) ont été installées au cours des années 80 avec un appui technique et financier du Danemark.

La volonté du gouvernement du Cap-Vert d'augmenter la pénétration de l'énergie éolienne a abouti en 2008 à la création d'une société locale pour développer, financer, construire, détenir et exploiter les quatre parcs éoliens d'une capacité installée totale de 25,5 MW.

Cette puissance est distribuée sur quatre îles stratégiquement sélectionnées en fonction de la demande d'énergie: Santiago (9,35 MW), sur laquelle réside la moitié de la population du pays et où se trouvent la plupart des infrastructures industrielles et administratives : Vicente (5,95 MW), la seconde île la plus habitée; Sal (7,65 MW) et Boa Vista (2,55 MW), les deux îles qui connaissent l'afflux de touristes le plus important.

En septembre 2011, le premier parc éolien (Santiago) est entré en fonctionnement et tout au long de l'année, il a contribué avec une pénétration mensuelle moyenne de 20 %. Le parc éolien de São Vicente a commencé à fonctionner en octobre de la même année et a contribué avec une pénétration mensuelle moyenne en période de mise en service de 25% environ. Le parc éolien de Sal a été mis en service en novembre avec une pénétration mensuelle moyenne de l'ordre de 21%.

- Le potentiel éolien du Sénégal [21]

Le Sénégal possède une très bonne ressource en énergie éolienne dans certaines régions, pourtant cette forme d'énergie reste encore très peu exploitée.

Des vents présentant une vitesse moyenne de 5 m/s à 20 mètres du sol sont très intéressants à exploiter par des éoliennes.

Sur la carte suivante, les zones sont définies avec :

Vert : potentiel éolien très bon à bon

Bleu : potentiel éolien bon à moyen

Reste de la carte : potentiel éolien faible

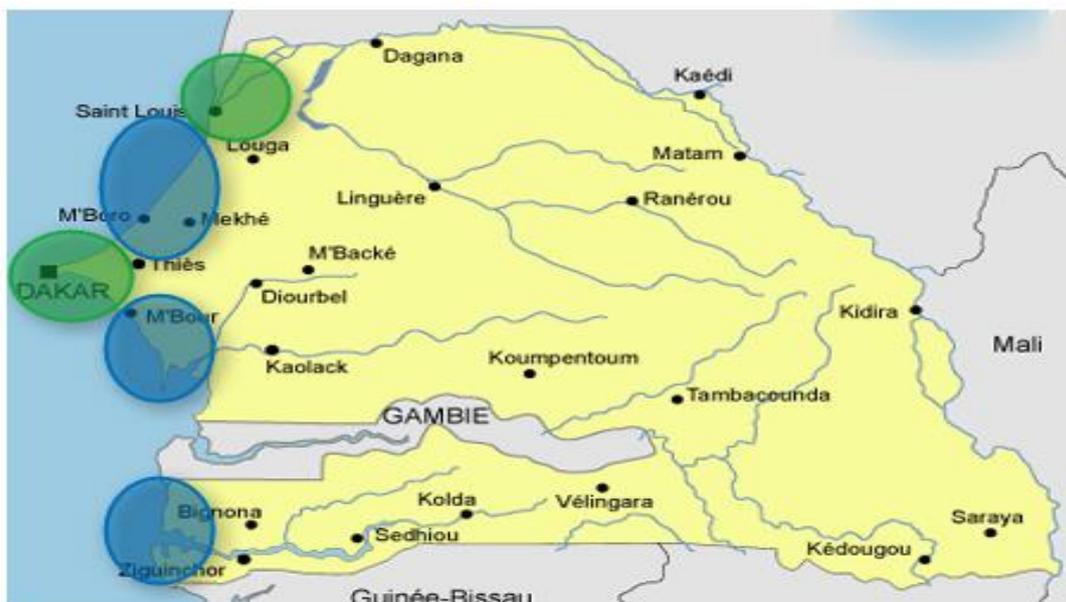


Figure 3.7 : Distribution du Potentiel éolien au Sénégal [21]

Tableau 3.4: Potentiel éolien des grandes villes du Sénégal [21]

Ville-région	Hauteur de mesure (m)	Vitesse moyenne du vent (m/s)
Dakar	20	5
Saint louis	30	4.9
Mboro	30	3.8
Thiès	15	4

➤ L’Afrique du sud

L’Afrique du Sud se place au premier rang africain dans l’éolien avec 1 053 MW installé fin 2015 contre 570 MW fin 2014 et 10 MW fin 2013 ; les 483 MW installés en 2015 représentent un accroissement de 85 % du parc éolien du pays et 64 % du marché africain de l’année [22].

Après avoir mis une décennie pour installer ses premiers 10 MW d’éoliennes, elle était, en 2013, en train de développer 3 000 MW à 5 000 MW de projets éoliens.

- Le parc éolien de Jeffreys Bay a été mis en service en juillet 2014 par la société Globeleq dans la province du Cap oriental avec 138 MW de puissance installée et une production annuelle prévisionnelle de 460 GWh.
- Le parc éolien de Cookhouse dans la province du Cap oriental a été terminé fin 2014 avec 66 turbines Suzlon totalisant 138,6 MW et un potentiel de production de 370 GWh par an.
- Le parc éolien de Sere a été mis en service en avril 2015 par la compagnie électrique nationale Eskom avec un prêt de la Banque africaine de développement, sur la côte ouest à 300 km au nord de la ville du Cap ; sa puissance de 106 MW (46 turbines Siemens de 2,3 MW) lui permet de produire 240 à 300 GWh.
- Le parc éolien de Gouda a été inauguré en septembre 2016 par Acciona à 135 km au nord-est du Cap avec 46 turbines d’une puissance totale de 138 MW.

### 3.4. Conclusion

L’énergie éolienne ne peut pas convenir dans tous les pays africains, étant donné que sa rentabilité est liée aux facteurs topographiques et à la vitesse du vent.

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire, concerne l'étude du gisement éolien en Afrique.

La connaissance du gisement de vent est un élément déterminant et stratégique pour le développement de l'éolien car la puissance captée par une éolienne dépend de la vitesse du vent à la puissance cubique. Ainsi, il est indispensable d'avoir étudié avec précision le régime et les conditions de vent pour évaluer au plus juste le facteur de charge de tout parc éolien et donc le prix de l'énergie produite pour un niveau de rentabilité cible.

L'évaluation du gisement éolien d'un site se déroule en deux étapes. D'abord, des mesures de vent sont réalisées sur le site du futur parc éolien ; puis, ces mesures sont rapprochées de celles recueillies par plusieurs sources de vent long terme dans la région environnante du projet éolien.

Le croisement de l'ensemble de ces données permet d'obtenir une évaluation cohérente du gisement éolien sur le long terme, statistiquement représentative pour la durée de vie du futur parc éolien. Ce gisement éolien long terme sera ensuite utilisé comme référence pour l'étude du potentiel éolien du parc envisagé.

Plusieurs méthodes permettent d'estimer le gisement éolien sur un site donné. Parmi les modèles souvent utilisés, citons celui de Weibull à deux paramètres qui est basé sur une loi de distribution continue des vents. Cette méthode représente assez bien les variations du vent, mais pour être efficace, le modèle impose un échantillon d'un grand nombre de classes de vitesses de vent.

Aujourd'hui, le continent africain reste le mauvais élève en matière de production d'énergies renouvelables, Pour ce qui est du potentiel éolien, il reste assez mal connu.

Des pays comme le Maroc, la Tunisie ou l'Afrique du Sud font partie des zones offrant le plus haut potentiel éolien dans le continent africain. Et, si les bons investissements sont mis en place, les ressources du continent laissent prévoir un avenir radieux pour « l'électricité verte »

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] STEPHEN KAREKEZI ; JOHN KIMANI ; AYAGO WAMBILE .Renewables Energy in Africa-French .Liaison Energie-Francophonie.Les Cahiers de Global Chance.disponible sur < <http://www.afrepren.org/Renewables%20Energy%20in%20Africa%20-%20French.pdf> >
- [2]P.GIPE.le grand livre de l'éolien.Edition Observ 'ER.Janvier 2007
- [3] BENMEDJAHED Miloud, « *Choix du site et optimisation du dimensionnement d'une installation éolienne dans le nord Algérien et son impact sur l'environnement* », Thèse de doctorat, UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID TLEMCEM FACULTE DES SCIENCES, Soutenue en Novembre 2013. Disponible à l'adresse : <[http://dspace.univtlemcen.dz/bitstream/112/4056/1/benmedjahed\\_miloud.pdf](http://dspace.univtlemcen.dz/bitstream/112/4056/1/benmedjahed_miloud.pdf) >
- [4] Météorologie, Brevet d'Initiation Aéronautique. Disponible sur : <<http://www.helico.org/IMG/pdf/Meteorologie-V2.pdf>>
- [5] Météorologie, Cours : Introduction Panorama Des Phénomènes Métrologiques, Sciences de la Planète Terre. Disponible sur : <<http://www.lmd.ens.fr/legras/Cours/L3-meteo/intro.pdf> >
- [6] Futura PLANETE : [www.futura-sciences.com](http://www.futura-sciences.com). Consulté le 21.06.2016. Disponible sur : <<http://www.futura-sciences.com/magazines/environnement/infos/dico/d/climatologie-climat-13771/> >
- [7] Saidou Madougou , « Etude du potentiel éolien du jet nocturne dans la zone sahélienne à partir des observations de radars profileurs de vent ». Thèse de doctorat de l'université de TOULOUSE.
- [8] Ressources Educatives : [meteocentre.com](http://meteocentre.com). Consulté le 21.06.2016. Disponible sur : <[http://meteocentre.com/internet/vent/p\\_vent1\\_def.htm](http://meteocentre.com/internet/vent/p_vent1_def.htm) >
- [9] ww 2010 University of illinois : [ww2010.atmos.uiuc.edu](http://ww2010.atmos.uiuc.edu) . Consulté le 21.06.2016. Disponible sur : < [http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/mtr/fw/crls.rxml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/fw/crls.rxml) >
- [10] Station météo amateur : Mesure de direction et de vitesse du vent . Jean Cassanet, membre de la SMF-Météo et Climat. Disponible sur : < [http://meteoetclimat.fr/wp-content/uploads/FP\\_Mesure-de-direction-et-de-vitesse-du-vent.pdf](http://meteoetclimat.fr/wp-content/uploads/FP_Mesure-de-direction-et-de-vitesse-du-vent.pdf) >
- [11] Hassan NFAOUI. « Caractéristiques du gisement éolien marocain et optimisation d'un système aérogénérateur /groupe électrogène pour l'électrification es villages isolés ». Thèse de doctorat.Université MOHAMMED V-AGDAL,Rabat. Soutenue le 3 Décembre 2004. Disponible à l'adresse : <[http://toubkal.imist.ma/bitstream/handle/123456789/3611/THESE\\_NFAOUI.pdf?sequence=3](http://toubkal.imist.ma/bitstream/handle/123456789/3611/THESE_NFAOUI.pdf?sequence=3) >
- [12] G. Al Zohbi, P. Hendrick et P. Bouillard. Evaluation du potentiel d'énergie éolienne au Liban. Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°1 (2014) 83 – 96. Le 31 Mars

2014.Disponible sur :< [http://www.cder.dz/download/Art17-1\\_7.pdf](http://www.cder.dz/download/Art17-1_7.pdf)>

[13] L’Afrique et les énergies renouvelables : la voie vers la croissance durable. L’Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) 2013.Disponible sur :< [https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/Afrique\\_%C3%A9nergies\\_renouvelables.pdf](https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/Afrique_%C3%A9nergies_renouvelables.pdf) >

[14] Étude stratégique de déploiement de l’énergie éolienne en Afrique. La Banque Africaine De Développement, Helimax Énergie INC. Mars 2004.Disponible sur :<<http://www.webmanagercenter.com/telecharge/etude04112004.pdf> >

[15] Centre de Développement des énergies renouvelables : [www.cder.dz](http://www.cder.dz) . Consulté le 10.10.2016. Disponible sur :< <https://www.cder.dz/spip.php?article1442> >

[16] L’énergie éolienne au Maroc *Historique et nouvelles opportunités* : [base.d-p-h.info](http://base.d-p-h.info). Consulté le 10.10.2016. Disponible sur :< <http://base.d-p-h.info/fr/fiches/dph/fiche-dph-7431.html> >

[17] aderee, Agence Nationale pour le Développement des Energies Renouvelables et de l’Efficacité Energétique : [www.aderee.ma](http://www.aderee.ma).Consulté le 10.10.2016. Disponible sur :<<http://www.aderee.ma/index.php/fr/expertise/energies-renouvelables/eolien/lenergie-eolienne-au-maroc?showall=1&limitstart=>>

[18] Nafâa BACCARI. Potentiel éolien en Tunisie & Programme national d’autoproduction électrique à partir de l’énergie éolienne. L’Agence Nationale pour la Maitrise de l’Energie.Mai 2011. Disponible sur :< [http://tunesien.ahk.de/fileadmin/ahk\\_tunesien/06\\_Events/CDM-Windworkshop/ANME\\_Nafaa\\_Baccari.pdf](http://tunesien.ahk.de/fileadmin/ahk_tunesien/06_Events/CDM-Windworkshop/ANME_Nafaa_Baccari.pdf) >

[19] Hossein Razavi .Mise en valeur des énergies propres en Egypte. Banque africaine de développement 2012. Disponible sur :<<http://www.afdb.org/fileadmin/uploads/afdb/Documents/Policy-Documents/Cata%20Energie%20Fran%C3%A7ais.pdf>>

[20] Nodalis Equilao.Préparation, financement et montage des projets éoliens en Afrique subsaharienn.Disponible sur : < [http://www.afd.fr/webdav/shared/P\\_ORTAILS/SECTEURS/ENERGIE/pdf/RECP-synthese-eolien-2012.pdf](http://www.afd.fr/webdav/shared/P_ORTAILS/SECTEURS/ENERGIE/pdf/RECP-synthese-eolien-2012.pdf) >

[21] senegal-energies.com: [www.senegal-energies.com](http://www.senegal-energies.com). Consulté le 26.06.2016 .Disponible sur :< <http://www.senegal-energies.com/index.php/sources-d-energie/eolienne/potentiel-eolien> >

[22] Wikipedia : [fr.wikipedia.org](http://fr.wikipedia.org).Consulté le 10.10.2016. Disponible sur :< [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_en\\_Afrique\\_du\\_Sud](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_en_Afrique_du_Sud) >