

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



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

*Ecole Nationale Polytechnique*  
*Département de Génie Mécanique*

*Mémoire de Master*

*Option : énergétique*

*Thème*

*Installation hybride de conversion d'énergie  
renouvelable  
Future ferme éolienne d'Adrar*

Proposé et dirigé par:

Dr. M. BOUBAKEUR

Présenté par :

M. BENSALÉM

Promotion : 2012

# REMERCIEMENT

*Louange à Dieu le tout Puissant qui m'a donné force, courage et patience de faire aboutir ce travail.*

*Je tiens à remercier très vivement mes promoteurs, Mr M. BOUBAKEUR pour leur disponibilité, leur gentillesse, leurs conseils et leurs pertinentes remarques.*

*Je remercie vivement Mr A, SMAILI pour l'honneur qu'il me fait en président de jury de ce mémoire.  
Mes remerciements les plus sincères s'adressent également Mr T, ATTOUCHI pour avoir accepté de juger ce travail.*

*Pour les nombreux soutiens que j'ai reçus dans le cadre de mon Projet de Fin d'Etudes, c'est une grande satisfaction pour moi de remercier ceux qui m'ont aidé à le mener à bien.*

*J'adresse mes remerciements également à toute la famille du Département Génie Mécanique de l'ENP (Enseignant, Techniciens et Etudiants).*

## Dédicace

### *Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents, mon père Dahmen et ma mère Rebeiha, qui sont sacrifiés toute leur vie pour que je réussisse dans mon cursus scolaire et universitaire, qui grâce à eux j'ai pu atteindre ce niveau, qui ont été toujours à mon côté pour me soutenir dans les moments les plus difficiles, pour me conseiller et ils sont pour moi plus que parents mais amis, que dieu leur donne longue vie et une bonne santé.*

*A mon petit frère Khaled et Mes chères sœurs Noura, Kheira*

*A toutes mes tantes sans oublier mon oncle Saad et ma grand-mère Tata*

*A grand-père El-Haj Ali et mon oncle Attia qui nous ont quitté « Allah yarhamhom »*

*A mon cher ami Hamza et sa famille Marhoune*

*A mes amis du campus « Mohamed », Aissa, Lotfi, Takki, Abdelnour, Ibrahim...*

*A mes collègues de classe Walid, Abdo, Nouredine, Nounou, Ibrahim, Houcine, Said ....et tous le reste.*

*A mon cher ami Brahim*

*A tous ce qui me connais et je l'ai oublié*

## ملخص

تتمثل هذه المذكرة في دراسة مجال توليد الكهرباء من النظم الهجينة من المصادر التقليدية ومن الرياح هذه المذكرة تحتوي أيضا على الإحصاءات التقديرية لإنتاج الكهرباء في منطقة أدرار والتطرق لبعض الدراسات التي تمت بالفعل على تقدير إمكانات طاقة الرياح في بعض السنوات اينا كذلك تدخل بعض الوسائط النظرية

وأخيرا، راينا عدد قليل من النماذج لتوربينات الرياح و الحد من تكاليف الإنتاج

**الكلمات المفتاحية** النظام الهجين، وإمكانات الرياح، توربينات الرياح

## Résumé

Ce mémoire représente une étude concernant le domaine de la production de l'électricité par des systèmes hybrides plus spécialement une source classique avec source éolienne, ce mémoire comporte aussi des statistiques sur l'estimation de production d'électricité dans la région d'Adrar en essayant de voir quelques études qui ont été déjà faites auparavant sur l'estimation de potentiel éolien durant quelques années, on a aussi vue quelques paramètres théoriques intervenant.

Finalemnt, on a vue quelques modèles des éoliennes et leur production afin de diminuer les couts.

**Les mots clés** : système hybride, le potentiel éolien, l'éolienne

## Summary

This memoirs present a study of electricity production field by the hybrid system especially the classic source/wind, this memoir contains also some statistical studies of estimation of electricity production in the area of Adrar seeing some studies have treated before on the estimation of wind potential during some years, we have also seen some theoretical parameters.

Finally we have seen some of wind 's models and their production to decrease the costs.

**Keywords** : hybrid system, wind potential, the wind

# SOMMAIRE

|  |   |
|--|---|
| <b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....                                 | 1 |
| <b>CHAPITRE I: PRESENTATION DU SYSTEME HYBRIDE</b> .....           | 3 |
| <b>I.1) Introduction</b> .....                                     | 3 |
| <b>I.2) Définition des systèmes hybrides</b> .....                 | 3 |
| <b>I.3) Principaux composants par des systèmes hybrides</b> .....  | 3 |
| I-3-a) Eolienne.....   | 4 |
| I-3-b) Pile à combustible .....                                    | 4 |
| I-3-c) Générateur diesel.....                                      | 4 |
| I-3-d) Le système de stockage .....                                | 5 |
| I-3-e) Système de supervision .....                                | 6 |
| I-3-f) Convertisseurs.....   | 6 |
| I-3-g) Les charges.....  | 6 |
| <b>I.4) L'énergie éolienne</b> .....                               | 7 |
| <b>I.5) Aspects mécaniques et conversion de l'énergie</b> .....    | 7 |
| I-5-a) La nacelle .....  | 7 |
| I-5-b) Le rotor .....  | 7 |
| I-5-c) Le frein .....  | 8 |
| I-5-d) Le générateur .....   | 8 |
| <b>I.6) Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne</b> ..... | 8 |
| I-6-a) Avantages de l'énergie éolienne .....                       | 8 |
| I-6-b) Inconvénients d'énergie éolienne.....                       | 9 |

|   |    |
|---|----|
| <b>CHAPITRE II: Estimation de la production éolienne d'électricité dans la région d'Adrar</b> ..... | 10 |
| <b>II.1) Introduction</b> .....   | 10 |
| <b>II.2) Estimation du potentiel des ressources éoliennes</b> .....                                 | 10 |
| II-2-a) Analyse des données .....   | 11 |
| II-2-b) Répartition de la vitesse du vent.....  | 12 |
| <b>II-3) Potentiel éolien à Adrar</b> .....   | 13 |
| II-3-a) Description de la situation.....  | 15 |
| II-3-b) Potentiel éolien de Kabertène.....  | 16 |
| <b>II-4) Densité de puissance éolienne</b> .....  | 17 |
| <br>  |    |
| <b>CHAPITRE III: Le choix technique et économique de l'éolienne</b> .....                           | 20 |
| <b>III-1) Le modèle Vergnet</b> .....   | 20 |
| <b>III.2) le modèle Nordex</b> .....  | 21 |
| III-2-1) puissance de l'éolien Nordex.....  | 21 |
| III-2-2) Les paramètres influençant sur la production de l'énergie.....                             | 24 |
| <b>III-2-2-a) Influence de la hauteur du moyeu sur la production d'énergie</b> .....                | 24 |
| <b>III-2-2-b) Influence de la taille d'un éolien sur la production d'énergie</b> .....              | 25 |
| III-2-3) Analyse des résultats.....   | 26 |
| <br>  |    |
| <b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES</b> .....  | 27 |
| <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....  | 28 |
| <b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....   | 30 |
| <b>TABLE DES FIGURES</b> .....  | 31 |

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction générale

Aujourd'hui, compte tenu des enjeux que représentent les sources d'énergies durables, la promotion des énergies renouvelables constitue un des grands axes de la politique énergétique et environnementale de beaucoup de pays. Cette politique énergétique vise à maintenir la sécurité d'approvisionnement tout en prenant en compte les préoccupations environnementales.

Le désastre nucléaire au Japon et le déversement de pétrole dans le Golfe du Mexique auront un impact à long terme sur les perspectives de l'énergie éolienne. Les gouvernements doivent renforcer, de façon urgente, leurs politiques de promotion de l'énergie éolienne. L'ensemble des éoliennes installées à la fin de 2010 peut produire 430 TéraWatt heure par an, plus que la demande totale d'électricité du Royaume- Uni, la sixième plus grosse économie mondiale, et égale 2.5% de la consommation mondiale d'électricité.

La capacité mondiale a atteint 196 630 MW, dont 37 642 ont été ajoutés en 2010, soit légèrement moins qu'en 2009

Le secteur éolien représente en 2010 un chiffre d'affaires mondial de 40 milliards d'euros et emploie 670 000 personnes dans le monde. La Chine est devenue le numéro un en termes de capacité installée et le centre de l'industrie éolienne internationale, et a accru sa capacité de 18 928 MW en un an, soit plus de la moitié de l'accroissement mondial. Une décroissance majeure des nouvelles installations peut être observée en Amérique du Nord et les Etats-Unis ont perdu leur position de leader au bénéfice de la Chine. De nombreux pays d'Europe de l'Ouest montrent une stagnation, alors qu'une forte croissance est observée dans de nombreux pays d'Europe de l'Est.

L'Allemagne conserve sa position de leader en Europe avec 27 215 MW, suivie de l'Espagne avec 20 676 MW.[12]

En Algérie, beaucoup reste à faire en matière de développement des énergies renouvelables, même si plusieurs programmes sont déjà réalisés ou lancés pour la production de l'électricité à partir des énergies renouvelables. Aujourd'hui, la part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national encore très faible, contrairement à d'autres pays de la région. Cependant, l'Algérie

dispose actuellement de tous les atouts nécessaires pour le développement des énergies renouvelables; un potentiel considérable des énergies renouvelables et une politique énergétique adoptée favorisant une contribution plus conséquente des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national. Par conséquent, un usage massif des énergies renouvelables peut être envisagé.

Dans le cadre de la réalisation d'une ferme éolienne de 10 MW, la région d'Adrar a été choisie suite à l'observation des mesures effectuées par l'Office National de la Météorologie (ONM) qui ont montré que cette région présente l'un des meilleurs potentiels éoliens en Algérie.

Un déplacement à Adrar a été effectué pour rechercher des sites potentiels. Mis à part, les critères de choix de site éolien, tels que: accessibilité, présence de réseau, topographie, orographie, superficie, obstacles, etc. Un autre critère sur lequel la recherche du site a été basée, est la proximité d'un poste de transformation électrique afin que l'énergie produite soit injectée directement sur le poste.

Les solutions technologiques nouvelles proposées par les générateurs hybrides, même si elles sont très complexes comparativement aux solutions courantes mono source, présentent par contre un intérêt évident considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient vraiment attractif. Cependant, ces solutions exigent au préalable un dimensionnement laborieux basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation à l'amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval et un savoir faire que seule l'expérience dans l'ingénierie des systèmes énergétiques pourra assurer.

Cette gestion rigoureuse de l'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle rendu possible grâce à des logiciels très performants. Ces installations hybrides vont connaître, à moyen terme un intérêt certain grâce à leur flexibilité vis-à-vis des sources d'énergie primaires.

# **CHAPITRE I**

## **Présentation du système hybride**

## I) Présentation du système hybride

### I-1) Introduction

Les solutions technologiques nouvelles proposées par les générateurs hybrides, même si elles sont très complexes comparativement aux solutions courantes mono source, présentent par contre un intérêt évident et considérable, à travers leur flexibilité, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient attractif. Cependant, ces solutions exigent au préalable un dimensionnement laborieux basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation à l'amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval et un savoir faire que seule l'expérience dans l'ingénierie des systèmes énergétiques pourra assurer.

Cette gestion rigoureuse de l'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle rendu possible grâce à des logiciels très performants. Ces installations hybrides vont connaître, à moyen terme un intérêt certain grâce à leur flexibilité vis-à-vis des sources d'énergie primaires.

### I-2) Définition des systèmes hybrides

Un système d'énergie hybride (SEH) est défini comme une installation qui utilise plus de deux technologies de génération d'énergies ; une ou plusieurs source de production d'énergie classique (groupe diesel généralement) et au moins une source de production d'énergie renouvelable afin de réunir les avantages et les meilleurs caractéristiques opérationnelles de chaque système.

L'influence sur les performances de SEH (le rendement et la durée de vie) se traduit d'une part par sa conception (dimensionnement des composants, le type de composants,...), et d'autre part par le choix de la stratégie de fonctionnement telles que : le cout de KW, l'économie de carburant...

### **I-3) Principaux composants par des systèmes hybrides**

Le système d'énergie hybride est constitué par [1] :

- Des sources classiques d'énergie (fossile).
- Des sources d'énergie renouvelable (éolienne, solaire, énergies géothermique, hydroélectrique)
- Des convertisseurs statiques et dynamiques
- Des systèmes de stockage (batterie, volant d'inertie...)
- Des charges principales
- De délestage
- Un système de surveillance

#### **I-3-a) Eolienne**

La différence de température de certaines zones de la planète fait créer une différence de pression par conséquent les masses d'air seront en perpétuel déplacement par les quelles la ressource éolienne provient, un aérogénérateur appelé aussi éolienne est une machine qui utilise l'énergie éolienne pour produire de l'énergie électrique.

On peut citer différents types d'éolienne :

Les petites éoliennes : les éoliennes de petites et moyennes puissances vont de 100 watts à 20 Kilowatts, montées sur des mats de 10 à 35 m raccordées à un réseau, ces éoliennes sont utilisées pour produire de l'électricité et alimenter des appareils électriques tels que les pompes, l'éclairage...de manière économique et durable, principalement dans les milieux ruraux.

Le vent qui doit être a la fois fréquent et puissant reste l'élément essentiel pour qu'une petite éolienne soit économiquement rentable, cette dernière a un axe horizontal et comprend de deux à trois pales, elle peut avoir un système mécanique de modification de l'angle de calage des pales ou d'orientation face au vent, alors que les grandes éoliennes utilisent des systèmes de commande électroniques.

#### **I-3-b) Générateur diesel**

Il est nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes diesels dans le cas ou on a une source d'énergie renouvelable insuffisante.

Le générateur classique est généralement un moteur diesel directement couplé au moteur synchrone (figure I-1).

La maintenance de fréquence de courant alternatif à la sortie est assurée par un gouverneur de vitesse ou régulateur de vitesse sur le moteur diesel par l'ajustement de flux de carburant pour garder une vitesse constante du moteur et du générateur.

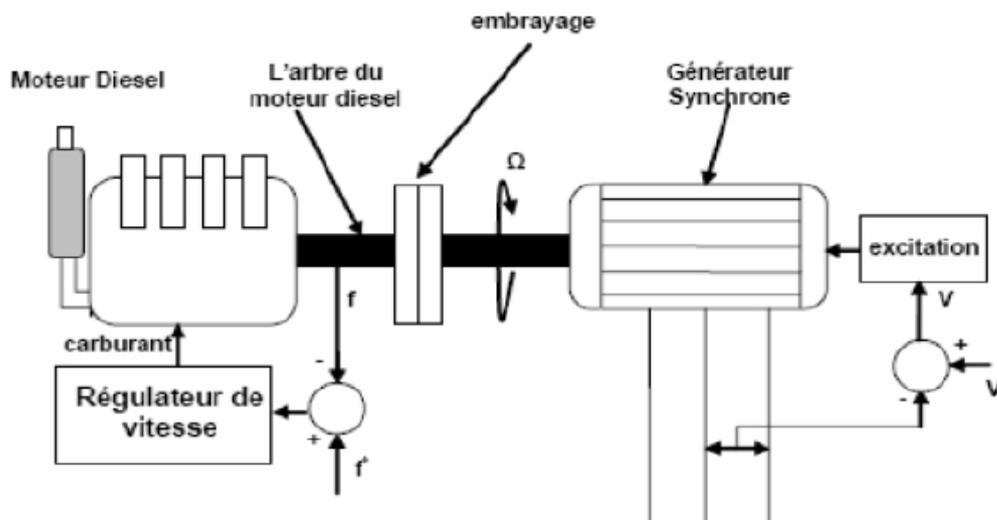


Figure I.1 : configuration de générateur diesel

Quand on a plusieurs générateurs diesels fournissent de l'énergie à un réseau ceux-ci sont connectés généralement par un bus CA, le système de commande devient indispensable afin d'assurer la distribution correcte de la puissance fournie par les générateurs diesels.

### I-3-c) Le système de stockage

Le stockage d'énergie est un élément clef dans le système d'énergie hybride en site isolé ou les batteries représentent la technologie la plus rentable, elles sont de type Nickel-cadmium ou plomb-acide, ce dernier est le plus utilisé grâce à son faible coût et leur large disponibilité commerciale.

Le stockage d'énergie est utilisé couramment dans les petits SEH pour avoir la possibilité d'alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours) parfois il peut être utilisé avec les SEH connecté avec des grands réseaux. Afin de garantir le bon fonctionnement de batterie acide-plomb on doit

respecter certaines contraintes au cours de leur utilisation parce que ces batterie ne peuvent pas rester longtemps inutilisées sans conséquences sur leur durée de vie, pour cela il faut éviter le cycle répétés charge/décharge aléatoire et leur état de charge ne doit pas atteindre les valeurs extrêmes pour éviter toute dégradation prématuré.

### **I-3-d) Système de supervision**

La plupart des systèmes hybrides comportent des commandes de contrôle, parfois la commande est intégré individuellement dans chaque composant de système, la commande peut être globale assurant la surveillance d'un ou tous les composants, le démarrage et l'arrêt de générateur diesel, le chargement des batteries et la répartition de puissance pour les différent types de charge.

### **I-3-e) Convertisseurs**

Leur rôle est le chargement des batteries de stockage, les convertisseurs les plus rencontrés souvent dans un SEH sont :

- Les redresseurs effectuant la conversion CA/CC : courant alternatif/courant continu
- Les onduleurs faisant passer du CC en CA : courant continu /courant alternatif
- Les hacheurs permettant de réaliser la conversion CC/CC courant continu /courant continu pour adapter la tension entre deux sources.

### **I-3-f) Les charges**

Les charges électriques rendent utiles la puissance électrique, ces charges sont à caractère résistif telles que les ampoules les chauffe-eau alors que les charges résistives et inductives se trouvent au niveau des appareils électriques ce sont les principaux consommateurs de la puissance.

### I-4) L'énergie éolienne

Il existe deux grandes familles d'éoliennes, selon que l'axe de rotation est vertical ou horizontal. Ces dernières sont davantage développées et utilisées dans les milieux industriels. On distingue également les cas où le mât se trouve en amont ou en aval des pales par rapport au vent (downwind ou upwind).

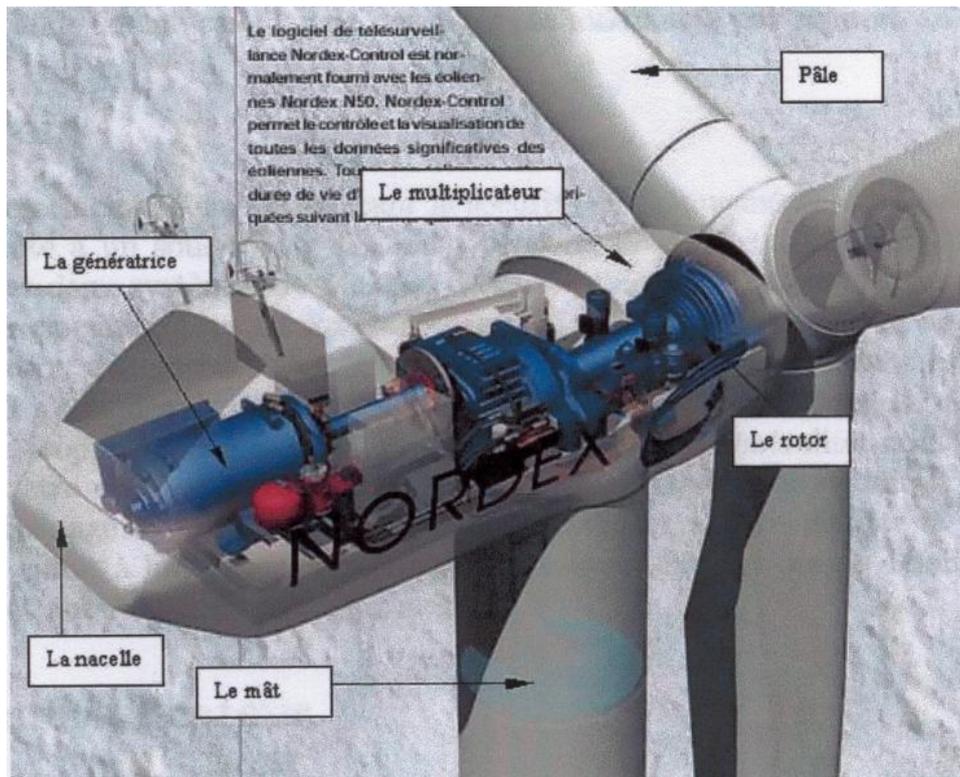


Figure I.2 : Composantes d'une éolienne à axe horizontal

### I-5) Aspects mécaniques et conversion de l'énergie

Une des premières questions qui se pose est de savoir comment convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique ? Afin de comprendre son mode de fonctionnement, nous allons détailler les principales parties constituant une éolienne [2].

**I-5-a) La nacelle** : est placée au sommet du mât et renferme tous les éléments qui permettent à l'éolienne de fonctionner de manière autonome. Elle supporte le rotor, les pales et renferme le multiplicateur, le frein, la transmission et le générateur.

**I-5-b) Le rotor** : assure une fonction que l'on devine essentielle: celle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le rotor est à angle fixe ou variable. Dans ce deuxième cas, l'angle des pales est modifiable par rapport au rotor, ce qui permet d'adapter l'angle des pales en fonction de la force du vent. Ce système de régulation peut agir comme un frein.

**I-5-c) Le frein** : est le principal élément assurant la sécurité de l'aérogénérateur. Beaucoup d'accidents sont survenus suite à un sous freinage. C'est pourquoi, la plupart des constructeurs d'éoliennes veillent à installer plusieurs systèmes de freinage. Le système de freinage le plus courant est certainement le frein à disque. Il s'agit d'un frein s'enclenchant automatiquement lorsque la vitesse du vent est trop importante, arrêtant ainsi la rotation des pales. Cette vitesse s'appelle la cut-out speed.

**I-5-d) Le générateur** : sert à convertir l'énergie mécanique reçue par les pales en énergie électrique. Afin d'assurer au générateur une rotation correspondant à son rendement optimal, un multiplicateur de vitesse est utilisé. En général, une seule éolienne contient deux générateurs: le premier est chargé d'exploiter les basses vitesses du vent et l'autre s'occupe des vitesses plus importantes. Les génératrices produisent en général un courant alternatif à une tension d'environ 700 Volts. Un transformateur se charge alors de porter la tension aux standards du réseau local (50Hz, 220 Volts).

## **I-6) Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne**

Comme tout système d'énergie, certains avantages et inconvénients peuvent être mis en évidence

### **I-6-a) Avantages de l'énergie éolienne**

On peut citer parmi les avantages de l'énergie éolienne :

- Énergie renouvelable peu coûteuse.
- Faible pollution sonore (nuisance sonore évaluée à 44 dB à 250 m).
- Pas d'émission directe de gaz à effet de serre.
- Le gigantisme : la puissance de l'éolienne est proportionnelle au carré du rayon de l'hélice donc si on multiplie par deux la longueur des pales, on voit la puissance de l'engin augmenter

d'un facteur 4. Cela induit un autre avantage et permet d'éviter de devoir multiplier les éoliennes et diminue les coûts.

### **I-6-b) Inconvénients d'énergie éolienne**

Face à ses avantages on peut aussi citer quelques désavantages tels que :

- Le stockage de l'énergie et la transmission sur de longues distances augmentent le niveau technique de performance requis.
- Seuil physique de capacité (« loi de Betz » : seulement 59 % de l'énergie cinétique apportée par le vent peuvent être au maximum récupérés pour être convertis en énergie mécanique. A ce jour, les meilleures installations atteignent un rendement de l'ordre de 35%.
- Mauvaise utilisation du flux d'air autour de la nacelle.
- Pollution sonore lors de son utilisation dans un parc éolien.

## **CHAPITRE II**

### **Estimation de la production éolienne d'électricité dans la région d'Adrar**

## **II) Estimation de la production éolienne d'électricité dans la région d'Adrar**

### **II-1) introduction**

Aujourd'hui, compte tenu des enjeux que représentent les sources d'énergies durables, la promotion des énergies renouvelables constitue un des grands axes de la politique énergétique et environnementale de beaucoup de pays. Cette politique énergétique vise à maintenir la sécurité d'approvisionnement tout en prenant en compte les préoccupations environnementales.

Cependant, l'Algérie dispose actuellement de tous les atouts nécessaires pour le développement des énergies renouvelables; un potentiel considérable des énergies renouvelables et une politique énergétique adoptée favorisant une contribution plus conséquente des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national. Par conséquent, un usage massif des énergies renouvelables peut être envisagé.

### **II-2) Estimation du potentiel des ressources éoliennes**

L'estimation du potentiel énergétique éolien disponible sur un site donné est sans doute l'étape la plus importante lorsqu'il s'agit d'envisager l'implantation d'un système d'exploitation de ce type d'énergie, la connaissance des différents aspects, tels que la variation horaire et mensuelle de la vitesse du vent ainsi que sa distribution en fréquence.

Dans les différentes études les données utilisées sont obtenues à partir des données tri-horaires des vitesses de vent mesurées à 10 m du sol, publiées par l'Office National de la Météorologie et collectées sur la période 1976-1988, comme la figure ci-dessus montre [4].

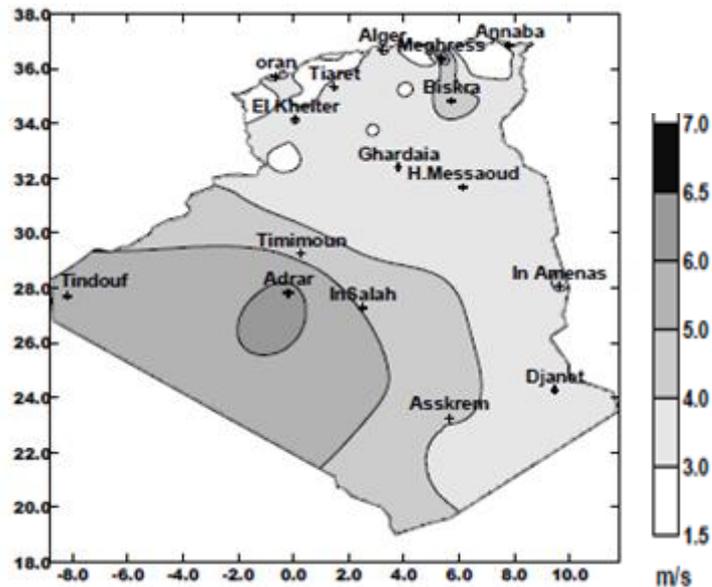


Figure II.1 : Carte de la vitesse annuelle moyenne de l'Algérie à 10 m de sol [7].

### II-2-a) Analyse des données

La qualité des ressources éoliennes d'une région se détermine à partir de la vitesse moyenne du vent tout simplement, ces données publiées par O.N.M, figures ci-dessous montrent moyennes mensuelles des vitesses du vent du site d'Adrar et évolution de la vitesse moyenne horaire du vent pour le site d'Adrar (à 10 m du sol) [3].

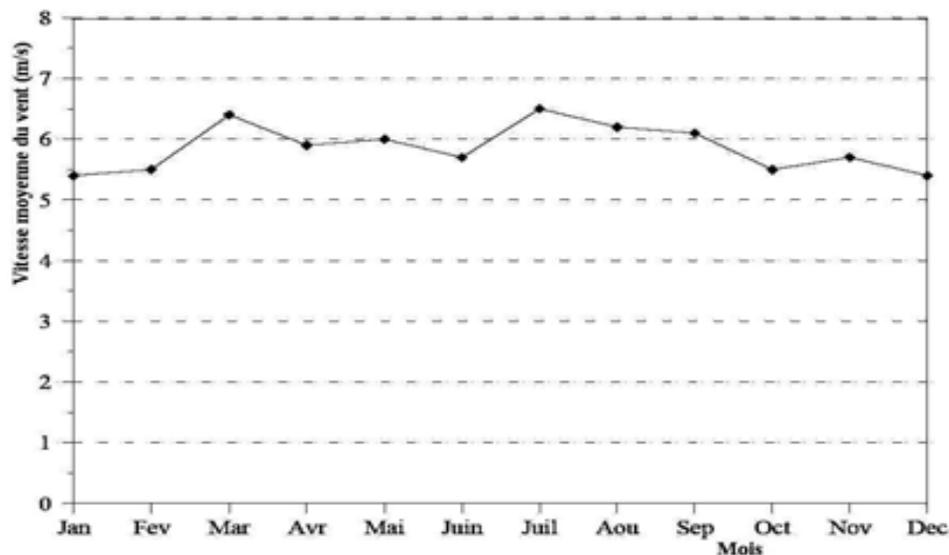


Figure II.2 : Moyennes mensuelles des vitesses du vent du site d'Adrar

Cette figure présente la variation de la moyenne mensuelle de la vitesse du vent pour le site d'Adrar. Elle montre que ce site comporte un pic de vitesse moyenne pendant la période de Juillet-Septembre avec le mois de Mars, alors que le minimum se produit durant la période hivernale, ça montre que le site Adrar est une région ventée pendant toute l'année par une vitesse moyenne annuelle autour de 6 m/s à 10 m de sol.

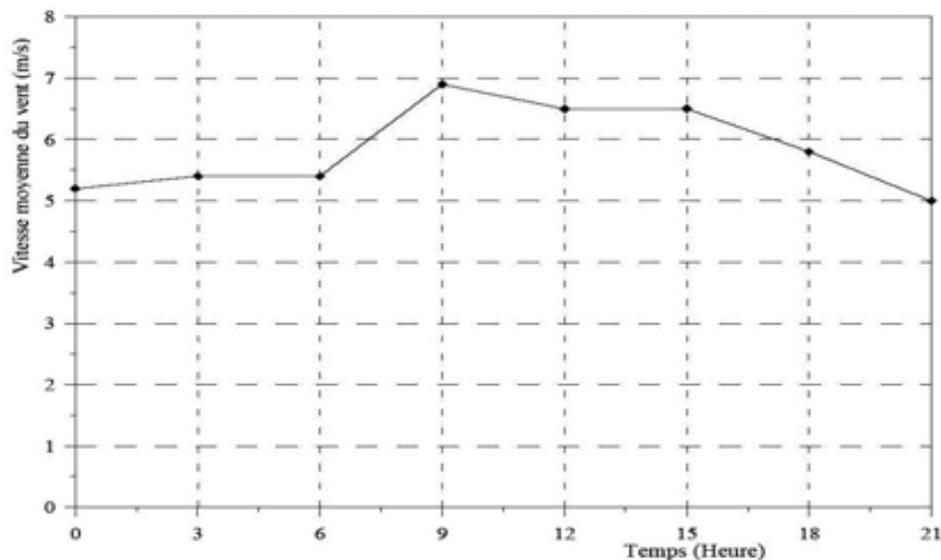


Figure II.3 : Evolution de la vitesse moyenne horaire

Cette évolution de la vitesse montre, d'une part, une diminution de la vitesse moyenne durant la nuit et une augmentation durant la journée sont constatées, et d'autre part que le site d'Adrar est plus venté l'après midi que la matinée.

On peut aussi remarquer que le vent souffle à une vitesse supérieure à 5 m/s durant toute la journée et supérieure à 6 m/s pendant presque 10 heures (plus de 40% du temps) et cela seulement à 10 m du sol.

### II-2-b) Répartition de la vitesse du vent

La distribution des vitesses du vent est un indicateur pour le potentiel éolien Sa connaissance permet l'estimation de l'énergie éolienne disponible sur le site, peut être représentée par un tableau ou par une fonction mathématique [3].

| Fréquences des vitesses du vent (m/s) | Pourcentage |
|---------------------------------------|-------------|
| 0-3                                   | 12          |
| 3-5                                   | 20          |
| 5-7                                   | 32          |
| 7-9                                   | 19          |
| 9-11                                  | 10          |
| 11-13                                 | 4           |
| 13-15                                 | 2           |
| 15-17                                 | 1           |
| >17                                   | 0           |

Tableau II-1: Distribution fréquentielle de la vitesse de vents à 10 m sur le site d'Adrar

Si on remarque ce tableau on peut bien voir que seulement 12% de vitesse est inférieure à 3m/s, cette vitesse excède très rarement 13m/s, cela veut dire que les petites éoliennes installées sur ce site à une hauteur de 10 m peuvent produire de l'énergie en 88% de temps, cependant pour les grande éoliennes qui nécessitent une hauteur plus élevée supérieure à 10m/s, les vitesses seront plus grandes par conséquent ces éoliennes fonctionnent beaucoup plus mieux.

### II-3) Potentiel éolien à Adrar

L'étude du potentiel éolien de la région d'Adrar est basée sur les vitesses horaires de vent de la période 2003-2008 mesurées par l'ONM.

La station de mesure est placée à l'aéroport d'Adrar, ses coordonnées géographiques sont 27,82°N et -0,18°E; l'anémomètre est placé à une hauteur de 10 m.

Les mesures disponibles sont des mesures horaires effectuées sur une période de six (6) années (2003 – 2008).

La vitesse moyenne du vent obtenue durant cette période est donnée dans le tableau ci-après [5].

|  | Mesurée | Calculée | Ecart  |
|--|---------|----------|--------|
| Vitesse moyenne de vent, m/s                   | 6,62    | 6,31     | 4,62 % |
| Densité de puissance moyenne, W/m <sup>2</sup> | 279,31  | 282,20   | 1,03 % |

Tableau II-2: La vitesse moyenne du vent obtenue durant la période mentionnée

Le choix de site s'est fixé sur la région de Kabertène pour l'installation de la ferme éolienne, ce choix a été basé sur les éléments décisifs et aussi grâce à la proximité des postes électriques de Sonelgaz l'image suivante présente la situation de site ou la ferme va être installer [6].

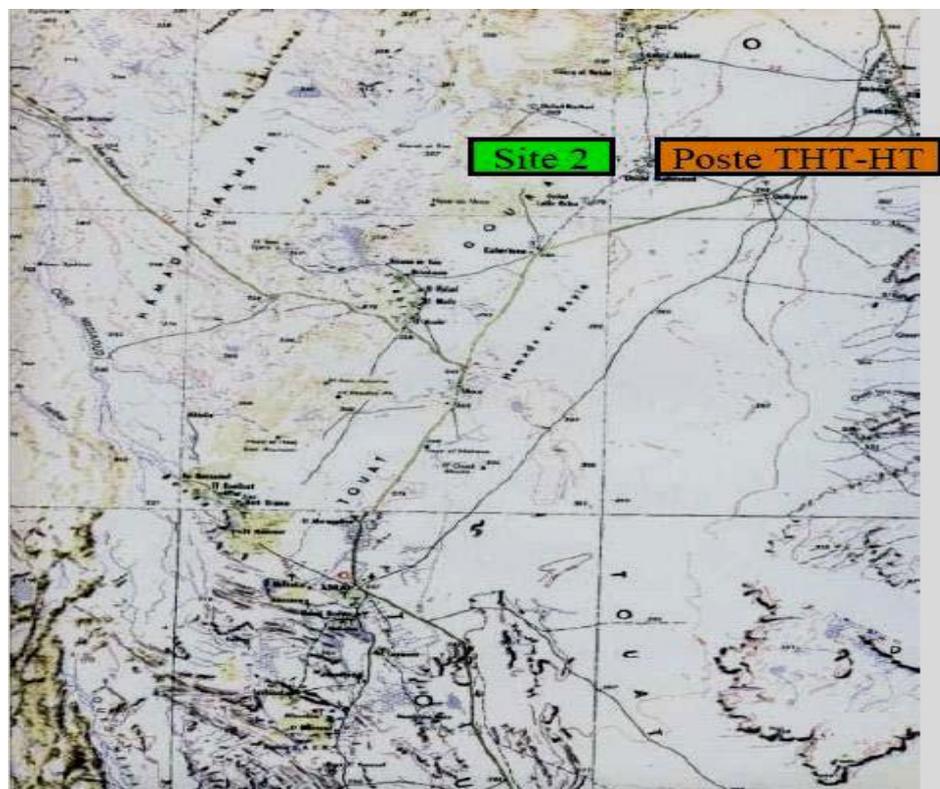


Figure II.4 : Situation du site de Kabertène

**II-3-a) Description de la géographie du site :**

Ce site se trouve à environ 73 km au Nord de la ville d'Adrar à proximité d'un poste électrique de Sonelgaz. Il se trouve à une altitude d'environ 260 m et ses coordonnées géographiques sont 28°27' 7.28" N 0°02' 59.08" W.

Voici quelques caractéristiques pour lesquelles ce choix a été fait :

**\*/Réseau électrique** ce site se trouve à proximité d'un poste THT-HT, et de ce fait l'extension nécessaire afin de raccorder le parc au poste est limitée, ce qui réduit les coûts de construction.

**\*/Superficie et topographie** La topographie est plate et la rugosité du terrain est faible. Mis à part le poste et les poteaux électriques, aucun obstacle ne se trouve dans les alentours de ce site.

**\*/Transport** Ce site présente des possibilités idéales pour le transport. En effet, il se trouve près de l'axe routier Adrar – Timimoune.

Les photographies ci-après montrent la Photographie du site éolien de quatre cotés :

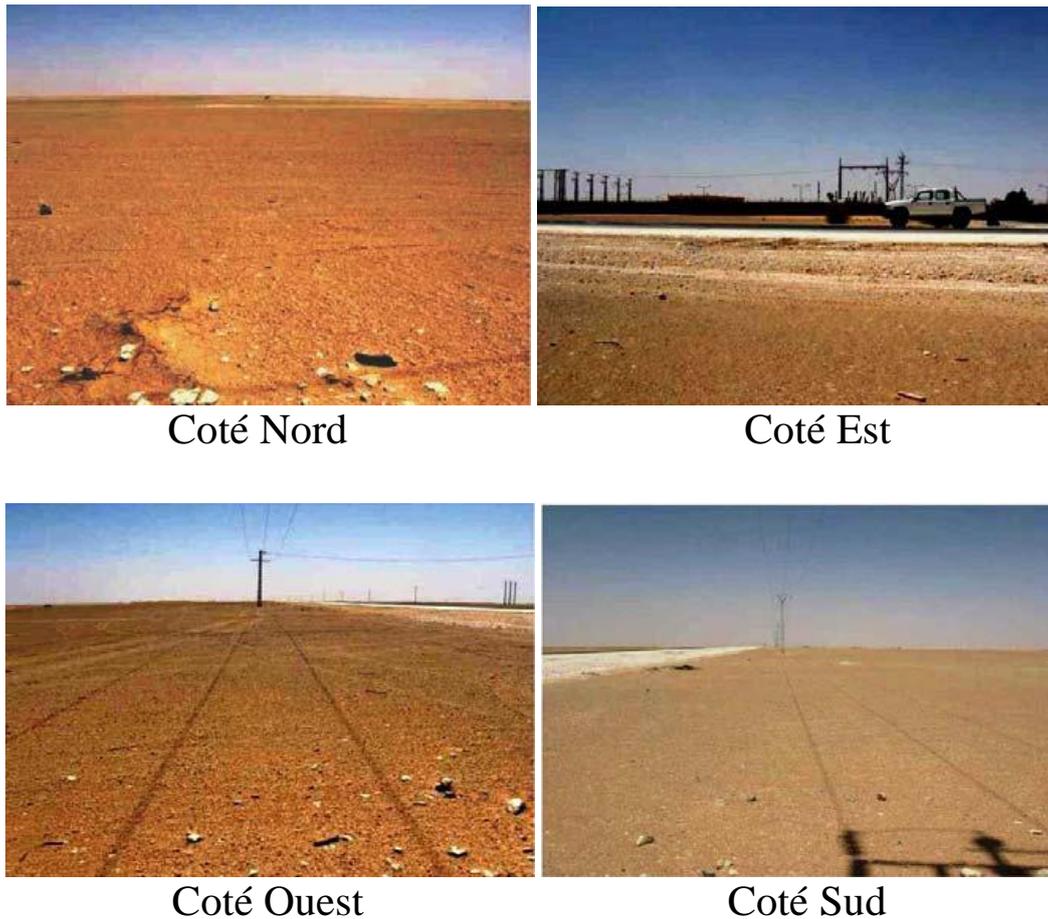


Figure II.5 : Photographie du site éolien [6].

### II-3-b) Potentiel éolien de Kabertène

L'évaluation de potentiel éolien de ce site a été évaluée pour une hauteur de 50m.

Les études ont montrés que il y'a pas une différence entre Adrar et ce site au niveau de profil Ceci pourrait s'expliquer que malgré leur éloignement, il n'y a pas d'obstacle physique pouvant intervenir dans le changement des profils [6].

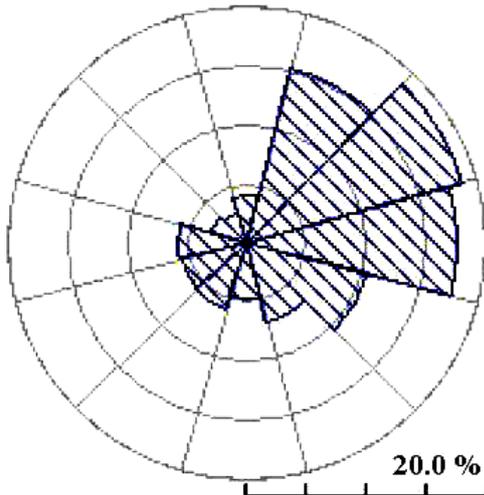


Figure II.6 : Rose des vents de Kabertène

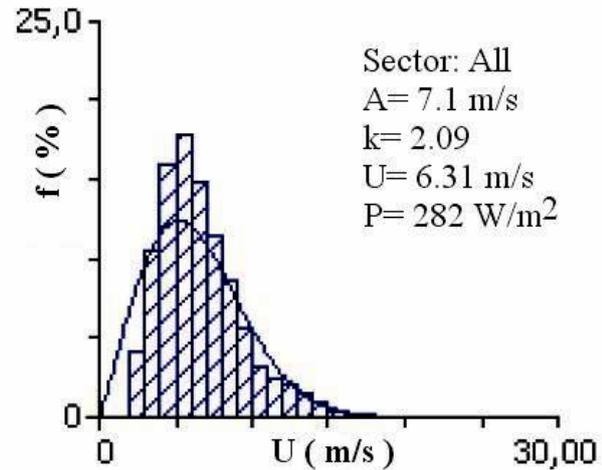


Figure II.7 : Distribution des vitesses du vent de Kabertène

Théoriquement la fonction de Weibull représente bien mathématiquement la distribution de la vitesse du vent, ce modèle a démontré de bons résultats, l'équation suivante décrit bien la distribution de la fréquence de la vitesse de vent :

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

Avec :

$f(v)$  : La fonction de densité de Weibull

$c$  et  $k$  sont des paramètres de Weibull respectivement le paramètre d'échelle et le paramètre de forme

$v$  : La vitesse de vent

#### II-4) Densité de puissance éolienne

C'est un bon indicateur de potentiel éolien, son expression est [8]

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho \bar{V}^3 \quad (2)$$

Où  $\rho$  est la densité de l'air supposée

La vitesse cubique moyenne peut être exprimée comme suit :

$$\bar{V}^3 = \sum_i (V_i^3 \times f_i) \quad (3)$$

Elle peut s'écrire :

$$\overline{V^3} = c^3 \times \Gamma \times \left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (4)$$

Par conséquent la densité de puissance peut s'exprimer

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho (V_i^3 \times f_i) \quad (5)$$

Ou bien

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho c^3 \times \Gamma \times \left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (6)$$

Où  $V_i$  est la vitesse médiane du vent du  $i$  ième intervalle de vitesse

$f_i$  est la fréquence d'occurrences des vitesses appartenant au  $i$  ième intervalle de vitesse (%)

$\Gamma$  est la fonction gamma

La valeur maximum théorique de la puissance éolienne récupérable par l'éolienne est autour de 59 % de la puissance éolienne disponible.

Les résultats relatifs à la densité de puissance éolienne moyenne pour le site d'Adrar calculée à partir des paramètres de Weibull et des données des fréquences de vitesse du vent, Les résultats obtenus montrent que l'estimation de la densité de la puissance moyenne à partir des paramètres de Weibull donne des valeurs très proches de celles calculées à partir des données des fréquences de vitesse.

| Densité de puissance (W/m <sup>2</sup> )<br>Eq (5) | Densité de puissance (W/m <sup>2</sup> )<br>Eq (6) |
|--|--|
| 280  | 283  |

Tableau II-3: Densité de puissance éolienne à 10 m du sol (Adrar).

La densité de puissance éolienne peut être estimée pour différentes hauteurs, le tableau suivant montre sa valeur pour deux différentes hauteurs 10m et 50m à partir des paramètres de Weibull extrapolés pour le site d'Adrar.

| Densité de puissance ( $W/m^2$ )<br>10m | Densité de puissance ( $W/m^2$ )<br>50m |
|---|---|
| 283                                     | 650                                     |

Tableau II-4: Densité de puissance éolienne disponible à Adrar Pour deux hauteurs différentes.

L'augmentation de la densité de puissance disponible est proportionnelle avec l'augmentation de l'hauteur, cet augmentation à un coefficient de 2 à 2,3 pour un passage de 10m à 50m sur ce site [3].

**CHAPITRE III**  
**Le choix technique de l'éolienne**

### III) Le choix technique de l'éolienne

#### III-1) Le modèle Vergnet

Le constructeur retenu pour le projet est le constructeur français Vergnet. L'éolienne est une GEV HP de puissance 1 MW l'unité. Cette éolienne à un rotor bipale de 62 m de diamètre avec une génératrice à vitesse variable et un régulateur pitch (calage des pales à pas variable), le mât est une tour haubanée compacte et légère comme le montre l'image ci-après :



Figure III.5 : Eolienne - GEV HP de puissance 1 MW

L'énergie produite est de l'ordre de 40 GWh par an, soit un nombre d'heures de fonctionnement à puissance nominale de l'ordre de 4000 heures. Ces résultats sont démontrés par l'estimation de l'énergie produite en utilisant le programme WAsP pour une configuration linéaire des dix éoliennes avec une orientation face au vent dominant (Nord Est).

### III-2) Modèle Nordex

L'énergie produite par une éolienne dépend principalement de la distribution des vitesses du vent et de sa courbe caractéristique puissance-vitesse.

La technologie utilisée et la taille de la machine sont les deux principaux paramètres dont dépend la caractéristique puissance-vitesse de la machine. Par conséquent, les modèles de puissance des éoliennes qui ont été développés dans la littérature rendent plus ou moins compte de la réalité selon la machine considérée.

Tous les modèles considèrent que la puissance produite par une éolienne est nulle dans les intervalles de vitesse du vent

$$V < V_d \text{ et } V > V_c$$

Et elle est maintenue constante et nominale pour l'intervalle

$$V_n < V < V_c$$

$V_d$ ,  $V_n$  et  $V_c$  sont respectivement la vitesse de démarrage, la vitesse correspondante à la puissance nominale et la vitesse de coupure de la machine.

Pour l'intervalle de vitesses du vent  $V_d < V < V_n$ , la puissance fournie par l'éolienne est fonction de la vitesse du vent et c'est dans cet intervalle que ces modèles diffèrent.

La vitesse du vent varie en fonction de la hauteur. Dans cette étude, l'extrapolation verticale de la vitesse du vent est approchée par une loi de puissance. Les différents modèles utilisés pour l'estimation de la puissance de sortie de l'éolienne sont appliqués aux données des trois éoliennes (N43/250, N29/600, N54/1000) fournies par les constructeurs.

Une interpolation des valeurs des données fournies par le constructeur Nordex, peut nous aider à estimer la puissance de l'éolienne, plusieurs méthodes ont déjà été établies [3], telles que l'interpolation linéaire, quadratique et spline cubique.

#### III-2-1) Puissance de l'éolien Nordex

Comme la vitesse du vent varie en fonction de la hauteur, des différents modèles ont été utilisés [3] pour l'estimation de la puissance

de sortie de l'éolienne sont appliqués aux données des trois éoliennes (N43/250, N29/600, N54/1000) fournies par les constructeurs.

Le tableau suivant présente les caractéristiques techniques des éoliennes :

| <b>Type de l'éolienne</b> | <b>N29/250</b> | <b>N43/600</b> | <b>N54/1000</b> |
|---------------------------|----------------|----------------|-----------------|
| Puissance nominale, kW    | 250            | 600            | 1000            |
| Vitesse démarrage, m/s    | 3-4            | 3-4            | 3-4             |
| Vitesse nominale, m/s     | 15,5           | 13,5           | 14              |
| Vitesse coupure, m/s      | 25             | 25             | 25              |
| Diamètre rotor, m         | 29,7           | 43             | 54              |
| Hauteur moyeu, m          | 30, 40, 50     | 40, 50,60      | 50, 60,70       |

Figure III-1 : Les caractéristiques techniques des éoliennes.

Les figures suivant montrent les caractéristiques puissances-vitesses de ces trois éoliennes, à partir des données des constructeurs, ainsi que les résultats de simulation de ces caractéristiques issus des différents modèles [3]

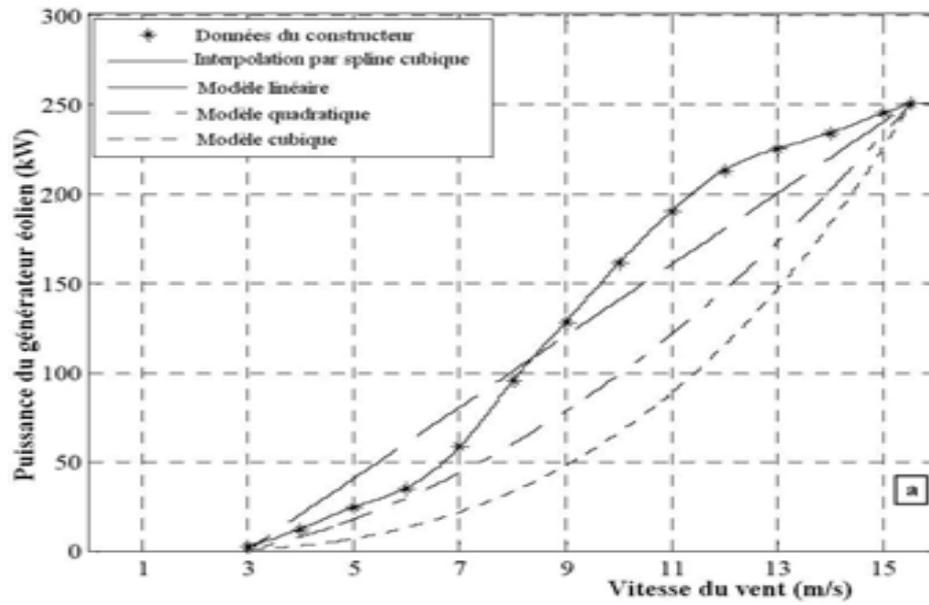


Figure III.1 : Courbes de puissances de l'éolienne Nordex N29/250

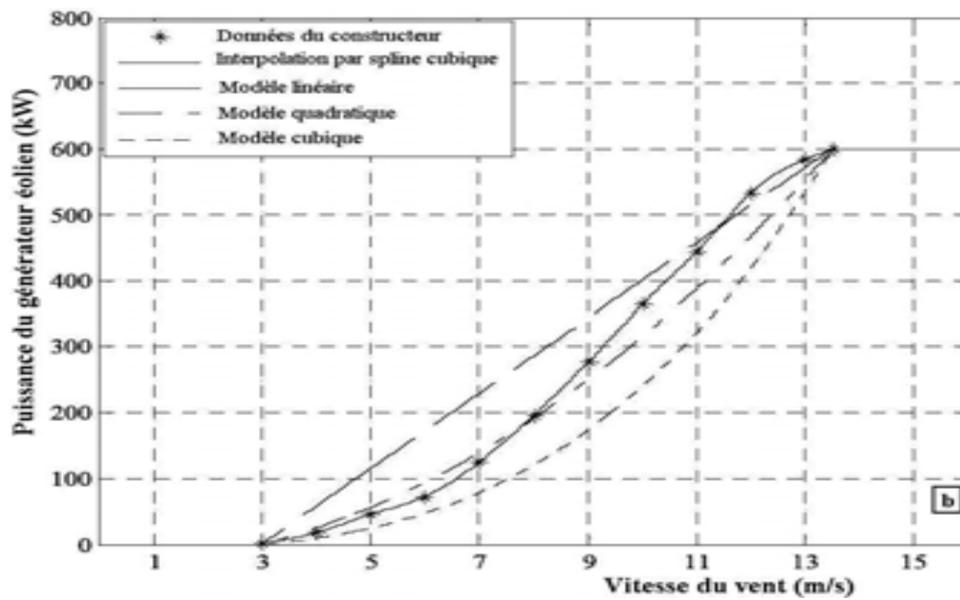


Figure III.2 : Courbes de puissances de l'éolienne Nordex N43/600

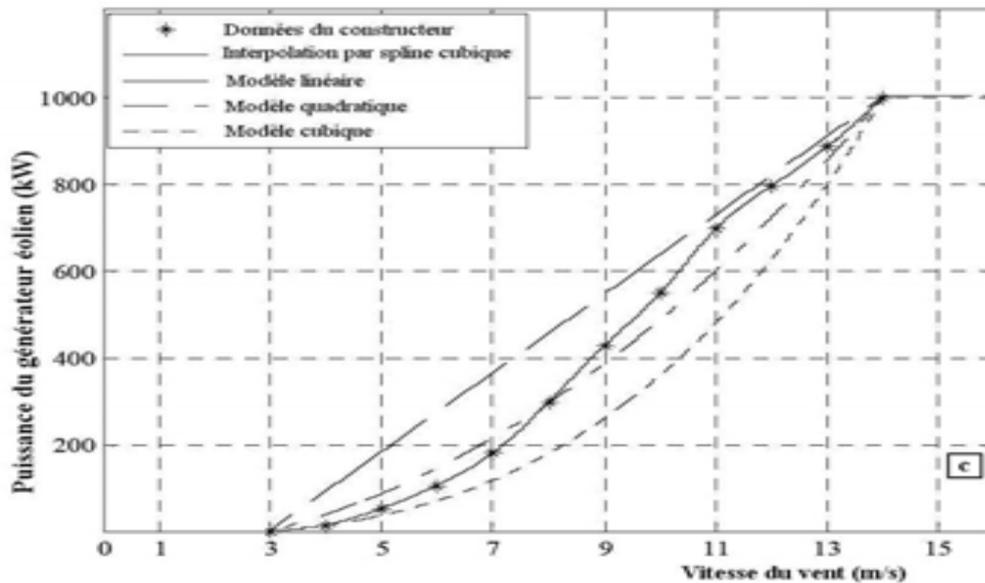


Figure III.3 : Courbes de puissances de l'éolienne Nordex N54/1000

Si on compare ces résultats on remarque bien que l'éolienne N29/250 s'adapte mieux au modèle linéaire, alors que N43/600 et N54/1000 s'adaptent avec le modèle linéaire et quadratique.

### III-2-2) Les paramètres influençant sur la production de l'énergie

On va voir deux principaux paramètres qui ont une grande importance sur l'énergie annuelle de la sortie d'éolienne la hauteur du moyeu et la taille de la machine utilisée.

#### III-2-2-a) Influence de la hauteur du moyeu sur la production d'énergie

Pour cela des études ont déjà été faites [3] pour des différentes hauteurs en déterminant l'énergie fournie par l'éolienne. L'estimation de l'énergie fournie par les différentes éoliennes est basée sur le modèle de puissance d'extrapolation de la vitesse du vent [11].

Les résultats sont montrés sur le tableau suivant :

| h(m) \ P(kw) | 30  | 40   | 50   | 60   |
|--------------|-----|------|------|------|
| 250          | 745 | 804  | 850  | 888  |
| 600          | /   | 1835 | 1951 | 2047 |
| 1000         | /   | /    | 2982 | 3138 |

Figure III-2 : Production d'énergie annuelle des éoliennes.

**REMARQUE :** la hauteur du moyeu pour l'éolienne de 600 kW varie de 40 m à 60 m et celle pour l'éolienne de 1000 kW varie de 50 m à 70 m.

### III-2-2-b) Influence de la taille d'un éolien sur la production d'énergie

La production d'énergie mensuelle a été estimée pour une ferme éolienne de 12 MW composée de 12, 20 et 48 éoliennes de puissance nominale respectivement égale 1000 kW, 600 kW et 250 kW avec une hauteur de 50 m.

Les résultats sont montrés comme suite :

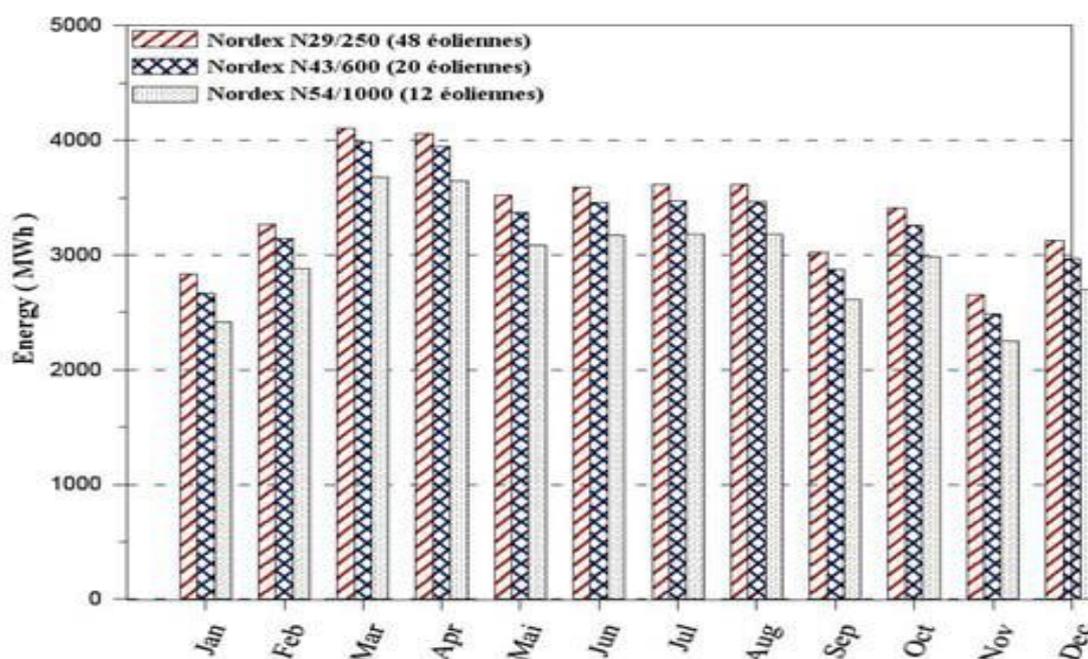


Figure III.4 : Production d'énergie d'une ferme éolienne de 12 MW avec différentes puissances nominales d'éoliennes (à une hauteur de 50 m) [3]

**III-2-3) Analyse des résultats**

On voit que pour toute éolienne la quantité d'énergie fournie est proportionnelle avec la hauteur, par conséquent, avec la vitesse du vent ou bien le potentiel éolien.

La comparaison entre les différents types d'éoliennes de taille différente pour un parc éolien de 12MW peut nous donner une idée sur l'influence de la taille d'un aérogénérateur, cette figure montre bien que la ferme éolienne composée de 48 machines de puissance nominale de 250 kW permet de produire plus d'énergie comparativement à celle composée des machines de puissance nominale supérieure (600 kW ou 1000 kW).

## **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion et perspectives

Ce travail est considéré comme un thème d'actualité que l'Algérie est en train de le mettre en valeur à travers la création de son premier parc éolien afin de produire de l'énergie électrique hors hydrocarbures, et diversifier les sources énergétiques et augmenter les sources propres par rapport à la production nationale pour atteindre 10% en 2027.

L'étude du potentiel éolien a montré que l'éolienne pourrait fonctionner pendant environ 4000 heures en moyenne par an, ce qui classe Kabertène comme étant un bon site éolien.

Sur la base d'une consommation nationale moyenne de 2344 kWh/foyer/an (y compris les services), cette centrale produit l'équivalent de la consommation d'une ville de 100 000 habitants, soit environ 17 000 foyers.

L'estimation du potentiel des ressources énergétiques éoliennes sur le site d'Adrar et d'autre part l'estimation de la production annuelle d'énergie d'une ferme éolienne montre que le site d'Adrar dispose d'un potentiel énergétique éolien important. Les études ont montré qu'en passant d'une hauteur de 40 m à 60 m, l'énergie produite par l'éolienne est augmentée de 11% selon Nordex.

Ainsi pour la même taille d'une ferme éolienne, l'utilisation des machines de puissance nominale inférieure (48 éoliennes à 250kw) permet de produire plus d'énergie comparativement à la même ferme éolienne composée de machines de puissance nominale supérieure (12 éoliennes à 1000kw).

Comme perspectives on peut envisager à relancer les grands projets de développement avec des objectifs à atteindre une diversification dans l'utilisation des ressources d'énergie.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERNCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : Mémoire de Magistère, spécialité génie mécanique, option thermofluides, thème «Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergie renouvelables » soutenu le 26/09/2011 par BAGHDADI Fazia. université de MOULOUD Mammeri Tizi-Ouzou
- [2] : Analyse comparative et critique d'articles scientifiques dans le domaine des énergies renouvelables effectué par Valérie Grogna et Tanguy de Villepin (ENVI 3DS) dans le cadre du cours d'Energies Renouvelables (ENVI3007) enseigné par les professeurs : André de Herde, Patrick Gerin, Jean-Francois Ledent, et Hervé Jeanmart Année académique (2006/2007).
- [3] : Saïd Diaf, « Estimation de la production éolienne d'électricité dans la région d'Adrar », Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismail Tipaza (2010) 161 – 172
- [4] : R. Hammouche, '*Atlas Vent de l'Algérie*', Office National de la Météorologie, Alger, 1991.
- [5] : Mustapha Merdaoui, Ali Houha et Arezki Smaïli, « Etude et dimensionnement du futur parc éolien de Kaberten situé dans la région d'Adrar », Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismail Tipaza (2010) 269 – 274.
- [6] : Fatiha Sebaa-Ben Miloud et R. Aïssaoui CREDEG, Sonelgaz, « Etude du potentiel éolien d'Adrar Sélection de sites pour la ferme éolienne de 10 MW », *Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismail Tipaza (2010) 295 – 300.*
- [7] : Lilia aiche-HAMANE, mustapha HAMANE et Maiouf BELHAMEL (CDER), « Estimation de la production d'hydrogene par energie eolienne dans le sud algerien », 13emes journees internationales de thermique
- [8] : N. KASBADJI MERZOUK et M. MERZOUK, « Perspectives Du Pompage Eolien En Algerie», Projet National de recherche, domicilié au CDER.
- [9] : Mémoire de Magistère, spécialité génie mécanique, option Maîtrise des Energies, thème «Elaboration d'un modèle de

dimensionnement d'un système hybride (solaire-éolien) alimentant une ferme dans la région des Aurès », Soutenu le : 01/12/2011 par Zohra BENHACHANI. Université HADJ Lakhdar Batna.

**[10]** : Guide des énergies renouvelables, édition 2007 par le ministère de l'énergie et des mines.

**[11]** : S. Diaf, 'Intégration des Systèmes à Sources Renouvelables d'Énergie pour la Production Décentralisée d'Électricité en Site Isolé', Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, El Harrach, Alger, 2009.

**[12]** : Rapport mondial de l'énergie éolienne 2010, 10th World Wind Energy Conference & Renewable Energy Exhibition, Le Caire, Egypte 31 octobre - 2 novembre 2011

## **LISTE DES TABLEAUX**

## **LISTE DES TABLEAUX**

### **Chapitre I : ETAT DE L'ART DE SYSTEME HYBRIDE**

### **CHAPITRE II : ESTIMATION DE LA PRODUCTION EOLIENNE D'ELECTRICITE DANS LA REGION D'ADRAR**

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau II.1</b> : Distribution fréquentielle de la vitesse de vents à 10 m sur le site d'Adrar ...         | 13 |
| <b>Tableau II.2</b> : La vitesse moyenne du vent obtenue durant la période mentionnée.....                     | 14 |
| <b>Tableau II.3</b> : Densité de puissance éolienne à 10 m du sol (Adrar).....                                 | 18 |
| <b>Tableau II.4</b> : Densité de puissance éolienne disponible à Adrar Pour deux hauteurs<br>différentes ..... | 19 |

### **CHAPITRE III : LE CHOIX TECHNIQUE ET ECONOMIQUE DE L'EOLIENNE**

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau III.1</b> : les caractéristiques techniques des éoliennes ..... | 20 |
| <b>Tableau III.2</b> : Production d'énergie annuelle des éoliennes .....   | 23 |

## **TABLE DES FIGURES**

## TABLE DES FIGURES

### Chapitre I : ETAT DE L'ART DE SYSTEME HYBRIDE

|  |   |
|--|---|
| <b>Figure I.1</b> : configuration de générateur diesel.....          | 5 |
| <b>Figure I.2</b> : Composantes d'une éolienne à axe horizontal..... | 7 |

### CHAPITRE II : ESTIMATION DE LA PRODUCTION EOLIENNE D'ELECTRICITE DANS LA REGION D'ADRAR

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure II.1</b> : Carte de la vitesse annuelle moyenne de l'Algérie à 10 m de sol ..... | 11 |
| <b>Figure II.2</b> : Moyennes mensuelles des vitesses du vent du site d'Adrar .....        | 11 |
| <b>Figure II.3</b> : Evolution de la vitesse moyenne horaire .....                         | 12 |
| <b>Figure II.4</b> : Situation du site de Kabertène.....                                   | 14 |
| <b>Figure II.5</b> : Photographie du site éolien.....                                      | 16 |
| <b>Figure II.6</b> : Rose des vents de Kabertène<br>.....                                  | 17 |
| <b>Figure II.7</b> : Distribution des vitesses du vent de Kabertène.....                   | 17 |

### CHAPITRE III : LE CHOIX TECHNIQUE ET ECONOMIQUE DE L'EOLIENNE

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure III.1</b> : Courbes de puissances de l'éolienne Nordex N29/250.....  | 21 |
| <b>Figure III.2</b> : Courbes de puissances de l'éolienne Nordex N43/600.....  | 21 |
| <b>Figure III.3</b> : Courbes de puissances de l'éolienne Nordex N54/1000.....   | 22 |
| <b>Figure III.4</b> : Production d'énergie d'une ferme éolienne de 12 MW avec différentes<br>puissances nominales d'éoliennes (à une hauteur de 50 m)..... | 23 |
| <b>Figure III.5</b> : Eolienne - GEV HP de puissance 1 MW.....   | 24 |