



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Option : CONVERSION THERMIQUE

Thème :

**Etude de Pompage Eolien dans Les
Zones Arides Algériennes**

Par :

Mr. Menous Mohamed Hichem

Soutenu le 01 /07 /2018 devant le jury compose de :

Nom et Prénom	Grade	Institution	Qualité
Pr M.MERZOUK	Professeur	USDB1	Président
Mme S.CHAOUCHI	MMA	USDB1	Examineur
Mr K.MEHALAINE	MAB	USDB1	Examineur
Dr N.Kasbadji	DR	UDES	Promoteur

Remerciment

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Dr.N. Kasbadji Merzouk, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dedicace

Je dédie ce modeste travail A mes parents .Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie. A mes Très chère sœur Souhila, Nabila et Meriem mon frère Younes qui m'ont donné une panoplie d'aide et encouragement, et bien sur A mes camarade de classe par toutes les spécialités dont j'ai vécu mes plus belle jours avec eux et qu'on a été tous une seule main Pour Pouvoir tenir debout jusqu'à la fin de nos études aussi pour mes chers amies Mehdi, Abderrahmane et Amine et Bachir, Khalil, Meriem, Yasmine.

Enfin Pour tous les gens qui m'ont soutenu du pré ou du loin.

Je le dédier aussi a tous la famille Menous et a ceux que j'aime et qui m'aiment merci infiniment d'être avec moi.

Résumé : La croissance démographique et l'évaporation des eaux de surface conduisent aujourd'hui à une situation alarmante ce qui incite à profiter autant que possible des eaux souterraines.

Notre étude porte sur l'installation du pompage éolien et l'estimation du débit à l'aide d'un aérogénérateur dans la région Adrar. En faite une étude statistique a permis la détermination de la carte des vents de la région. La vitesse moyenne annuelle est supérieure à 6m/s. Par ailleurs, la carte des ressources en eau du Sahara septentrional a montré que la région choisie est caractérisée par l'existence d'un affleurement du continental intercalaire avec un toit de réservoir allant de 40 à 200 mètres de profondeur.

Les distributions statistiques sont établies pour tous les mois en traitant les données de cinq années consécutives. en considérant les limites de 3 éoliennes du commerce de 10 kW, 45 kW et 250 kW de puissance nominale respective Les puissances utiles et utilisables ont été estimées mensuellement dans cette étude.

Le débit journalier qui pourrait être obtenu par ce système est calculé pour différentes hauteurs manométriques.

Notre objectif est déterminer l'aérogénérateur adéquat qui pourrait être planter dans ce site et savoir les différents facteurs permettant l'optimisation du rendement en se basant sur les caractéristiques du site et celle de la machine choisie.

Mot clé : Aérogénérateur, pompage éolien, vitesse du vent, débit journalier

Abstract: Population growth and surface water evaporation lead today to an alarming situation which encourages to take advantage as much as possible of groundwater.

Our study deals with the installation of wind pumping and the estimation of the flow with the aid of an aerogenerator in the Adrar region. In addition a statistical study allowed the determination of the map of the winds of the region. The average annual speed is above 6m / s. In addition, the water resources map of the northern Sahara showed that the selected region is characterized by the existence of an outcrop of the continental shelf with a reservoir roof ranging from 40 to 200 meters deep.

Statistical distributions are established for all months by processing data for five consecutive years. Considering the limits of 3 commercial wind turbines of 10 kW, 45 kW and 250 kW of respective nominal power. Useful and usable powers were estimated monthly in this study.

The daily flow that could be obtained by this system is calculated for different pressure heights.

Our objective is to determine the suitable aerogenerator that could be planted in this site and to know the different factors allowing the optimization of the yield based on the characteristics of the site and that of the chosen machine.

Keywords: Wind turbines, wind pumping, wind speed, daily flow

الملخص:

النمو السكاني و تبخر المياه السطحية تقود اليوم إلى وضع ينذر بالخطر و يشجع على الاستفادة قدر الإمكان من المياه الجوفية . تتعامل دراستنا مع تركيب ضواغط الهواء وتقدير التدفق بمساعدة جهاز هوائي في منطقة أدرار من جهة أخرى سمحت دراسة إحصائية بتحديد خريطة رياح المنطقة. متوسط السرعة السنوي فوق 6 وبالإضافة إلى ذلك ، أوضحت خريطة الموارد المائية في الصحراء الشمالية أن المنطقة المختارة تتميز بوجود نتوء من الجرف القاري بسقف خزان يتراوح من 40 إلى 200 متر.

تم إنشاء التوزيعات الإحصائية لجميع الأشهر من خلال معالجة البيانات لمدة خمس سنوات متتالية. النظر في حدود 3 توربينات الرياح التجارية من 10 كيلووات و 45 كيلووات و 250 كيلووات من الطاقة اللازمة وتقدير القوى القابلة للاستخدام شهريا في هذه الدراسة.

تم احتساب التدفق اليومي الذي يمكن الحصول عليه من قبل هذا النظام بدلالة الارتفاع المانومتري . هدفنا هو تحديد جهاز التهوية المناسب الذي يمكن غرسه في هذا الموقع ومعرفة العوامل المختلفة التي تسمح بتحسين العائد على أساس خصائص الموقع وخصائص الماكينة المختارة.

الدالة الكلمات: توربينات الرياح، وضخ الرياح، سرعة الرياح، والتدفق اليومي

Chapitre 1

Figure (1.1) : Schéma représentatif de pompage vertical	16
Figure (1.2) : Schéma représentatif de Pompage déporté.....	17
Figure (1.3) : Représentation schématique des systèmes éoliens mécanique et électrique pour le pompage de l'eau.....	19
Figure (1.4) : Pompe a Piston pour le pompage mécanique.....	20
Figure (1.5) : Pompe centrifuge pour le pompage électrique	20
Figure (1.6) : Pompe a vis pour le pompage mécanique	20

Chapitre 2

Figure (2.1) : Profil de vent moyen au-dessus d'un couvert de hauteur	30
Figure (2.2) : Schéma d'un aérogénérateur	31
Figure (2.3) : Structure générale de la transmission de puissance d'une éolienne...32	
Figure (2.4) : Représentation schématique des dégradations successives de l'énergie éolienne avant utilisation	32
Figure (2.5) : Distribution de vitesses du vent et limites des vitesses .Caractéristiques d'une machine quelconque (démarrage, nominale et arrêt).....	34
Figure (2.6) : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent....35	

Chapitre 3

Figure (3.1) : Organigramme du programme développé sous MatLab.....	41
Figure (3.2) : Situation géographique de la zone étude.....	42
Figure (3.3) : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en Algérie.....	43
Figure (3.4) : Représentation de la nappe albienne.....	44
Figure (3.5) : Positionnement des forages de la zone d'étude, sur image satellite (benhamza 2013).....	46

Chapitre 4

Figure (4.1) : La distribution de Weibull Pour hauteur de 10m.....	50
Figure (4.2) : Variation mensuelle de la distribution de weibull en fonction de la vitesse.....	51
Figure (4.3) : Comparaison entre la vitesse cubique et la vitesse moyenne au cube.....	52
Figure (4.4) : La variation de facteur d'échelle (C) en fonction de l'altitude.....	53

Figure (4.5) : La variation de facteur de forme (k) en fonction de l'altitude.....	53
Figure (4.6) : La variation de la vitesse moyenne en fonction de l'altitude.....	54
Figure (4.7) : Facteurs de forme k et d'échelle C calculés pour chaque hauteur.....	54
Figure (4.8) : Variation des vitesses moyennes mensuelle pour des différentes hauteurs.....	55
Figure (4.9) : La puissance disponible et récupérable pour l'aérogénérateur de 10kW.....	56
Figure (4.10) : La puissance disponible et récupérable pour l'aérogénérateur de 45kW.....	56
Figure (4.11) : La puissance disponible et récupérable pour l'aérogénérateur de 250 kW.....	57
Figure (4.12) : La Puissance utile et utilisable pour les trois machines installées.....	57
Figure (4.13) : Estimation du débit en fonction de la hauteur manométrique.....	58
Figure (4.14) : Comparaison entre les débits pompés pour chaque aérogénérateur.....	59

Liste Des Tableaux

Chapitre1

Tableau (1.1) : La différence entre les deux Pompé utilisées.....	21
Tableau (1.2) : Avantages et inconvénients.....	21

Chapitre 2

Tableau (2.1): Expressions des vitesses moyennes et cubiques moyennes ainsi que les variances selon le modèle utilisé.....	27
Tableau (2.2) : Exemples d'ordre de grandeur de la rugosité z_0	29
Tableau (3.3) : Schéma d'un aérogénérateur.....	31

Chapitre 3

Tableau (3.1) : Carte d'identité du site.....	42
Tableau (3.2) : Caractéristiques des aérogénérateurs BERGEY BWC EXCEL.....	45
Tableau (3.3) : Caractéristiques des aérogénérateurs SUDWIND N1245.....	45
Tableau (3.4) : Caractéristiques des aérogénérateurs NORDEX N29.....	45
Tableau (3.5) : Représentation du rendement global.....	47

Chapitre 4

Tableau (4.1) : Paramètres de la distribution de Weibull et les caractéristiques du vent.....	51
Tableau (4.2) : Paramètres extrapolés des caractéristiques du vent du site d'Adrar.....	52
Tableau (4.5) : Extrapolation mensuelle des paramètres de Weibull pour différentes hauteurs.....	55
Tableau (4.6) : Présentation du débit à partir d'une hauteur manométrique de 40m.....	58

Nomenclature

A:	Surface de la roue	m^2
C :	Facteur d'échelle de Weibull	$m s^{-1}$
F(V)	Fréquence cumulée de la distribution de Weibull	
Hmt	Hauteur manométrique totale	
Lv	Fonction de vraisemblable	
<P>	Puissance énergétique éolienne moyenne disponible	W
<PMax >	Puissance récupérable par la roue	W
<Pr>	Densité de Puissance récupérable par la roue	Wm^{-2}
<Pu>	Densité de Puissance éolienne utile	Wm^{-2}
<Pe>	Densité de Puissance éolienne réellement utilisable	Wm^{-2}
Pn	Puissance nominale	W
Pthéorique	Puissance calculée à la vitesse nominale	W
<V>	Vitesse moyenne du vent	$m s^{-1}$
V, Vx	Vitesse du vent	$m s^{-1}$
<Vu>	<Vu>	$m s^{-1}$
ff0	Fréquence de vents calmes	
f(V)	Fréquences des vitesses moyennes tri horaires	
g	Accélération de la pesanteur	$m s^{-2}$
k	Facteur de forme de Weibull	
m	Exposant d'extrapolation du facteur d'échelle	
zg	Moyenne géométrique de l'altitude	m
z, z1	Altitude	m
zo	Rugosité du sol	m
Γ	Fonction gamma	
Γ_n	Fonction gamma normalisée	
η	Rendement global d'un système	
η_i	Rendement indiqué de la pompe	
ρ	Masse volumique de l'air	$Kg.m^{-3}$
σ	Ecart type de la distribution de la vitesse	m/s

Sommaire

Introduction générale.....	10
-----------------------------------	-----------

Chapitre 1 : Généralités sur le pompage éolien

1.1. Introduction.....	13
1.2. Historique sur le pompage éolien.....	13
1.2.1 Etat de l'art.....	13
1.3. Le pompage éolien.....	16
1.3.1 Éolienne de pompage vertical ou déporté.....	17
1.3.2 Les différents types de pompage éolien.....	18
1.3.2.1 Le Pompage mécanique.....	18
1.3.2.1.1 Pompes volumétriques couplées aux éoliennes.....	18
1.3.2.1.1.1 Pompe à piston.....	18
1.3.2.1.1.2 Pompe à vis.....	19
1.3.2.2 Le Pompage électrique.....	19
1.3.2.2.1 Pompe centrifuge à moteur asynchrone.....	20
1.3.3 Domaine d'utilisation de pompage éolien.....	21
1.4 Comparaison des pompes volumétrique centrifuge.....	22
1.5 Conclusion.....	22

Chapitre 2 : Modélisations

2.1 Introduction.....	24
2.2 Etude Statistique.....	24
2.2.1. Modèle Statistique.....	24
2.2.1.1 Distribution de Weibull.....	24
2.2.1.2 Distribution de Rayleigh.....	25
2.2.2 Vitesse moyenne, vitesse cubique moyenne et variance.....	25
2.2.3 Méthode d'ajustement	26
2.2.3.1 Méthode des moindres carrées.....	26
2.2.3.2 Méthode du maximum de vraisemblance.....	27
2.2.4 Variation des paramètres de weibull.....	28
2.2.4.1 Profil de vent et ses caractéristiques.....	28
2.2.5 Extrapolation verticale des paramètres du vent.....	29
2.2.5.1 Modèle d'extrapolation de Justus et Mikhaïl.....	29
2.2.5.2 Modèle modifié d'extrapolation de Justus.....	29
2.3 Principe de fonctionnement de l'aérogénérateur.....	30
2.4 Potentiel Energétique Eolien.....	31
2.4.1 Puissance disponible	32
2.4.2 Energie électrique produit par un aérogénérateur.....	32
2.4.2.1 Puissance maximale (Formule de Betz).....	32
2.4.2.2 Puissance Eolienne moyenne utilisable.....	32
2.5 Zones de fonctionnement de l'éolienne.....	34
2.5.1 Puissance éolienne moyenne Utile.....	34
2.6 Estimation du débit pompé.....	35
2.7 Conclusion.....	35

Sommaire

Chapitre 3 : Simulation et Application

3.1 Introduction.....	38
3.2 Simulation.....	38
3.2.1 Traitement des données de mesure.....	38
3.2.2 Organigramme de calcul.....	38
3.3 Site Etudier.....	40
3.3.1 Présentation du site Etudier.....	40
3.3.2 Choix de site.....	41
3.4 Les données de vent.....	42
3.5 Choix de l'aérogénérateur.....	42
3.6 Sondages de recherches hydrauliques.....	44
3.7 Application.....	44
3.8 Conclusion.....	45

Chapitre 4 : Résultats et discussion

4.1 Introduction.....	47
4.2 Estimation de potentiel énergétique.....	47
4.2.1 La distribution de weibull.....	47
4.2.2 La variation mensuelle de la distribution de weibull.....	48
4.2.3 Variation de des vitesses cubiques et les vitesses moyenne au cube.....	49
4.3 Extrapolation verticale du paramètre du vent.....	49
4.3.1 Variation des paramètres de Weibull avec l'altitude(C et k).....	49
4.3.2 Variation de la Vitesse moyenne avec l'altitude.....	50
4.3.3 Comparaison de la distribution de Weibull pour les trois aérogénérateurs...	51
4.3.4 Extrapolation mensuelle des paramètres de weibull.....	52
4.3.5 Variation mensuelle des vitesses moyennes.....	52
4.3.6 Puissance disponible et Récupérable.....	53
4.3.7 Détermination de la Puissance utile et électrique.....	54
4.4 Débits pompés.....	55
4.4.1. Estimation des débits pour chaque aérogénérateur.....	55
4.4.2 Comparaison des débits des aerogenerateur installer.....	56
4.5 Conclusion.....	57

Conclusion générale.....	58
--------------------------	----

Référence.....	61
----------------	----

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie éolienne est probablement la plus ancienne énergie utilisée par l'homme en dehors de son énergie musculaire qui fut, d'abord une énergie captée par la voile pour la navigation. Par la suite, quelques inventeurs chinois ou perses ont pensé à faire tourner la voile autour d'un axe fixe : le moulin était né. C'est seulement plus tard que l'axe devient sensiblement horizontal, avec des ailes, pour prendre la disposition bien connue des moulins à vent [1].

Au XX^e siècle, s'appuyant sur les progrès de l'aérodynamique, certaines tentatives de réalisation de nouvelles machines sont faites aux États-Unis, en ex-URSS, en Angleterre et en France. En effet, "Électricité de France" ont mis en place une éoliennes puissantes, jusqu'à 1 000 kW environ dès 1960. Des progrès importants dans l'aérodynamique, l'arrivée de nouveaux matériaux vont permettre d'exploiter ce gisement mondial estimé à 4 TWh à partir de nouvelles machines fiables et diminuer le prix de l'énergie produite, qui ne devient plus marginale dans certains pays comme le Danemark ou certaines contrées comme la Californie.

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. Ainsi qu'elle est une forme indirecte de l'énergie solaire : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne produit pas directement de gaz à effet de serre en phase d'exploitation. Les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins [2] :

- Production d'énergie électrique : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système "autonome" avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène), un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. Une éolienne est parfois qualifiée d'aérogénérateur dès lors qu'elle produit de l'électricité (figure 3).
- Production d'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (voilier ou char à voile), pour pomper de l'eau (éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.

Notre étude va se focaliser sur l'utilisation de l'éolienne pour la transformation en énergie électrique pour le pompage de l'eau.

CHAPITRE 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Introduction

Le présent chapitre porte en premier lieu sur l'introduction des éoliennes destinées au pompage d'eau. Un bref historique de cette technologie qui a connu une très grande élaboration depuis le 13ème siècle est donné.

En seconde partie seront abordées les différentes études qui ont été faites dans le monde et notamment en Algérie où l'application s'est avérée très intéressante dans certaines régions.

1.2. Historique sur le pompage éolien

Hammourabi, Fondateur de la puissance de Babylone, est celui qui vers l'an 2000 avant Jésus-Christ selon les uns, ou l'an 1700 suivant les autres, aurait conçu un immense projet d'utilisation de l'énergie du vent pour assurer l'irrigation des plaines de Mésopotamie. Mais si la Perse est généralement considérée comme le berceau du moulin à vent, la Mésopotamie toute proche pourrait bien être le pays qui le premier utilise la force du vent pour l'élévation de l'eau.

Les moulins à vent furent introduits en Europe par les Croisés. De là, il s'est répandu, assez lentement d'ailleurs, jusqu'au nord de l'Europe. Les premiers moulins apparaissent en Hollande au 13ème siècle, où la tâche confiée à ces machines est la mouture de blé, d'où le nom de moulin puis vint les machines en 1430 pour le pompage de l'eau qui ne tardent pas à se répandre dans toute l'Europe, pour les besoins de l'agréement du parc de quelque château [3].

1.2.1 Etat de l'art

L'état de l'art sur le pompage éolien ou la première étude qui a été effectuée revient à **A. Ramelli** (1588) [4], qui a publié des descriptions d'éoliennes de pompage dans son ouvrage "le diverse e artificiose machine"

En 1745, **Edmund Lee** [5] fit breveter la roue auxiliaire "rose du vent" en assurant l'orientation automatique du moulin dans le vent. A notre époque on trouve plusieurs études établies dans ce domaine que ce soit en dehors de notre pays ou bien dans notre pays ou plusieurs études ont été faites dans des régions différentes.

Clark R.N et al en 1995 [6] ont utilisé un système de pompage d'eau éolien-électrique qui consiste en une éolienne produisant de l'énergie électrique à courant alternatif à fréquence variable et à tension variable.

Vick B-D et al 1995[7] ont utilisé des contrôleurs de pompes pour les systèmes de pompage d'eau éoliens-électriques. Ils ont été testés sur plusieurs éoliennes de différentes tailles à l'USDA - Agricultural Research Service Bushland, Texas- Toutes les éoliennes testées ont utilisé des alternateurs à aimants permanents qui ont généré de l'électricité à courant alternatif triphasé. Les éoliennes testées ont varié en puissance nominale de 1 kW à 10 kW à une vitesse du vent d'environ 12 m / s. L

Vick B-D et al 1996 [8] ont étudié la performance de pompage d'eau de deux systèmes éoliens est comparée à la performance de pompage d'eau de deux

systèmes solaires PV. Les systèmes éoliens ont été évalués à 1,0 kW et 1,5 kW à une vitesse du vent d'environ 12 m / s, et les diamètres des rotors étaient respectivement de 2,75 m et 3,05 m.

Vick B-D et al 1996 [9] ont réalisé une étude sur des volets de bord de fuite qui ont été appliqués aux pales d'une éolienne de 10 kW utilisée pour le pompage de l'eau afin d'essayer d'améliorer les performances et de réduire la fatigue structurelle de l'éolienne. La plupart des petites éoliennes (10 kW et moins) utilisent des enroulements (le rotor tourne à l'encontre du vent, semblable à une éolienne mécanique) pour protéger l'éolienne de la survitesse lors de vents violents.

Vick B-D et al 1997[10] ont étudié deux systèmes de pompage éolienne électrique qu'ils ont comparé à deux systèmes de pompage d'eau éolienne mécanique pour une profondeur de pompage de 30 m. Les éoliennes mécanique avaient des vitesses de démarrage plus faibles (2,5 à 3 m / s) par rapport à celle de éoliennes pompage électrique (5 à 5.5 m/s). Cependant, les systèmes éoliens de pompage électrique ont pompé plus d'eau à des vitesses de vent élevées que les systèmes d'éoliennes de pompage mécanique. Pour la même hauteur de moyeu, le volume d'eau quotidien moyen du système éolien de pompage électrique était supérieur à celle de l'éolienne de pompage mécanique durant la saison hivernal mais généralement plus moins dans la saison estivale,

Vick B-D et al 1997[11] ont testé une éolienne de 1,5 kW en continu au Laboratoire de recherche sur la conservation et la production de l'USDA-ARS à Bushland, TX, pour le pompage d'eau domestique et animale. Cette éolienne utilise un alternateur à aimants permanents fournissant une tension variable. La pompe optimale a été jugée en fonction de la profondeur du puits d'eau et de la distribution de la vitesse du vent. Après avoir corrigé les problèmes initiaux de démarrage, l'éolienne de 1,5 kW s'est révélée très fiable au cours des cinq dernières années

Vick B-D et al 2000[12] ont développé des systèmes de production d'électricité hybride utilisant des énergies renouvelables qui seront fiables, rentables et indépendantes des réseaux d'électricité. Ils ont évalué les performances et les émissions de biodiesel dérivé de différentes matières premières en mesurant les changements de performance (puissance, consommation de carburant, réponses de stabilité, etc.) des moteurs diesel hors route et mesurer les émissions (Nox, SO₂, CO, H₂S, etc.) lorsqu'il est alimenté au biodiesel par rapport au carburant diesel standard. Développer la technologie pour la production d'électricité et de combustibles à la ferme à partir du fumier animal.

Vick B-D et al 2001 [13] ont amélioré la correspondance entre les systèmes d'énergie éolienne et solaire et l'exigence d'énergie d'irrigation, il est préférable de combiner une culture d'hiver (par exemple blé d'hiver) avec une culture d'été (par exemple maïs ou coton) plutôt que de cultiver seulement une culture d'hiver ou d'été.

O. Guerri et al 2002[14] ont présenté une étude préliminaire sur l'utilisation de l'énergie éolienne pour le pompage de l'eau appliquée à la région d'Adrar. Le travail consiste à définir les puissances moyennes fournie par 3 machines de puissance nominal de (1.4kw 4kw 10kw) sur des mats de différentes hauteurs Ils ont trouvé que aérogénérateur de plus petit puissance (1-5) kW sont recommandés aux puits de faible profondeur ou les besoins en eau sont peu élevé

Chapitre 1 : Généralité sur le Pompage Eolien

Mounir ALLICHE et al 2002[15] ont modélisé et évalué le potentiel éolien disponible dans la région de Médéa en utilisant 4 aérogénérateurs de différente puissance nominale (1kw 10kw 100kw 335kw).

Nelson V et al 2004[16] ils ont écrit un livre sur les moulins à vent de ferme et une brève description des éoliennes modernes et de leur conception des systèmes utilisés pour l'irrigation. Un chapitre est inclus sur l'élaboration de projets et la méthodologie pour effectuer des comparaisons économiques. Enfin, des études de cas sont présentées au Mexique et aux États-Unis.

N. Kasbadji Merzouk et al 2006 [17] ils ont estimé Le potentiel énergétique éolien utilisable de la partie ouest des Hauts Plateaux algériens en considérant deux sites représentatifs, à savoir: Tiaret et El Bayadh.

Les potentiels éoliens disponibles dans les régions de Tiaret et El Bayadh comptent parmi les plus importants des hauts plateaux. Comme, par ailleurs, ils disposent d'une faible pluviométrie compensée par des ressources en eaux souterraines non négligeables, Les dégradations successives de l'énergie potentielle au cours des différentes transformations font que les rendements de conversion ne peuvent jamais excéder les 30 %.

R. Maouedj et al 2008[18] ont présenté une Estimation du potentiel énergétique éolien Sur le site Tindouf In Salah, In Amenas avec un système de pompage éolien composé d'aérogénérateur de différente puissance (1kw 2kw 3kw). L'examen des courbes a permis d'établir un rapport entre le débit d'eau pompé et la hauteur manométrique et la puissance nominale. Ils ont trouvé par conclure que l'aérogénérateur de Type 1 kW peut être installé sur des puis moins profonds dans le cas ou les besoins en eau sont faible contrairement les puits les plus profond ou il nécessite un aérogénérateur de puissance nominal plus importante

Clark R.N et al 2008 [19] ont testé deux pompes à eau submersibles hélicoïdales identiques en utilisant différentes sources d'énergie. Les pompes ont été testées à trois profondeurs de pompage typiques, des profondeurs de pompage dans le Grand Sud Plaines: 50, 75 et 100 m. Une éolienne de 1000 W produisant de l'électricité triphasée et un réseau solaire PV de 640 W a été utilisé comme source d'énergie.

Vick B-D et al 2008 [20] en utilisant Une pompe hélicoïdale qui a été alimentée par des modules PV solaires a été alimentée par une petite (2,1 m ou Diamètre du rotor de pale de 7 pieds) éolienne sur une période de 2,3 ans. La performance de pompage mesuré était très bonne à démontrer une capacité à pomper assez d'eau à un pompage de 50 m profondeur pour arroser 120 bovins et à une profondeur de 100 m de pompage pour arroser 60 bovins. La puissance de pointe le coefficient mesuré de l'éolienne était de 0,33 (typique d'une petite éolienne). La pompe l'efficacité varie entre 40 et 80% en fonction de la profondeur de pompage. Le système total de pointe 13 le rendement était de 12% pour des profondeurs de pompage de 75 et 100 m. Bien que la performance mesurée fût bonne pour ce système de pompage de l'eau à énergie éolienne, la longévité de ce système est encore inconnue

S. Bousalem et al 2008 [21] ont présenté une méthode de pompage éolien électrique à partir d'un aérogénérateur de 1.5 kW. Les débits d'eaux pompés mensuellement ont été estimés pour la région d'Adrar, pour chaque hauteur manométrique simulée, la pompe optimale a été obtenue. On peut noter que plus la hauteur manométrique est importante, plus le nombre d'étage de la pompe doit augmenter. Ils ont montré que le débit moyen est important dans 2 cas lorsque la

Chapitre 1 : Généralité sur le Pompage Eolien

hauteur de pylône est considérable et aussi dans le cas où le débit pompé a faible profondeur plus important que de pomper l'eau à une grande profondeur.

M. Benabdelkader et al 2011[22] ont trouvé que d'après l'étude de la distribution du vent et des débits de pompage, estimés pour les sites de Béchar, Moughel et Béni-Abbès, que l'application du pompage éolien jumelée au procédé de l'irrigation localisée, peut constituer une solution au problème de développement du palmier dattier dans la région de Béchar, étant donné qu'elle règle le problème d'indisponibilité de l'énergie conventionnelle sur site. Enfin, il est recommandé l'application de ces systèmes éoliens pour les sites de Béchar et de Moughel, plutôt que les sites de Béni-Abbès, compte tenu du potentiel éolien acceptable et du régime favorable du vent pour les deux premiers sites.

N. Kasbadji Merzouk et al 2015 [23] ont étudié les perspectives d'installation dans six régions au sud ouest de l'Algérie où ils ont estimé le potentiel éolien des six régions afin de pouvoir déterminer les débits journaliers soutirés à l'aide d'une éolienne à pompage mécanique et un aérogénérateur de différentes puissances nominales. Les résultats obtenus montrent que l'irrigation à l'aide de pompage éolien est très adéquat en savoir que pour la faible profondeur il est préférable d'utiliser les machines éoliennes de pompe mécanique contrairement à la grande profondeur où il est préférable d'utiliser les pompes à l'aide de l'aérogénérateur.

A. Mazidi et al 2016 [24] a développé un programme pour l'étude et le traitement des données statistiques relatives au vent. L'étude a été réalisée à la région Adrar où les résultats montrent que le modèle le plus adapté sur ce site pour la présentation de la distribution de la vitesse du vent est celui de Weibull qui est proche des histogrammes de la distribution de la vitesse du vent. Ce qui permet de confirmer la faisabilité de la région pour l'implantation de ce système de pompage éolien.

H. Daaou Nedjari et al [25] où il a utilisé des éoliennes de différents diamètres de rotor et en fonction des données de forage qui ont permis la détermination de quelque point d'eau soutiré et en prenant en considération les vitesses moyennes annuelles. Cette étude a bien montré que certaines régions sont favorables pour l'implantation du système de pompage éolien.

1.3. Le pompage éolien

Les éoliennes de pompage ou éoliennes à eau ont pour but de pomper de l'eau et de la remonter à la surface. Elles transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ou bien électrique qui actionne différents types de pompes. Les machines modernes comptent des éoliennes lentes couplées aux pompes à piston et des éoliennes rapides dont les caractéristiques s'adaptent particulièrement bien à l'entraînement des pompes centrifuges et des pompes à hélices.

Le choix de la vitesse de démarrage, de la vitesse nominale et du point de fonctionnement de la pompe a une grande influence sur la production et l'économie du groupe de pompage.

La comparaison des différents types de pompes qui peuvent être couplés avec une éolienne rapide fait ressortir pour les hauteurs de refoulement faibles et moyennes l'avantage considérable qu'il y a à utiliser une pompe à pales orientables.

Ces pompes, qui fonctionnent certes de façon moins fiable que les pompes motorisées au diesel ou à l'électricité, permettent cependant de pomper, grâce à une énergie gratuite et avec très peu de frais de maintenance de grands volumes d'eau (entre 5 et 25 m³ par jour pour la plupart des modèles, mais jusqu'à 100 m³/jour, leur débit dépendant essentiellement de la taille de l'éolienne, de la profondeur du forage et des caractéristiques locales du vent) [26].

1.3.1 Éolienne de pompage vertical ou déporté

Les besoins en eau et les caractéristiques topographiques vont déterminer le type d'éolienne de pompage à mettre en place. Si l'eau est située dans une nappe ou un puits situé à la verticale, il faut connaître (figure 1.1) :

- la hauteur du pompage de l'eau (en mètres).
- la hauteur de la nappe depuis la surface en hiver et en été.
- le diamètre intérieur du forage ou du puits.
- le débit du forage ou du puits.

Si l'eau est située en déport de l'éolienne, dans le cas par exemple d'une rivière ou d'un étang, il faut connaître (figure 1.2) :

- la hauteur du pompage de l'eau (en mètres).
- la distance entre le centre de l'éolienne et l'endroit du puisage de l'eau.
- la hauteur de dénivelé entre éolienne et nappe d'eau.
- la hauteur à laquelle l'eau doit être montée (si elle doit être montée au-dessus du sommet du pylône de l'éolienne, cela nécessite alors un presse-étoupe).

Si l'éolienne est à la verticale, on peut utiliser une pompe aspirante ou refoulant mais si l'éolienne est déportée, on utilise une pompe aspirante uniquement [26].

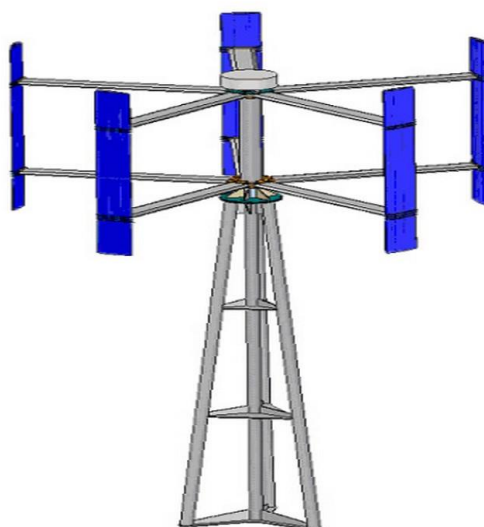


Figure 1.1 : Le pompage vertical [26]

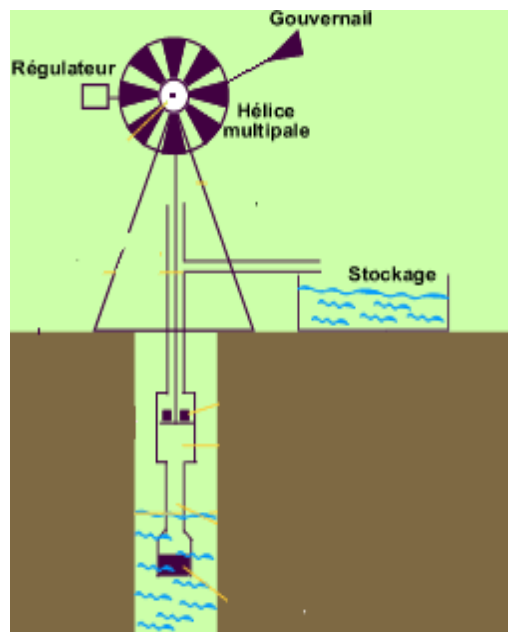


Figure 1.2 : Schéma représentatif de Pompage déporté [26]

1.3.2 Les différents types de pompage éolien

1.3.2.1 Le Pompage mécanique

L'éolienne de pompage mécanique traditionnelle utilise un système bielle manivelle monté sur l'arbre du rotor. Elle possède normalement plusieurs pales montées sur un rotor qui tourne relativement lentement. Le système bielle manivelle transforme le mouvement rotatif de la bielle en un mouvement rectiligne alternatif qui commande la pompe à piston installée dans un puits ou un étang, à la base de l'éolienne.

Le mouvement alternatif du piston de la pompe assure le pompage de l'eau. Les éoliennes de pompage mécaniques ont leurs avantages et leurs inconvénients. Elles sont généralement fiables, d'un entretien facile et d'un coût abordable. La contrainte principale réside dans le fait qu'elles doivent être installées directement au-dessus du puits ou de l'étang, ceci même si l'eau doit être utilisée à une certaine distance de ce puits [6]. Les pompes éoliennes exigent un entretien régulier des joints qui doivent être remplacés tous les 1 à 2 ans. Ce remplacement exige que la pipe de canalisation verticale soit tirée pour accéder à la pompe. Un autre problème est que l'éolienne est placée directement au-dessus de la source d'eau. Dans certaines situations c'est physiquement difficile à réaliser (figure 1.3).

1.3.2.1.1 Pompes volumétriques couplées aux éoliennes

1.3.2.1.1.1 Pompe à piston :

Elles fonctionnent à l'aide d'un rotor relié à un arbre. Ce dernier est équipé d'un petit pignon sur l'extrémité opposée (roue menante), qui entraîne deux roues principales

plus grandes (roues menées), déplaçant à leur tour des bielles pendantes. Une éolienne multipale associée à une pompe à piston ou alternative composent les systèmes de pompage éoliens mécaniques les plus communs. Un dispositif de stockage est nécessaire pour assurer l'approvisionnement en eau lorsqu'il n'y a pas de vent pour faire fonctionner la pompe, mais également pour équilibrer les fluctuations horaires qui peuvent survenir dans la demande. (figure 1.4) [27].

1.3.2.1.1.2 Pompe à vis :

Les pompes à vis excentrique, appelées monovis, sont des pompes à déplacement positif constituées d'un rotor hélicoïdal en acier inox accouplé à un stator en caoutchouc vulcanisé. Utilisées pour pomper des produits liquides, visqueux et délicats, abrasifs ou avec des matériaux solides en suspension, les pompes à vis excentrique, comme toutes pompes volumétriques, délivrent un débit constant et peuvent assurer des pressions max de 24 bars et des débits max de 160 m³/h (figure 1.5) [27]

1.3.2.2 Le Pompage électrique

Le système éolien électrique commande une pompe électrique, (après conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique) qui aspire l'eau de la source (un puits ou un étang) et la refoule à l'endroit de son utilisation (un abreuvoir à bétail, un étang ou un système d'irrigation).

La quantité d'énergie consommée par la pompe électrique peut être adaptée à la puissance de sortie de l'éolienne, de manière à ce que l'énergie éolienne soit utilisée efficacement. Ils combinent une fiabilité élevée et un bas entretien des éoliennes et les pompes centrifuges à courant alternatif qui vont avec. Ils constituent des systèmes simples et robustes. Dans ces systèmes, le moteur à courant alternatif triphasé de la pompe est directement actionné par la tension alternative variable de fréquence variable de l'alternateur de l'éolienne. À la différence des éoliennes à pâles, systèmes n'exigent aucun entretien programmé et peuvent fonctionner de façon autonome pendant des années.

Pour les secteurs ayant des ressources modestes de vent (4 m/s ou plus), ces systèmes fournissent une alternative rentable pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation de parcelle de terrain [27]. Contrairement au système mécanique, le système éolien électrique n'est pas obligé de se trouver près de la source d'approvisionnement en eau.

La technologie des systèmes de pompage électrique éolien a été développée par les services d'agriculture, d'énergie et industrie privée des USA dans les années 80. Les systèmes commerciaux s'étendant de 1 - 10 kilowatts (1.3 - HP 13) ont été installés dans plusieurs centaines d'emplacements dans plus de 20 pays. (figure 1.3).

1.3.2.2.1 Pompe centrifuge à moteur asynchrone :

La pompe centrifuge est une machine tournante qui grâce à un rotor à aubes convenablement orientées augmente l'énergie cinétique et projette à l'aide de la force centrifuge le liquide à la périphérie sur la volute. (figure 1.6).

A la sortie et à l'aide d'un divergent, une grande partie de l'énergie cinétique se transforme en pression motrice. Le stator est formé d'une carcasse ferromagnétique qui contient trois enroulements électriques. C'est la partie fixe du moteur. Le passage d'un courant dans les enroulements crée un champ magnétique à l'intérieur du stator. Sur les moteurs triphasés, il y a 3 enroulements alimentés (en étoile 230V ou en triangle 400V) chacun par une phase. Pour le moteur asynchrone, le stator est l'inducteur (celui qui "induit", qui crée le champ magnétique).

Au centre des 3 bobines se trouve le rotor. Le rotor c'est l'élément en rotation qui transmet la puissance mécanique. Il se trouve au centre du moteur et est soumis au champ magnétique créé par le stator. Pour le moteur asynchrone, le rotor est l'induit (celui qui subit les courants "induits") (figure 1.6) [27].

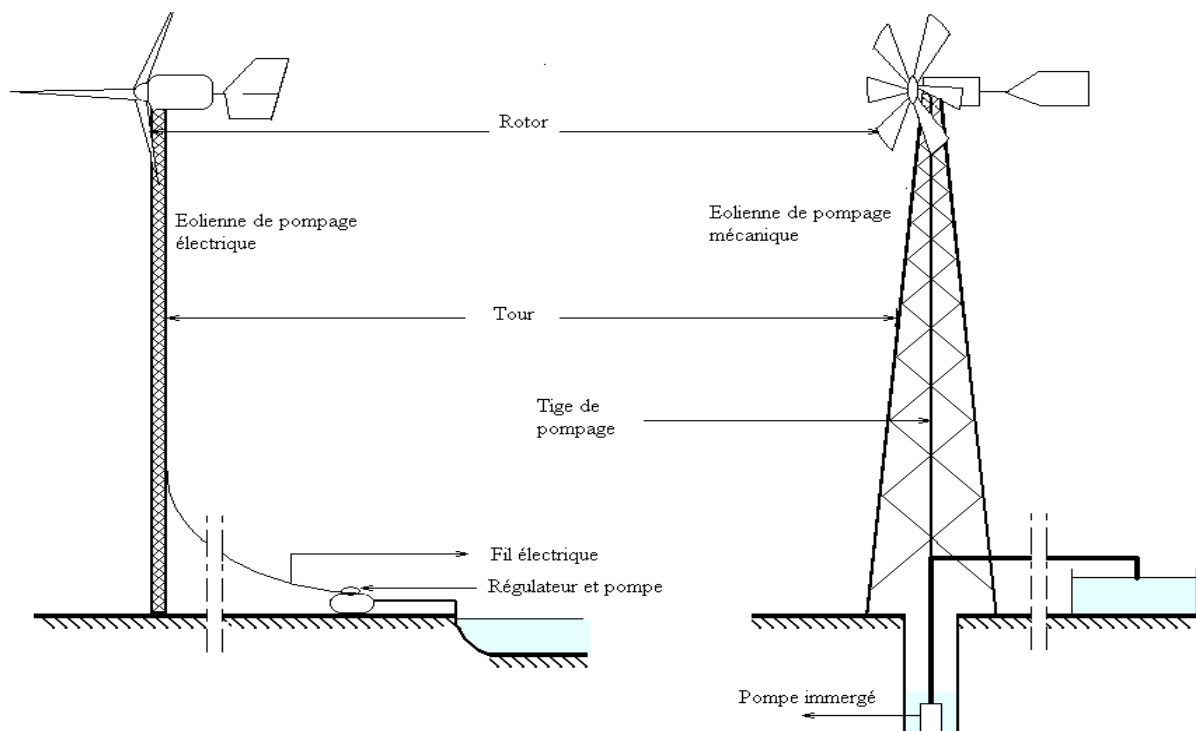


Figure 1.3 : Représentation schématique des systèmes éoliens mécanique et électrique [23]

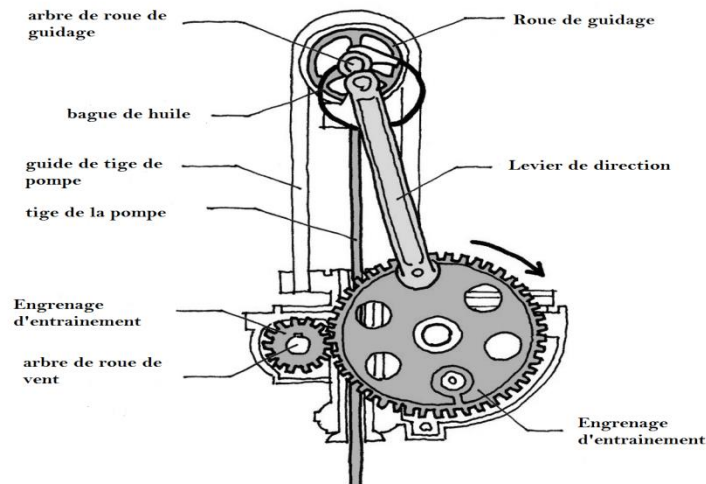


Figure (1.4) : Pompe a Piston pour le pompage mécanique [27].

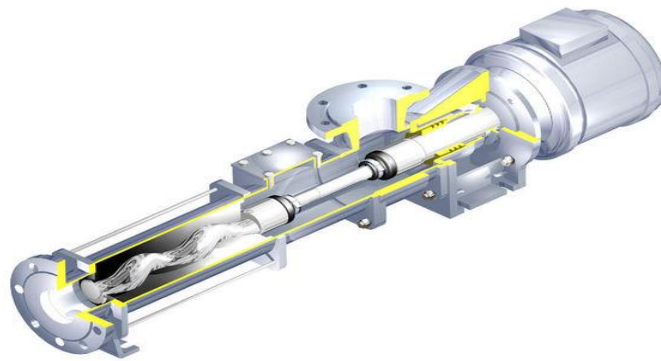


Figure (1.5) : Pompe a vis pour le pompage mécanique (excentrique) [27].

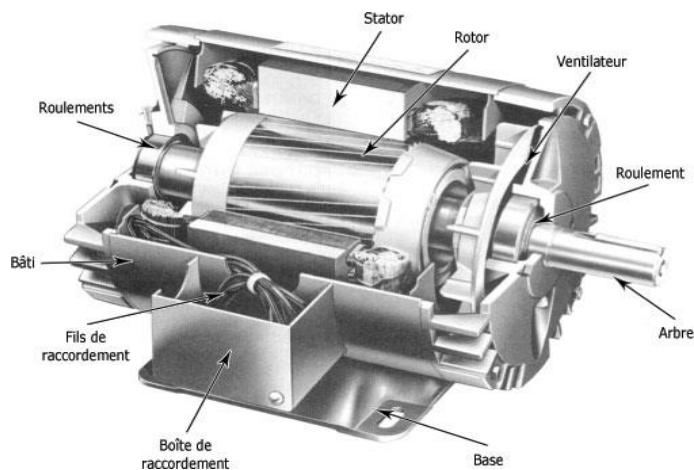


Figure (1.6) : Pompe centrifuge pour le pompage électrique [27].

1.3.3 Domaine d'utilisation de pompage éolien

Le pompage éolien est utilisé pour [26] :

- irriguer les cultures.
- abreuver le bétail.

- constituer une réserve d'eau.
- assécher des marais.

1.4 Comparaison des pompes volumétrique centrifuge

Au tableau 1 sont comparées les pompes volumétriques avec celle centrifuge.

Tableau (1.1) : La différence entre les deux Pompes utilisé [26]

Pompe volumétrique (mécanique)	Pompe centrifuge (électrique)
Faible vitesse de rotation	Vitesse de rotation élevée
Démarrage par vent très faible	Démarrage par vent plus élevé
Coût plus important	Coût moins important
Rendement moins important	Faible prise au vent
Forte prise au vent	Pales plus complexes à réaliser

Au tableau 2 sont résumées les avantages et les inconvénients des deux types de pompes.

Tableau (1.2) : Avantage et inconvénients [27]

Avantages	Inconvénients
Les éoliennes de pompage sont relativement résistantes et peuvent fonctionner pendant plusieurs dizaines d'années si elles sont correctement entretenues, elles sont économiques et respectueuses de l'environnement.	Elles sont encombrantes, peu esthétiques, et peuvent être bruyantes. Les éoliennes de pompage doivent être placées près de la source de l'eau et sur un terrain comportant peu d'obstacles susceptibles de freiner le vent. Leur prix peut être important (mais maintenance peu coûteuse).
Il est possible (dans le cas de petites ou de moyennes éoliennes) de les construire et de les installer soi-même.	Elles ne fonctionnent que s'il y a assez de vent et il est déconseillé de les utiliser si le forage a plus de 30 m de profondeur.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le pompage éolien avec ces deux variantes mécanique et électrique ainsi que les différentes utilisations. Le chapitre a débuté par la citation des différentes recherches et études et les perspectives du pompage éolien dans le monde et en Algérie. Nous avons montré aussi que plusieurs critères entrent dans l'amélioration du rendement de la machine à savoir la puissance de l'aérogénérateur, la hauteur du mat, la hauteur de la profondeur de forage, la vitesse du vent moyenne (les caractéristique du site). Ce qui donne un meilleur rendement et donc un bon débit exploité.

CHAPITRE 2

MODELISATION

2.1 Introduction

Le but du présent chapitre est l'étude statistique utilisée pour le traitement des mesures du vent afin de déterminer la vitesse moyenne annuelle du vent du site étudié.

Le modèle d'estimation de vitesse du vent extrapolée de la hauteur de la mesure à la hauteur des aérogénérateurs est présenté. Ainsi que celui consacré à l'estimation du potentiel énergétique éolien du la région Adrar.

Enfin, la démarche utile à la détermination de la puissance éolienne réellement utilisable en fonction des limites de fonctionnement des aérogénérateurs et des paramètres énergétiques éoliennes du site d'implantation est exposée.

Le chapitre se termine par la définition de la méthode d'estimation du débit en fonction de la Puissance utilisable et la hauteur manométrique des puits existé.

2.2 Etude statistique

En plus de la méthode de la moyenne arithmétique pondérée, deux modèles Statistiques sont utilisés pour la modélisation des distributions statistique du vent sont [29] :

- la loi de Weibull.
- la loi de Rayleigh.

Lois utilisées pour la détermination des facteurs éoliens caractérisant un site, à savoir [29] :

- la vitesse moyenne du vent
- la vitesse cubique moyenne du vent
- la variance de la distribution des vitesses

2.2.1. Modèles Statistique

2.2.1.1 Distribution de Weibull

La fonction de distribution de Weibull (2.1) est le modèle le plus fréquemment utilisé pour décrire la distribution de la vitesse du vent, sa densité de probabilité se présente sous la forme [29]

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right). \quad 2.1$$

Cette fonction donne une bonne correspondance avec les données mesurées. Elle est caractérisée par deux paramètres k et c . k est le paramètre de forme décrivant la dispersion des données et c paramètre d'échelle dans l'unité de la vitesse du vent (m / s) qui détermine la qualité du vent.

La détermination de ces paramètres permet la connaissance de la distribution des vents pour un site donné. Le traitement peut se faire directement ou en passant par les fréquences par classes en considérant les moyennes [29].

Chapitre 2 : Modélisation

La fonction de répartition est donnée par :

$$f(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} f(V) dV = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k\right) \quad 2.2$$

$$f(V \geq V_x) = \int_{V_x}^{\infty} f(V) dV = \exp\left(-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k\right) \quad 2.3$$

2.2.1.2 Distribution de Rayleigh

La distribution de Rayleigh (2.4) 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 :

$$f(V) = 2 \frac{V}{c^2} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^2\right) \quad 2.4$$

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 [29].

2.2.2 Vitesse moyenne, vitesse cubique moyenne et variance

Partant des mesures vent (vitesse et direction), la vitesse moyenne pondérée s'écrit [29] :

$$\langle V \rangle = \int_0^{\infty} V f(V) dV \quad 2.5$$

Alors que la vitesse cubique moyenne se détermine par :

$$\langle V^3 \rangle = \int_0^{\infty} V^3 f(V) dV \quad 2.6$$

La variance est donné par :

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (V - \langle V \rangle)^2 f(V) dV \quad 2.7$$

Les différentes intégrations permettent de déduire les expressions données au tableau (2.1) de la valeur de la vitesse moyenne, cubique moyenne et la variance selon les différents modèles.

Chapitre 2 : Modélisation

Tableau (2.1): Expressions des vitesses moyennes et cubiques moyennes ainsi que les variances selon le modèle utilisé. [29].

Distributions	$\langle V \rangle$	$\langle V^3 \rangle$	σ^2
Weibull	$C \Gamma(1 + \frac{1}{k})$	$C^3 \Gamma(1 + \frac{3}{k})$	$C^2 [\Gamma(1 + \frac{2}{k}) - \Gamma^2(1 + \frac{1}{k})]$
Rayleigh	$0.886 C$	$1.32 C^3$	$0.2146 C^2$

2.2.3 Méthodes d'ajustement

Plusieurs méthodes sont utilisées pour l'ajustement des données statistiques (Détermination des coefficients k et C de Weibull). Nous allons citer les plus fréquemment utilisées. [29]

2.2.3.1 Méthode des moindres carrées

La plus simple est la méthode des moindres carrés qui après hiérarchisation passe par le calcul de la fréquence cumulée de la distribution de Weibull qui s'écrit [29] :

$$F(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} f(V) dV = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right). \quad 2.8$$

$$F(V \geq V_x) = \int_{V_x}^{\infty} f(V) dV = \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right). \quad 2.9$$

La relation 2.9 peut être linéarisée en écrivant :

$$\log[-\log F(V \geq V_x)] = k \log V_x - k \log C \quad 2.10$$

Et en posant :

$$Y = \log[-\log F(V \geq V_x)] \quad \text{et} \quad X = \log V_x \quad 2.11$$

Il vient :

$$Y = aX + b \quad 2.12$$

Avec :

$$a = k \quad \text{et} \quad b = -k \log C \quad 2.13$$

D'où :

$$C = \exp\left[\frac{-b}{a}\right] \quad 2.14$$

Chapitre 2 : Modélisation

L'inconvénient de la méthode des moindres carrée appliquée à un modèle non linéaire réside dans le fait que le minimum de la variable linéarisée diffère de celui de la variable non linéarisée [30].

2.2.3.2 Méthode du maximum de vraisemblance

La fonction vraisemblance appliquée à la distribution de Weibull s'écrit, [31]:

$$L_v = \prod_{i=1}^N f(V_i) = \prod_{i=1}^N \frac{k}{C} \left[\frac{V_i}{C} \right]^{k-1} \exp \left[- \left[\frac{V_i}{C} \right]^k \right] \quad 2.15$$

On prend le logarithme :

$$\log(L_v) = \sum_{i=1}^N \log k - k \sum_{i=1}^N \log C + (k-1) \sum_{i=1}^N \log V_i - \sum_{i=1}^N \left[\frac{V_i}{C} \right]^k \quad 2.16$$

L est maximale pour $(\partial L_v / \partial k) = 0$, $(\partial L_v / \partial C) = 0$, et $(\partial^2 L_v / \partial k^2) < 0$, $(\partial^2 L_v / \partial C^2) < 0$, soit :

$$\frac{\partial(\log L)}{\partial C} = -\frac{k}{C} N + \frac{k}{C} \sum_{i=1}^N \left[\frac{V_i}{C} \right]^k = 0 \quad 2.17$$

d'où :

$$C^k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^k \quad 2.18$$

Par ailleurs :

$$\frac{\partial(\log L)}{\partial k} = \frac{N}{k} - N \log C + \sum_{i=1}^N \log V_i - \frac{\sum_{i=1}^N V_i^k \log V_i}{C^k} + \frac{\sum_{i=1}^N V_i^k \log C}{C^k} = 0 \quad 2.19$$

En utilisant 2.19, il vient :

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^k - \frac{\sum_{i=1}^N V_i^k \log V_i}{C^k} = 0 \quad 2.20$$

D'où :

$$\frac{1}{k} = \left(\frac{1}{C^k} \sum_{i=1}^N V_i^k \log V_i - \sum_{i=1}^N \log V_i \right) * \frac{1}{N} \quad 2.21$$

N étant le nombre total d'observations non nulles. Le système (2.15-2.21) est résolu par itérations successives en utilisant une méthode d'optimisation, (Méthode Lvenberg-Marquart sous MatLab, [32]).

Chapitre 2 : Modélisation

2.2.4 Variation des paramètres des Weibull

Les paramètres k et C de Weibull caractérisent la distribution des vents tant au sens qualitatif que quantitatif. [32]

2.2.4.1 Profil de vent et ses caractéristiques

A des altitudes élevées, soit environ un à deux kilomètres au-dessus du sol, l'influence de la surface de la terre sur l'écoulement du vent est pratiquement nulle. Par contre, dans les couches d'air plus basses, la friction contre la surface du terrain influe beaucoup sur la vitesse du vent.

Les facteurs influents sont la rugosité du terrain, l'influence exercée par les obstacles avoisinants et les contours du paysage et l'orographie d'un paysage. En règle générale, une rugosité forte diminue considérablement la vitesse du vent près du sol. Ainsi, les forêts et les grandes villes freinent beaucoup le vent, tandis qu'une piste d'atterrissage en béton n'influe que peu sur la vitesse du vent.

Le tableau (2.2) présente quelques valeurs du paramètre de rugosité z_0 correspondant à différents types de surface. [33]

Tableau (2.2) : Exemples d'ordre de grandeur de la rugosité z_0 . [33]

Surface	Glace	Eau	Pelouse	Prairie	Blé	Mais	Foret	Ville
z_0 (m)	10^{-5}	$4 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	$6 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$ à 2	2 à 5

Le profil de vent est logarithmique (droite sur la figure (2.1) en échelle semi logarithmique) au-dessus de la couche de rugosité (qui a pour limite inférieure la hauteur h du couvert). La hauteur de rugosité est la hauteur au-dessus de (d) pour laquelle la vitesse du vent serait nulle si le profil est logarithmique même dans le couvert (profil dessiné en pointillés dans la figure (2.1) ci-dessous).

La hauteur est représentée en échelle logarithmique et la vitesse du vent est normalisée par la vitesse au sommet du couvert. La hauteur de déplacement (d) et la rugosité z_0 apparaissent.

Le profil de vent en conditions de neutralité thermique peut s'écrire sous la forme Suivante :

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \quad 2.22$$

Où u^* est la vitesse de frottement, k la constante de Von-Karman (= 0,41), z_0 la longueur de rugosité et d la hauteur de déplacement.

Les trois paramètres d'ajustement du profil logarithmique sur le profil de vent mesuré sont donc u^* , d et z_0 . On parle de hauteur de déplacement lorsque le sol est recouvert par une végétation dense de hauteur H , alors, le niveau du sol se trouve surélevé d'une hauteur $d < H$ appelée hauteur de déplacement. [33]

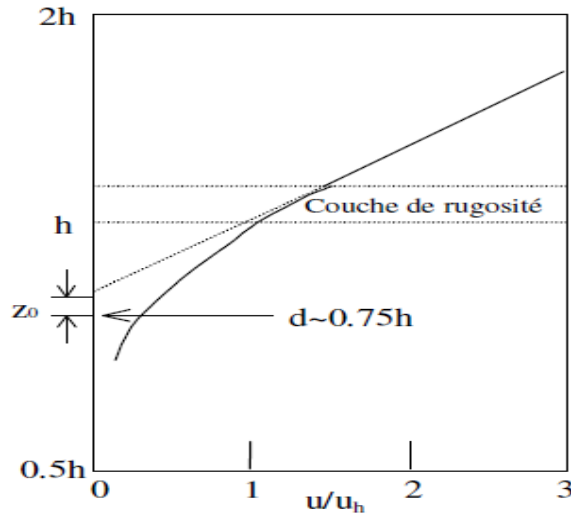


Figure (2.1) : Profil de vent moyen au-dessus d'un couvert de hauteur [33].

2.2.5 Extrapolation verticale des paramètres du vent

2.2.5.1 Modèle d'extrapolation de Justus et Mikhaïl [34]

Le modèle de Justus et Mikhaïl a été proposé en 1976, pour une référence d'altitude initiale égale à 10m, les formules d'extrapolation suivantes :

$$\frac{k_2}{k_1} = \left[\frac{1 - 0.0881 \cdot \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)}{1 - 0.0881 \cdot \ln\left(\frac{z_2}{10}\right)} \right] \quad 2.23$$

$$\frac{C_2}{C_1} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^m \quad 2.24$$

Avec :

$$m = \left[\frac{0.37 - 0.0881 \cdot \ln(C_1)}{1 - 0.0881 \cdot \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)} \right] \quad 2.25$$

2.2.5.2 Modèle modifié d'extrapolation de Justus, [34]

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

$$\frac{k_2}{k_1} = \left[\frac{1}{1 - 0.0881 \cdot \ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)} \right] \quad 2.26$$

$$\frac{C_2}{C_1} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^m \quad 2.27$$

Avec :

$$m = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_g}{z_0}\right)} - 0.00881 \cdot \ln\left(\frac{C_1}{6}\right). \quad 2.28$$

Et :

$$zg = \sqrt{z_1 * z_2}.$$

2.29

2.3 Principe de fonctionnement de l'aérogénérateur

En figure (2.2) est présenté le schéma d'un aérogénérateur [35]. Le vent fait tourner l'hélice. Les pales transfèrent cette puissance au rotor, le moyeu du rotor est fixé à l'arbre lent de l'éolienne.

Un multiplicateur permet de passer de l'arbre lent à un arbre rapide (vitesse de rotation forte). Cet arbre rapide entraîne une génératrice électrique (souvent asynchrone en éolien). L'énergie électrique est alors transférée vers le réseau à l'aide d'un transformateur (en courant alternatif) puis stockée dans des batteries (en courant continu). L'éolienne est également équipée d'une girouette permettant l'orientation des pales en fonction de la direction du vent. Elle doit être également fixée solidement au sol [32].

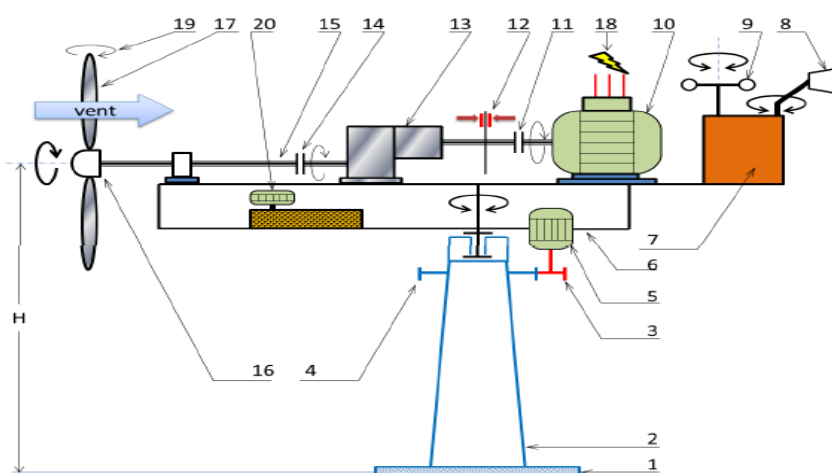


Figure (2.2). : Schéma d'un aérogénérateur [35]

Tableau (3.3) : Tableau défini le schéma d'un aérogénérateur [35]

Repère	Désignation	Repère	Désignation
1	Fondation	11	Accouplement à haute fréquence de rotation
2	Tour	12	Frein à disque
3	Pignon d'entraînement de la nacelle	13	Multiplicateur de vitesse
4	Roue dentée liée à la tour	14	Accouplement à basse fréquence de rotation
5	Moteur d'orientation de la nacelle	15	Arbre lent
6	Nacelle orientable	16	Moyeu du rotor à 3 pales
7	Unité centrale	17	Pale à pas variable
8	Girouette	18	Réseau électrique
9	Anémomètre	19	Système de régulation du pas des pales
10	Générateur	20	Groupe hydraulique

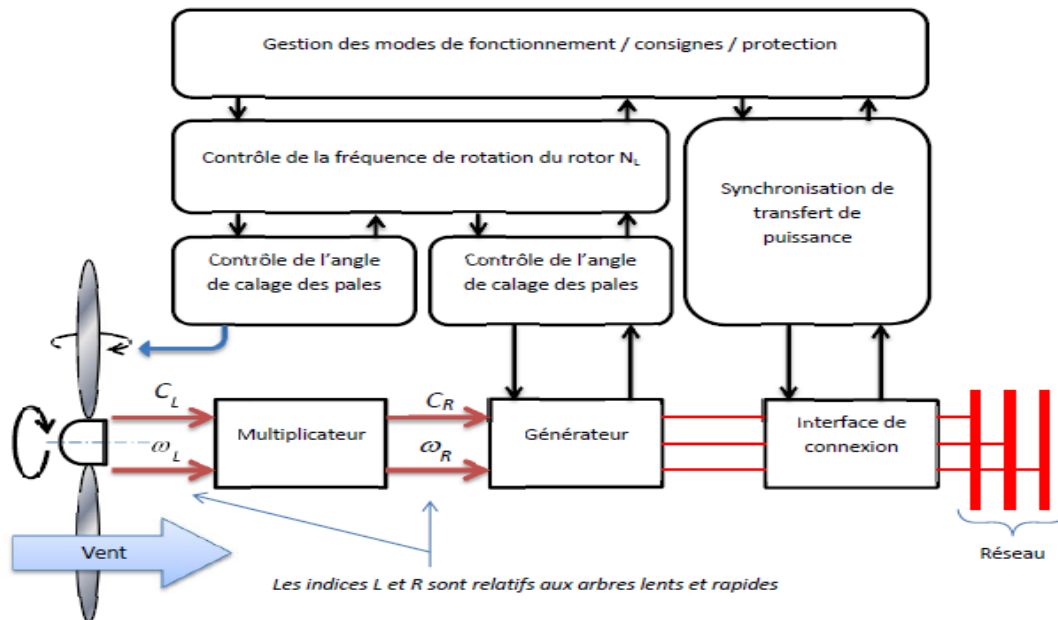


Figure (2.3) : Structure générale de la transmission de puissance d'une éolienne [35]

Les conditions de fonctionnement d'un aérogénérateur dépendent essentiellement des conditions de vent sur les quelles aucune action n'est possible. La courbe de puissance donnée par le constructeur optimise la plage d'exploitation de l'éolienne en fonction de puissance nette transmise au réseau. On définit ainsi :

- VD: (vitesse de démarrage) vitesse du vent correspondant au démarrage du rotor.
- VN: (vitesse nominale) vitesse minimale du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale P_n du générateur.
- VC: (vitesse de coupure) celle du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de sécurité du matériel. [35].

2.4 Potentiel énergétique éolien

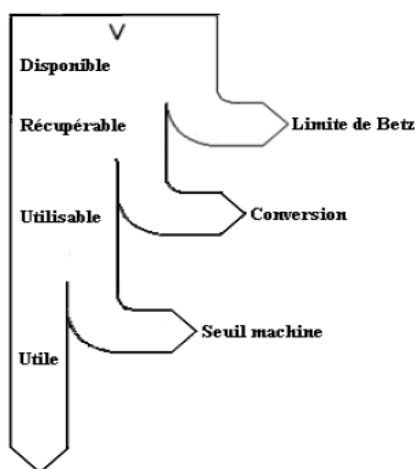


Figure (2.4): Représentation schématique des dégradations successives de l'énergie éolienne avant utilisation [31].

2.4.1 Puissance disponible :

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} \rho \langle V^3 \rangle \quad 2.30$$

Où ρ est la masse volumique de l'air égale en moyenne à (1.25 kg/m^3) et $\langle V^3 \rangle$ la vitesse cubique moyenne du vent.

La vitesse cubique moyenne se met sous la forme :

$$\langle V^3 \rangle = C^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \quad 2.31$$

C : Facteur d'échelle (m/s)

k : Facteur de forme (sans unité)

Γ : Fonction gamma $\Gamma(x)$

2.4.2 Energie électrique produit par un aérogénérateur

2.4.2.1 Puissance maximale (Formule de Betz)

L'énergie récupérable est inférieure à l'énergie cinétique de l'air situé en amont de l'éolienne, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement. Albert Betz a démontré que la puissance maximale récupérable est égale aux 16/27 de la puissance incidente. [29]

La puissance maximale théorique d'une éolienne est ainsi fixée à :

$$P_{\max} = \frac{16}{27} * \frac{1}{2} * \rho * s * V^3 \quad 2.32$$

$$P_{\max} = \frac{8}{27} * \rho * s * V^3 \quad 2.33$$

Formule dans laquelle :

P = puissance exprimé en watts (W)

S = surface balayée par les pales exprimée en mètres carrés (m²)

V = vitesse du vent en mètres par seconde (m/s)

Cette puissance maximale est ensuite affectée du coefficient de performance propre au type et au modèle d'éolienne et au site d'installation. Ce coefficient est en général compris entre 0,20 et 0,70. [29]

2.4.2.2 Puissance éolienne moyenne utilisable

Etant donné que :

- la vitesse du vent est variable et que chaque machine éolienne est caractérisée par la vitesse de démarrage V_1 , une vitesse nominale V_n et une vitesse d'arrêt V_s spécifiques, la puissance éolienne utilisable est donnée par [29] :

$$\langle P_u \rangle = \frac{1}{2} \rho A \langle V_u^3 \rangle \quad 2.34$$

La vitesse V_u est déduite de la courbe représentative de la distribution de Weibull entre les limites de la machine. La limite inférieure est représentée par la vitesse de démarrage.

En effet, seules les vitesses du vent supérieures à la vitesse démarrage V_i sont Considérées dans le calcul.

En second lieu, lorsque la vitesse nominale V_n est atteinte, l'augmentation de la vitesse du vent n'a aucun effet sur le régime de la roue.

Enfin, lorsque la vitesse d'arrêt V_s est atteinte, le système est stoppé et les vitesses qui lui sont supérieures n'interviennent pas pour le calcul de V_u La densité de puissance utilisable est donnée par [29] :

$$\langle P_u \rangle = \begin{cases} 0 & \text{pour } V < V_i \\ \frac{1}{2} \rho < V^3 \rangle & \text{pour } V \leq V_i \leq V_n \\ \frac{1}{2} \rho < V_n^3 \rangle & \text{pour } V_n \leq V \leq V_s \\ 0 & \text{pour } V_n \geq V_s \end{cases} \quad 2.35$$

La vitesse cubique utilisable moyenne est donnée par intégration de la vitesse cubique pondérée par de la fonction de probabilité en considérant comme bornes d'intégration les limites imposées par la machine, à savoir [29]:

$$\langle V_u \rangle = \int_{V_1}^{V_n} f(V) V^3 dV + V_n^3 \int_{V_n}^{V_s} f(V) dV. \quad 2.36$$

Soit, après intégration et en utilisant la fonction gamma normalisée

$$\langle \overline{V_u^3} \rangle = \left[\Gamma_n \left(\left(\frac{V_n}{c} \right)^k \cdot 1 + \frac{3}{k} \right) - \Gamma_n \left(\left(\frac{V_i}{c} \right)^k \cdot 1 + \frac{3}{k} \right) \right] \overline{V^3} + \left[\exp \left(- \left(\frac{V_n}{c} \right)^k \right) - \exp \left(- \left(\frac{V_s}{c} \right)^k \right) \right] \quad 2.37$$

Avec :

$$\Gamma_n(x, a) = \Gamma(x, a) / \Gamma(x) \quad 2.38$$

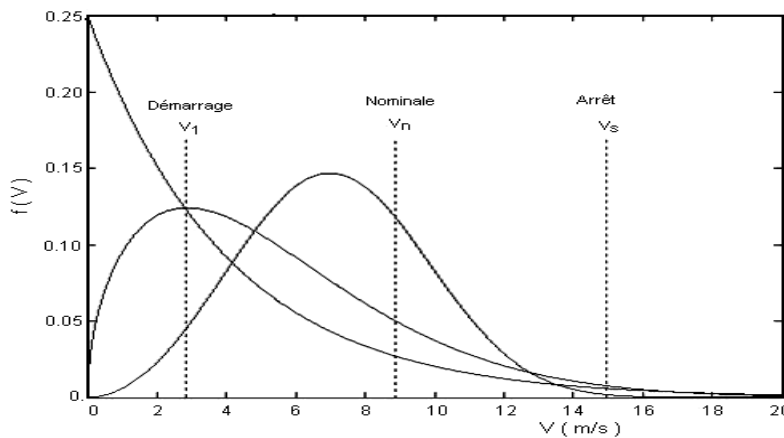


Figure (2.5) : Distributions de vitesses de vent et limites des vitesses .Caractéristiques d'une machine quelconque (démarrage, nominale et arrêt) [31].

Chapitre 2 : Modélisation

2.5 Zones de fonctionnement de l'éolienne

Compte tenu des informations précédentes, la courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, qui permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent. [36]

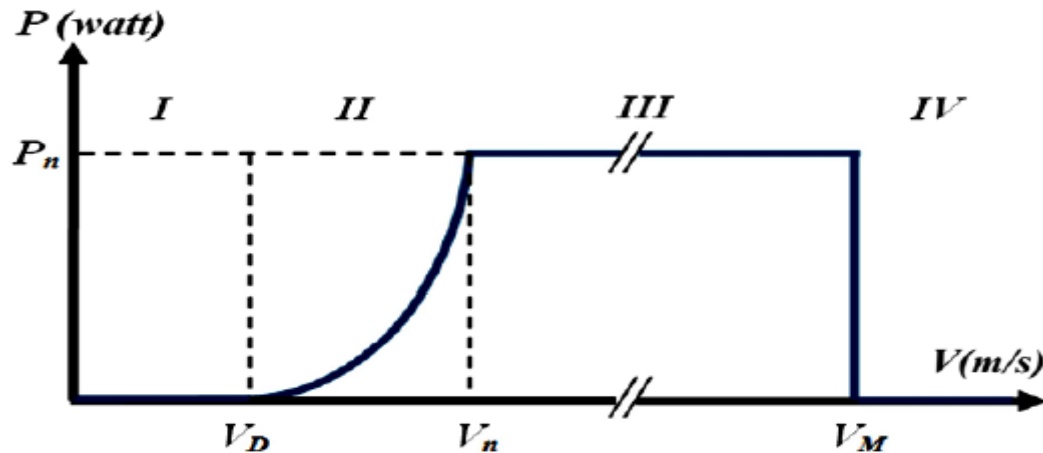


Figure (2.6) : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.[36]

V_D : La vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine selon les constructeurs, elle varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

V_n : La vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice.

V_M : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, V_M vaut 25m/s. [37]

Zone I : $V < V_D$: La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

Zone II : $V_D < V < V_n$: Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite.

Zone III : $V_n < V < V_M$: La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine (P_n). Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge [38].

2.5.1 Puissance éolienne moyenne utile :

La puissance éolienne moyenne réellement utile s'écrit [29] :

$$\langle P_e \rangle = \eta \langle P_u \rangle \quad 2.39$$

Chapitre 2 : Modélisation

Où η représente le rendement de la machine.

Ce dernier représente le rapport entre la puissance nominale donnée par le constructeur et la puissance électrique théorique calculée pour une vitesse du vent constante égale à la vitesse nominale. Soit [29] :

$$\eta = \frac{\langle P_n \rangle}{\langle P_{\text{theorique}} \rangle} \quad 2.40$$

Avec :

$$P_{\text{theorique}} = \frac{1}{2} * \rho * A * \langle V_n^3 \rangle. \quad 2.41$$

Les systèmes de conversion de l'énergie éolienne sont utilisés au maximum de leurs performances si leur choix est effectué, correctement, en fonction des paramètres du site d'implantation.

2.6 Estimation du débit pompé :

L'énergie sortante du générateur alimente directement une pompe centrifuge qui prélève un débit désiré en fonction de la hauteur manométrique des puits et la puissance électrique sortante de l'aérogénérateur utilisé

En considérant un système de pompage éolien de rendement global η_i et de hauteur manométrique totale H_t , le débit d'eau pompé est donné par [31]:

$$Q = \frac{\eta_i \langle P_e \rangle}{\bar{\rho} g H_t} \quad 2.42$$

Le débit journalier sera égal à [31]:

$$Q_d = 3600 * 24 * \frac{\eta_i \langle P_e \rangle}{\bar{\rho} g H_t} \quad 2.43$$

H_t est la hauteur manométrique totale, g l'accélération de la pesanteur, ρ la masse volumique de l'eau, η rendement global du système, et P_e la puissance utile fournie par l'aérogénérateur.

2.7 Conclusion :

L'énergie éolienne moyenne disponible sur un site donné par unité de temps et par unité de surface de la roue d'une éolienne s'écrit en fonction de la masse volumique de l'air et la vitesse cubique moyenne du vent. La détermination de cette dernière se fait à partir d'étude statistique en utilisant la distribution de Weibull. La méthode de vraisemblance présentée permet de déterminer les facteurs k et c après avoir calculer la vitesse moyenne. Et déduire le potentiel énergétique de ce site en commençant par calculer la puissance disponible puis déterminer la puissance

Chapitre 2 : Modélisation

recupérable en fonction de la limite de Betz. Ensuite calculer la Vitesse utile en fonction des caractéristiques de la machine (Vitesse de démarrage vitesse nominale et vitesse d'arrêt) à fin de déduire la Puissance utile.

Enfin pour trouver la Puissance utilisable il faut multiplier la Puissance Récupérable par le rendement de la machine. Cette énergie alimente directement la pompe centrifuge intégrée dans le système pour pomper l'eau de la nappe albien.

On note également que la rugosité du terrain et l'influence des obstacles avoisinants et le contour du paysage, en générale une forte rugosité diminue considérablement la vitesse du vent près du sol.

CHAPITRE 3

SIMULATION ET APPLICTION

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter le programme développé pour l'estimation du débit pompé par chaque aérogénérateur afin de connaître l'aérogénérateur adéquat pour ce site.

La deuxième partie portera sur la localisation du site étudié et l'estimation des caractéristiques du vent à partir des données de vent fournies par la station météorologique. Les paramètres de Weibull et le potentiel énergétique du site sont estimés. Des aérogénérateurs de différentes puissances nominales ont été utilisés dans cette étude.

3.2 Simulation

3.2.1 Traitement des données de mesure

Les fichiers obtenus en format txt comportent la vitesse du vent et sa direction moyennée sur une période de trois heures. Un programme a été développé sous MatLab pour la lecture des fichiers ou une identification des colonnes de données de mesure est effectuée pour procéder au calcul soit des vitesses soit des paramètres de Weibull.

3.2.2 Organigramme de calcul

L'environnement MatLab permet la programmation orienté objet par la création d'un affichage d'un menu de choix. Une fois le choix porté, un menu permet le choix du modèle pour le calcul des paramètres de Weibull.

Ces valeurs calculées successivement sont utilisées pour le calcul des écarts relatifs par rapport à la hauteur de référence de 10 m. Les résultats obtenus sont représentés sous forme graphique par le tracé de la distribution.

Les paramètres de Weibull (C et k) sont estimés par la méthode de vraisemblances (2.21) présentée au chapitre 2. Le calcul de la vitesse moyenne et du potentiel éolien disponible se fait à travers un menu permettant l'affichage ou non des résultats du l'écart relatif des paramètres de Weibull.

Par ailleurs le programme permet le calcul des débits soutirés des forages en fonction de la puissance électrique et la hauteur manométrique à travers un menu qui contient 3 aérogénérateurs commercialisés.

En figure (3.1) est donné l'organigramme du programme développé.

Chapitre 3 : Simulation et Application

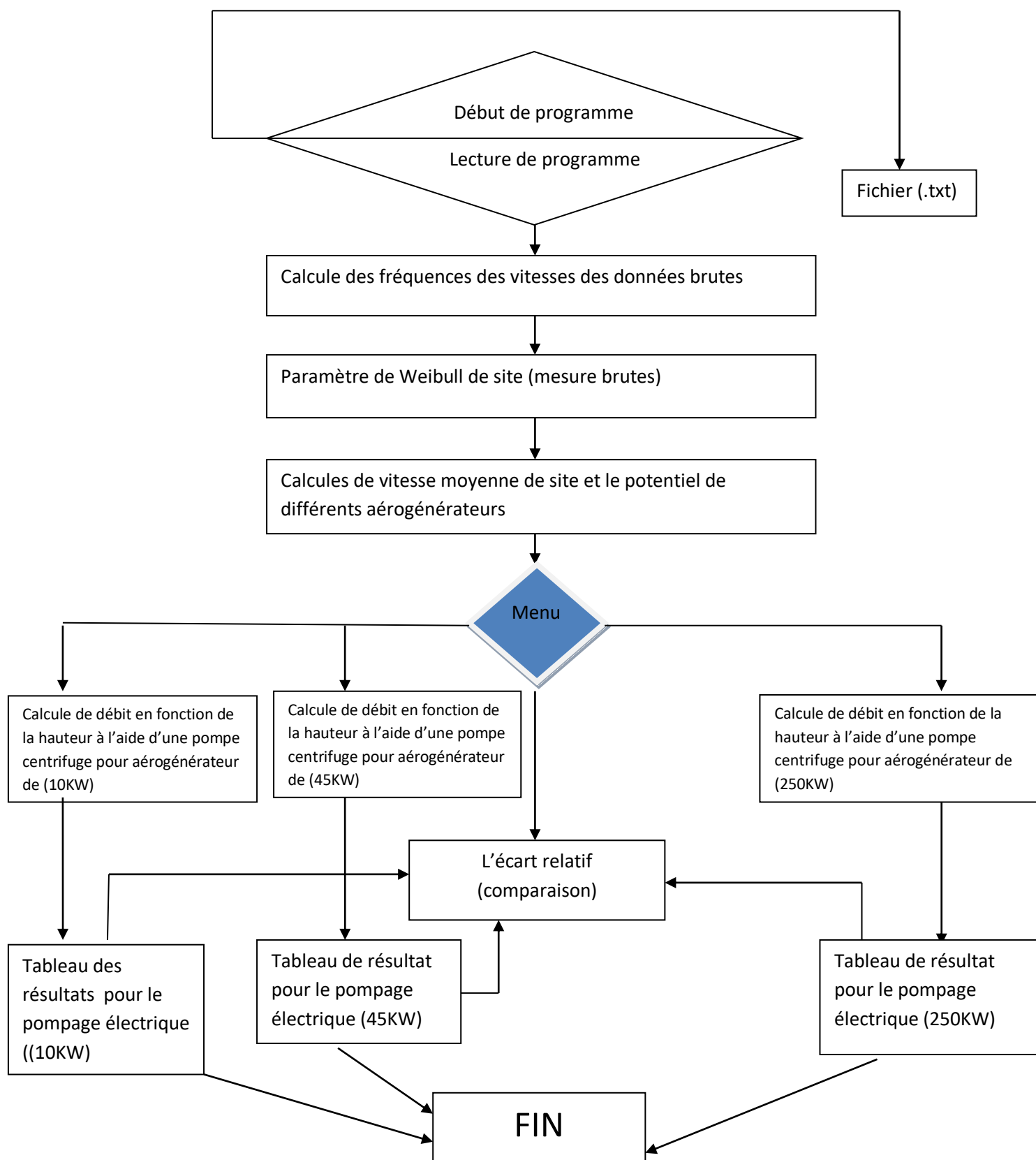


Figure (3.1) : Organigramme de programme développé sous MatLab

3.3 Site Etudié

3.3.1 Présentation du site Etudié

En plein cœur du Sahara algérien, la wilaya d'Adrar est située au sud-ouest du pays à plus de 1200 km d'Alger, [39]

La wilaya d'Adrar a une superficie totale est de 427 368 Km². Soit environ 18 % de la superficie globale de l'Algérie, près d'un cinquième du territoire national. Issue du dernier découpage administratif de 1974, la wilaya d'Adrar est composée de 11 daïras et 28 communes, et 294 ksars. [40]. (Tableau 3.1).

La wilaya est découpée en quatre régions du Nord au Sud comme montré en figure (3.2). [39]

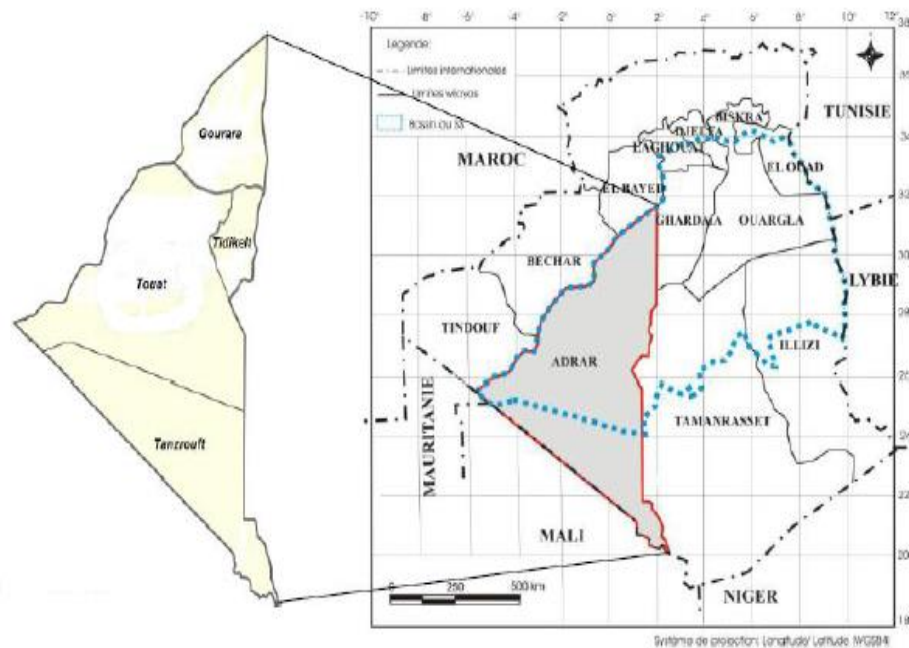


Figure (3.2) : Situation géographique de la zone étude [40]

Tableau (3.1) : Carte d'identité du site [40]

Rugosité (m)	0.01
Composé de	11 daïras et 28 communes, et 294 ksars
Habitant (2011)	1,01 hab. / km ² .

3.3.2 Choix de site

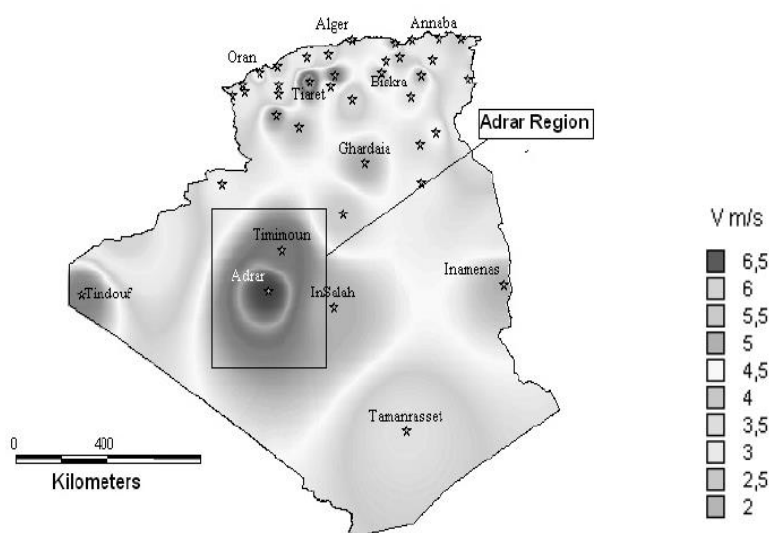
L'étude de faisabilité porte sur un site situé au sud de l'Algérie, dont le climat chaud et sec en été et très froid en hiver est caractérisé par des longues périodes de sécheresse et des précipitations irrégulières qui accroissent les besoins en eau et par un potentiel énergétique éolien intéressant.

Ce site est la région d'Adrar où il correspond à l'emplacement de la station de mesure du réseau de l'Office National de Météorologie.

Cependant, pour qu'une telle installation soit performante, la vitesse moyenne du vent doit être supérieure à 4 m/s. Pour les installations de grandes puissances, les vitesses du vent moyennes doivent être supérieures à 6 m/s, la hauteur de référence étant de 10 mètres. [41]

Selon le premier Atlas Vent de l'Algérie établi par N. Kasbadji en 2000, [42], les vitesses les plus élevées sont de l'ordre de 6 m/s et sont localisées dans la région d'Adrar (figure 3.3). Ces résultats, ont été obtenus à partir d'un traitement statistique des données de vent couvrant jusqu'à 10 années de mesures. Les données ont été mesurées périodiquement toutes les 3 heures régulièrement à une hauteur de 10 mètres au-dessus du sol.

La majorité de cette partie du Sahara possède une ressource importante en eau souterraine, à savoir la nappe Albienne qui affleure dans certaines régions. En effet, la carte des ressources en eau de Septentrional Sahara représentant le toit du réservoir, les couches perméables incluent un secteur entier qui s'étend d'Adrar à In Amenas tout en passant par In Salah, [43] (figure 3.4).



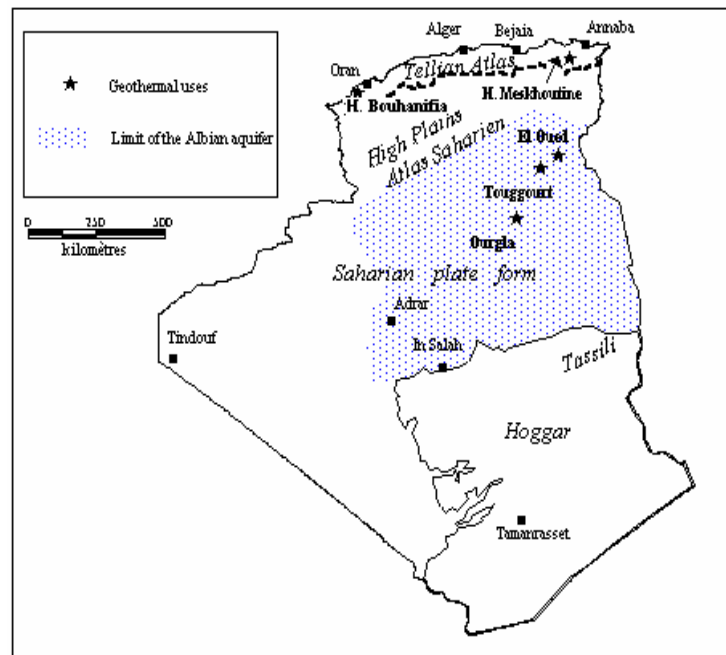


Figure (3.4) : Représentation de la nappe albienne [43]

Il faut savoir que les réserves en eau potable du Sahara sont estimées, selon de récentes études, à 40.000 milliards de m³. Il existait dans le Sahara deux sortes de gisements d'eau : un «albien terminal » et un «albien intercalaire ». L'albien terminal qui se trouve entièrement dans les régions de Tidikelt, El-Menéa, Adrar et Ghardaïa, contient des eaux pures qui se trouvent à de petites profondeurs de la surface [41].

3.4 Les données du vent

Les données de la vitesse du vent ont été fournies par la station météorologique Adrar située à la latitude 27 ° 40 'de latitude nord et 8 ° 06 de longitude ouest et 263 mètres d'altitude au-dessus de la mer. Les données ont été mesurées périodiquement toutes les 3 heures régulièrement à une hauteur de 10 mètres au-dessus du sol et pendant la période entre 1995 et 1999. La fonction de probabilité de Weibull est utilisée pour estimer le climat éolien régional de la région d'Adrar.

3.5 Choix de l'aérogénérateur

Les données fournies par l'institut hydraulique en 2000 [40], montrent que selon les besoins locaux, les débits soutirés des forages varient énormément d'un site à l'autre. Pour répondre à ces besoins, trois aérogénérateurs commercialisés [47], de 10 kW, 45kW et 250 kW, ont été choisis pour l'étude de faisabilité du pompage électrique [50]. Le rendement global du système pompe - génératrice a été supposé égal à 55 %, soit au niveau des caractéristiques moyennes des équipements du commerce. [45]

Si dessous les fiche technique de chaque aérogénérateur utilisé (Tableaux 3.2 ; 3.3 ; 3.4).

Chapitre 3 : Simulation et Application

Tableau (3.2) : Caractéristiques des aérogénérateurs BERGEY BWC EXCEL [48]

TYPE DE ROTOR	BW-7 AIRFOIL
DIAMETRE	7.0 M
SURFACE BALAYE	38.5 M ²
NOMBRE DE PALES	3
HAUTEUR DE NOYAU	30 M
PUISSANCE NOMINALE	10
VITESSE DE DEMARRAGE	3.4 M/S
VITESSE NOMINALE	15.6 M/S
VITESSE D'ARRET	22 M/S
DENSITE DE PUISSANCE	259.7 W/M ²
TYPE DE L'AEROGENERATEUR	PERMANENT SYNCHRONE
CONNECTIONS AU RESEAU	IGBT
FREQUENCE	50 HZ
ON-SHORE	YES

TABLEAU (3.3) : CARACTERISTIQUES DES AEROGENERATEURS SUDWIND N1245 [48]

DIAMETRE	12.5 M
SURFACE BALAYE	122.7 M ²
NOMBRE DE PALES	3
VITESSE DE ROTOR MAXIMALE	89.0 U/MIN
HAUTEUR DE NOYAU	18.5/30.5/36.5 M
PUISSANCE NOMINALE	45.0 kW
VITESSE DE DEMARRAGE	3.0 M/S
VITESSE NOMINALE	12.0 M/S
VITESSE D'ARRET	22 M/S
DENSITE DE PUISSANCE	366.7 W/M ²
TYPE DE L'AEROGENERATEUR	SYNCHRONE
CONNECTIONS AU RESEAU	THYRISTORS
FREQUENCE	50 HZ
ON-SHORE	YES

TABLEAU (3.4) : CARACTERISTIQUES DES AEROGENERATEURS NORDEX N29 [48]

TYPE DE ROTOR	LM 13.4
DIAMETRE	29.7 M
SURFACE BALAYE	692.7 M ²
NOMBRE DE PALES	3
HAUTEUR DE NOYAU	36/40/50 M
PUISSANCE NOMINALE	250.0 kW
VITESSE DE DEMARRAGE	3.0 M/S
VITESSE NOMINALE	15.0 M/S
VITESSE D'ARRET	22 M/S
DENSITE DE PUISSANCE	360.9 W/M ²
TYPE DE L'AEROGENERATEUR	ASYNCHRONE
CONNECTIONS AU RESEAU	THYRISTOR
FREQUENCE	50 HZ
ON-SHORE	YES

3.6 Sondages de recherches hydrauliques :

La plupart des forages dans la zone étudiée sont des forages agricoles et d'alimentation en eau potable. Ces forages ont été réalisés par ANRH d'Adrar. La profondeur de ces forages est comprise entre (40 à 200 m), avec une lithologie généralement du type : Grès, argile, gravier, Grès quartzitique, calcaire, argile sableuse, [40].

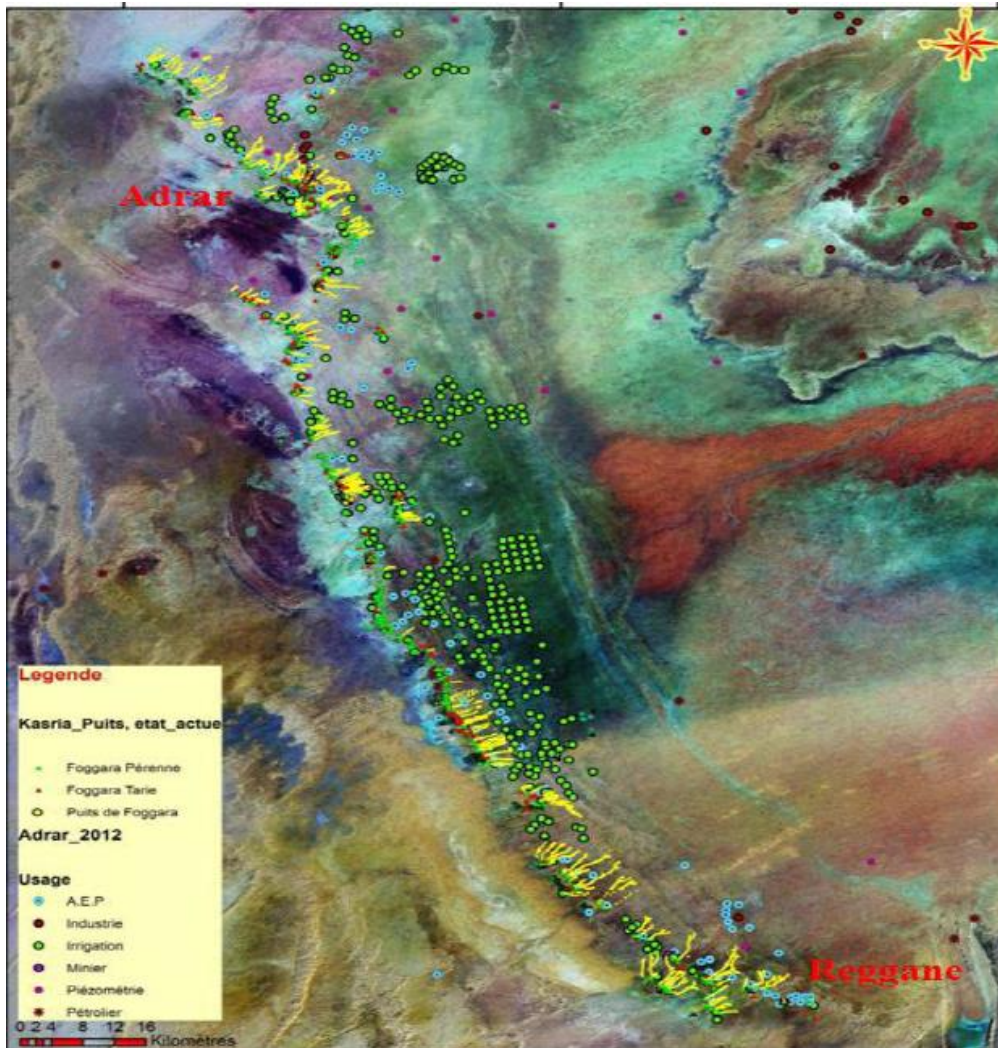


Figure (3.5) : positionnement des forages de la zone d'étude, sur Image satellite (benhamza 2013) [40]

3.7 Application :

Pour la simulation des débits journaliers fournis par le système, une estimation du rendement global est indispensable.

Le système de pompage par aérogénérateur, est directement connecté à la pompe (sans convertisseur de puissance). La pompe utilisée est une pompe centrifuge à moteur asynchrone qui fonctionne à puissance et vitesse de rotation variable. Ces conditions de fonctionnement font que le rendement global du système varie avec la vitesse du vent et la taille de la pompe [46]. Ainsi, selon des données de constructeur,

Chapitre 3 : Simulation et Application

pour un aérogénérateur de 10kW le rendement optimal est de 39,20% environ. Pour un aérogénérateur de 45kW, le rendement est de l'ordre de 44,10%.et Pour un aérogénérateur de 250 kW est de l'ordre de 53,90%. (Tableau 3.5)

Tableau (3.5) : Représentation des Rendement globale

Aérogénérateurs	BERGEY BWC EXCEL	SUDWIND N1245	NORDEX N29
Rendement globale	39,20%	44,10%.	53,90%.

Le rendement de la machine NORDEX N29 est le plus élevé par rapport aux autres aérogénérateurs utilisés. Ce point sera un facteur très important qui influe directement sur le débit pompé.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre on a pu montrer que la région Adrar représente un bon choix pour l'implantation des éoliens pour le pompage de l'eau au vu la nature des vents et de l'existence de la nappe albien qui affleure dans cette région. La hauteur manométrique du forage réalisé par ANRH d' Adrar varie entre (40(m) à 200(m)). Pour exploiter cette énergie 3 aérogénérateurs avec des puissances nominales et des rendements différents ont été choisis. La puissance électrique sortie de ces 3 aérogénérateurs permet de connaître le débit soutiré par une pompe centrifuge utilisé pour le pompage de l'eau. L'étude est effectuée à l'aide d'un programme développé sous environnement MatLab qui permet la lecture des fichiers, le traitement et l'estimation du débit soutiré par les différent aérogénérateurs et à différent hauteur du forage.

CHAPITRE 4

RESULTAT ET DISCUSSION

4.1 Introduction

Le présent chapitre porte sur la production et la discussion des résultats obtenus à l'aide de la simulation numérique pour déterminer l'aérogénérateur adéquat pour le pompage de l'eau en fonction de différentes hauteurs des puits situés à Adrar.

La première partie est consacrée sur l'étude statistique pour définir les paramètres de Weibull puis la détermination du potentiel énergétique du site âpre savoir déduire les paramètres de Weibull extrapolés selon la hauteur de pylône de chaque aérogénérateur. La deuxième partie porte sur l'estimation du volume d'eau pompé en fonction des hauteurs manométriques pour les 3 aérogénérateurs de différentes puissance nominale.

4.2 Estimation de potentiel énergétique :

4.2.1 La distribution de weibull

L'étude statistique des données mesurées, au niveau de la station métrologique d'Adrar, pour chaque 3 heure pendant cinq ans de 1995 à 1999 a permis de déterminer les coefficients de forme et d'échelle, en utilisant la méthode d'ajustement de la vraisemblance de maximum.

En figure (4.1) est tracée la distribution de Weibull du site d'Adrar. On remarque que la distribution de Weibull convient le site d'Adrar et que la fréquence des faibles vitesses ne dépasse pas les 2%. La courbe de Weibull atteint un maximum pour la fréquence de vitesse de 16.47% à 6m/s puis elle se décroît au fur et à mesure jusqu'à ce qu'elle s'annule à une vitesse maximale de 22 m/s.

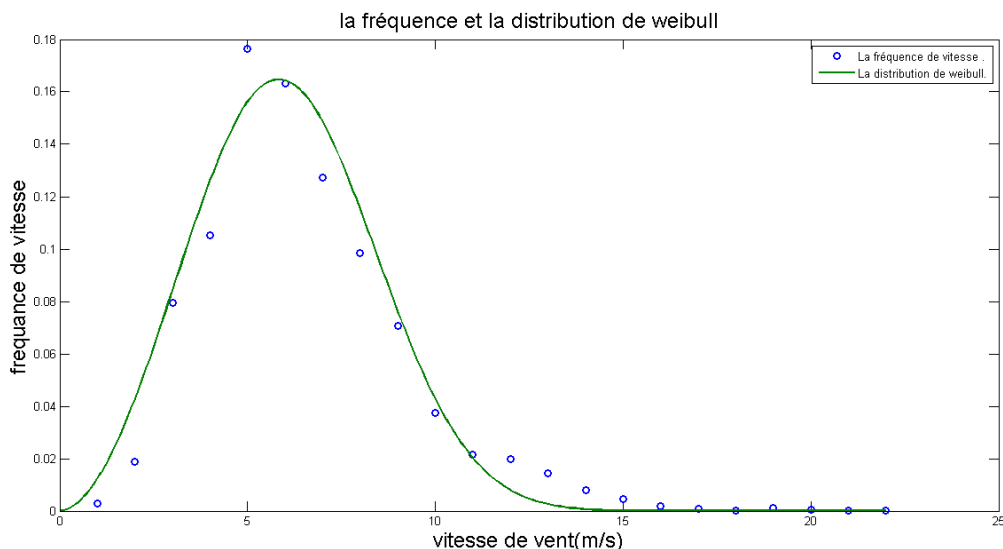


Figure (4.1) : La distribution de weibull Pour hauteur de 10m

Chapitre 4 : Résultat et Discution

Les résultats de l'ajustement par la distribution de Weibull ont permis d'obtenir les paramètres de forme et d'échelle égaux respectivement à 2.83 et 6.80 m/s, à 10 m du sol avec une vitesse moyenne du vent $V_m=6,06$ m/s.

Les paramètres de la distribution de Weibull et les caractéristiques du vent sont présentés au Tableau (4.1). On peut dire qu'Adrar présente un bon site en termes de ressources éolienne.

Tableau (4.1) : Paramètres de la distribution de Weibull et les caractéristiques du vent.

Site	K	C (m/s)	V_m (m/s)	$\langle V^3 \rangle$	σ
Adrar	2.83	6.8	6.06	322.53	5.36

4.2.2 La variation mensuelle de la distribution de weibull :

Il est important d'effectuer une étude à l'échelle mensuelle pour choisir l'aérogénérateur adéquat et voir si la production éolienne peut répondre à la demande durant toute l'année. En figure (4.2) sont présentées les distributions mensuelles de Weibull.

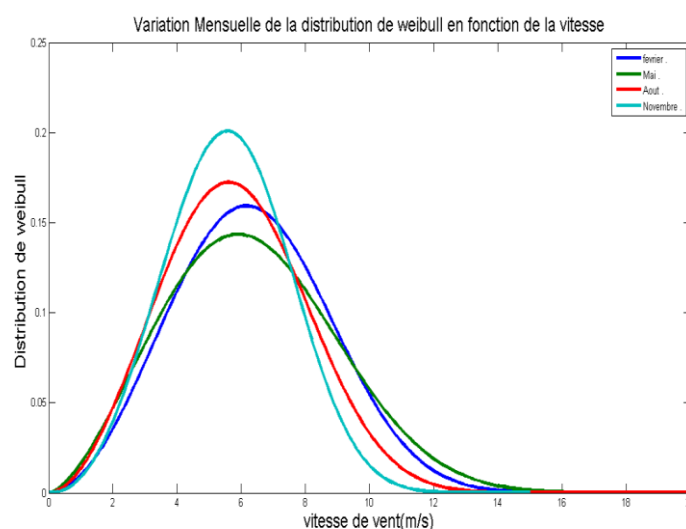


Figure (4.2) : Variation mensuelle de la distribution de weibull en fonction de la vitesse

Le régime du vent représenté en figure (4.2), est appliqué pour quatre mois représentant les saisons de l'année (février, mai, août et novembre).

On remarque qu'il y'a une nette dispersion de distribution des fréquences de la vitesse du vent et que les régimes du vent diffèrent d'un mois à l'autre. Ces derniers pouvant atteindre une vitesse maximale de 15m/s au mois de novembre et 20m/s aux mois de Mai et Aout. Reste que ces vitesses n'atteignent jamais la vitesse d'arrêt des aérogénérateurs choisis qui est estimé à 22m/s.

Chapitre 4 : Résultat et Discution

4.2.3 Variation des vitesses cubiques et les vitesses moyennes au cube :

En figure (4.3) sont présentées les variations des vitesses cubiques et des vitesses moyennes cube.

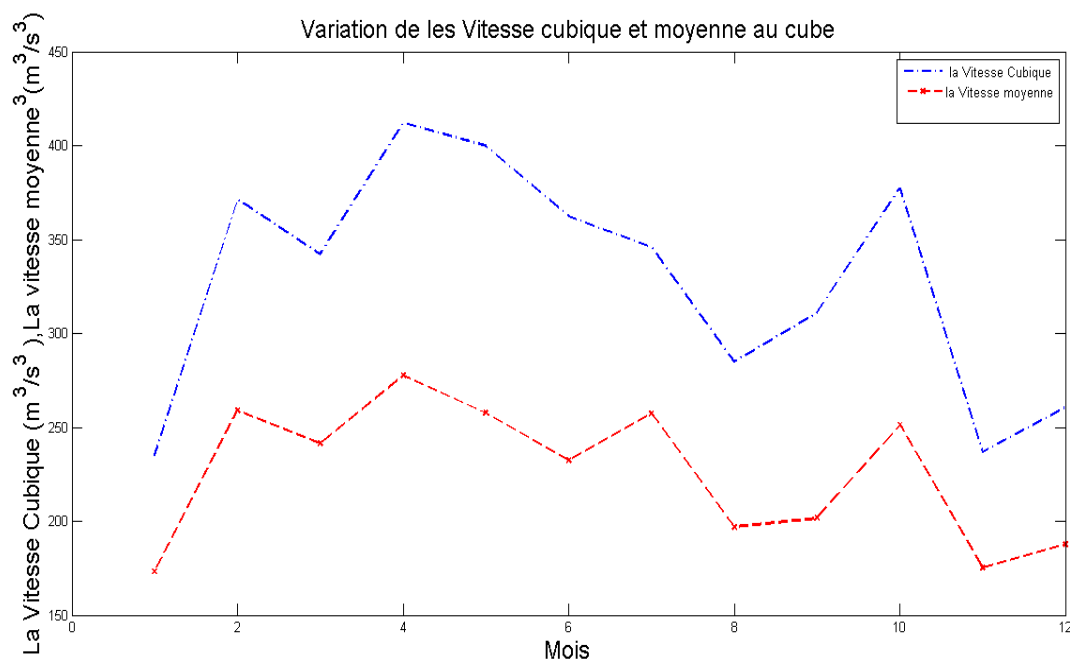


Figure (4.3) : Comparaison entre la vitesse cubique et la vitesse moyenne au cube

On constate que la vitesse cubique moyenne est supérieure à la vitesse moyenne au cube. En effet la vitesse moyenne au cube est calculée à partir du moment d'ordre 1 de la distribution de Weibull.

4.3 Extrapolation verticale du paramètre du vent :

Tableau (4.2) : Paramètres extrapolés des caractéristiques du vents du site d'Adrar.

Aérogénérateurs	Hauteur (m)	K	C (m/s)	Vm (m/s)	$\langle V^3 \rangle (m^3/s^3)$	σ
Aéro1	30	3.14	8.48	7.59	599.06	7.01
Aéro2	36.5	3.20	8.82	7.90	669.55	7.34
Aéro3	50	3.30	9.40	8.43	800.79	7.89

On remarque que les paramètres de Weibull, la vitesse moyenne et la vitesse cubique moyenne augmentent avec l'altitude.

4.3.1 Variation des paramètres de Weibull avec l'altitude(C et k) :

En figures (4.4) et (4.5), sont tracées respectivement les variations des paramètres de Weibull en fonction de l'altitude.

Chapitre 4 : Résultat et Discussion

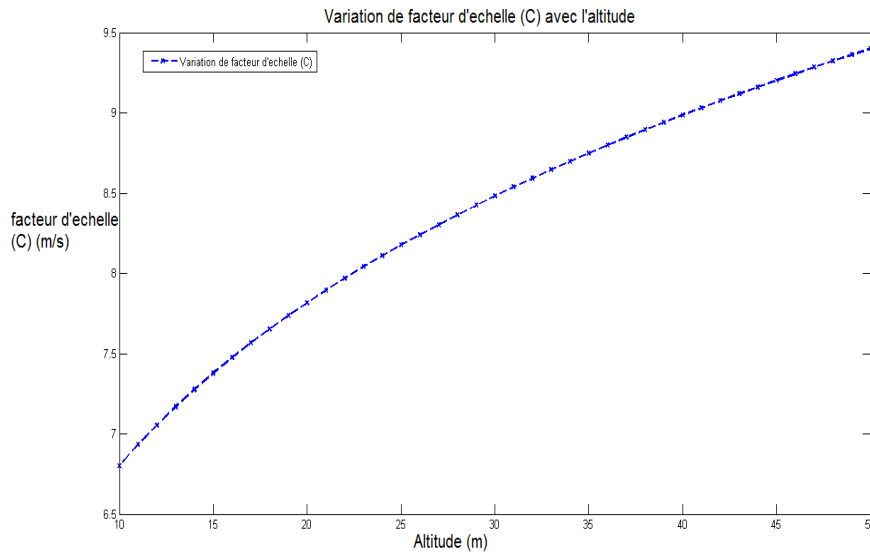


Figure (4.4) : La variation de facteur d'échelle (C) en fonction de l'altitude

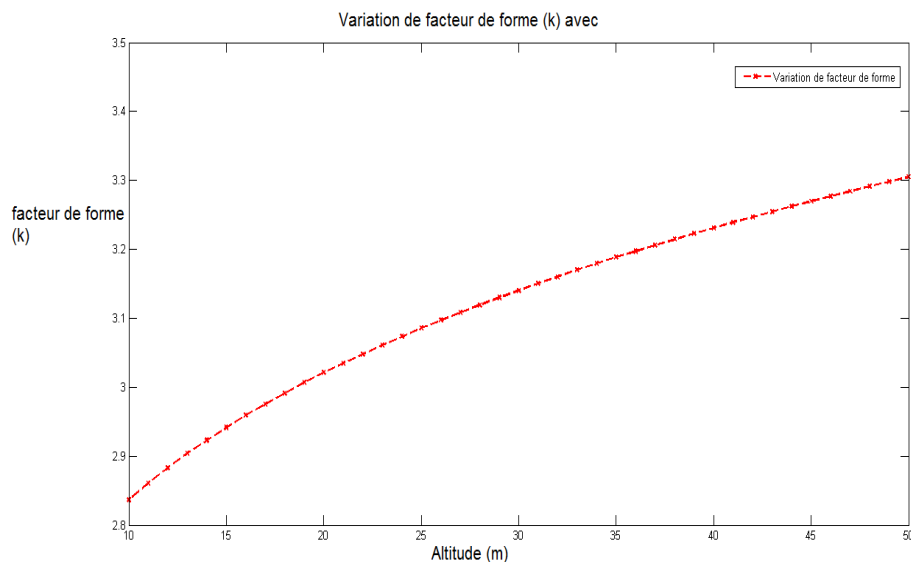


Figure (4.5) : La variation de facteur de forme (k) en fonction de l'altitude

On remarque en figure (4.5), que le facteur de forme k augmente d'une façon directe avec l'augmentation de l'altitude. Il atteint son maximum 3.30 à 50m. Il faut souligner qu'il n'est pas en fonction de la rugosité du sol.

La figure (4.4) indique que le facteur C continue à augmenter avec l'augmentation de l'altitude. Sa valeur maximale est de 9.40 à 50m. La rugosité n'a pas été utilisée lors de l'extrapolation car pour le sable cette dernière influe très peu que la variation de la vitesse.

4.3.2 Variation de la Vitesse moyenne avec l'altitude :

La figure (4.6) représente la variation de la vitesse moyenne avec l'Altitude. On remarque bien que la vitesse moyenne croît proportionnellement avec l'altitude. En fait elle est en fonction des paramètres de Weibull (k et C) qui augmentent directement avec l'altitude.

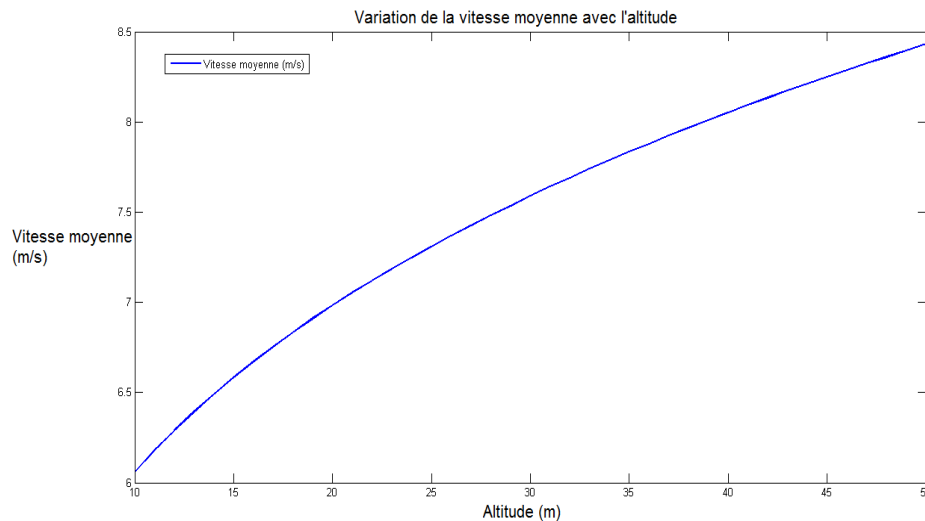


Figure (4.6) : La variation de la vitesse moyenne en fonction de l'altitude

On voit que pour une hauteur maximale de 50m, la vitesse moyenne peut atteindre une vitesse importante de 8.43 m/s.

4.3.3 Comparaison de la distribution de Weibull pour les trois aérogénérateurs

La figure (4.7) représente les distributions de Weibull à différentes hauteurs obtenus à partir de l'extrapolation des paramètres de Weibull estimés à 10 m. Les facteurs de forme k et d'échelle C sont calculés pour chaque hauteur.

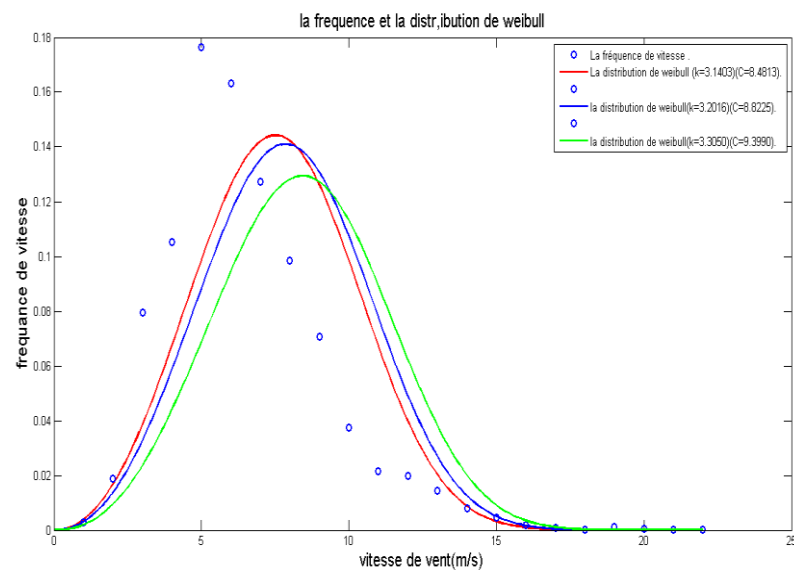


Figure (4.7) : Forme k et d'échelle C sont calculés pour chaque hauteur.

On voit que le régime du vent en fonction des paramètres extrapolés diffère de celui ajusté avec les fréquences mesurées à 10m. On remarque que l'augmentation de l'altitude entraîne l'augmentation des paramètres de Weibull. La fréquence des faibles vitesses du vent diminuent proportionnellement avec l'altitude. Par exemple la fréquence des vitesses inférieures ou égales à 3m/s des altitudes 10m, 30m, 36.5m

Chapitre 4 : Résultat et Discussion

et 50m sont égales respectivement à 8% 3.8% 3.2% 2.3%. Ceci entraîne par exemple une vitesse maximale de 17m/s à la hauteur 50m contrairement aux autres régimes qui s'annulent à une vitesse de 16.3 m/s et 16.7 m/s, mais ça n'empêche que les courbes sont asymptotiques.

4.3.4 Extrapolation mensuelle des paramètres de Weibull

Au tableau (4.3) sont donnés les résultats de l'extrapolation mensuelle des paramètres de Weibull. On remarque que les paramètres diffèrent d'un mois à un autre.

Tableau (4.3) : Extrapolation mensuelle des paramètres de weibull pour différentes hauteurs

Mois	k (10m)	C(10m)	k(30m)	C(30m)	k(36.5)	C(36.5)	K(50m)	C(50m)
Janvier	3.20	6.22	3.54	7.76	3.61	8.16	3.73	8.71
Février	2.89	7.15	3.20	8.87	3.26	9.22	3.37	9.81
Mars	2.95	6.98	3.27	8.68	3.33	9.02	3.44	9.61
Avril	2.73	7.33	3.02	9.08	3.08	9.43	3.18	10.02
Mai	2.56	7.17	2.83	8.89	2.88	9.24	2.98	9.83
Juin	2.54	6.93	2.81	8.62	2.87	8.97	2.96	9.55
Juillet	2.69	7.09	2.97	8.81	3.03	9.16	3.13	9.75
Aout	2.85	6.53	3.16	8.17	3.29	8.51	3.32	9.08
Septembre	2.58	6.60	2.85	8.26	2.91	8.60	3.00	9.16
Octobre	3.26	7.09	3.61	8.81	3.68	9.16	3.80	9.75
Novembre	3.23	6.24	3.58	7.85	3.65	8.18	3.76	8.74
Décembre	3.06	6.41	3.39	8.04	3.46	8.37	3.57	8.93

4.3.5 Variation mensuelle des vitesses moyennes :

La figure (4.8) présente la variation des vitesses moyennes mensuelles pour chaque hauteur en savoir 30m 30.6m et 50m.

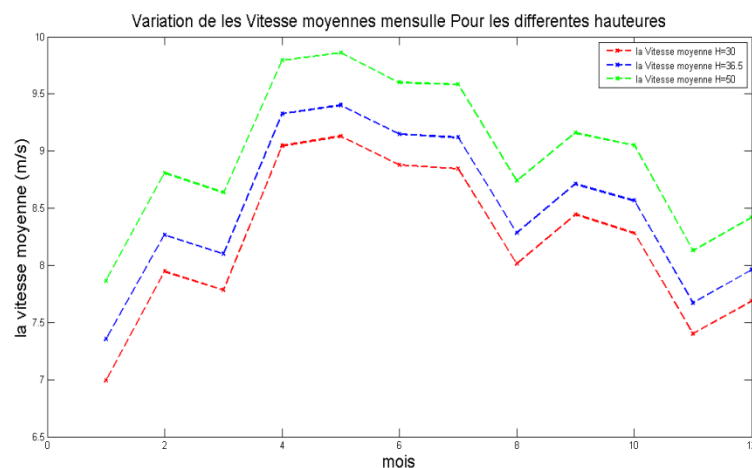


Figure (4.8) : Variation des vitesses moyennes mensuelles pour des différentes hauteurs

On remarque que les courbes sont asymptotiques ou elles augmentent dans les premiers mois jusqu'à ce qu'elles atteignent une vitesse maximale de 9.86 m/s au mois de Mai puis la courbe décroît au fur et à mesure des mois.

On peut dire que la vitesse moyenne du vent est faible en saison hivernale contrairement au printemps ou on trouve un très bon régime du vent avec une vitesse importante. Les vitesses décroissent par la suite dans l'été, augmentent un peu en automne et se décroissent jusqu'à le début du premier mois prochaine.

On voit qu'avec l'augmentation des hauteurs, la vitesse moyenne augmente aussi.

4.3.6 Puissance disponible et Récupérable

La puissance disponible et récupérable données en (formule (2.30) (2.33)) ont été estimées pour les 3 Aérogénérateurs utilisés, à savoir 10 kW, 45kW et 250 kW, [50] à l'aide d'un programme développé sous environnement Matlab. Les figures (4.9), (4.10), (4.11) représentent les puissances énergétiques éoliennes disponibles et récupérables pour les trois aérogénérateurs.

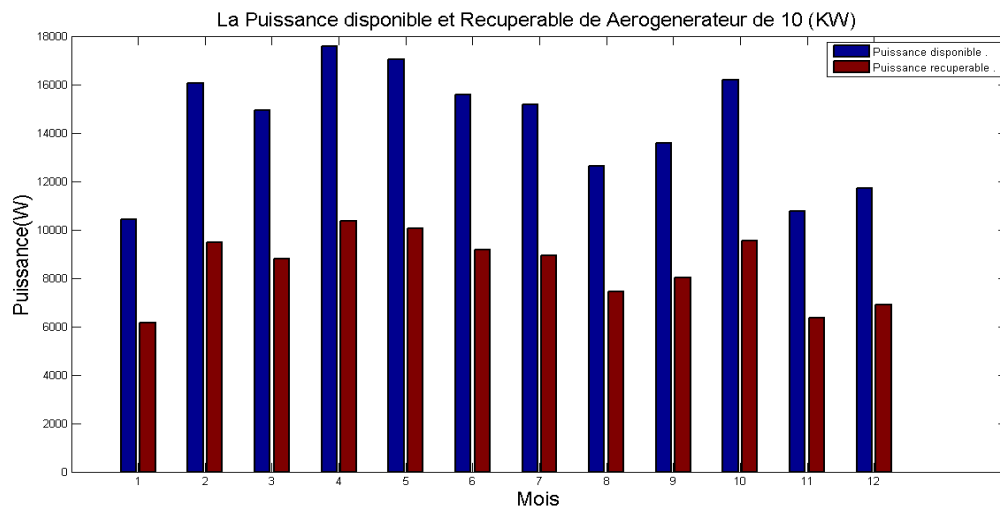


Figure (4.9) : La Puissance disponible et récupérable pour aérogénérateur de 10kW

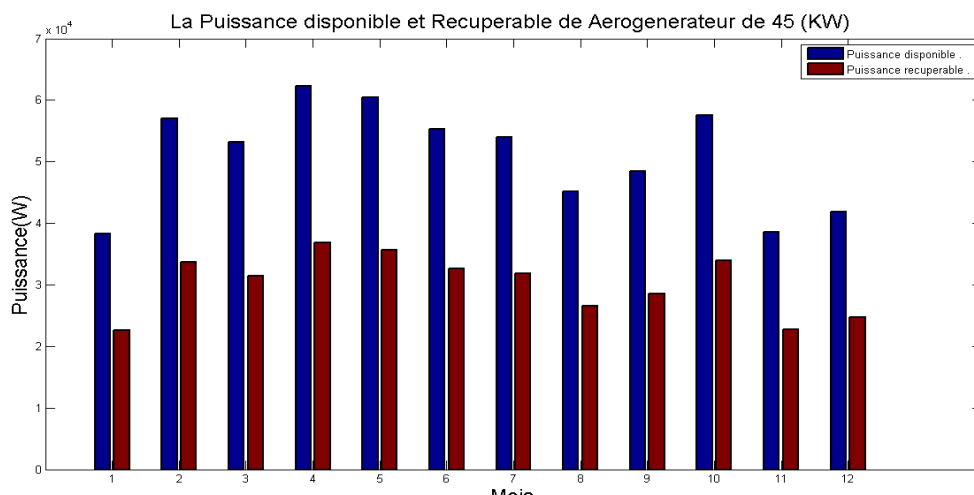


Figure (4.10) : La puissance disponible et récupérable pour l'aérogénérateur de 45kW

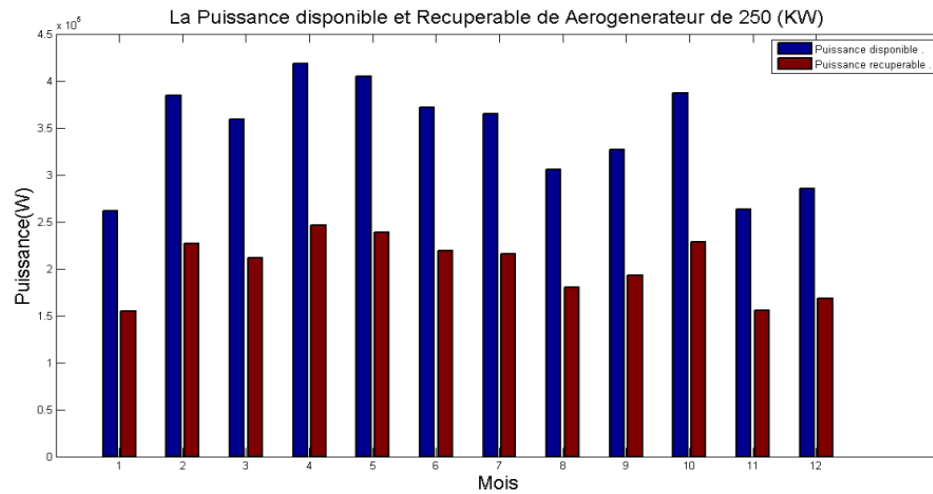


Figure (4.11) : La puissance disponible et récupérable pour aérogénérateur de 250kW

On remarque que pour les 3 Aérogénérateurs, l'énergie récupérable est inférieure à l'énergie disponible d'une valeur supérieure à 40%. En effet, si la densité de l'air est supposée constante, la seule réduction restante de Betz dont la valeur est 59%. On remarque aussi sur les 3 figures que l'augmentation de l'énergie cinétique est proportionnelle avec l'augmentation du diamètre (la surface balayée) de la machine, On constate que la machine 3 (250KW) est celle qui fournit une puissance disponible plus grande que les autres machines, estimée à 136860 (W), et une Puissance récupérable la plus grande aussi bien évidemment par ce qu'elle est en fonction de la puissance disponible de la machine utilisée.

4.3.7 Détermination de la Puissance utile et électrique :

Les histogrammes de la figure (4.12) présentent la variation mensuelle de la puissance générée par l'alternateur de chaque machine en savoir (10 KW 45KW 250KW) [50].

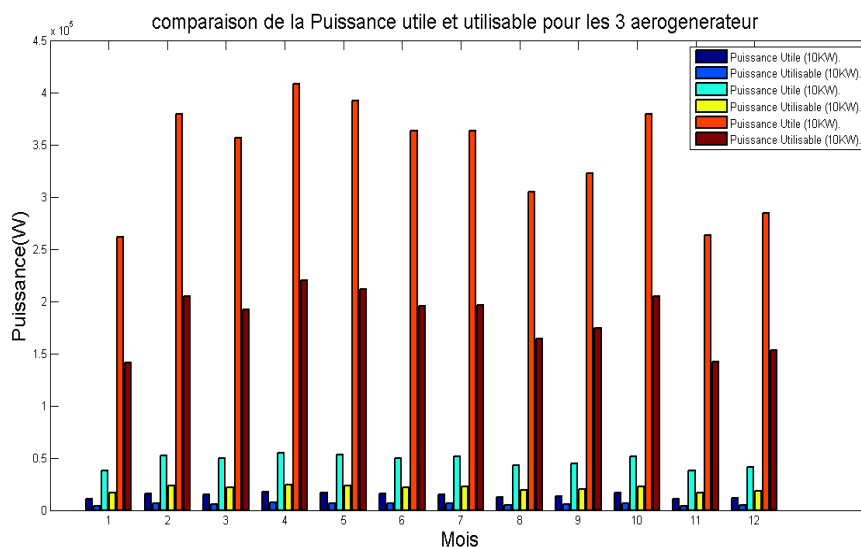


Figure (4.12) : La Puissance utile et utilisable pour les trois machines installées

Le maximum de cette puissance intervient au mois de Avril, tandis que son minimum coïncide avec le mois de janvier. Cette observation est valable pour les trois aérogénérateurs choisis.

On remarque que l'aérogénérateur de Puissance 250 kW possède une puissance électrique plus élevée que celle de 45 kW et nettement plus grande que l'aérogénérateur de 10kW. Ceci implique que pour les sites ventés, les aérogénérateurs de grande puissance sont le choix le plus adéquat.

4.4 Débits pompés

4.4.1. Estimation des débits pour chaque aérogénérateur

En figure (4.13) sont représentés les débits journaliers que peut fournir le système de pompage par aérogénérateur de 10 kW, 45 kW et 250 kW [50] au niveau de la

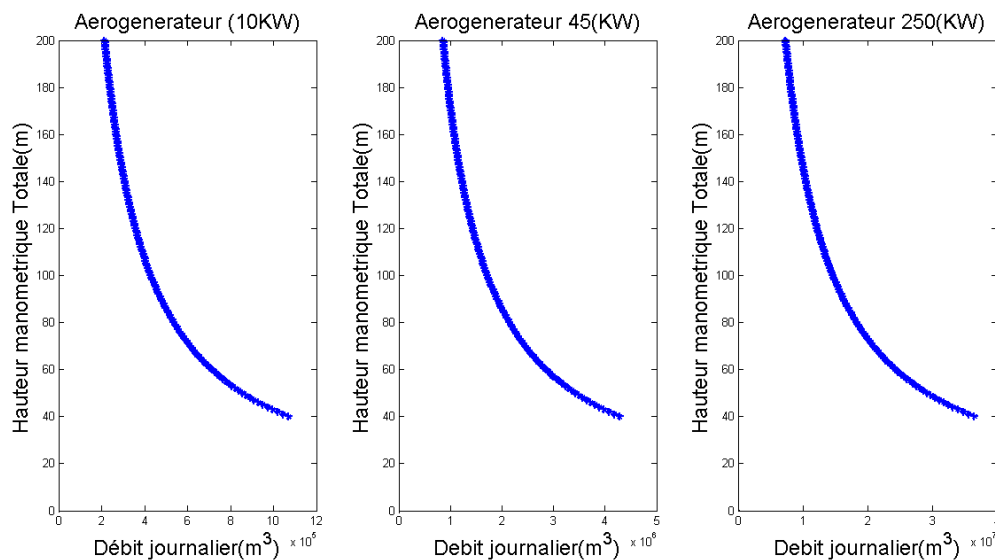


Figure (4.13) : Estimation de débit en fonction de la hauteur manométrique

région d'Adrar, pour différentes hauteurs manométriques totales (de 0 m à 200 m [52]).

Et pour un rendement global pompe-génératrice égal à 55% [51].

Pour bien montrer la différence des débits, nous donnons au Tableau (4.4) ci-dessous la quantité d'eau pompée pour une hauteur manométrique totale de 40m.

Tableau (4.4): Présentation de débits à partir d'une hauteur manométrique de 40m

Hauteur manométrique	Puissance nominale de l'aérogénérateur (kW)	Hauteur de pylône (m)	Puissance produite par l'aérogénérateur (W)	Rendement de la machine	Débit pompé (m^3)
40 m	10	30	5.5197e+003	0.11	107100
	45	36.5	2.2088e+004	0.34	428400
	250	50	1.8854e+005	0.17	3657000

Chapitre 4 : Résultat et Discussion

Les débits du pompage éolien des aérogénérateurs choisis, varient selon la profondeur des puits et la hauteur d'élévation de l'hélice de la machine ainsi que le rendement de la machine qui est en fonction de la puissance nominale (Tableau), L'ensemble des facteurs ayant une influence sur le débit sont mis en évidence dans les résultats résumés au Tableau (4.4) ci-dessus. L'augmentation de la profondeur des forages qui se traduit par des hauteurs manométriques élevées influe négativement sur les volumes d'eau et ce quel que soit la hauteur de l'hélice de l'aérogénérateur

A titre indicatif pour l'aérogénérateur de Puissance nominale de 10 kW, a une hauteur manométrique de 60m la quantité d'eau extraite est de l'ordre de 7.137.00 m³ et pour une hauteur manométrique de 80m le débit estimé a 5.353.00m³. On remarque qu'il y'a une chute lorsqu'on augmente la hauteur de 20m

4.4.2 Comparaison des débits des aerogenerateur installer :

La figure (4.14) présente la comparaison des débits pour les 3 aérogénérateurs à différentes hauteurs diverses du mat et puissance nominale en savoir a 30m 36.5m 50m pour des machines de 10kW 45kW et 250kW [50] respectivement.

On constate que l'augmentation de la hauteur du mât de la machine se traduit par un accroissement des quantités d'eau pompées.

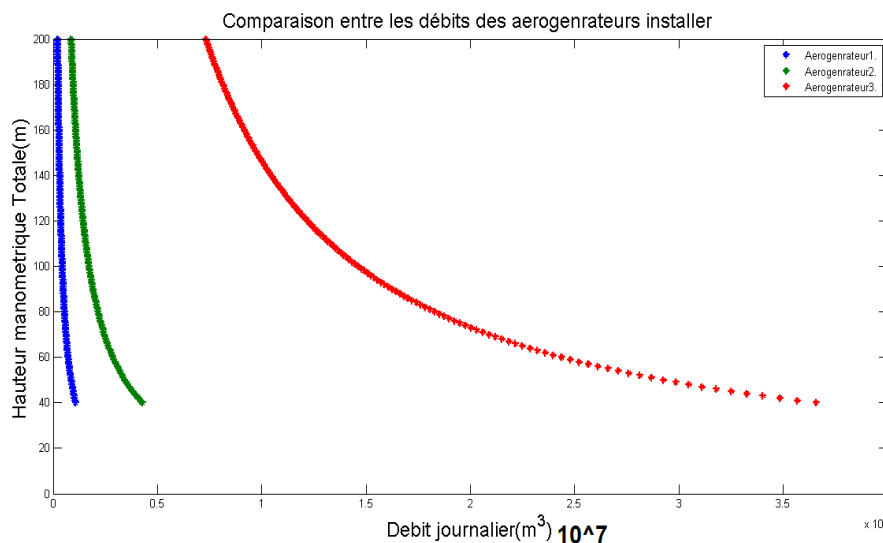


Figure (4.14) : comparaison entre les débits pompés pour chaque aérogénérateur

On remarque aussi que pour la même hauteur manométrique, le débit obtenu par l'aérogénérateur de 250kW s'avère plus important par rapport a ceux obtenu par les aérogénérateurs de 45kW et 10kW.

A titre illustratif pour une hauteur de 40m l'aérogénérateur de 250kW peut pomper jusqu'à 3.657.0000m³ par rapport à l'aérogénérateur de 45kW et de 10kW ou la quantité de l'eau pompée est estimée à 4.284.000m³ et 1.071.000m³ respectivement avec la même hauteur de 40m.

4.5 Conclusion :

L'étude de la potentialité du site a montré que la région d'Adrar présente un bon site pour l'implantation des aérogénérateurs pour l'application du pompage d'eau.

La simulation des débits pompés a permis de conclure que l'aérogénérateur Nordex N29 [50] de Puissance 250kw est le plus adéquat pour l'implantation dans des forages qui peuvent atteindre 200 m [52] et dans le cas où les besoins d'eau sont grands. Tandis que pour le cas où les besoins de l'eau sont faibles et les forages sont à faibles profondeurs, il est préférable d'utiliser l'aérogénérateur BERGEY BWC EXCEL [50] à de petite puissance nominale (10kW). Et aussi il est recommandé d'utiliser l'aérogénérateur SUDWIND N1245 [50] de moyenne puissance nominale (45kW) pour le pompage des puits moyens de profondeur où les besoins d'eau sont faibles.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Pour un site isolé et assez bien venté, l'utilisation de l'énergie éolienne pour le pompage de l'eau peut s'avérer indispensable et très compétitive par rapport à d'autres sources d'énergie.

Le travail présenté dans ce mémoire de Master porte sur le pompage éolien à l'aide d'aérogénérateurs de différentes puissances nominales 10kW 45kW 250kW dans la région d'Adrar.

Une étude bibliographique a été présentée dans le premier chapitre sur les principaux travaux qui portent sur les perspectives et les estimations de l'eau pompé à partir de forage en fonction de la hauteur manométrique dans le monde et en Algérie.

Pour l'étude de faisabilité et le calcul du potentiel énergétique éolien du site, nous avons présenté dans le chapitre 2, les différents modèles pour l'étude statistique ainsi que les méthodes d'ajustement pour déterminer les paramètres de Weibull, le profil du vent et l'extrapolation des paramètres, ainsi que la formule d'estimation du débit en fonction de la puissance générée par un aérogénérateur et une hauteur manométrique donnée.

Un programme sous MatLab a été développé pour le traitement des données et le calcul numérique des paramètres de Weibull. Les tracés des distributions ont été produits et comparées avec celles obtenues à l'aide des données tri horaires mesurées sur le site Adrar à 10m.

Dans le troisième chapitre, nous avons argumenté le choix de l'aérogénérateur le plus adéquat pour le pompage sur le site d'Adrar. Nous avons donc délimité la région qui présente le maximum de conditions favorables pour l'application de pompage éolienne.

Pour les systèmes de pompage par aérogénérateur, nous avons considéré le cas où ce dernier est directement connecté à la pompe (sans convertisseur de puissance). La pompe utilisée est une pompe centrifuge à moteur asynchrone qui fonctionne à puissance et vitesse de rotation variable. Les conditions de fonctionnement font que le rendement global du système varie avec la vitesse du vent et la taille de la pompe.

Les résultats montrent bien que le site d'Adrar présente bien un potentiel énergétique qui peut être rentable pour des systèmes éoliens. En effet, cette région est un des sites les plus ventés en Algérie, balayé par des vents locaux durant toute l'année et dont la vitesse moyenne dépasse le 6 m/s.

Les débits d'eaux pompés mensuellement ont été estimés pour la région d'Adrar , Nous avons montré que :

- Le débit est important lorsque la hauteur de l'hélice est considérable (car la puissance moyenne produite par le générateur éolien augmente avec la hauteur de l'hélice). De ce fait, le nombre de foyers alimentés en eau sera plus important.

—

Conclusion Générale

- lorsqu'on pompe à des faibles profondeurs, les débits moyens sont plus importants que ceux obtenues à des grandes profondeurs.

Les débits produits par l'aérogénérateur de puissance nominale a 250kW s'avère beaucoup plus important par rapport a ceux obtenu pour les aérogénérateurs de 10kW et 45kW.

Cela revient a la différence du diamètre de l'hélice et le rendement de la machine qui permet l'obtention d'une grande puissance électrique produite.

Par ailleurs, les aérogénérateurs de petites puissances peuvent être installés dans le cas ou les besoins en eau sont faibles et les puits de forage sont de petite profondeur. Lorsque les besoins en eau sont grand, et pour des puits plus profond l'installation d'un aérogénérateur de puissance nominale plus importante s'avère plus rentable.

- [1] <http://msmelectric.com>, 2008 .
- [2] [https://www.connaissance des energies.org/fiche-pédagogique/énergie-éolienne](https://www.connaissance-des-energies.org/fiche-pedagogique/energie-eolienne). 2011 – 2018 – Tous droits réservés – Fondation D'entreprise Alcen Pour La Connaissance Des Energies
- [3] Belidor, M. “ Architecture hydraulique, ou L'art de conduire, d'élever et de ménager les eaux pour les différents besoins ”. Belidor, M. (Bernard Forest de), 1697-1761. Science des ingénieurs. Publication.1737
- [4] Ramelli A. “ Le diverse et artificiose machine del capitano” nellequali si contengono varij et industriosi movimenti, degni digrandissima speculatione, per cavarne beneficio infinito in ogni sorte d'operatione : [...]. A Parigi : in Casa del'autore, 1588. ETH-Bibliothek Zürich, Rar 1255, <http://doi.org/10.3931/e-rara-8944> / Public Domain Mark
- [5] Edmund L. “ rose du vent ” (1745) The Origins of Feedback Control JOURNAL ARTICLE .The Origins of Feedback Control”Otto Mayr*Scientific American*”.Vol. 223, No. 4 (October 1970), pp. 110-119.Publier par Scientific American, a division of Nature America, Inc.
- [6] Clark R.N. “ Wind-electric water pumping systems for rural domestic and livestock water ”.United States Department of Agriculture Agricultural Research Service.Publier 9/5/1995.
- [7] Vick B.D. “ Wind-electric water pumping systems for rural domestic and livestock water ”.United States Department of Agriculture Agricultural Research Service.Publier 9/5/1995
- [8] Vick B.D. “ Performance of wind-electric and solar-PV water pumping systems for watering livestock ”. *J. Sol. Energy Eng* 118(4), 212-216 (Nov 01, 1996) (5 pages). Online February 14, 2008
- [9] Vick B.D. “Trailing Edge Devices To Improve Performance And Increase Lifetime Of Wind-Electric Water Pumping Systems ”. National Renewable Energy Lab., Golden, CO (United States) Publication Date: 1997-12-31.
- [10] Vick B.D. “ Performance and economic comparison of a mechanical windmill to a wind-electric water pumping system. ” Agricultural Research Service Conservation and Production Research Laboratory .Bushland.TX.79012.August 10-13-1997.
- [11] Vick B.D. “ Five years of experimental testing with a 1.5 kilowatt wind turbine. ”, USDA, Agricultural Research Service, Bushland, TX ASME Wind Energy Symposium Reno, NV, U.S.A..American Institute of Aeronautics and Astronautics.Inc.A98-16865.Publier 1997.
- [12] Vick B.D. “ Testing of a 2-kilowatt wind-electric system for water pumping. ”, Wind power 2000, Palm Springs, CA. 2000. CDROM. 2000
- [13] Vick B.D. “ Wind Powered Irrigation for Selected Crops in the Texas Panhandle and Southplains. ” Windpower 2001, Washington, D.C. 2001. CDROM.
- [14] O. Guerri, K. Ameer, A. Kaabache, S. Moussa et A. Harhad, “ Utilisation de L'Energie Eolienne pour le Pompage de l'Eau dans la Région d'Adrar. ”

- Pompage de l'Eau à l'Aide d'un Aérogénérateur. Rev. Energ. Ren.: Zones Arides (2002) 63-68
- [15] Alliche M, Kamel LAIDI “ Study of the Wind Potential in the Region of MEDEA. ” LMP2M Laboratory, University of MEDEA, MEDEA District Ain Dheb, 26000, ALGERIA. Publier 2002
- [16] Nelson V. “ Wind water pumping. ” [CDROM]. Canyon, Texas: West Texas A&M University, Alternative Energy Institute. 2004
- [17] Kasbadji Merzouk N, M. Merzouk “ Estimation du potentiel énergétique éolien utilisable Application au pompage dans les Hauts Plateaux ”. *Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°3 (2006) 155 – 163* (reçu le 02 Juin 2006 - accepté le 30 Septembre 2006).
- [18] Maouedj R. S. Bousalem et B. Benyoucef “ Optimisation d'un Système de pompage éolien Application aux sites sahariens ”. *Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°2 (2008) 239 – 250.* (reçu le 03 Novembre 2007 – accepté le 30 Juin 2008).
- [19] Clark R.N “ Livestock water pumping with wind and solar power. ”. In: Proceedings of the American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) Annual Meeting, June 29-July 2, 2008, Providence, Rhode Island. Paper No. 084176. Available.
- [20] Vick B.D. “ Performance of a small wind powered water pumping system” In: Proceedings of Wind power 2008 Conference and Exhibition, June 1-4, 2008, Houston, Texas. 2008 CDROM.
- [21] Bousalem S. “ Optimisation du fonctionnement d'un système de captage éolien destiné au pompage de l'eau ” *Revue des Energies Renouvelables CICME'08 Sousse (2008) 87 – 94*
- [22] Benabdelkader M, A. Malek et B. Draoui “ Perspective du pompage éolien appliqué à l'irrigation du palmier dattier dans la région de Béchar ”. *Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°3 (2011) 381 – 395*
- [23] Kasbadji Merzouk N. “ Perspectives du pompage eolien dans le sud algerien ”. Publier .20/05/2015.
- [24] Mazidi .A “ Characterization and Sizing of a Wind power Pumping System in an Algerian Sahara area ”. Publier 2016
- [25] Daaou Nedjari H. “ Utilisation de l'énergie éolienne pour le pompage de l'eau dans les hauts plateaux Algériens ”. 12ème JITH, novembre 2005 Tanger Maroc.
- [26] <https://eolienne.ooreka.fr/astuce/voir/341584/eolienne-de-pompage>
- [27] <https://wikiwater.fr/e42-les-pompes-a-energie-eolienne>
- [28] Kasbadji Merzouk N. “ Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie ”, Thèse de Doctorat, L'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Faculté des Science, Département de Physique, Unité de recherche matériaux et énergies renouvelable, 2006.
- [29]

- [30] Kasbadji Merzouk N “ Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie ”, Thèse de Doctorat, L’université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Faculté des Science, Département de Physique, Unité de recherche matériaux et énergies renouvelable, 2006.
- [31] Kasbadji Merzouk “ Perspectives du pompage éolien dans le sud algérien ”. 20 mai 2015.
- [32] Kasbadji Merzouk, N. M. Merzouk “ Estimation du potentiel énergétique éolien utilisable Application au pompage dans les Hauts Plateaux ”. Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°3 (2006) 155 – 163.
- [33] Guerri O. “ L’Energie éolienne en Algérie ” Un bref aperçu. Bulletin des Energies Renouvelables - N° 21 Centre de Développement des Energies Renouvelables , 2011
- [34] Panic I. “ Tests de modèles numériques de dispersion et de dépôt sec de polluants atmosphériques définition de scénarios représentatifs ”, Université de Marne la Vallée, Avril – Septembre 2003.
- [35] Justus C. G. and A. Mikhail, “ Height Variation of Wind speed and Wind distributions Statistic ” Geophysical Research Letters, vol. 3, N°5, (1976).
- [36] Delord J. D. et R. Emmanuel, “ Étude d’un aérogénérateur ”, *Lycée Maximilien Perret – Alfortville Académie de Créteil. Publier 11-2009.*
- [37] Benali O. “ Evaluation de potentiel énergétique éolien dans la région sud est du Sahara algérienne ”, Mémoire de Master Académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, Soutenu publiquement le : 08 / 06 / 2015.
- [38] Coulombe J. “ Évaluation de la modélisation et des prévisions de la vitesse du vent menant à l’estimation de la production d’énergie annuelle d’une turbine éolienne ”, Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures. Monreal.Canada. 2015-04 (octroi du grade: 2015-04-30).
- [39] Latreche M. T. “ Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien ”, Mémoire de Magister Université Ferhat Abbas de Sétif, 2012.
- [40] Dahali S. “ Etude hydrogéologique et hydro chimique des eaux de la nappe du continental intercalaire dans la région d’Adrar (Touat) ”. Université Kasdi Merbah – Ouargla - Faculté Des Sciences De La Nature Et De La Vie Et Des Sciences De La Terre Et De L’univers.
- [41] M. Banaceur Omar “ Etude Hydrogéologique Et Hydrochimique De Foggara Dans La Région Touat (Adrar) ”. Université Kasdi Merbah – Ouargla
- [42] Faculté Des Hydrocarbures, Des Energies Renouvelables Et Des Sciences De La Terre Et De L’univers. Le 02 /07 /2016
- [43] N. Kasbadji. Merzouk. “ Carte des Vents de l’Algérie – Résultats Préliminaires ”. Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 209-214
- [44] R. Hamouche, “ Atlas Vent de l’Algérie ”, Office National de la Météorologie, Alger, 1990
- [45] N. Kasbadji Merzouk “ Perspectives du pompage éolien dans le sud algérien ”. Division Energie Eolienne, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie. Publier 2015..
- [46] Djamai M. and N. Kasbadji Merzouk. “ Wind farm feasibility study and site selection in Adrar ”. Algeria. Energy Procedia 6 (2011) 136–142

- [47] Kasbadji Merzouk N. et M. Merzouk “ Estimation du potentiel énergétique éolien utilisable Application au pompage dans les Hauts Plateaux ”. Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°3 (2006) 155 – 163.
- [48] Delord J.D, R. Emmanuel, “ Étude d’un aérogénérateur ”, Lycée Maximilien Perret – Alfortville Académie de Créteil. Publier 11-2009.
- [49] Bousalem S., R. Maouedj, L. Aici, B. Benyoucef. “ Etude des performances d’un système de pompage par aérogénérateur de petite puissance ”. Jean-Jacques BEZIAN. JITH 2007, Aug 2007, Albi, France. ENSTIMAC, 5p., 2007.
- [50] Bauer L. & Matysik S. “ wind-turbinmodels.com ”. USA. 2011 – 2018.
- [51] Bauer L. & Matysik S. “ Wind Turbinmodels.Com ”. Usa. 2011 - 2018
- [52] Kasbadji Merzouk N., “ Evaluation Du Gisement Energétique Eolien
- [53] Contribution A La Détermination Du Profil Vertical De La Vitesse Du Vent En Algérie ”, Thèse De Doctorat, L’université Abou Bekr Belkaid De Tlemcen, Faculté Des Science, Département De Physique, Unité De Recherche Matériaux Et Energies Renouvelable, 2006.
- [54] Banaceur O. “ Etude Hydrogéologique Et Hydrochimique De Foggara Dans la Région Touat (Adrar) ”. Université Kasdi Merbah – Ouargla