

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

FACULTÉ DES SCIENCES

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° :.....

DOMAINE : Sciences de la Matière

FILIÈRE : Physique

**OPTION : Physique Énergétique
et Énergie Renouvelable**

**Mémoire présenté pour l'obtention
du Diplôme de Master Académique**

Par :

- **RAFAI ABD EL DJALIL**
- **BARKA SALAH EDDINE**

Intitulé :

**ÉTUDE QUALITATIVE ET
QUANTITATIVE DU PARC ÉOLIEN
D'ADRAR**

Soutenu le 05 / 10/2020 devant le jury composé de :

HADDED Zakaria M.A.A.	Université Mohamed Boudiaf – M'sila	Président
NAHOUI Azzedine M.C.B.	Université Mohamed Boudiaf – M'sila	Examineur
BOURSAS Abdelhakim M.C.A.	Université Mohamed Boudiaf – M'sila	Encadreur
MAHDI Khaled M.A.B.	Université Mohamed Boudiaf – M'sila	Co-encadreur

Année universitaire : 2019/2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Autrefois on disait :

« Celui qui sème le vent récolte la tempête »

Aujourd'hui on doit dire :

« Celui qui sème le vent récolte de l'électricité »

شكر وإهداء

{وَمِنْ آيَاتِهِ أَنْ يُرْسِلَ الرِّيَّاحَ مُبَشِّرَاتٍ وَلِيُذِيقَكُمْ مِنْ رَحْمَتِهِ وَلِتَجْرِيَ الْفُلُكُ بِأَمْرِهِ وَلِتَبْتَغُوا مِنْ فَضْلِهِ
وَلَعَلَّكُمْ تَشْكُرُونَ }٥

[سورة الروم آية 46]

الحمد لله وحلوة والسلام على عباده الذين اصطفى الحمد لله الذي أمدنا بنعمة البصر والبصيرة ووفقنا في دروسنا ودراستنا وأنار لنا طريق العلم وثبتنا عليه سبحانه.

في هذا اليوم المبارك الذي شاء الله فيه إتمام فيه مذكرة تخرجي والتي كانت بعنوان حمل معنى الرياح مبشرات وهي نعمة من الله للبشر فله الحمد والمنة ، وبما أنه من لم يشكر الناس لم يشكر الله أتقدم بهذا الشكر والإهداء لكل من ساهم في إتمام هذه المذكرة على رأسهم الوالدين الكريمين والأساتذة الأعزاء في كل أطوار مرحلتي الدراسية و أستاذي المشرف الأستاذ بورصا عبد الحكيم والأستاذ كمال مهدي وكل أساتذتي من أعضاء لجنة المناقشة وكل عمال شركة كهرباء وطاقت متجددة (SKTM) بكابرتن بأدوار الذين كان لهم فضل كبير في إتمام هذه المذكرة رغم كل ظروفه أزمة وباء كورونا التي ميزت هذه السنة نسأل الله أن يرفعه عنا وأن يرحم من افتقدناهم من الأبناء ، كما أتقدم بالشكر التام والكامل لكل إخواني وعائلتي وأصدقائي وزملائي في الدراسة ولا أنسى كل العمال من الإداريين والقائمين على الخدمات في قطاع التعليم العام والعالي.

وفي الأخير أجدد شكري لله الذي وفقنا لهذا فما كان فيه من إحسان فمن الله وما كان فيه من خطأ فمن نفسي والشيطان، وفقنا الله وأياكم لكل ما يحبه ويرضى.

عبد الجليل رافي .. بركة صلاح الدين ..

شكر وإهداء.....	II
Table des matières.....	III
Liste des figures.....	VI
Liste des tableaux.....	VII
Nomenclature.....	VIII
Mots clés.....	VIII

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale.....	2
----------------------------	---

CHAPITRE I : AÉROGÉNÉRATEURS STRUCTURE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

<u>I.1 Introduction</u>	5
<u>I.2 Historique</u>	5
<u>I.3 Définition d'un aérogénérateur</u>	5
<u>I.3.1 Types d'éoliennes</u>	6
<u>I.3.1.1 Éoliennes à axe vertical</u>	6
<u>I.3.1.2 Éoliennes à axe horizontal</u>	7
<u>I.3.2 Le principe de fonctionnement</u>	7
<u>I.3.2.1 Le coefficient de puissance</u>	8
<u>I.3.2.2 Théorie de Betz</u>	9
<u>I.3.2.3 Limite de Betz</u>	9
I.3.2.4 Classement des éoliennes en fonction de c_p	10
I.3.2.5 Vitesse réduite.....	10

CHAPITRE II : DIMENSIONNEMENT DES PARCS ÉOLIENS

<u>II.1 Introduction</u>	13
<u>II.2 Structure des éoliennes</u>	13
<u>II.2.1 Taille des éoliennes</u>	13
<u>II.2.2 Composantes d'une éoliennes</u>	14
<u>II.2.3 Caractéristiques d'une éolienne</u>	16
<u>II.3 Le climat</u>	16
<u>II.4 Le vent</u>	17
<u>II.5 Potentiel éolien</u>	17
<u>II.5.1 Distribution de Weibull</u>	18
<u>II.5.2 Distribution hybride de Weibull</u>	18
<u>II.5.3 Densité de puissance moyenne</u>	19
<u>II.6 Configuration d'un parc éolien</u>	20

<u>II.7 Impact de proximité des parcs éoliens</u>	21
<u>II.7.1 Impact sonore</u>	21
<u>II.7.2 Impacts visuels</u>	22
<u>II.7.3 Impact sur les systèmes de télécommunications</u>	23
<u>II.7.4 Impact sur la santé</u>	23
<u>II.7.5 Impact sur la faune</u>	23
<u>II.8 Conclusion</u>	23
<u>CHAPITRE III : APERÇU SUR LE MILIEU NATUREL DU SITE DE KABERTÈNE</u>	
<u>III.1 Introduction</u>	25
<u>III.2 Énergie éolienne en Algérie histoire et perspectives</u>	25
<u>III.3 Le Gisement éolien de l'Algérie</u>	26
<u>III.4 Présentation de la wilaya d'Adrar</u>	27
<u>III.4.1 Données climatiques</u>	28
<u>III.4.2 Le Relief</u>	28
<u>III.5 Description du site de Kabertène</u>	29
<u>III.5.1 Les coordonnées géographique</u>	29
<u>III.5.2 Les Éléments décisifs dans le choix du site</u>	30
<u>III.5.3 Démarche à suivre pour le dimensionnement et l'installation éolienne</u>	31
<u>III.5.4 Profil du potentiel éolien de la région d'Adrar</u>	32
<u>III.5.4.1 La température</u>	33
<u>III.5.4.2 Le vent</u>	33
<u>III.5.4.3 La rose des vents</u>	34
<u>III.5.4.4 Distribution de Weibull des fréquences du vent à Kabertène</u>	35
<u>III.6 Conclusion</u>	36
<u>CHAPITRE IV : DESCRIPTION QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DU PARC ÉOLIEN DE KABERTÈNE</u>	
<u>IV.1 Introduction</u>	38
<u>IV.2 Plan de la station de Kabertène</u>	38
<u>IV.3 Description de la ferme éolienne</u>	39
<u>IV.3.1 Les aérogénérateurs</u>	39
<u>IV.3.2 La Sous station de la ferme éolienne</u>	39
<u>IV.3.3 Champs d'éoliennes (kiosque + éolienne)</u>	42
<u>IV.4 Choix de la Machine</u>	46
<u>IV.5 Énergie produite annuelle</u>	55
<u>CHAPITRE V : ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE UN PARC ÈOLIEN VIRTUEL À M'SILA ET LE PARC DE KABERTÈNE</u>	
<u>V.1 Préambule</u>	58

<u>V.2</u> <u>Courbe de puissance des éoliennes</u>	58
<u>V.3</u> <u>Calcul de la puissance effective moyenne du parc de Kabertène</u>	60
<u>V.4</u> <u>Calcul de la puissance effective moyenne d'une éolienne G52/850 dans la région de M'sila</u> ...62	
<u>V.5</u> <u>Conclusion</u>	67
<u>CONCLUSION GÉNÉRALE</u>	68
<u>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	69

Liste des figures

<u>Figure I-1 : parc éolien [4]</u>	6
<u>Figure I-2 : éolienne à axe vertical [5]</u>	7
<u>Figure I-3 : éolienne à axe horizontal [5]</u>	8
<u>Figure I-4 :Schéma d'une veine d'air à travers l'hélice d'éolienne</u>	9
<u>Figure I-5 : courbes de puissance (c_p en fonction de λ) [12]</u>	10
<u>Figure I-6 : vitesse du vent et vitesse tangentielle en bout de pales</u>	11
<u>Figure II-1 Evolution de la taille des éoliennes[14]</u>	13
<u>Figure II-2 : Composante d'une éolienne de forte puissance [15]</u>	14
<u>Figure II-3 : L'installation éolienne[18]</u>	15
<u>Figure II-4 : Disposition optimale des aérogénérateurs dans une ferme éolienne</u>	20
<u>Figure II-5 : Insertion paysagère des éoliennes[15]</u>	22
<u>Figure II-6 : Projection d'ombres d'une éolienne[15]</u>	23
<u>Figure III-1 : Eolienne d'Adrar 1953</u>	25
<u>Figure III-2 : Eolienne de 100W de grand vent</u>	26
<u>Figure III-3 : La vitesse moyenne du vent au niveau l'Algérie 10m (2004 - 2014) [30]</u>	26
<u>Figure III-4 : Carte géographique de la wilaya D'Adrar [31]</u>	27
<u>Figure III-5 : répartition du vent [32]</u>	28
<u>Figure III-6 : carte géographique représente le site de la central [34]</u>	30
<u>Figure III-7 : Transport Réseau électrique [33]</u>	31
<u>Figure III-8 : Morphologie des terrains près du site</u>	31
<u>Figure III-9 : Pylône de mesure [33]</u>	32
<u>Figure III-10 : Courbe des variation annuelles de température de Kaberténe</u>	33
<u>Figure III-11 : Variations journalières, mensuelles et annuelles de la vitesse moyenne du vent [35]</u> ...	34
<u>Figure III-12 : Rose du vents à Adrar (2010-2011) (logiciel WRPLOT)</u>	34
<u>Figure III-13 : Distribution des fréquences des vitesses du vent (2003-2008) [33]</u>	35
<u>Figure III-14 : : Histogramme des puissances mensuelles moyennes disponibles</u>	36
<u>Figure IV-1 : Ferme éolienne de kaberténe</u>	38
<u>Figure IV-2 : Plan d'implantation de la ferme éolienne de kabertene [36]</u>	39
<u>Figure IV-3 : Maquette de la sous station</u>	39
<u>Figure IV-4 : Bâtiment électrique</u>	40
<u>Figure IV-5 : le post de moyenne tension 30KV</u>	41
<u>Figure IV-6 : schéma électrique poste ferme 30KV [37]</u>	41
<u>Figure IV-7 : armoire B vidéo et armoire SCADA</u>	42
<u>Figure IV-8 : Bâtiment de maintenance</u>	42
<u>Figure IV-9 : L'éolienne et le kiosque adjacent</u>	42
<u>Figure IV-10 : Equipements du kiosque d'éolienne[37]</u>	44
<u>Figure IV-11 : la cellule MT</u>	44
<u>Figure IV-12 : Schéma électrique de la cellule MT [37]</u>	44
<u>Figure IV-13 : chambre d'armoire gronde</u>	45
<u>Figure IV-14 : Schéma de Ground controller [37]</u>	45
<u>Figure IV-15 : Transformateur élévateur 690 V/30 KV</u>	45
<u>Figure IV-16 : Principaux éléments de la nacelle. Vue avant [38]</u>	48
<u>Figure IV-17 : le schéma électrique de la MADA [33]</u>	52
<u>Figure IV-18 : le système de communication [36]</u>	55
<u>Figure V-1 : Courbe de puissance active de l'éolienne N°06 (valeurs sur 10min)</u>	58
<u>Figure V-2 : Histogramme de la vitesse annuelle du vent ajusté par la distribution de Weibull à 10m du sol</u>	62
<u>Figure V-3 : Distribution annuelle des directions du vent</u>	63

Liste des tableaux

<u>Tableau II-1 : Présentation d'une fiche technique d'une éolienne.</u>	16
<u>Tableau III-1 : Coordonnées géographiques du site de Kabertène [33]</u>	29
<u>Tableau III-2 : Vitesse moyenne du vent et densité de puissance moyenne (2003-2008) [33]</u>	33
<u>Tableau III-3 : Récapitulatif des caractéristiques de la distribution [33]</u>	35
<u>Tableau IV-1 : Centrale éolienne de Kabertène</u>	39
<u>Tableau IV-2 : Caractéristiques d'une cellule du poste ferme 30Kv</u>	41
<u>TABLEAU IV-3 : Paramètres de base pour les classes d'éoliennes</u>	46
<u>Tableau IV-4 : Caractéristiques de la turbine G52/850 du Constructeur Gamesa</u>	47
<u>Tableau IV-5 : Caractéristiques de la génératrice</u>	52
<u>Tableau IV-6 : Rapport de production générale du parc année 2015(kWh) [49]</u>	56
<u>Tableau V-1: Puissance électrique produite (puissance effective) en fonction de la vitesse du vent</u>	59
<u>Tableau V-2 : caractéristiques du potentiel éolien d'Adrar à la hauteur du moyeu</u>	61
<u>Tableau V-3 : Valeur unitaire et du parc de la puissance effective (mesurée et calculée)</u>	61
<u>Tableau V-4 : caractéristiques moyennes annuels du vent à 10 m du sol</u>	63
<u>Tableau V-5 : Caractéristiques du vent et puissance effective moyenne à 55m du sol</u>	63
<u>Tableau V-6 : Fiche technique de l'éolienne G58/850</u>	66
<u>Tableau V-7 :Paramètres du vent à 74m du sol et puissance effective produite par la G58/850</u>	66

Nomenclature

V : vitesse du vent (m/s)

$\overline{V^3}$: moyenne de la vitesse au cube du vent

K : facteur de forme de la loi de Weibull (sans dimension)

C : facteur d'échelle de la loi de Weibull (m/s)

P : puissance fournie par une éolienne (W/m^2).

\overline{P} : densité de puissance moyenne (W/m^2).

ρ : masse volumique de l'air (kg/m^3).

S : surface balayée par la voilure de l'éolienne (m^2).

h : hauteur de mesure de la vitesse du vent(m)

c_p : coefficient de puissance

λ : vitesse réduite

Ω : vitesse de rotation

R : rayon de la voilure

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

$F(v)$: fonction de distribution cumulée

Γ_n : fonction gamma

α : coefficient de cisaillement

η : Rendement

c_f : facteur de capacité

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'un des secrets les plus importants de la communication et de l'évolution des êtres humains depuis des temps immémoriaux est sa dépendance à l'égard du contrôle et du développement des sources d'énergie. La dépendance aux combustibles du charbon et du pétrole a contribué à donner une grande impulsion au développement à la Révolution industrielle, mais après que l'humanité a réalisé le danger de ne compter que sur des sources d'énergie épuisables, elle a commencé à ce moment à développer d'autres sources renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne.

L'énergie éolienne diffère des autres sources d'énergie renouvelables car elle est plus ancienne et adoptée auparavant de manière traditionnelle dans plusieurs domaines, comme le broyage des céréales, la poussée des voiliers et le pompage de l'eau. Avec les progrès scientifiques, elle s'est développée davantage et devenue une source de courant électrique en convertissant l'énergie éolienne en énergie électrique grâce au mouvement mécanique des turbines et de la stimulation magnétiques. Le développement de cette ressource électromécanique distinguée s'est poursuivi en raison de son bon coût, de sa rapidité d'installation et de sa rentabilité pratique, en particulier après la crise de 1973 (choc pétrolier), qui a contribué sensiblement au développement des études autour d'elle et au développement des outils et programmes informatiques spécialisés tel que le programme Wind pro, WAsP et autres.

La mise en place d'une centrale éolienne dépend de plusieurs études : Quantitative, qualitative (type de turbine utilisée), longueur du mat, zone de construction du projet, vitesse et direction du vent, etc , Ces études déterminent la faisabilité de la mise en place de ces stations, dont la durée varie selon les emplacements spécifiques et peut durer d'un jusqu'à trois ans, à condition que l'accent soit mis sur les saisons d'hiver et d'été.

Grâce à ces efforts continus, le développement de cette importante source d'énergie a atteint un sommet en 2014 avec une production totale de 336 gigawatts, soit environ 4% de la consommation totale d'électricité dans le monde, de sorte que la Chine, l'Amérique et l'Allemagne sont en tête des pays du monde à adopter cette technique. L'Algérie demeure encore très en retard dans ce domaine. La première ferme éolienne inaugurée en 2014 dans la wilaya d'Adrar au sud ne dépasse pas une production de 10MW. Cependant un programme national est lancé d'ici l'an 2030 va permettre à l'Algérie d'aller plus loin dans le domaine des énergies renouvelables.

Notre présent travail justement a pour ambition de contribuer dans ce programme par l'étude du site de M'sila et la faisabilité d'un projet de ferme éolienne à l'instar de celle de Kabertène au Sud de l'Algérie où le gisement éolien est plus important en comparaison avec le Nord. Notre objectif était de projeter le même parc avec les mêmes caractéristiques pour déterminer le rendement dans les conditions de fonctionnement du site de M'sila. Et comme on s'attend à ce que l'efficacité soit inférieure, quelles sont alors les modifications à apporter au dimensionnement du parc pour qu'il puisse fonctionner avec une rentabilité comparable. L'étude nous a montré que les changements dans les éléments du parc virtuel que ce soit au niveau du nombre ou des caractéristiques techniques des éoliennes ne sont pas assez éloignés du parc d'origine, ce qui rend le projet réalisable techniquement et économiquement.

CHAPITRE I
AÉROGÉNÉRATEURS -
STRUCTURE ET PRINCIPE DE
FONCTIONNEMENT

I.1 Introduction

Le présent chapitre traite des généralités sur les éoliennes (aérogénérateurs), en l'occurrence la structure et les divers éléments constituant une éolienne, leur principe de fonctionnement et les différents types d'aérogénérateurs utilisés dans le monde de l'éolienne.

I.2 Historique

L'utilisation de la force du vent pour suppléer l'énergie humaine ou animale n'est pas nouvelle. La première utilisation et sans doute la plus simple, a été la propulsion des bateaux à voiles. Au moyen âge, les Perses furent les premiers à utiliser des éoliennes très simples à axe vertical pour irriguer leurs cultures et aider au meulage du grain. Ce type d'éoliennes va se répandre dans tout le monde arabe puis dans l'occident suite aux croisades. Au 16ème siècle, elles ont été utilisées pour pomper de l'eau et couper le bois. En 1891, le danois Poul La Cour [1] inventa le premier aérogénérateur qui a pour but de produire de l'électricité. Aux débuts du 20ème siècle, a été marquée par la conception de la première éolienne à axe verticale, même si la puissance générée restait assez faible. Il faut attendre jusqu'à 1957 pour que la puissance atteigne les 200kW par le constructeur Danois Gedser. Mais ce n'est qu'après le premier choc pétrolier en 1973, que de nombreux pays se sont lancés dans le marché éolien. Actuellement, les progrès technologiques, tant dans les domaines de l'électrotechnique, de l'électronique que dans celui des matériaux, font que l'on peut désormais disposer de machines aux performances étonnantes en terme de puissance produite, tout en limitant les impacts sur l'environnement [2].

I.3 Définition d'un aérogénérateur

Plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent, c'est-à-dire le fluide en mouvement, en énergie mécanique. Cette dernière est disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments dont la nacelle, le mât, les pales et le multiplicateur, doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative plus au moins stable à l'énergie nucléaire et d'autres d'origine fossile. Sans pour autant, prétendre à les remplacer de nos jours si nous prenons en compte l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite qui est largement plus faible. Les installations peuvent être réalisées sur terre (onshore), mais également de plus en plus en mer (offshore). Ces dernières donnent naissance aux fermes éoliennes offshore, où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores [3]



Figure I-1 : parc éolien [4]

I.3.1 Types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

I.3.1.1 Éoliennes à axe vertical

Ces éoliennes ont un axe de rotation perpendiculaire au sol. Le principe de mise en mouvement de ce type de machine est identique à celui d'un anémomètre : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes.

Le principal avantage des machines à axe vertical est que la génératrice repose sur le sol, ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour. Par ailleurs, une éolienne à axe vertical fonctionne quelle que soit la direction du vent, permettant donc de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine. En revanche, le fait qu'une telle éolienne soit érigée près du sol signifie que le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable (gradient de vent, turbulence due aux accidents du terrain en amont de la machine). Ce qui réduit significativement l'efficacité de la machine. Par ailleurs, le principe même de fonctionnement, basé sur des variations incessantes de charge aérodynamique sur les pales, fait que ces éoliennes sont très sujettes aux problèmes d'aéroélasticité. Enfin, pour des éoliennes de grande puissance, la surface occupée au sol par le haubanage est très conséquente. Les deux plus importantes conceptions d'éoliennes à axe vertical sont : Darrieus et Savonius :

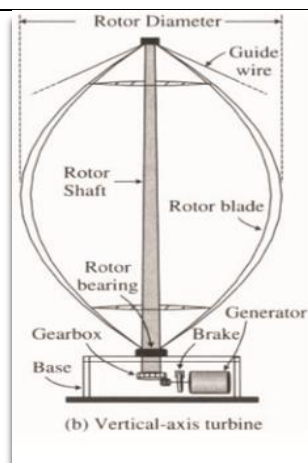


Figure I-2 : éolienne à axe vertical [11]

I.3.1.2 Éolienne à axe horizontal

Ces éoliennes ont leur axe de rotation à l'horizontale par rapport au sol. La majorité des éoliennes présentes sur le marché appartiennent à cette catégorie [10]. Même si elles nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pâles, elles présentent néanmoins un rendement aérodynamique plus élevé. De plus, elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Par contre, elle rend sa conception plus complexe et plus coûteuse [10].

I.3.2 Principe de fonctionnement

Les systèmes de conversion d'énergie éolienne transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sur la turbine éolienne puis en énergie électrique via une génératrice. En effet, si nous considérons une masse d'air, qui se déplace avec une vitesse V , l'énergie cinétique de cette masse E_c est :

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2 \quad (\text{I-1})$$

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être entièrement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface S , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent. La puissance instantanée fournie serait alors [5, 6] :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (\text{I-2})$$

Où ρ est la masse volumique de l'air.

La puissance fournie par une éolienne est fonction de trois principaux paramètres : l'énergie éolienne disponible, la courbe de puissance de la machine, ainsi que la capacité de l'aérogénérateur à réagir aux fluctuations du vent [7, 8].

3.2.1 Coefficient de puissance

Parce que la vitesse en aval du dispositif de récupération n'est jamais nulle, la puissance ne peut être captée en sa totalité [12], le dispositif de conversion extrait une partie seulement P_m de la puissance incidente P_v . Ainsi, la puissance P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime comme suit :

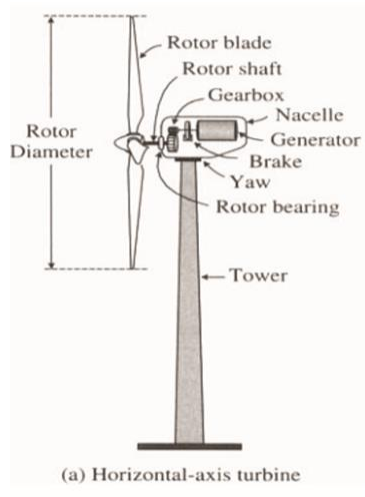


Figure I-3 : éolienne à axe horizontal [11]

$$P_m = \frac{1}{2} c_p(\lambda) \rho S V^3 \quad (\text{I-3})$$

λ est appelée vitesse réduite ; c 'est le rapport de la vitesse angulaire de l'axe du rotor à la vitesse au bout des pales.

Le coefficient c_p dit coefficient de puissance (appelé aussi rendement) est une grandeur variable inférieure à 1. Ce coefficient qui est propre à chaque éolienne, lie la puissance fournie par l'éolienne P_m et la puissance du vent disponible à l'entrée de la voilure P_v par la relation suivante. :

$$c_p = \frac{P_m}{P_v} \quad \text{(I-4)}$$

3.2.2 Théorie de Betz

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Albert Betz. Il suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse V et à l'infini en aval d'une vitesse v et V' celle au travers de S . La production d'énergie ne pouvant se faire que par la conversion de l'énergie cinétique, v est nécessairement inférieure à V . Il en résulte que la veine d'air traverse le générateur éolien en s'élargissant (figure I-4).

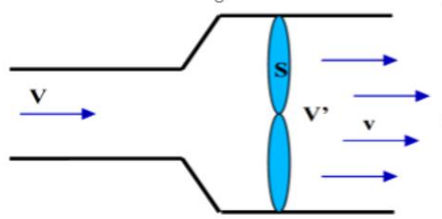


Figure I-4 : Schéma d'une veine d'air à travers l'hélice d'éolienne

La variation de l'énergie cinétique de l'air ΔE est donc :

$$\Delta E = \frac{1}{2} m (V^2 - v^2) \quad \text{(I-5)}$$

La puissance transmise à l'éolienne P_t est alors :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho S V' (V^2 - v^2) \quad \text{(I-6)}$$

Par ailleurs, la force F de l'air sur l'éolienne est :

$$F = \rho S V' (V - v) \quad \text{(I-7)}$$

D'où :

$$P_t = F V' = \rho S V'^2 (V - v) \quad \text{(I-8)}$$

En identifiant les équations (I-6) et (I-8), on obtient :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho S V^2 - v(V + v) \quad \text{(I-9)}$$

P_t sera maximal si sa dérivée par rapport à v est nulle. Ceci aura lieu pour $\frac{V}{3}$

La puissance est alors maximale et vaut :

$$P_t = P_{tmax} = \frac{16}{27} \frac{\rho S V^3}{2} \quad \text{(I-10)}$$

3.2.3 Limite de Betz

Cette dernière expression (I-10) démontre qu'indépendamment du modèle de la turbine, seuls 16 /27 ièmes (59 %) de l'énergie cinétique du vent peuvent être transformés en énergies

mécanique. Représentant ainsi la puissance maximale qui peut être récupérée par une éolienne. C'est la valeur maximale de ce coefficient qui correspond à la limite dénommée limite de Betz du coefficient de puissance :

$$c_p = \frac{16}{27} = 0.59 \quad (\text{I-11})$$

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse réduite λ .

3.2.4 Classement des éoliennes en fonction de c_p

La figure I-5 représente les variations de c_p en fonction de la vitesse réduite λ et ce pour différents types d'éoliennes. Comme le montre le graphe de la figure l'efficacité varie considérablement avec la vitesse de vent. Elle atteint sa valeur nominale pour une certaine vitesse du vent (spécifique à chaque type d'éolienne). A des vitesses de vent faibles, l'efficacité n'est pas un sujet très important étant donné qu'il n'y a pas beaucoup d'énergie à récupérer. A des vitesses de vent élevées, l'éolienne perd forcément toute énergie excédant la quantité pour laquelle l'éolienne a été conçue. La question d'efficacité trouve donc avant tout sa valeur à des vitesses de vent où l'on trouve la plus grande partie de l'énergie récupérable.

3.2.5 Vitesse réduite

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, on utilise une grandeur spécifique, dite vitesse réduite. Elle représente le rapport entre la vitesse tangentielle en bout de pales de la turbine et de la vitesse du vent (figure I-6). Ainsi, la vitesse réduite est donnée par la relation suivante :

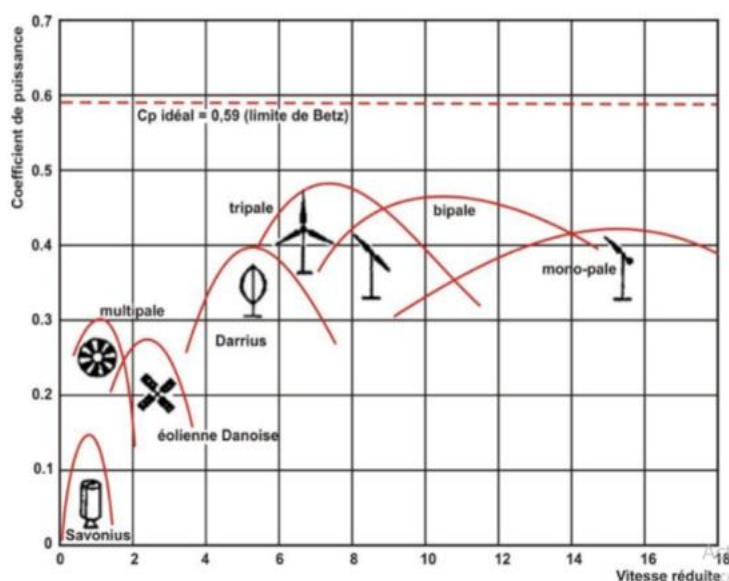


Figure I-5 : courbes de puissance (c_p en fonction de λ) [14]

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V} \quad (\text{I-12})$$

Avec R le rayon de la voilure et Ω la vitesse de rotation et V celle du vent.

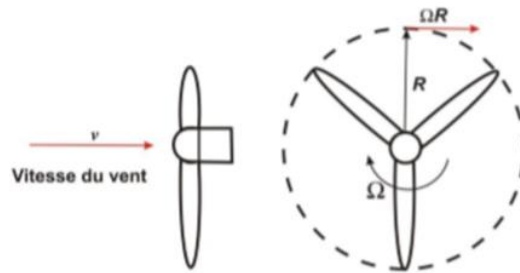


Figure I-6 : vitesse du vent et vitesse tangentielle en bout de pales

CHAPITRE II
DIMENSIONNEMENT DES
PARCS ÉOLIENS

II.1 Introduction

Ce chapitre traite les méthodes de calcul pour étudier la faisabilité et la possibilité d'implanter un parc éolien sur un site donné en fonction des conditions climatiques régnants, mais aussi en fonction de la géographie de la région et la superficie sur laquelle on veut réaliser le projet. En effet ce volet est en relation direct avec l'efficacité du parc en termes de production de l'énergie électrique. Néanmoins, il faut être capable d'évaluer l'impact du parc sur l'environnement. Cette étude prend plusieurs aspects de manière à prévenir les atteintes aux paysages, au patrimoine et à la qualité de vie des riverains. Dans cette perspective, l'étude d'impact constitue le seul moyen de fonder la décision.

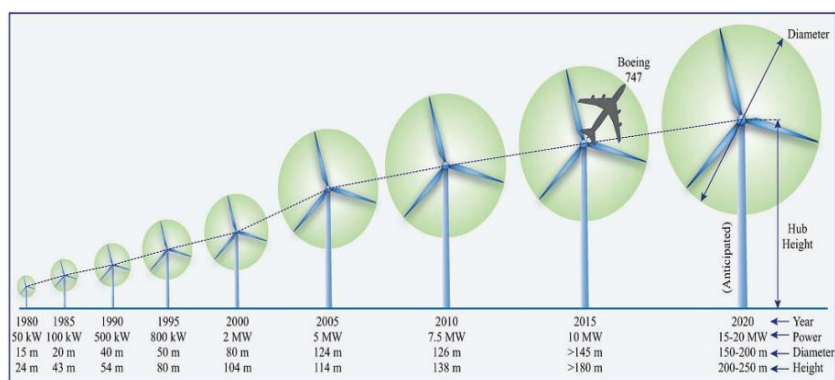
II.2 Structure des éoliennes

Les éoliennes à axe horizontal occupent la part du lion dans l'industrie et le marché des aérogénérateurs dans le monde. Il est alors plus convenable de se pencher sur l'architecture de ce type d'éoliennes.

II.2.1 Taille des éoliennes

Face à l'augmentation de la consommation d'énergie électrique mondiale, les constructeurs ont tendance à produire des turbines de plus en plus puissantes et des mâts de plus en plus élevés pour installer des voilures de grandes tailles et pouvoir capter des vents réguliers avec des vitesses plus importantes, puisque la puissance captée par la turbine est proportionnelle au carré du rayon du rotor. Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories [15] :

- Éoliennes de petite puissance : inférieure à 40kW.
- Éoliennes de moyenne puissance : de 40kW à quelques centaines de kW.
- Éoliennes de forte puissance : supérieure à 1MW.



FigureII-1 : Evolution de la taille des éoliennes [16]

II.2.2 Composantes d'une éolienne

Une installation est généralement constituée d'un nombre d'éoliennes, chacune portée sur une tour avec de solides fondations et d'un ensemble d'équipements électriques pour l'adaptation, le stockage de l'énergie produite ou pour gérer la connexion avec le réseau électrique local. L'éolienne est pour sa part, composée d'un rotor bi ou tri pale, bien souvent à axe horizontal, d'une génératrice à courant continu ou d'un alternateur et d'une nacelle qui permet de fixer et supporter le rotor et la génératrice (Figure II-2). Dans certains cas, l'éolienne peut contenir un boîtier multiplicateur à engrenages pour relier le rotor et la génératrice, un empennage qui permet de l'orienter dans le vent, un système de contrôle du calage des pales pour optimiser la puissance

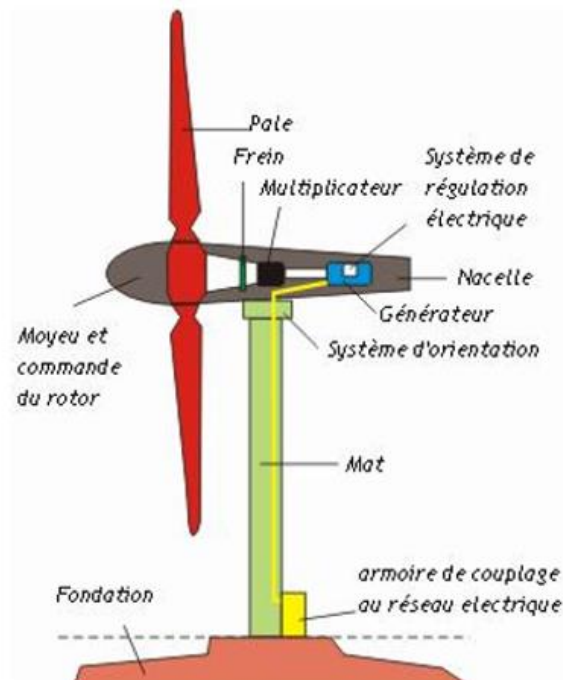


Figure II-2 : Composantes d'une éolienne de forte puissance [17]

➤ La fondation

La fondation est généralement conçue en béton armé. Elle doit être assez solide pour permettre de fixer toute la structure de l'éolienne et supporter le poids lourd des autres parties. Dans le cas des éoliennes offshore (installations maritimes), elle doit non seulement résister aux différentes contraintes, mais aussi celle créée par la force des vagues et des courants marins sur le mât.

➤ **La tour ou le mât**

Un édifice qui sert à Supporter et élever les principaux éléments de l'éolienne (la nacelle et le rotor) à une certaine hauteur adéquate. Il est généralement un tube d'acier pour apporter la solidité nécessaire de l'ensemble. Elle doit être le plus haut possible pour éviter les turbulences du vent près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité, mais sa taille augmente avec celle de l'éolienne. Plus le rotor est haut et plus le rendement de l'éolienne sera bon.

➤ **Le rotor**

C'est l'élément mécanique qui transforme la force cinétique du vent captée par les pales en rotation, ensuite transformée en électricité dans la nacelle. Généralement, il est composé de trois pâles et placé devant la nacelle [18].

➤ **La nacelle**

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent (LSS : Low Speed Shaft) et rapide (HSS : High Speed Shaft), roulements, multiplicateur. Le frein à disque et le frein aérodynamique qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur est généralement une machine synchrone ou asynchrone [19].

➤ **Le système d'orientation des pales**

Sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique) [19].

➤ **Le multiplicateur**

Sert à adapter la vitesse de rotation de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique [19].

La figure II-3 Montre l'ordre de disposition des différents éléments dans la nacelle et l'armoire d'interconnexion à la sortie de l'éolienne avec le réseau électrique

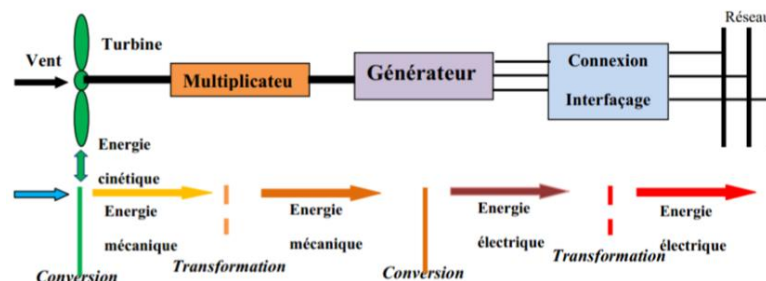


Figure II-3 : L'installation éolienne [20]

II.2.3 Caractéristiques d'une éolienne

Le tableau ci-dessous (tableau II-1) est un exemple de fiche technique qui peut aider dans la prise de décision dans le choix de l'éolienne industrielle standard à installer. Le tableau comprend les caractéristiques techniques de chaque élément de l'aérogénérateur.

Tableau II-1 : Présentation d'une fiche technique d'une éolienne

	Caractéristiques
Vitesses	<ul style="list-style-type: none"> • du vent de démarrage • du vent nominal • du vent de coupure
Rotor	<ul style="list-style-type: none"> • Diamètre • Surface balayée • Nombre de pales • Vitesse de rotation • Poids
Pales	<ul style="list-style-type: none"> • Longueur • Matériaux • Poids unitaire
Nacelle : Élément fixé au sommet de la tour, contenant la génératrice.	<ul style="list-style-type: none"> • Poids
Système d'orientation	<ul style="list-style-type: none"> • Type : (quatre motoréducteur) • Stabilisation : frein à disque
Multiplicateur	<ul style="list-style-type: none"> • Type : étages parallèles et planétaires • Rapport de réduction : 1/105,4
Génératrice	<ul style="list-style-type: none"> • Type : quatre pôles, asynchrone, à double alimentation • Puissance nominale : ex 2 000 kW • Vitesse de rotation : ex 900 à 1800 tours/min • Tension nominale : ex : 690V
Mât	<ul style="list-style-type: none"> • Type : Tubulaire en acier • Hauteur du moyeu : 80 m • Poids de la virole : 10 tonnes
Résistance au froid	<ul style="list-style-type: none"> • Supporte jusqu'à -40°C, la neige, le givre et la glace. Certains éléments possèdent leur propre chauffage (génératrice, armoires électriques).

II.3 Climat

Le climat désigne l'ensemble des conditions atmosphériques qui caractérise une région donnée, il est paramétré par des valeurs moyennes des grandeurs climatologiques dans un endroit donné (température, précipitations, ...) calculées d'après des observations d'au moins 30 ans (défini par l'organisation mondiale). La détermination du climat est effectuée à partir de mesures statistiques annuelles et mensuelles sur des données atmosphériques locales :

température, précipitations, ensoleillement, humidité, vitesse et direction du vent, mais également la pris en compte leur récurrence ainsi que les phénomènes exceptionnels.

L'étude du climat de l'endroit destiné à l'installation éolienne est de grande importance, car c'est un facteur déterminant dans la durée de vie de l'installation, donc la durée d'amortissement de l'investissement, mais aussi dans la planification des travaux d'entretien périodiques.

II.4 Le vent

L'air qui constitue l'atmosphère est un mélange de gaz et de particules de forme solides ou liquides. Sa composition est relativement constante jusqu'à une altitude inférieure à 100km et est majoritairement composée d'azote et d'oxygène. La quasi-totalité de sa masse est située à une altitude de moins de 16 km, dans les basses couches atmosphériques [21]. Au sein de ces couches, le déplacement des masses d'air, appelé vent n'est autre que le résultat de la mise à l'équilibre d'un ensemble de forces qui sont :

- La force gravitationnelle.
- La force due gradient de pression.
- La force de Coriolis
- La force de frottement

Le vent qui est tout simplement ce déplacement de ces masses d'air transporte une certaine quantité d'énergie, qui n'est d'autre que l'énergie cinétique des particules qui le constituent. C'est cette énergie, appelée communément potentiel éolien, qui fait tourner les pales d'une éolienne. L'efficacité d'une éolienne est alors intimement liée l'importance du potentiel éolien présent sur le lieu de l'installation. C'est dans cette perspective que l'évaluation de ce potentiel est un point crucial dans le choix du futur site.

II.5 Potentiel éolien

Le potentiel éolien d'une région donnée est calculé à partir des distributions de la vitesse mesurée sur une période de temps. Lorsqu'on dispose de mesures de vent, l'information peut être représentée sous forme d'histogramme Ce dernier illustre la variation de la fréquence relative des vitesses de vent. La modélisation de la distribution ainsi obtenue est basée sur de la vitesse du vent se fait à partir de plusieurs méthodes statistiques présentes dans la littérature [22]. Ces méthodes consistent à ajuster les modèles mathématiques sur la distribution empirique de la vitesse du vent. Le modèle le plus utilisé est celui de la fonction de densité de probabilité (pdf) de Weibull [23] à deux paramètres, dont les avantages ont été mis en évidence par Justus et al. [24, 25].

II.5.1 Distribution de Weibull

Sa fonction exponentielle à deux paramètres permet de caractériser la distribution fréquentielle des vitesses de vent sur une période donnée. Elle comprend un paramètre d'échelle A (m/s) qui renseigne sur la moyenne du vent caractéristique du site et un paramètre de forme k (sans unité) indiquant quant à lui le caractère plus ou moins pointu de la distribution. Sa densité de probabilité se présente sous la forme :

$$f(v) = \left(\frac{k}{A}\right) \left(\frac{v}{A}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (\text{II-1})$$

La densité de probabilité $f(v)$ représente la distribution en fréquences des vitesses mesurées

La fonction de distribution cumulée de Weibull correspondante $F(v)$ s'écrit sous la forme :

$$F(v) = \int f(v) dv = 1 - e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (\text{II-2})$$

La vitesse moyenne du vent V_m peut être calculée en fonction des paramètres de Weibull à partir de :

$$V_m = \int_0^{\infty} v f(v) dv \quad (\text{II-3})$$

Tout calcul fait on obtient :

$$V_m = A \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (\text{II-4})$$

Où la fonction Γ (Gamma) est donnée par :

$$\Gamma_n = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{n-1} dx \quad (\text{II-5})$$

avec :

$$n = \frac{1}{k} + 1 \quad (\text{II-6})$$

II.5.2 Distribution hybride de Weibull

Sur les sites où la fréquence des vents calmes est relativement importante, la distribution de Weibull ne répond pas parfaitement à la situation [28]. Dans ce cas, la distribution hybride de Weibull est utilisée. Elle est définie par :

$$f(v) = (1 - F_0) \left(\frac{k}{A}\right) \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right] \quad (\text{II-7})$$

Où F_0 est la fréquence des vitesses calmes, qui est déterminée à partir des données du vent.

II.5.3 Densité de puissance

La meilleure façon d'évaluer la ressource éolienne disponible sur un site donné est le calcul de la densité de puissance du vent, indiquant la puissance du vent par unité de surface disponible sur le site (exprimée en W/m^2). En effet et d'après la relation (I.2), la densité de puissance est donnée par :

$$P_V = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (\text{II-8})$$

La densité de puissance moyenne peut se mettre alors sous la forme [31] :

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho \bar{V}^3 \quad (\text{II-9})$$

La moyenne du cube de la vitesse du vent se calcule d'une manière similaire à celle de V_m . La densité de puissance moyenne est par conséquent obtenue à partir de la relation suivante [32, 33] :

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho A^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{K}\right) \quad (\text{II-10})$$

Compte tenu des nécessités de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, le potentiel disponible subit une succession de pertes, jusqu'à la sortie de la machine, (limite de Betz, seuils machine et pertes de conversion) [30]. En effet, seule une partie de la puissance éolienne disponible sur un site donné, dite puissance effective est réellement obtenue en fin de parcours à la sortie de l'éolienne.

La puissance effective P_{eff} obtenue est fonction non seulement du coefficient de puissance c_p , mais on doit compter aussi les pertes mécaniques au niveau du multiplicateur et électriques et magnétiques au niveau de la génératrice. Le coefficient d'efficacité noté c_e qui exprime la partie de la puissance transférée à la sortie de l'éolienne est donné par :

$$c_e = c_p \eta_m \eta_g \quad (\text{II-11})$$

η_m et η_g sont les rendements du multiplicateur et la génératrice respectivement

La puissance effective pour une vitesse instantanée V du vent est donc :

$$P_{eff} = c_e P_v \quad (\text{II-12})$$

La densité de puissance moyenne produite par une éolienne sur un site donné est alors calculée par :

$$\bar{P}_{eff} = \int_0^{\infty} P_{eff}(V) f(V) dV \quad (II-13)$$

On peut estimer cette grandeur en se basant sur les données de la vitesse du vent collectées sur le site concerné sur une année ou une saison ou un mois par l'expression suivante :

$$\bar{P}_{eff} = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^N c_e(V_i) V_i^3 f(V_i) \quad (II-14)$$

Sachant que, V_i est la $i^{ème}$ valeur de la vitesse du vent de la série chronologique de N valeurs, $f(V_i)$ la fréquence correspondante. Les valeurs de $c_e(V_i)$ sont déduites de la courbe du coefficient de puissance en fonction de la vitesse du vent. C'est une courbe fournie par le constructeur de la machine.

II.6 Configuration d'un parc éolien

La configuration des fermes éoliennes date depuis une quarantaine d'années. Les spécialistes de la mécanique des fluides ont montré que l'emplacement optimal des éoliennes est celle où des rangées d'éoliennes alternées avec un décalage entre deux rangées successives (figure II-4). Afin de minimiser l'effet de la turbulence induite par la rotation des pales de la turbine, un espacement de l'ordre 3 à 4 D_T (D_T est le diamètre du rotor) est fourni à l'intérieur des rangées et un écartement entre les rangées de l'ordre de 8 à 10 D_T , de sorte que le courant d'air passant à travers une turbine est rétabli avant son interaction avec la turbine suivante.

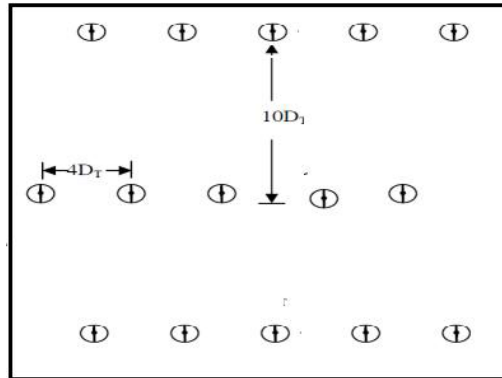


Figure II-4 : Disposition optimale des aérogénérateurs dans une ferme éolienne

Récemment des chercheurs ont étudié 56 configurations d'un modèle de ferme rassemblant pas moins de 100 éoliennes miniatures, réparties en trois groupes : le premier utilise un espacement constant entre les différentes rangées d'éoliennes ; le deuxième se caractérise par un motif avec deux rangs rapprochés suivi d'un autre plus éloigné ; et le troisième rassemble des configurations encore plus extrêmes basées sur deux rangs très resserrés suivis d'un autre encore plus distant. Dans chaque groupe, les chercheurs ont ensuite testé différentes configurations avec des éoliennes alignées ou plus ou moins décalées sur deux ou trois rangées.

Chaque configuration présente la même densité, c'est-à-dire le même nombre d'éolienne par unité de surface. Certaines configurations resserrées, du troisième groupe les éoliennes bénéficient d'interactions positives des turbulences (avec une accélération du flux d'air) qui se traduisent par un gain de puissance sur l'ensemble de la ferme.

II.7 Impact de proximité des parcs éoliens

Les projets éoliens doivent être réalisés de manière à prévenir les atteintes aux paysages, au patrimoine et à la qualité de vie des riverains. Dans cette perspective, l'étude d'impact constitue le seul moyen de fonder la décision. Elle facilite l'élaboration de projets prenant en compte les enjeux environnementaux et contribue au développement durable [17].

L'évaluation environnementale désigne l'étude descriptive et fonctionnelle des différents thèmes environnementaux : le milieu naturel (les écosystèmes, la faune, la flore, les habitats naturels ...); le milieu physique (la géographie, la topographie, l'occupation du sol, ...); le milieu humain (les activités humaines, les transports et l'environnement paysager).

Mais, c'est surtout la sensibilité du territoire sur lequel un projet est envisagé qui doit guider le porteur de projet : un petit projet dans un site sensible requiert des études qui peuvent être plus délicates, plus longues et plus onéreuses qu'un projet plus important mais dans un site peu sensible. L'ensemble des recommandations pour les études d'impact s'applique également pour les notices d'impact.

Pour certains thèmes (paysage, bruit,...), des recommandations spécifiques sont fournies dans le « Guide De l'Etude d'impact sur L'Environnement des Parcs Eoliens» [36]

II.7.1 Impact sonore

Le bruit généré par une éolienne a deux origines : le bruit mécanique et le bruit aérodynamique [17]. Il repose sur une problématique de propagation acoustique à grande distance. Les premières générations d'éoliennes avaient un bruit relativement important. Les plus récentes ont bénéficié de nombreuses améliorations, ce qui a permis de réduire leurs émissions sonores.

Le niveau sonore induit par un parc éolien dépend d'un nombre important de facteurs :

- intrinsèques à la source (puissance acoustique des éoliennes, taille du parc,...) ;
- liés à la configuration du terrain (topographie, nature du sol, géométrie éolienne-récepteur) ;
- liés aux conditions météorologiques ;
- liés au milieu environnant (zone rurale, zone industrielle, proximité d'axes routiers, présence de végétation...).

II.7.2 Impacts visuels

On distingue deux types d'impacts visuels : ceux induits par une altération du paysage, et ceux dus à l'effet stroboscopique.

a. Insertion paysagère des éoliennes

Il va de soi que les éoliennes constituent toujours des éléments très visibles dans le paysage. Sinon elles ne seraient pas bien situées d'un point de vue météorologique. La figure II-5 montre le parc éolien de Kappel au Danemark, dont la disposition des éoliennes suit la ligne de la côte pour une bonne insertion du parc dans son paysage [17].



Figure II-5 : Insertion paysagère des éoliennes [17]

b. Effet stroboscopique

L'effet stroboscopique est le résultat du passage des pales en rotation dans les rayons du soleil illuminant des pièces d'habitation ou des lieux de travail. Il ne se produit que lorsque les conditions suivantes sont simultanément réunies :

- Temps clair (soleil)
- Vent (rotation) ;
- Orientation du soleil par rapport à l'éolienne portant l'ombre de cette dernière sur un lieu d'habitation ou de travail
- Orientation des fenêtres du lieu en question vers l'éolienne.

c. Projection d'ombres d'une éolienne

Lorsque le soleil est visible, une éolienne projette - comme toute autre haute structure - une ombre sur le terrain qui l'entoure.



Figure II-6 : Projection d'ombres d'une éolienne [17]

II.7.3 Impact sur les systèmes de télécommunications

Des études traitant de ce sujet indiquent que certains systèmes de radiodiffusion et/ou télécommunications peuvent être grandement affectés. L'interférence due aux éoliennes prend deux formes; interférence par obstruction ou interférence par réflexion. Il en résulte une dégradation du signal reçu ce qui affecte la performance et la fiabilité du service.

II.7.4 Impact sur la santé

Il y a environ à ce jour 50 000 éoliennes dans le monde, dont certaines en fonctionnement depuis plus de 20 ans. Depuis tout ce temps, aucun problème de santé qui aurait alerté les autorités sanitaires n'a été remarqué.

II.7.5 Impact sur la faune

Comme pour toute étude d'impact, il convient d'identifier et d'étudier les groupes selon le risque potentiel auquel l'espace éolien les expose et de porter une attention particulière aux espèces protégées. Il a été reporté une mortalité anormale d'oiseaux et de chauves-souris. Cependant il s'agit de situations très spécifiques qui ne peuvent en aucun cas être présentées comme des exemples de référence [17].

II.8 Conclusion

La capacité de production de vent varie en fonction de sa taille et de sa forme et la forme et la taille appropriées sont choisies en fonction de site choisi. Le vent horizontal est le plus utilisé pour compter les raisons (coût, apparence et capacité de production). Nous utilisons des relations mathématiques et physiques pour prédire la capacité de production d'un site (météo et direction de vent, distribution de Weibull) ainsi qu'une étude très importante pour déterminer l'emplacement et la forme appropriées d'éolienne.

CHAPITRE III
APERÇU SUR LE MILIEU NATUREL DU
SITE DE KABERTÈNE

III.1 Introduction

Comme tout projet, la réalisation d'un projet éolien doit être précédée par une étude de faisabilité sur le site choisi pour atteindre les objectifs dressés préalablement. Dans cette perspective, une étude du milieu physique, du climat et du potentiel éolien sont réalisés. Cependant et pour mieux valoriser le projet, les retombées économiques régionales et nationales sont prises en compte. L'impact sur l'environnement doit être rigoureusement établi pour une bonne insertion du projet dans son milieu naturel et urbain. Cependant l'étude fait appel à plusieurs moyens, en particulier l'outil informatique, qui par le biais de logiciels d'évaluation du potentiel éolien on peut dresser un profil du gisement énergétique de la région, mais bien évidemment à côté des mesures réalisées sur terrain.

III.2 Énergie éolienne en Algérie histoire et perspectives

En Algérie, la première exploitation de l'énergie éolienne remonte à 1953. Il s'agit de la première construction d'éoliennes en Afrique, dans une zone agricole dite "Sidi Issa" proche de la ville d'Adrar. La région est aujourd'hui un institut de recherche agricole. L'éolienne est de 6m de diamètre (Figure III-1) destinée à l'exploitation des eaux souterraines de manière mécanique. Actuellement et après son renouvellement elle a été liée à une pompe électrique mais elle est jusqu'à présent traditionnel avec une capacité de production limitée.



Figure III-1 : Eolienne d'Adrar 1953

La première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 W sur le site des Grands Vents (Alger). Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé

initialement à St Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30m de haut avec un diamètre de 25m (Figure III-2) fut racheté par Électricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie.



Figure III-2 : Eolienne de 100W de grand vent

L'Algérie, comme le reste du monde, a entamé une vague d'investissements dans les énergies renouvelables, compte tenu de sa vaste superficie et de sa situation stratégique, et bien qu'elle soit considérée comme très faible dans l'exploitation de l'énergie éolienne, le ministère de l'Énergie et des Mines a lancé de nombreux projets. La portée de production de 1700 MW est en trois étapes. Le seul projet opérationnel est celui de Kabertène avec une capacité de production de 10 MW. Sept autres parcs éoliens avec une production moyenne de 260 MW sont en attente de plantation dans le but d'atteindre 1700 MW d'ici 2030.

III.3 Gisement éolien en l'Algérie

La cartographie des vents moyens en Algérie (sur laquelle nous pouvons constater une différence au niveau de la vitesse des vents) ci-dessous établie par le CDER nous indique les vitesses du vent à 10 m de sol sur le territoire national (Figure III-3).

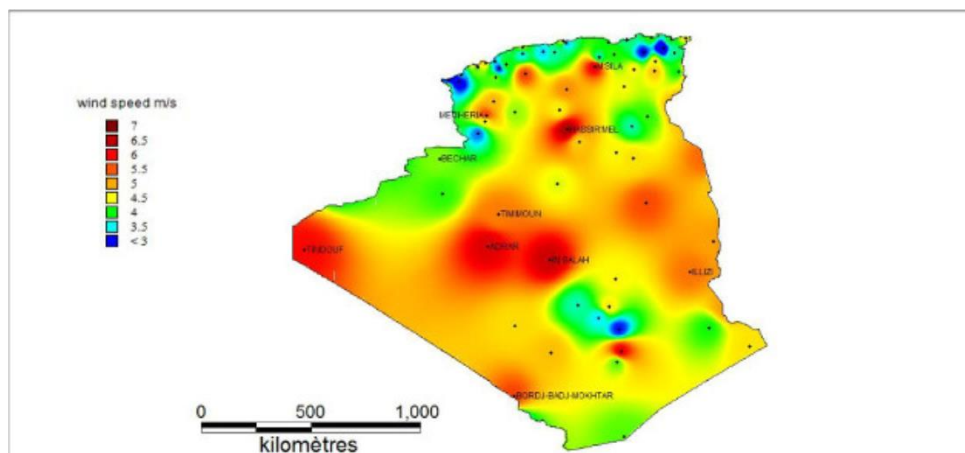


Figure III-3 : vitesses moyennes du vent en Algérie à 10m du sol (2004-2014) [37]

Notons que la vitesse du vent en Algérie est généralement de l'ordre 3m/s à 6m/s. Elle est très faible sur les régions côtières de 3m/s à 4m/s. À l'intérieur elles varient entre 4m/s et

6m/s avec des pics sur le territoire de M'sila, Tindouf et Adrar qui dépassent 5,5m/s et 6m/s respectivement. L'extrême sud est caractérisé par des vitesses modérées entre 4m/s et 5m/s. La carte montre nettement que la wilaya d'Adrar est dans une région de haut potentiel éolien.

III.4 Présentation de la wilaya d'Adrar

Le mot Adrar signifie en langue berbère "montagne". La Wilaya d'Adrar est située dans le sud-ouest de l'Algérie (Figure III-4). Elle est en superficie la deuxième plus grande wilaya d'Algérie avec 471 137 km². Ses coordonnées géographiques en degrés décimaux latitude 27.87° nord et longitude 0.29° ouest et en degrés et minutes décimales latitude 27°52.4574 Nord longitude 0°17.6328 ouest. Majoritairement occupée par le Sahara, la wilaya est peu peuplée avec seulement 452 726 habitants (estimation 2013). Au nord de la wilaya on trouve les wilayas de Ghardaïa et d'El Bayedh, à l'ouest les wilayas de Béchar et de Tindouf, à l'est la wilaya de Tamanrasset et au sud les deux pays voisins la Mauritanie et le Mali. Quatre régions constituent la totalité du territoire de la wilaya :

- ✓ Le Gourara (région de TIMIMOUN)
- ✓ Le Tidikelt (région d'AOULEF).
- ✓ Le Touat (région d'ADRAR).
- ✓ La Tanezrouft (région de BORDJ BADJI Mokhtar)

La Wilaya a pour principale économie l'agriculture avec notamment son système d'irrigation la « foggara ».

En termes de gisement en énergies renouvelables La Wilaya dispose d'un important potentiel grâce à une bonne durée d'ensoleillement (9,2 h par jour) et aux caractéristiques physiques excellentes du vent (un vent quasi permanent ≥ 6 m/s, uni-directionnalité...).



Figure III-4 : Carte géographique de la wilaya d'Adrar [38]

a. Les plateaux

Couvrent de très grandes surfaces et sont constituées de formation géologiques différentes :

- Crétacé inférieur du continental intercalaire.
- Crétacé supérieur secondaire marin-Mio-Pliocène Comme le plateau de Tanezrouft.

b. Les ergs

Massifs dunaires s'étendant sur près de la moitié de la wilaya. Ils se sont formés au cours des temps quaternaires tels que le Grand Erg Occidental et l'Erg Chèche.

c. Les sebkhas

Correspondants aux puits les plus bas et appartiennent généralement aux anciens lits d'oueds très larges, elles sont formées de dépôts fluviaux gypseux. La sebkha de Timimoune, la sebkha de Timokten et celle de Bouda.

III.5 Description du site de Kabertène

Située près de 80 km au nord de la ville d'Adrar, la ferme éolienne de Kabertène est érigée sur une superficie globale de 33 hectares formée de 12 turbines éoliennes d'une puissance nominale de 0,85MW chacune, au total 10.2 MW de puissance nominale du parc tout entier. La ferme est caractérisée par un régime de vent allant de 6m/s jusqu'à 11m/s tout au long de l'année, mais peut dépasser les 100km/h en temps de Sirocco.

III.5.1 Coordonnées géographiques

Les coordonnées géographiques du site sont indiquées sur le tableau III-1, tandis que la figure III-6 montre sa position sur la carte géographique.

Tableau III-1 : coordonnées géographiques du site de Kabertène [41]

D.M.S DETAILLE S	DIRECTIONS	DEGRIE S	MinuTE S	SECOND S
N	28	27	5.611	
O	0	2	50.557	
Latitude	28.45155856720235			
longitude	- 0.0473771098768338 56			



Figure III-6 : carte géographique du site de Kabertène [40]

III.5.2 Éléments décisifs dans le choix du site

Les éléments décisifs qui doivent être examinés soigneusement dans le choix du site dans le but d'ériger une ferme éolienne sont :

- Altitude ;
- Obstacles ;
- Situation par rapport à la direction des vents ;
- Situation par rapport au réseau électrique de distribution ;
- Superficie disponible ;
- Géographie et géomorphologie (qualité des sols, topographie) ;
- Possibilités d'accès ;
- Axe routier jusqu'à la prochaine ville portuaire ;
- Éléments réglementaires (éloignement suffisant par rapport au plan d'extension de la ville, éloignement suffisant aux radars, aéroport).

Ces différents points ont été analysés rigoureusement dans le choix du site de Kabertène. L'optimisation se fait en comparant à la fois le potentiel éolien avec les coûts impliqués dans la construction du parc sur ce même endroit [42]. Les éléments ayant conduit au choix du site de Kabertène sont :

- **Élévation** : Le site se trouve à une altitude d'environ 260 m. sur un Terrain plat, couvert de sable et très dégagé.
- **Direction du vent dominant** : La Direction des vents est quasi uni directionnelle. Il souffle avec une grande fréquence du **Nord-est**.
- **Transport** : Le site présente des possibilités idéales pour le transport. En effet, il se trouve près de l'axe routier Adrar – Timimoune.

- **Réseau électrique** : Un autre avantage est que ce site se trouve à proximité d'un poste THT-HT, et de ce fait l'extension nécessaire afin de raccorder le parc au poste est limitée, ce qui réduit les coûts de construction (figure III-7).
- **Superficie et topographie** : La superficie disponible est importante qui permet l'extension du projet dans l'avenir. La topographie est plate et la rugosité du terrain est faible. Mis à part le poste et les poteaux électriques, aucun obstacle ne se trouve aux alentours de ce site. Les photographies (Figure III-8) ci-après montrent la morphologie des terrains [43]



Figure III-7 : Transport Réseau électrique [43]



Côté Nord



Côté Ouest



Côté Est



Côté Sud

Figure III-8 : Morphologie des terrains près du site [42]

III.5.3 Démarche suivie pour le dimensionnement de l'installation éolienne

Le dimensionnement et l'installation de Kabertène a été réalisé par la compagnie de l'engineering de l'électricité et du gaz **CEGELEC CEEG**, à l'aide d'un utilitaire de calcul

professionnel : Windpro. Ce logiciel permet en effet de créer un parc éolien virtuel, et d'en calculer la production, la rentabilité, de faire des photomontages, etc... Grâce au serveur EMD qui y est rattaché. Les données empiriques sont obtenues grâce au pylône de mesure placé sur le site et qui a permis la collecte des valeurs des paramètres climatiques depuis l'an 2003 jusqu'à 2008.

III.5.4 Profil du potentiel éolien de la région d'Adrar

Il est fondamental de connaître avec précision le potentiel éolien régnant sur l'endroit futur du projet, car c'est de lui que dépend la viabilité économique. Il est donc nécessaire de mettre en place au préalable un mât de mesure qui enregistrera le comportement du vent pendant plusieurs mois, voire même plusieurs années. La puissance éolienne disponible est proportionnelle au cube de la vitesse du vent, ce qui signifie, par exemple, qu'une augmentation de 10 % de la vitesse du vent augmente de 33 % l'énergie éolienne disponible.

La région d'Adrar a été choisie suite à l'observation des mesures effectuées par l'Office National de la Météorologie (ONM) qui ont montré que cette région présente l'un des meilleurs potentiels éoliens en Algérie. Un déplacement à Adrar a été effectué pour rechercher des sites potentiels. Mis à part, les critères de choix de site éolien, tels que : accessibilité, présence de réseau, topographie, orographie, superficie, obstacles, etc. Un autre critère sur lequel la recherche du site a été basée, est la proximité d'un poste de transformation électrique afin que l'énergie produite soit injectée directement sur le poste. Les paramètres climatiques sont enregistrés pendant la période de 2001 à 2013 par le CEEG avec un pylône de mesure (Figure III-9), où sont fixés 05 anémomètres 02 girouettes et 02 CT (température).



Figure III-9 : Pylône de mesure [43]

III.5.4.1 La température

La température est un critère très important et en particulier à Kabertène (climat saharien), du moment qu'une éolienne est mise à l'arrêt pour des raisons de sécurité de la machine dès que les températures dépassent les 45°C. La courbe de la figure III-10 donne les variations annuelles de la température à Kabertène. Elle montre que juin, juillet, août et même septembre sont les mois les plus exposés à des températures caniculaires.

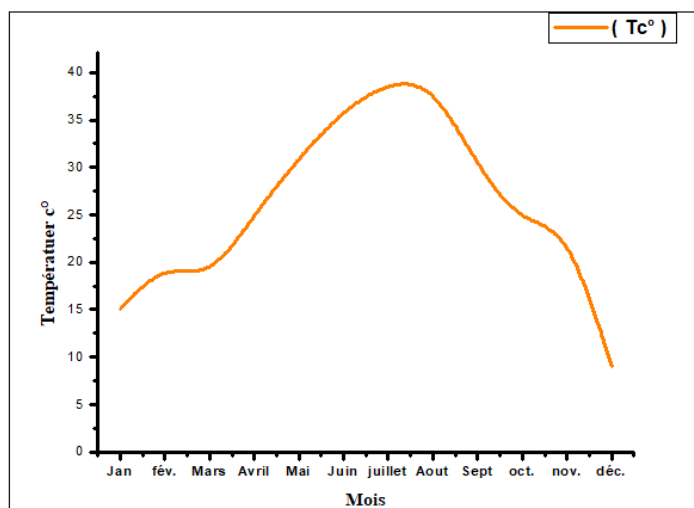


Figure III-10 : Courbe des variations annuelles de la température à Kabertène

III.5.4.2 Le vent

Le tableau III-2 présente l'écart entre les valeurs mesurées et calculées de la vitesse moyenne et la densité de puissance moyenne. L'écart qui est assez faible montre bien la fiabilité des calculs.

La figure III-11 représente les variations journalières, mensuelles et annuelles de la vitesse moyenne du vent. Les trois graphes montrent clairement que la vitesse moyenne est quasiment constante, chose qui peut être interprétée par un vent stable tout au long de l'année, du mois et même au cours d'une journée.

Tableau III-2 : Vitesse moyenne du vent et Densité de puissance moyenne (période 2003-2008) [43]

	Mesurée	Calculée	Ecart
Vitesse moyenne du vent (m/s)	6.62	6.31	4.62 %
Densité de puissance moyenne (W/m ²)	279.31	282.20	1.32 %

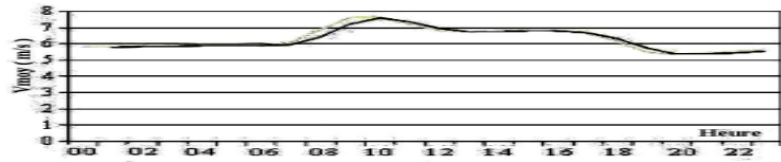


Fig. 2: Variation journalière de la vitesse moyenne du vent

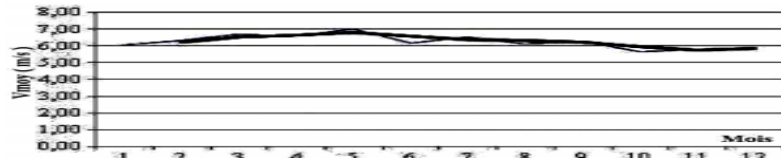


Fig. 3: Variation mensuelle de la vitesse moyenne du vent

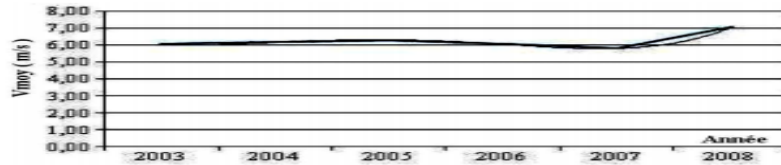


Fig. 4: Variation annuelle de la vitesse moyenne du vent

Figure III-11 : Variations journalières, mensuelles et annuelles de la vitesse moyenne du vent [44]

III.5.4.3 La rose des vents

La rose des vents de la figure III-12 est tracée par le biais du logiciel WRPLOT pour la région de Kabertène, qui montre nettement la dominance du vent soufflant du Nord-est.

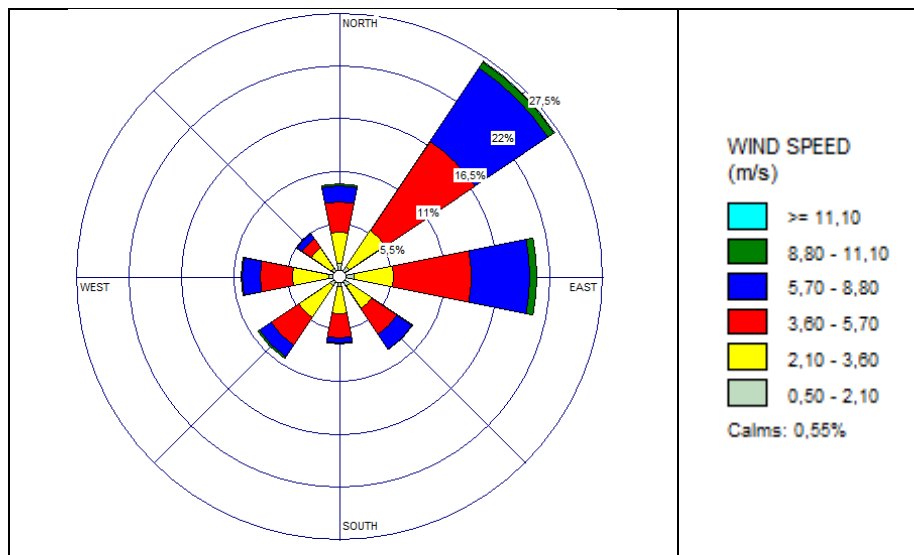


Figure III-12 : Rose des vents à Adrar (2010-2011) (logiciel WRPLOT)

III.5.4.4 Distribution de Weibull des fréquences du vent à Kabertène

L'histogramme de la figure III.13 représente la distribution des fréquences relatives des différentes classes de la vitesse du vent à Kabertène, tandis que la courbe en ligne continue est l'ajustement de l'histogramme par la fonction de Weibull. Les valeurs des paramètres de la courbe de Weibull en l'occurrence k et A ; le facteur de forme et le facteur d'échelle respectivement, ainsi que la vitesse moyenne U et la densité de puissance moyenne P sont regroupées sur le tableau III-3. La valeur de k qui est supérieure à 2 montre bien que le vent dans la région est stable, c.-à-d. la présence quasi permanente du vent, alors que la valeur de A et par conséquent celle de U , qui est assez importante montre que la région est très venteuse (Figure III-14).

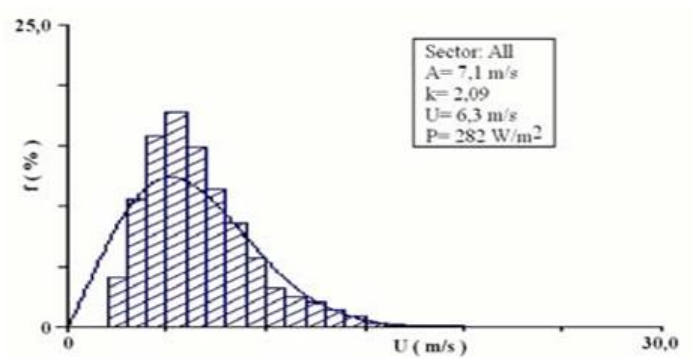


Figure III-13 : Distribution des fréquences des vitesses du vent (2003-2008) [43]

Tableau III-3 : Récapitulatif des caractéristiques de la distribution [43]

Grandeur	Valeur (sector : All)
A	7.1 m/s
k	2.09
U	6.3 m/s
P	282 W/m ²

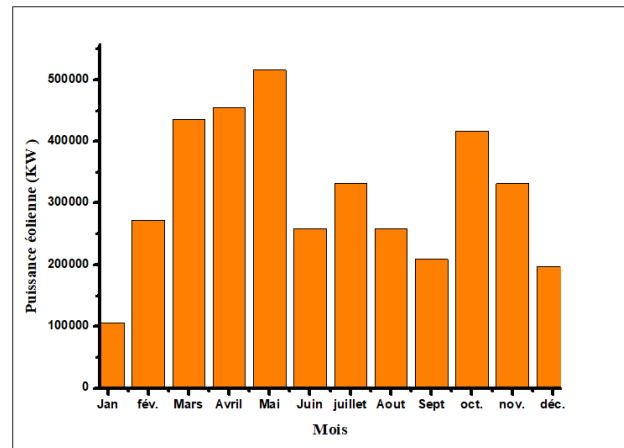


Figure III-14 : Histogramme des puissances mensuelles moyennes disponibles

III.6 Conclusion

Tous les études effectuées sur terrain du site de Kabertène confirment le bon choix non seulement sur le plan du potentiel éolien, mais aussi du côté des autres critères, que ce soit la nature du sol, l'accès au réseau routier, la proximité du réseau électrique, ainsi que la rentabilité économique du projet.

CHAPITRE IV
DESCRIPTION QUALITATIVE ET
QUANTITATIVE DU PARC ÉOLIEN DE
KABERTÈNE

IV.1 Introduction

Le 3 juillet 2014, l'ex-ministre de l'énergie, Youcef YOUSFI a procédé à la mise en service de la ferme éolienne à Kabertène (figure IV-1). Ce projet est non seulement une valeur ajoutée dans l'exploitation des ressources des énergies renouvelables disponibles dans notre pays, mais aussi une contribution dans la production d'électricité à Adrar en particulier et en Algérie généralement.

Ce chapitre est le produit d'un stage pratique effectué au sein de la centrale éolienne de Kabertène. L'étude faite sur le parc a pour but de déterminer les conditions de fonctionnement des éoliennes et leurs performances, et les problèmes qui entravent la ferme d'atteindre ces objectifs en termes de production. Toutes ces constatations sont faites pour enfin voir la possibilité de réaliser une ferme similaire à M'sila et d'étudier ses performances en fonction des conditions climatiques locales, et les modifications à apporter aux caractéristiques des éoliennes pour préserver le même rendement que celui de Kabertène.



FigureIV-1 : Ferme éolienne de Kabertène

IV.2 Plan de la Station de Kabertène

La station est constituée de deux parties (figure IV-2) :

- Sous station de la ferme éolienne (local technique + local de maintenance)
- Champ des éoliennes : Pied de mât (éolienne + kiosque)

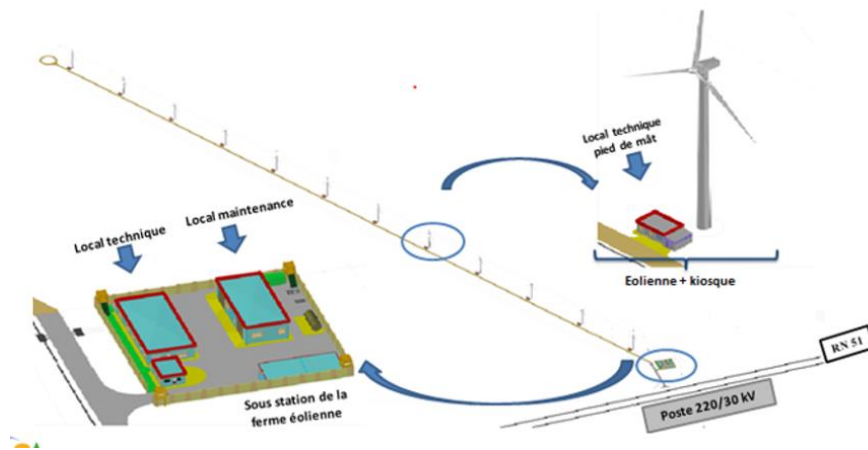


Figure IV-2 : Plan d'implantation de la ferme éolienne de Kabertène [46]

IV.3 Description de la ferme éolienne

IV.3.1 Les aérogénérateurs

Les caractéristiques des aérogénérateurs de la ferme sont répertoriées dans le tableau ci-dessous (Tableau IV-1) :

Tableau IV-1 : Caractéristiques des aérogénérateurs de Kabertène

Nombre d'éoliennes	12 éoliennes de type Gamesa (G52/850)
Nombre de pales	03 pales par éoliennes d'une longueur de 26m
Nombre de régions	01 région
Hauteur du mât	55 m
Distance entre les éoliennes	200 m
Puissance unitaire	850 KW avec $V=12\text{m/s}$ (Vitesse du vent)
Évacuation de l'énergie	Vers le poste 220/30 KV existant de Kabertène

IV.3.2 La sous station de la ferme éolienne

La sous-station illustrée par la maquette de la figure IV-3, est divisée en deux parties : local technique et local de maintenance, avec des annexes exploitées par l'administration générale et comme base de vie.



Figure IV-3 : Maquette de la sous station

a. Local technique

Un Bâtiment électrique contenant (Figure IV-4) :

- Un poste ferme 30kV moyenne tension 30kV ;
- Un tableau général de basse tension (TGBT) ;
- Une salle des batteries (40 batteries) ;
- Une salle de contrôle et de commande (système SCADA, une caméra vidéo et un système de détection des incendies).
- Un bureau de chef et une salle de réunion.



Figure IV-4 : Bâtiment électrique

• **Le poste ferme 30kV** (Figure IV-5)

Composé de 12 cellules des disjoncteurs suivants :

- disjoncteurs P1 P2 arrivée des éoliennes 1 et 12
- disjoncteur de couplage de deux demi jeux de barre 30 kV 1 et 2
- disjoncteur réserve pour éolienne (future)
- disjoncteur départ des transformateurs auxiliaires TACS1 et TACS2 (30/0.4kV).
- disjoncteurs liaisons A1 et A2 pour poste 30/220kV de SDO Kabertene(5)



Figure IV-5 : Le poste de moyenne tension 30kV

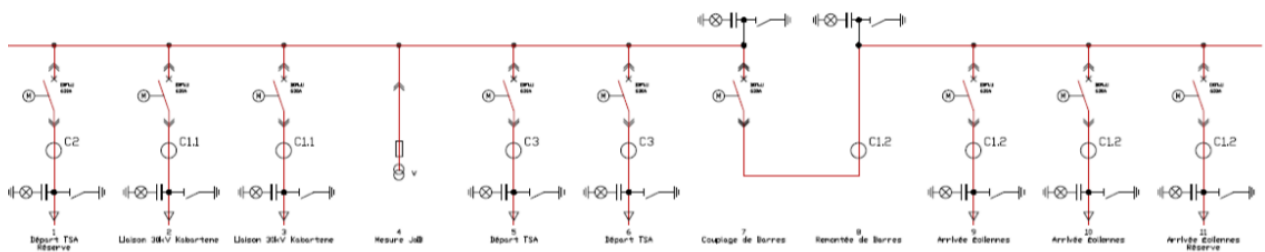


Figure IV-6 : schéma électrique du poste ferme 30kV [47]

Tableau IV-2 : Caractéristiques d'une cellule du poste ferme 30kV

Norme	CEI 62271-200
Tension de service	30 Kv
Tension de tenue assignée	36 Kv
Dimensions (H x L x P)	2250 (+ 500 pour cellule couplage) x 1200 x 2570 mm
Poids (1 cellule)	environ 1350kg

- **Tableau général basse tension (TGBT)**

Salle de contrôle des équipements basse tension : climatisation, chauffe, éclairage etc. armoire B vidéo (système pour la sécurité) et armoire SCADA (système de contrôle et d'acquisition de données)

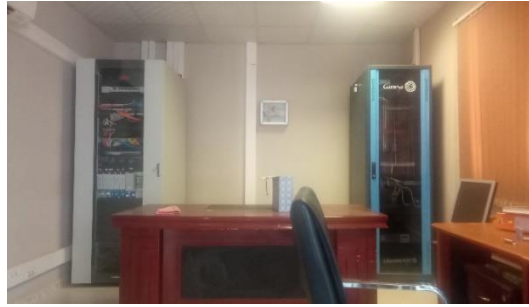


Figure IV-7 : armoire B vidéo et armoire SCADA

b. Locale maintenance

Le bâtiment de maintenance est équipé de matériel de travail, un magasin et un atelier pour les réparations.



Figure IV-8 : Bâtiment de maintenance

IV.3.3 Champs d'éoliennes (kiosque + éolienne)

Local technique considéré comme la deuxième partie de la ferme éolienne et est composé de l'éolienne elle-même et son kiosque adjacent (Figure IV-9)



Figure IV-9 : L'éolienne et le kiosque adjacent

➤ **Kiosque d'éolienne**

Le kiosque d'éolienne est constitué de trois chambres (figure IV-10) :

- la première chambre contient : trois cellules de type DM1-W de la gamme SM6-36kV de Schneider électrique, deux pour « arrivée ligne » et une cellule « départ transformateur » (figure IV-11 et 12).
- la deuxième chambre contient : Ground controller et le Coffret fusible. L'armoire électrique Ground est une armoire basse tension dotée de trois compartiments séparés :
 - **Compartiment de puissance** : Il se charge de contrôler la puissance et de gérer la connexion et la déconnexion de l'aérogénérateur au réseau.
 - **Compartiment des jeux de barres et protections** : il contient la sortie de la puissance produite avec les protections électriques.
 - **Compartiment de contrôle** : il contient l'écran tactile pour réaliser les opérations sur l'aérogénérateur. Le système de commande PLC est composé d'algorithmes de réglage et de protection qui permettent d'obtenir le meilleur rendement de l'aérogénérateur, en optimisant les variables de génération d'énergie.

La troisième chambre contient : le transformateur d'éolienne 30/0.69kV. Le transformateur de puissance 1000kVA (0,69 / 30kV ONAN) a pour tâche d'élever la tension en sortie de la génératrice de l'éoliennes de 690V entre phases à la tension de raccordement au poste du réseau électrique moyenne tension de 30kV entre phases.

CHAPITRE IV : DESCRIPTION QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DU PARC ÉOLIEN DE KABERTÈNE

Equipements principaux d'un kiosque d'éolienne :

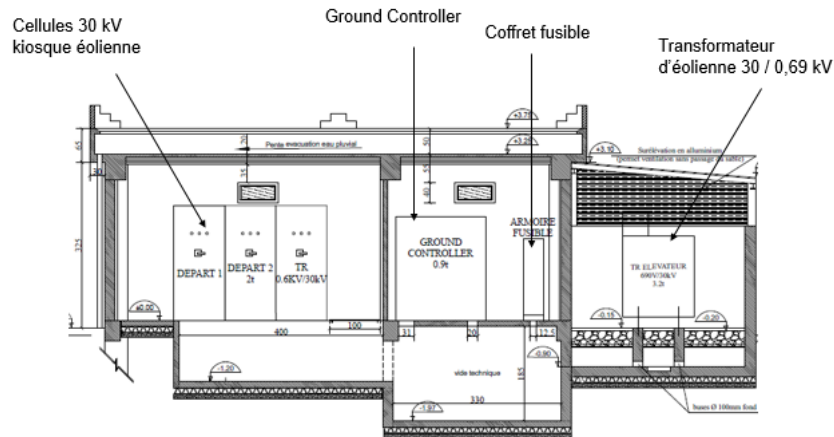


Figure IV-10 : Équipements du kiosque d'éolienne [47]



Figure IV-11 : la cellule MT

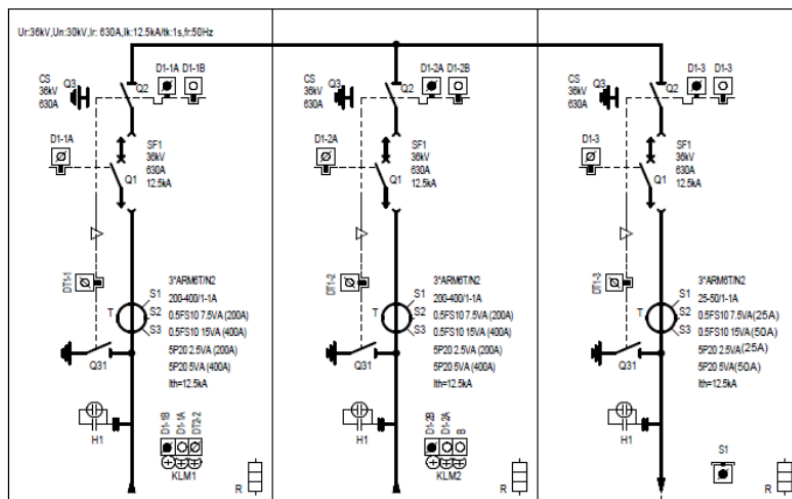
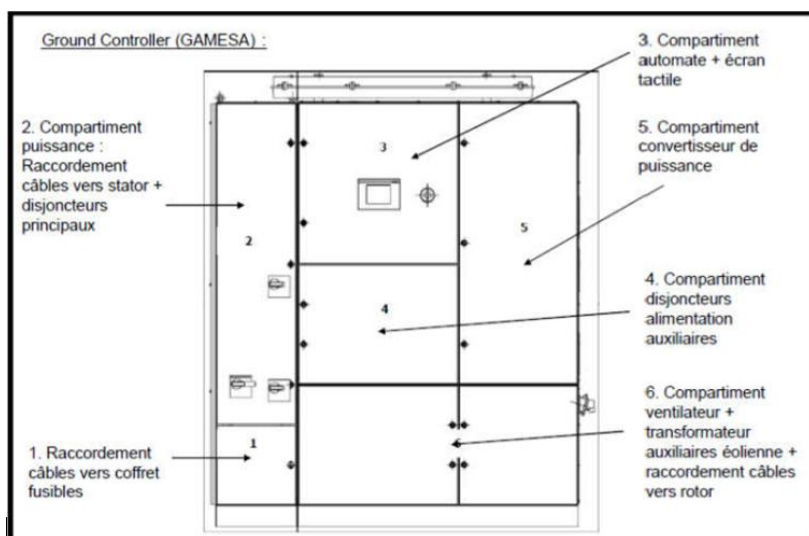


Figure IV-12 : Schéma électrique de la cellule MT [47]



Figure IV-13 : chambre d'armoire ground



FigureIV-14 : Schéma de Ground controller [47]



FigureIV-15 : Transformateur élévateur 690V/30kV

IV.4 Choix de la Machine

Les turbines éoliennes sont classées par la norme internationale IEC61400. C'est un ensemble d'exigences de conception visant à garantir que les éoliennes de puissance nominale > 500kW soient correctement conçues contre les dommages causés par les dangers pendant la durée de vie prévue. La norme concerne la plupart des aspects de la durée de vie de la turbine, depuis les conditions du site avant la construction, jusqu'aux composants de turbine testés, assemblés et exploités.

Leur classification est indiquée sur le tableau suivant :

Tableau IV-3 : Paramètres de base pour les classes d'éoliennes

Classe d'éoliennes	I	II	III	S
$V_{réf}$ (m/s)	50	42.5	37.5	Valeurs spécifiées par le constructeur
A $I_{réf}$ (-)	0.16			
B $I_{réf}$ (-)	0.14			
C $I_{réf}$ (-)	0.12			

Dans le tableau ci-dessus les valeurs des paramètres s'appliquent à la hauteur du moyeu. $V_{réf}$ est la moyenne de la vitesse du vent de référence sur 10 min.

- A désigne la catégorie relative aux caractéristiques de turbulence plus élevée ;
- B désigne la catégorie relative aux caractéristiques de turbulence moyenne ;
- C désigne la catégorie relative aux caractéristiques de turbulence plus faible ;
- $I_{réf}$ est la valeur attendue de l'intensité de la turbulence de 2 à 15 m/s.

Outre ces paramètres de base, plusieurs autres paramètres importants sont nécessaires afin d'indiquer de manière exhaustive les conditions externes devant être retenues dans la conception des éoliennes. Dans le cas des classes d'éoliennes IA à IIIC, ces dernières étant mentionnées en tant que classes standards d'éoliennes. La durée de vie prévue à la conception pour les classes I à III doit être d'au moins 20ans.

Les machines éoliennes érigées dans le parc de Kabertène sont de marque Gamesa de type G52 fabriquées en Espagne et de puissance nominale unitaire de 850kW (voir tableau IV-4). Voici les caractéristiques de chaque élément de la machine :

Tableau IV-4 : Caractéristiques de la turbine G52/850 du Constructeur Gamesa

Caractéristiques des turbines du Constructeur GAMESA		Caractéristiques Rotor	
Nom de l'aérogénérateur	G52/850	Vitesse minimale de rotation	19,44 tours/min
Puissance nominale	850 kW	Vitesse maximale de rotation	30,8 tours/min
Diamètre de rotor	52 m	Vent minimum	4 m/s
Surface balayée	$(52)^2/4 \times \pi \approx 2124 \text{ m}^2$	Vent nominal	16 m/s
Puissance unitaire	$850 \times 1 \text{ turbine} = 850 \text{ kW}$	Vent maximal	25 m/s
Puissance de parc	$850 \times 12 \text{ turbines} = 10200 \text{ kW}$		

- **Le rotor**

Le rotor de la plate-forme **Gamesa 850 kW** est composé de trois pales raccordées à un moyeu par l'intermédiaire des roulements de pale. Le moyeu possède, au niveau des brides de raccord aux pales, un angle de conicité qui éloigne la pointe de celles-ci de la tour.

- **Les pales**

Les pales sont fabriquées dans un matériau constitué de matrice organique avec un renfort en fibre de verre. Elles sont conçues pour maximiser la production énergétique et réduire les charges et l'émission de bruit ainsi que pour accomplir la fonction structurelle et aérodynamique. La longueur des pales est de 25.3m , la distance du pied des pales au centre du moyeu étant de $0,7\text{m}$ [49].

- **Le roulement de pale**

Le roulement de pale est un roulement rigide à billes, qui par l'intermédiaire d'un raccord vissé, raccorde la pale au moyeu et permet le mouvement de changement de pas de la pale.

- **Le moyeu**

Le moyeu est en fonte nodulaire. Il est fixé à la piste extérieure des trois roulements de pale et à l'arbre principal grâce à des raccords vissés. À l'intérieur est logé une partie du système de changement de pas. Il dispose d'une ouverture sur la partie frontale qui permet d'accéder à l'intérieur pour effectuer des inspections et la maintenance.

- **Le cône**

Le cône est l'enveloppe qui protège le moyeu et les roulements de pale de l'atmosphère extérieure. Il est formé de panneaux en fibre de verre et en résine de polyester, maintenus par

CHAPITRE IV : DESCRIPTION QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DU PARC ÉOLIEN DE KABERTÈNE

une structure métallique qui les fixe, par l'intermédiaire d'un raccord vissé, à la partie avant du moyeu. La conception de cette structure permet d'accéder à l'intérieur du moyeu pour les opérations de maintenance.

- La nacelle

Les dimensions approximatives de la nacelle sont 10mx 4m x3m. C'est l'élément principal de la machine, car c'est ici que la quasi-totalité des composants sont regroupés (figure IV-16).

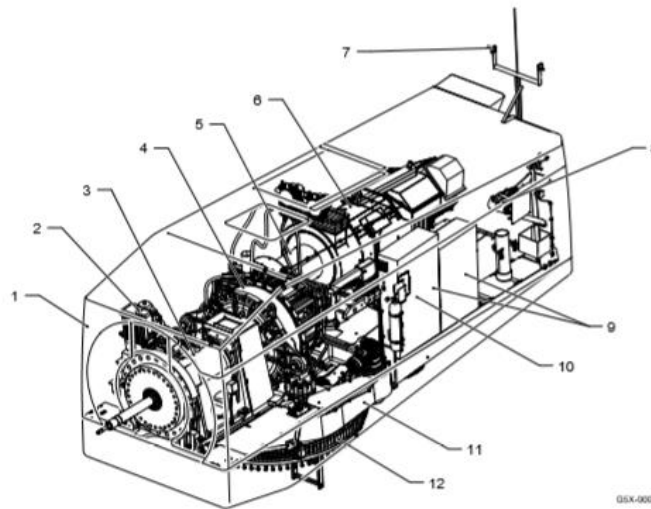


Figure IV-16 : Principaux éléments de la nacelle. Vue avant [49]

Légende de la figure IV-16

1	Carénage nacelle
2	Groupe hydraulique
3	Arbre principal
4	Multiplicateur
5	Système de freinage
6	Système générateur
7	Capteurs atmosphériques
8	Système fixe de levage de charges
9	Armoire électrique Top
10	Capteurs intégrés (OGS et SMP)
11	Châssis
12	Système d'orientation

Les principaux éléments de la nacelle sont décrits ci-dessous :

1. Carénage de la nacelle

Le carénage est l'enveloppe qui protège les éléments de l'aérogénérateur situés à l'intérieur, contre les agents météorologiques et les conditions environnementales externes. Il est fabriqué de résine avec un renfort en fibre de verre. Il dispose de 3 ouvertures principales :

- Trappe d'accès à la nacelle depuis la tour, située sur le sol de la nacelle
- Trappe d'accès à l'intérieur du cône/moyeu, située à l'avant
- Porte d'opération du palan, situé sur le panneau arrière du carénage.

Le carénage présente une lucarne au plafond qui permet de laisser entrer la lumière naturelle de jour, de bénéficier d'une ventilation supplémentaire, selon le type d'aérogénérateur, et d'accéder à l'extérieur où se trouvent les instruments de mesure du vent et le parafoudre [49]. La température extérieure et intérieure du carénage est surveillée en permanence par l'intermédiaire de sondes de température.

2. Châssis

Le châssis de la plate-forme **Gamesa 850 kW** a été conçu conformément aux critères de simplicité et de robustesse mécaniques prévus pour supporter les éléments de la nacelle et transmettre les charges jusqu'à la tour. La transmission de ces charges est réalisée par l'intermédiaire du palier du système d'orientation [49]. Le châssis est divisé en deux parties :

- Châssis avant : Il s'agit d'une pièce en fonte sur laquelle sont fixés les supports de l'arbre principal, où réagissent les bras de couple du multiplicateur et la couronne d'orientation.
- Châssis arrière : Il s'agit d'une structure mécano-soudée formée de deux poutres unies par leur extrémité avant et arrière.

3. Arbre principal

L'arbre principal est fabriqué en acier forgé et possède un orifice central longitudinal permettant de recevoir l'actionneur du système de changement de pas. Il est raccordé au moyeu par une bride vissée et s'appuie sur 2 roulements logés dans des supports en fonte. La jonction avec l'entrée de basse vitesse du multiplicateur est obtenue par un accouplement conique de serrage de l'arbre principal qui transmet le couple par friction. L'arbre principal possède deux capteurs inductifs raccordés au PLC et à l'OGS qui déterminent à tout moment la vitesse de rotation du rotor.

4. Multiplicateur

Le multiplicateur sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice à 1500 tr/min. Il est composé de 3 étages combinés, un étage planétaire et deux arbres hélicoïdaux. La denture du multiplicateur est conçue de manière à obtenir une efficacité maximale avec un niveau réduit d'émission de bruit et de vibrations. Du fait du rapport de multiplication, une partie du couple d'entrée est absorbée par les amortisseurs. Ces amortisseurs fixent le multiplicateur au châssis par l'intermédiaire de suspensions qui minimisent la transmission de vibrations. Le multiplicateur possède un système de lubrification principal équipé d'un système de filtration d'huile associé à l'arbre rapide. Il y existe un équipement électrique secondaire de filtration qui offre un degré de propreté de l'huile jusqu'à 3 μm . La température de l'huile du multiplicateur est surveillée en permanence par l'intermédiaire d'une sonde de température.

Les composants et paramètres de fonctionnement du multiplicateur sont surveillés par différents capteurs, tant du système de commande que du système de maintenance prédictive Gamesa SMP [49].

5. Génératrice

C'est une machine asynchrone à double alimentation (MADA) (technologie DFIM)

Parmi ses nombreux avantages, nous citons

- la mesure du courant stator et rotor, contrairement aux autres machines, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique ;
- le partage des fréquences entre le stator et le rotor : en effet, dans le cas d'une double alimentation il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement ;
- l'alimentation de la machine par deux onduleurs permet de travailler autour de l'arrêt à des fréquences relativement élevées évitant ainsi un déclassement des convertisseurs tout en maintenant un couple à l'arrêt. Cette même propriété assure un contrôle quasi insensible aux variations résistives de la machine ;

- la solution avec deux convertisseurs alimentant la machine permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge ;
 - la MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines à grandes puissance ;
 - la possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale ;
 - la MADA se comporte comme une machine asynchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6) ;
 - Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation.

Le générateur possède 4 pôles, avec le rotor et stator bobinés et des bagues collectrices (figure IV-17). Il est refroidi par convection forcée. L'air est évacué à l'extérieur par la conduite située dans le toit du carénage de la nacelle [49]. La vitesse variable du vent provoque une variation constante du débit qui traverse la zone de balayage des pales. Le rotor du générateur variera en fonction de la vitesse du vent. Sur ce type de générateurs, la fréquence angulaire de l'onde générée (équivalente à la fréquence du réseau) et la fréquence angulaire de la vitesse de rotation du rotor du générateur (imposée par la vitesse de vent) sont différentes.

Le système de commande du générateur permet de travailler avec glissement variable, afin de pouvoir produire de l'énergie en dessous de la vitesse de synchronisation et réduire les charges.

Le générateur est protégé contre les courts-circuits et les surcharges et est équipé d'un encodeur du côté opposé à l'accouplement pour contrôler la vitesse de rotation. Sa température est surveillée en permanence par l'intermédiaire de sondes installées dans le stator et les roulements.

Le système de contrôle de l'éolienne est capable de limiter la puissance active

Le convertisseur injecte ou extrait du courant dans le rotor avec une fréquence variable ce qui permet d'avoir une fréquence de 50 Hz au stator quel que soit la vitesse de rotation du rotor. L'énergie mécanique du rotor est aussi convertie en énergie électrique. L'énergie à la sortie est par conséquent l'énergie évacuée par le stator (~800 kW) et par le rotor (~50 kW).

Ci-dessous sont listées les principales caractéristiques de la génératrice :

Tableau IV-5 : Caractéristiques de la génératrice

Dénomination	Caractéristiques
Puissance nominale génératrice	850kw
Puissance nominale stator	812kw
Puissance nominale rotor	59kw
Vitesse nominale du générateur	1620 tours/min
Vitesse synchrone du générateur	1500 tours/min
Tension nominale	690V
Fréquence nominale	50Hz
Limite de fréquence autorisée	47-52Hz

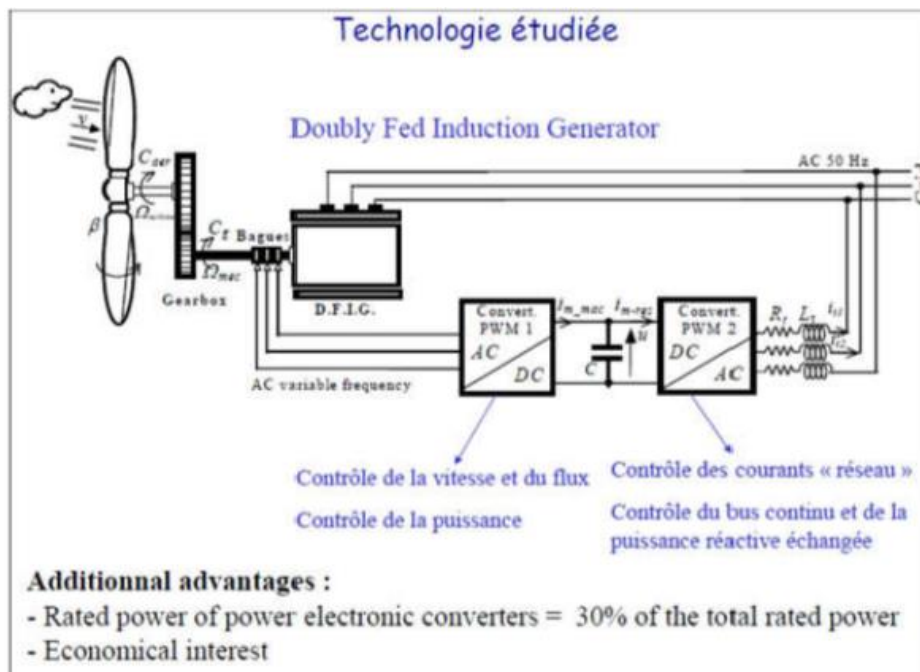


Figure IV-17 : Schéma électrique de la MADA [43]

6. Système fixe de levage de charges

L'aérogénérateur est équipé d'un système de levage de charges qui permet de hisser jusqu'à 160 kg de charge nominale de la partie inférieure de la tour à la nacelle.

7. Armoire électrique top

L'armoire électrique Top de basse tension est située dans la nacelle et comporte deux compartiments séparés par un troisième facultatif. Celui de gauche permet la connexion du câble de puissance côté statorique, celui de droite contient la cellule des actionnements, commande et protections. Le compartiment facultatif est réservé pour équiper l'armoire d'éléments annexes si nécessaire.

8. Capteurs

Les aérogénérateurs de la plate-forme Gamesa 850kW sont équipés de plusieurs capteurs qui contrôlent de manière permanente différents paramètres. Selon le type d'informations qu'ils collectent, on distingue les capteurs suivants : capteurs atmosphériques (vitesse et direction du vent), capteurs de niveau d'huile situé sur le multiplicateur et dans le groupe hydraulique, capteur de pression à différents points du groupe hydraulique.

9. Systèmes intégrés

On distingue deux systèmes ; OGS et SMP

- **OGS** : C'est un système composé d'un appareil de contrôle de survitesse et d'un capteur inductif qui agit comme système de commande de survitesse redondant au contrôle de survitesse du PLC.
- **SMP** : Le système SMP est une unité avec une capacité de traitement de données et de génération automatique d'alarmes relatives à l'état des principaux éléments mécaniques de l'aérogénérateur. Il est formé par l'unité de surveillance, installée dans l'armoire électrique Top et par des accéléromètres installés sur les principaux éléments mécaniques de l'aérogénérateur. Le système de maintenance prédictive permet la détection prématurée de défauts ou de détériorations dans les principaux éléments de l'aérogénérateur.

10. Système hydraulique

Le système hydraulique fournit le débit d'huile à la pression nécessaire pour l'actionnement du système de changement de pas et Frein mécanique de l'aérogénérateur, ainsi que le système d'orientation. La température de l'huile du groupe hydraulique est surveillée en permanence par l'intermédiaire d'une sonde de température.

11. Système de changement de pas des pales (pitch)

Le système pitch est conçu pour fait tourner la pale autour de son axe longitudinale de façon à ajuster sa position angulaire (angle d'attaque) en fonction du vent. Cette position est déterminée par la stratégie de puissance et de commande lorsque la machine est en protection. Le système est Composé de 3 cylindres hydrauliques (1 par pale) équipés d'un capteur de position (balluff). L'extension du cylindre détermine la position angulaire de la pale.

12. Système de freinage

Le frein principal de l'aérogénérateur est de type aérodynamique par la mise en drapeau des pales. Le frein secondaire, mécanique, est composé d'un frein à disque activé hydrauliquement et qui est monté à la sortie de l'arbre rapide du multiplicateur. Ce frein mécanique est utilisé uniquement comme frein de stationnement qui empêche le démarrage de la rotation une fois à l'arrêt.

13. Système d'orientation (système YAW)

L'action combinée du coussinet de friction et des freins des mâchoires (freins hydrauliques sur les aérogénérateurs anciens), procurent le couple de retenue suffisant pour contrôler la rotation d'orientation. L'action conjointe de ces systèmes évite la fatigue et des éventuels dommages sur la couronne.

Le système d'orientation comprend un dispositif de contrôle de tours que fait la nacelle dans les différents sens de rotation et qui protège l'aérogénérateur les câbles de puissance contre un enroulement excessif [49].

Le système est équipé d'un capteur inductif qui indique à tout moment la position relative de la nacelle par rapport au nord magnétique

14. Tour et fondations

La tour de l'aérogénérateur est tubulaire, en acier, de forme tronconique et divisée en 2 ou 3 sections modulaires démontables, en fonction de sa hauteur. Elle est fournie avec ses plates-formes, escaliers et éclairage d'urgence correspondants. La tour est équipée en option d'un élévateur et un système d'aide au levage interne pour faciliter la maintenance de l'aérogénérateur [49].

15. Le système SCADA de communication de l'éolienne G52/850

La station Utilise le système **SCADA** pour Control et Acquisition des Données. Il permet :

- Contrôle de surveillance ; mesurer pour agir et/ou pour corriger
- Registre de données ; obtention et traitement des données.

- Toutes ces données sont centralisées dans la base de données de contrôle à distance.
- Il est également possible de les échanger avec les appareils ou de les exporter vers un centre de contrôle.

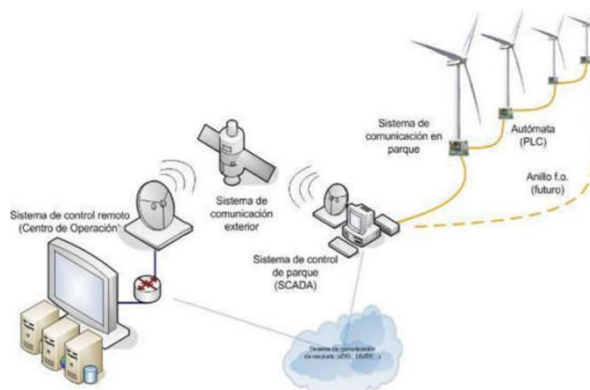


Figure IV-18 : Système de communication SCADA [46]

IV-5 Énergie produite annuelle

Les éoliennes ne peuvent pas fonctionner d'une façon permanente et efficacement au cours de l'année, pour des raisons diverses qu'on peut citer ci-dessous :

- Intermittence du phénomène éolien
- Vitesses excessives du vent à cause des rafales, les tempêtes ou dans le cas extrême les ouragans (régions cycloniques)
- Conditions climatiques extrêmes (température très élevée ; climat saharien)
- Pannes des aérogénérateurs (mécaniques ou électriques)
- Travaux d'entretiens

Le tableau IV-5 donne un rapport de la production générale en termes d'énergie électrique (en kWh) du parc de Kabertène durant une année allant du 01/01/2015 Au 31/12/2015. Le tableau montre en détail l'énergie électrique produite et le nombre d'heures de fonctionnement de chacune des douze éoliennes présentes sur le parc, ainsi que le nombre d'heures équivalent en régime nominal. L'efficacité varie énormément d'une machine à une autre. Elle est due à la disponibilité des différentes machines qui est exprimée par le rapport du nombre d'heures de fonctionnement sur le nombre d'heures d'une année complète. Ce rapport varie de 48% à 95% pour les différents aérogénérateurs pris séparés, cependant il atteint une valeur de 68,87% pour l'ensemble du parc. Cela indique que le temps des pannes et des entretiens est assez limité, c'est le temps de fonctionnement en dehors du régime nominal qui

CHAPITRE IV : DESCRIPTION QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DU PARC
ÉOLIEN DE KABERTÈNE

fait baisser sensiblement le facteur de capacité du parc jusqu'à 34,94%. En d'autres termes le régime nominal qui correspond à une vitesse du vent entre la vitesse nominale $V_N = 16m/s$ et la vitesse d'arrêt $V_A = 25m/s$ représente 34,94% du temps de fonctionnement.

Tableau IV-6 : Rapport de production générale du parc année 2015 (kWh) [54]

Dispositif	Production (kWh)	Aérogénérateur OK (h)	Disponible (%)	Équivalent heures	C_f (%)
WT01	2 250 284	7 215	92,00	2 647,39	36,69
WT02	1 697 193	5 432	70,17	1 996,70	36,76
WT03	697 817	2 258	47,95	820,96	36,36
WT04	1 906 719	6 242	85,77	2 243,20	35,94
WT05	1 944 630	6 513	93,66	2 287,80	35,13
WT06	2 387 932	7 625	95,72	2 809,33	36,84
WT07	1 875 750	6 009	75,47	2 206,76	36,72
WT08	2 200 120	7 369	90,76	2 588,38	35,13
WT09	1 952 431	6 877	88,84	2 296,98	33,40
WT10	1 162 480	4 592	65,67	1 367,62	29,78
WT11	1 894 519	7 180	89,26	2 228,85	31,04
WT12	1 542 196	5 129	69,32	1 814,35	35,37
Parc	21 512 071	72441	68,87	25308,32	34,94

Avec :

- Disponibilité (%)= Aérogénérateur OK(h)/nombre d'heures année
- Équivalent heures = Production (kWh)/850
- Facteur de capacité : C_f (%) = (Équivalent heures/ Aérogénérateur OK (h))
- Les cellules en blanc sont des valeurs rapportées du rapport [54]. Les cellules en jaunes des valeurs déduites.

CHAPITRE V

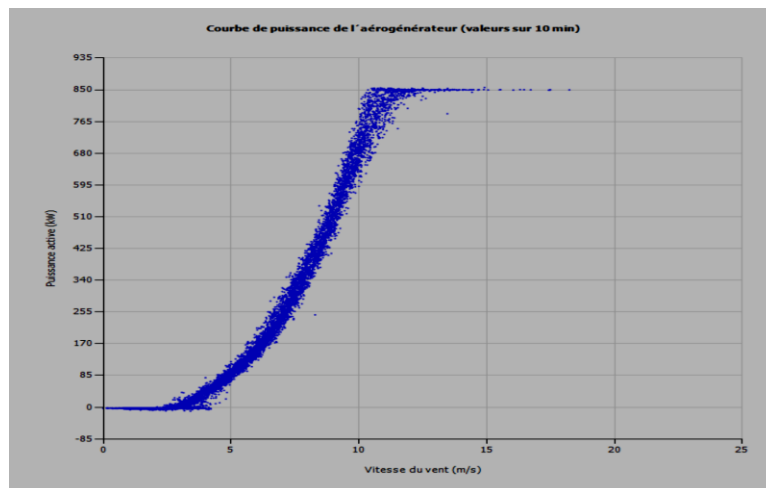
ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE UN PARC
ÉOLIEN VIRTUEL À M'SILA ET LE PARC
DE KABERTÈNE

V-1 Préambule

Dans cette partie, nous avons examiné l'efficacité d'une installation similaire au parc de Kabertène dans le cas où cette dernière aurait été érigée sur un site situé sur le territoire de M'sila. On sait au préalable que le potentiel éolien à M'sila est moins important que celui d'Adrar. On est certain alors que le rendement sera moindre avec les mêmes caractéristiques et le même nombre d'aérogénérateurs déjà installés à Kabertène. L'objectif est alors de déterminer le dimensionnement le plus adéquat pour la région afin d'avoir un rendement comparable à celui de Kabertène, mais quel sera le surcoût de l'installation dans ce cas ?

V-2 Courbe de puissance des éoliennes

La courbe de puissance donne la variation de la puissance électrique produite par une éolienne en fonction de la vitesse du vent. La figure V-1 représente la courbe de puissance active de l'éolienne N°06 (WT06) suivant le prélèvement du SCADA sur une période de 10min



de 00:00:00 à 00:10:00 du 01/01/2016.

Figure V-1 : Courbe de puissance active de l'éolienne N°06 (valeurs sur 10min)

On distingue sur la courbe trois zones principales. La première zone correspond à la fourchette des vitesses du vent de 0 à 4m/s ($V_D = 4m/s$ est la vitesse de démarrage de l'éolienne indiquée par le constructeur). Dans cette partie de la courbe la puissance électrique produite est nulle du moment que les pales du rotor sont au repos. À partir de cette vitesse l'hélice se met en marche et la machine commence à produire de l'électricité. La puissance produite s'accroît au fur et à mesure que la vitesse du vent augmente. Elle atteint sa valeur maximale pour une vitesse nominale $V_N = 16m/s$ (2^{ème} zone). Pour des vitesses supérieures à V_N la turbine laissée à elle-même voit sa puissance chuter drastiquement. Dans le but de maintenir la production à sa valeur nominale le poste de commande intervient par le biais du

CHAPITRE V : ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE UN PARC ÉOLIEN VIRTUEL À M'SILA ET LE PARC DE KABERTÈNE

SCADA au niveau du système PITCH des pales pour les orienter de sorte à agir contre la surélévation de la vitesse du vent (3^{ème} zone). Dès que le vent atteint la vitesse de $V_A = 25m/s$, et pour des mesures de sécurité (risque de détérioration des pales), les pales de la machine sont mises en drapeau en faisant tourner la nacelle (grâce au système YAW) de 90° par rapport à la direction du vent.

Le tableau V-1 ci-après illustre bien la situation expliquée en haut, où les valeurs négatives de la puissance indiquent simplement que l'éolienne n'est pas en mesure de produire, mais au contraire elle consomme de l'énergie pour maintenir le fonctionnement de ses auxiliaires (annexes).

Tableau V-1 : Puissance électrique produite (puissance effective) en fonction de la vitesse du vent

Classe de vitesses de vent	Vitesse du vent (m/s)	Puissance (kW)
0	0,15	-3
1	1,08	-3
2	2,00	-4
3	3,01	3
4	3,97	34
5	5,00	90
6	6,02	157
7	6,99	246
8	8,00	366
9	9,00	515
10	9,96	681
11	10,95	808
12	11,92	845
13	12,85	848
14	13,96	850
15	14,81	851
16	15,97	850
17	17,28	850
18	18,23	850

Le calcul de la puissance effective moyenne qui se fait par le biais de l'expression (II-13) nécessite de connaître la forme analytique de la courbe de puissance ou de chercher la somme

CHAPITRE V : ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE UN PARC ÉOLIEN VIRTUEL À
M'SILA ET LE PARC DE KABERTÈNE

discrète selon l'expression (II-14). Dans le premier cas des techniques d'intégration numérique s'imposent, le deuxième cas exige d'avoir des données empiriques sur la vitesse du vent, la fréquence d'occurrence de chaque classe de vitesses et la puissance effective pour chaque valeur mesurée de la vitesse.

Il existe en littérature une expression largement utilisée pour estimer la puissance effective moyenne à la sortie d'une éolienne en utilisant le facteur de capacité C_f défini par :

$$C_f = \frac{\overline{P_{eff}}}{P_n} \quad (V-1)$$

$\overline{P_{eff}}$: est la puissance effective moyenne définie dans (II-13 et 14)

P_n : est la puissance nominale de l'éolienne, donnée par le constructeur. Pour l'éolienne de type G52/850 elle vaut 850kW.

Le facteur de capacité C_f est déterminé en fonction des deux paramètres de Weibull du site considéré et les différentes vitesses de fonctionnement d'une éolienne (démarrage, nominale et d'arrêt) selon l'expression suivante :

$$C_f = \frac{e^{-\left(\frac{V_D}{A}\right)^k} - e^{-\left(\frac{V_N}{A}\right)^k}}{\left(\frac{V_N}{A}\right)^k - \left(\frac{V_D}{A}\right)^k} - e^{-\left(\frac{V_A}{A}\right)^k} \quad (V-2)$$

V_D, V_N et V_A sont respectivement la vitesses de démarrage, nominale et d'arrêt de la machine qui sont données par le constructeur. Donc on peut déterminer $\overline{P_{eff}}$ par :

$$\overline{P_{eff}} = \left(\frac{e^{-\left(\frac{V_D}{A}\right)^k} - e^{-\left(\frac{V_N}{A}\right)^k}}{\left(\frac{V_N}{A}\right)^k - \left(\frac{V_D}{A}\right)^k} - e^{-\left(\frac{V_A}{A}\right)^k} \right) P_n \quad (V-3)$$

V-3 Calcul de la puissance effective moyenne du parc de Kabertène

Tel que indiqué sur le tableau III-3 les valeurs des deux paramètres de Weibull k et A à 10m du sol sont 2,09 et 7,1m/s respectivement. Et comme le moyeu de l'éolienne G52/850 se trouve à une hauteur de 55m du sol, les deux paramètres doivent être extrapolés à cette hauteur en utilisant la loi de cisaillement du vent donnée par :

$$\frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^n \quad (V-4)$$

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{1 - 0.088 \ln\left(\frac{h_2}{10}\right)}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{h_1}{10}\right)} \quad (V-5)$$

L'exposant n étant calculé par :

CHAPITRE V : ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE UN PARC ÉOLIEN VIRTUEL À
M'SILA ET LE PARC DE KABERTÈNE

$$n = \frac{0.37 - 0.088 \ln(A_1)}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{h_1}{10}\right)} \quad (\text{V-6})$$

À savoir que k_1 et A_1 sont les paramètres de Weibull à la hauteur de référence h_1 et k_2 et A_2 ceux à la hauteur désirée h_2 . Cependant la vitesse du vent (v_2) à la hauteur désirée (h_2) est calculée en fonction de la vitesse v_1 à la hauteur de référence h_1 par :

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha \quad (\text{V-7})$$

Où α est le coefficient de cisaillement du vent et est donné par :

$$\alpha = \frac{0.37 - 0.088 \ln(v_1)}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{h_1}{10}\right)} \quad (\text{V-8})$$

Remarque : La vitesse moyenne \bar{V}_2 à la hauteur h_2 se déduit d'une façon similaire de (V-7) en remplaçant dans (V-8) v_1 par \bar{V}_1 .

Les résultats des calculs sont rapportés dans le tableau V-2 ci-dessus :

Tableau V-2 : caractéristiques du potentiel éolien d'Adrar à la hauteur du moyeu

Grandeur \ Hauteur(m)	k	$A(m/s)$	$V_{moy}(m/s)$	$\bar{P}_{eff}(kW)$
10	2,09	7,1	6,3	121,11
55	2,46	9,94	8,98	234,12

Remarque :

- La valeur de \bar{P}_{eff} à 10m du sol n'as pas de réalité physique.
- La puissance effective moyenne calculée au niveau du moyeu est une valeur théorique.
- La puissance calculée figurant dans le tableau ci-dessus se rapporte à une seule éolienne.

Donc pour l'ensemble du parc la puissance effective produite sera :

$$\bar{P}_{parc} = 12\bar{P}_{eff} \quad (\text{V-9})$$

Tableau V-3 : Valeur unitaire et du parc de la puissance effective (mesurée et calculée)

Mesurées			calculées		
$\bar{P}_{parc}(kW)$	$\bar{P}_{moy}(kW)$	C_f	$\bar{P}_{eff}(kW)$	$\bar{P}_{parc}(kW)$	C_f
3563,52	296,96	34,94	234,12	2809,44	27,54

V-4 Calcul de la puissance effective moyenne d'une éolienne G52/850 dans la région de M'sila

L'objectif est d'étudier dans un premier temps les performances de la machine G52/850 dans des conditions de fonctionnement relatives à la région de M'sila. En second lieu on étudie l'efficacité d'une installation constituée de douze éoliennes semblable au parc de Kabertène dans le but de comparer les deux installations en termes de rendement énergétique et par conséquent suggérer quelques variantes dans le dimensionnement du parc virtuel à M'sila pour pouvoir atteindre les performances comparables à celles de Kabertène.

Dans cette optique on doit Comme dans le cas de la ferme éolienne de Kabertène, évaluer la puissance effective moyenne de l'éolienne G52/850 sur un site de la région de M'sila. On doit nécessairement passer par l'extrapolation des paramètres de Weibull à la hauteur du moyeu qui est de 55m de haut, par rapport à leurs valeurs déjà connus à la hauteur de référence de 10m (Tableau V-2). La loi de cisaillement permet de déterminer d'une façon très élégante ces valeurs extrapolées. La puissance effective moyenne est ensuite déterminée selon (V-1), en calculant tout d'abord le coefficient de capacité C_f sachant les valeurs de k et A à la hauteur du moyeu.

Pour caractériser le potentiel éolien de la région de M'sila nous avons traité et analysé les données empiriques s'étalant sur deux ans (2010 et 2011), collectées de l'office national de météorologie (ONM) à M'sila. Les données sont traitées par le logiciel WAsP, dont l'utilisation est très répandue dans le monde de l'éolienne. Les résultats de l'étude sont illustrés sur la figure V-2 qui montre l'histogramme de la distribution annuelle des vitesses du vent à 10m du sol et la courbe de Weibull correspondante, tandis que la figure V-3 représente la rose des vents annuelle qui nous indique les directions dominantes du vent.

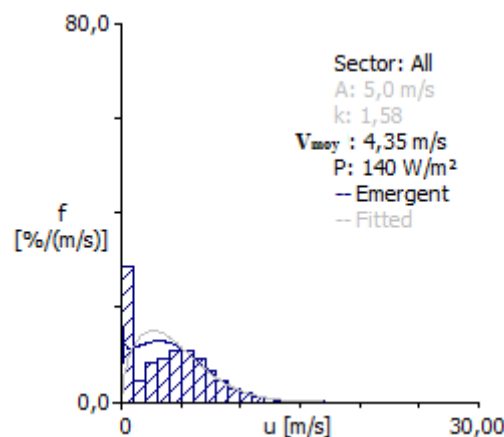


Figure V-2 : Histogramme de la vitesse annuelle du vent ajusté par la distribution de Weibull à 10m du sol

CHAPITRE V : ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE UN PARC ÉOLIEN VIRTUEL À
M'SILA ET LE PARC DE KABERTÈNE

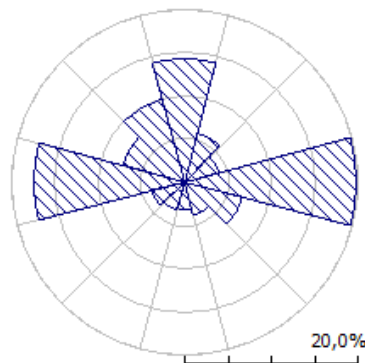


Figure V-3 : Distribution annuelle des directions du vent

Le tableau (V-4) récapitule les caractéristiques du vent dans la région de M'sila en l'occurrence les paramètres de Weibull, la vitesse moyenne et la densité de puissance disponible à 10m du sol.

Tableau V-4 : caractéristiques moyennes annuels du vent à 10 m du sol

k	$A (m/s)$	$V_{moy}(m/s)$	$P(W/m^2)$
1.58	5	4 .35	140

L'extrapolation de ces valeurs à 55m de haut donne les résultats tabulés ci-après (tableau V-5) :

Tableau V-5 : Caractéristiques du vent et puissance effective moyenne à 55m du sol

k	$A (m/s)$	$V_{moy}(m/s)$	C_f	$\bar{P}_{eff}(kW)$	$\bar{P}_{parc}(kW)$
1,86	7,38	6,56	0,18	155,18	1862,18

Une comparaison entre les deux installations sur la base des résultats rapportés sur les deux tableaux (V-1) et (V-3) montre clairement que les performances du parc de Kabertène l'emportent de loin sur l'installation virtuelle de M'sila. La puissance estimée pour la ferme de M'sila ne représente en fait que 66,3% de la puissance calculée de la station de Kabertène et ne dépasse pas les 52,25% de la puissance réellement produite. En dépit de l'écart entre les valeurs de la puissance calculée et mesurée, la station suggérée reste très loin d'atteindre les mêmes performances en préservant les mêmes dimensions que celle de Kabertène. Néanmoins, on peut améliorer le rendement en agissant sur le dimensionnement du parc.

Plusieurs scénarios peuvent être envisagés :

CHAPITRE V : ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE UN PARC ÉOLIEN VIRTUEL À M'SILA ET LE PARC DE KABERTÈNE

- Augmenter le nombre d'éoliennes de type G52/850 à installer ;
- Augmenter la hauteur du mât ;
- Augmenter le diamètre du rotor ;
- Optimiser l'installation en fonction des trois paramètres précédents.

Premier scénario : Augmenter le nombre d'éoliennes à installer

Soit N le nombre d'éoliennes à installer sur le parc virtuel. Les N machines doivent produire la même puissance que celle de Kabertène. Il en découle que :

$$N\bar{P}_{eff}(M'sila) = \bar{P}_{parc}(Kabertène) \quad (V-10)$$

D'où on tire le nombre d'éoliennes nécessaires pour l'installation :

$$N = \frac{\bar{P}_{parc}(Kabertène)}{\bar{P}_{eff}(M'sila)} \cong 23 \text{ éoliennes} \quad (V-11)$$

Le parc doit être alors doté de 23 éoliennes de type G52/850 pour qu'il puisse fonctionner avec des performances similaires. La configuration géographique du parc est constituée de deux rangées orientées vers l'Est. La première rangée est formée de 12 éoliennes espacées de 200m. La deuxième, composée de 11 éoliennes (toujours espacées de 200m) est plantée à une distance de 500m du côté Ouest et décalée horizontalement par rapport à la première d'une distance de 100m.

Deuxième scénario : augmenter la hauteur du mât

On désigne par H la hauteur du moyeu pour laquelle la vitesse moyenne du vent dans la région de M'sila aura la même valeur que celle de Kabertène à 55m de haut. A partir du tableau V-3 on trouve que $\bar{V}_H = 8,98m/s$, où \bar{V}_H désigne la vitesse moyenne du vent à M'sila à cette hauteur. La loi de cisaillement du vent indiquée dans les expressions (V-7) et (V-8) permet facilement d'extraire la valeur de H . Tout calcul fait on trouve que $H = 203,33m$

C'est un résultat sans intérêt pratique, car une installation pareille est techniquement difficile à réaliser, d'autant plus que le coût sera économiquement très élevé. A une hauteur semblable il faut penser à installer des turbines plus puissantes pour qu'on puisse effectivement augmenter le rendement du parc.

Troisième scénario : augmenter la longueur des pales

Augmenter la longueur des pales est une autre solution à envisager du moment que la puissance produite est proportionnelle à la surface S balayée par les pales.

Pendant la rotation du rotor les pales décrivent un cercle de diamètre D égal au double de la longueur des pales. Donc la surface du cercle sera :

$$S = \frac{1}{4}\pi D^2 \quad (V-12)$$

CHAPITRE V : ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE UN PARC ÉOLIEN VIRTUEL À M'SILA ET LE PARC DE KABERTÈNE

La densité de puissance effective moyenne est donnée par l'expression indiquée dans (II-13). C'est une grandeur définie par unité de surface. Il en découle que pour une surface S la puissance effective moyenne produite par une éolienne, dont le diamètre de l'hélice est D sera :

$$\bar{P}_{eff} = \frac{1}{4}\pi D^2 \int_0^{\infty} P_{eff}(V) f(V) dV \quad (V-13)$$

On déduit qu'il y a proportionnalité entre \bar{P}_{eff} et le carré du diamètre. On peut écrire alors que pour deux diamètres différents D_1 et D_2 on aura :

$$\frac{\bar{P}_{eff1}}{\bar{P}_{eff2}} = \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad (V-14)$$

Si :

- \bar{P}_{eff1} désigne la puissance effective produite par l'éolienne G52/850 de diamètre $D_1 = 52m$ installée à M'sila.
- \bar{P}_{eff2} désigne la puissance effective qu'on veut réaliser, dont la valeur est de 234,12kW qui doit être atteinte pour un certain diamètre D_2 qu'il faut déterminer.

L'expression (V-14) donne :

$$D_2 = D_1 \sqrt{\frac{\bar{P}_{eff2}}{\bar{P}_{eff1}}} \quad (V-15)$$

On obtient donc $D_2 = 64m$. La longueur des pales cherchée est de 32m de long. Or le critère à respecter dans la conception des éoliennes est que la longueur des pales soit entre 50% à 65% de la hauteur du mât [56]. Un critère bien vérifié étant donné que la hauteur de la tour est de 55m. Cependant des éoliennes de type 850kW avec un diamètre de 64m ne sont pas proposées par le constructeur.

Quatrième scénario : Optimiser l'installation en fonction des trois paramètres précédents

Les investigations qu'on a effectuées sur le marché des turbines proposées par le constructeur Gamesa nous ont révélé que l'éolienne de type G52/850 est proposée avec deux hauteurs du mât ; 44m ou 65m, qui ne peuvent en aucun cas remplacer l'éolienne de Kabertène si elle sera installée à M'sila. Pour cela nous avons opté pour un autre modèle plus proche ; la turbine G58/850, dont les caractéristiques sont répertoriées dans le tableau V-6. Pour estimer la puissance effective moyenne débitée par l'éolienne G58/850 dans les conditions de fonctionnement de M'sila, on doit tout d'abord évaluer les caractéristiques du vent dans cette région à la hauteur de 74m, en l'occurrence k, A, V_{moy} et le facteur de capacité de la turbine. Les résultats des calculs sont tabulés ci-dessous (tableau V-7) :

CHAPITRE V : ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE UN PARC ÉOLIEN VIRTUEL À
M'SILA ET LE PARC DE KABERTÈNE

Tableau V-6 : Fiche technique de l'éolienne G58/850

Élément	caractéristiques	Élément	caractéristiques
Données générales Constructeur Nom de l'aérogénérateur Puissance nominale Diamètre de rotor Classe de vent Offshore Surface balayée Surface spécifique Nombre de pale Limitation de puissance Mise en service	Gamesa (Espagne) G58/850 850 kW 58 m IEC IIIb/IIa Non compatible 2 643 m ² 3.11 m ² /kW 3 Pitch 2001	Boîte de vitesse Boîte de vitesse Nombre de rapports Ratio Fabricant	oui 3 61,74 Echesa, Fellar, Hansen, Lohman
Masses Nacelle Tour Rotor + hub Total	47 tonnes 40 - 91 tonnes 11,5 tonnes 99 - 150 tonnes	Générateur Type Nombre Vitesse maximale de rotation Tension de sortie Fabricant	ASYNC 1 1900 tours/minute 690 V Indar, Cantarey
Rotor Vitesse minimale de rotation Vitesse maximale de rotation Vent minimum Vent nominal Vent maximal Fabricant	19,44 tours/minute 30,8 tours/minute 3 m/s 14,5 m/s 25 m/s Gamesa	Tour Hauteur minimale de la nacelle Hauteur maximale de la nacelle Fabricant	44 m 74 m Gamesa

Tableau V-7 : Paramètres du vent à 74m du sol et puissance effective produite par la turbine G58/850

k	$A(m/s)$	$V_{moy}(m/s)$	C_f	$\bar{P}_{eff}(kW)$
1,92	7,9	7,04	0,267	226,95

Pour que le parc virtuel de M éoliennes soit efficace autant que le parc existant à Kabertène il faut qu'il débite la même puissance. On doit écrire par conséquent que :

$$M\bar{P}_{eff_{msila}} = 12\bar{P}_{eff_{Kabertène}} \quad (V-16)$$

D'où on tire :

$$M \cong 13 \text{ éoliennes} \quad (V-17)$$

Une comparaison entre les quatre scénarios montre que le dernier est le plus réaliste, que ce soit sur le plan technique ou économique.

L'ensemble des 13 éoliennes seront installées sur une seule rangée, espacées de 232m. La rangée est orientée vers l'est selon l'axe nord-sud. On propose que le parc soit érigé tout

CHAPITRE V : ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE UN PARC ÉOLIEN VIRTUEL À M'SILA ET LE PARC DE KABERTÈNE

près d'un barrage, comme celui d'El-ksob pour l'exploiter éventuellement dans le pompage –
turbinage.

V-5 Conclusion

Le dimensionnement d'un parc éolien et spécialement ceux de grande envergure est une
étape cruciale et obligatoire dans l'étude de faisabilité d'un projet ; que ce soit sur le plan
technique, économique ou environnemental.

Les données de vent ont été analysées pour étudier les caractéristiques du vent et la
production énergétique des douze éoliennes au cours d'une période allant de 2010 à 2012 dans
la région de M'sila située dans un climat aride. Nous avons aussi fait une projection énergétique
du parc de Kabertène sur un site à M'sila pour faire le choix d'une configuration la plus
adéquate non seulement sur le plan de l'efficacité énergétique, mais aussi du point de vue
technique et économique

La ferme éolienne de Kabertène est un projet rentable et cela est dû à la bonne sélection
du site et la bonne qualité des machines utilisées (générateur, changeur de transmission, système
de contrôle, transducteurs, etc.) réalisées par la société Gamesa.

Le système de protection et de sécurité est puissant en dépit du système d'extinction
d'incendie des éoliennes qui n'est pas assez efficace.

Mais, malgré tous les avantages de la station, la société SKTM exploitant la station,
rencontre un problème dans la réparation des pannes d'équipements, car le règlement du contrat
avec Gamesa ne permet pas la maintenance et la réparation de plusieurs appareils comme les
groupes électrogènes par exemple, et c'est ce qui fait que de nombreuses éoliennes cessent de
fonctionner pendant plusieurs mois voir une année.

L'étude de faisabilité d'une ferme éolienne à M'sila à l'instar de celle de Kabertène
nécessite un bon choix de la machine mais avec un coût plus élevé.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'énergie éolienne est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus importantes de l'ère moderne, et c'est l'avenir de l'énergie dans le monde car elle se distingue de autres sources d'énergie homologues en termes de coût et de qualité.

Pour la réussite énergétique et financière de tout projet (ferme éolienne), il doit faire l'objet de plusieurs études quantitatives et qualitatives en se basant sur des outils informatiques dédiés à ce but afin de déterminer le choix du site, la superficie du terrain, ainsi que les dimensions appropriées des éoliennes à installer.

L'Algérie à l'instar du monde entier a tracé un programme ambitieux dans l'exploitation des énergies renouvelable et en particulier l'éolienne. La première station éolienne (celle de Kabertène) a vu le jour en 2014 avec des normes internationales reconnues et précédée par une étude du site pendant plusieurs années (2003 - 2008) pour prédire la puissance escomptée de la station.

La station est caractérisée par des performances estimables en termes du nombre d'heures de fonctionnement par an estimé à 70% et cela en dépit des conditions climatiques très rudes de la région. Ici on doit souligner les efforts significatifs déployés par le personnel de la société gérant SKTM pour maintenir le bon fonctionnement du parc.

L'Algérie est l'un des pays qui accuse un retard remarquable dans la filiale éolienne, d'autant plus que sa situation géographique lui permet d'établir plusieurs stations éoliennes. Cependant il ne faut pas omettre bien évidemment le facteur économique qui joue un rôle déterminant dans la réalisation de ces projets, sachant que l'Algérie dispose d'un gisement énorme en gaz naturel, qui est parmi les causes principales de ce retard.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Poul La Cour, Regulering af vindkraft og andre kraftmaskiner: foredrag i det kgl. d. Landhusholdningsselskab den 5te oktober 1892
- [2] Leconte P., Rapin M., Szechenyi E., Eoliennes, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, Réf : BM 4 640, (2000)
- [3] Martine O. L. Hansen, ?Aerodynamics of Wind Turbines?, Second edition published by Earthscan in the UK and USA, 2008
- [4] Fichier GAMEZA Nogarcia@gamesacorp.com
- [5] <http://energie-verte.blogspot.com/2009/06/eolien-domestique-eolienneparticuliers.html>
- [6] Sathyajith Mathew; Wind energy fundamentals, resource analysis and economics. Springer, New York (2006)
- [7] N. Eskin, H. Artar, S. Tolun, Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews 12(2008)839-51
- [8] Lu L, Yang H, Burnett J. Investigation on wind power potential on Hong Kong islands- an analysis of wind power and wind turbine characteristics. Renew Energy 2002; 27:1-12.
- [9] Mike Robinson, Paul Veers, Wind Turbine Control Workshop, Santa Clara University, Santa Clara, CA, June, 1997
- [10] Muljadi, C.P. Butter"eld, P. Migliore, Variable speed operation of generators with rotor-speed feedback in wind power applications, Fifteenth ASME Wind Energy Symposium, Houston, Texas, 1996
- [11] D.M. EGGLESTON, F.S. STODDARD, Wind turbine engineering design, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1987
- [12] E. HAU. Wind Turbine, Fundamentals, technologies, Application, Economics .Springer, 2000
- [13] B. Multon, "Energie électrique : les enjeux, ". Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2008
- [14] <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/eoliennes-enmer-offshore>
- [15] BENMEDJAHED Miloud Thèse docteur énergies Renouvelables Choix du site et optimisation du dimensionnement d'une installation éolienne dans le nord Algérien

et son impact sur l'environnement UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID TLEMCEN
2013

- [16] 18 S. El Aimani, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension," Thèse de doctorat de l'école centrale de Lille, 06-122004
- [17] <http://www.energies-renouvelables.org>
- [18] F. POITIERS, " Etude et commande des génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne. Machine asynchrone à cage autonome. Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau " thèse doctorale, école polytechnique de l'Université de Nantes, 2003
- [19] J. P.Triplet, G. Roche, Météorologie générale, seconde édition, Editions de la Météorologie Nationale, France, 1977, pp. 317
- [20] Kostas Philippopoulos, Despina Deligiorgi, and George Karvounis, Wind Speed Distribution Modeling In The Greater Area Of Chania, Greece, International Journal of Green Energy, 9: 174-193, 2012
- [21] W. Weibull, "A statistical distribution function of wide applicability," Journal of Applied Mechanics, n°18, pp. 293-297, 1951
- [22] C. G. Justus, W. R. Hargraves, A. Yalcin, "Nationwide assessment of potential output from wind powered generators," Journal of Applied Meteorology, n°15, pp. 673-678, 1976.
- [23] C. G. Justus, W. R. Hargraves, A. Mikhail, D. Graber, "Methods for estimating wind speed frequency distribution," Journal of Applied Meteorology, n°17, pp. 350-353, 1978
- [24] Jensen O., Petersen E. L., Troen I., 1984: "World climate applications programme: extrapolation of mean wind statistics with special regard to wind energy applications," World meteorological organization, WMO/TD-No. 15
- [25] Manwell JF, McGowan JG, Rogers AL. Wind energy explained: theory, design and application. Amherst, USA: John Wiley & Sons; 2002
- [26] Patel MR. Wind and solar power systems. Florida, America: CRC Press, 1999.
- [84] Jamil M, Parsa S, Majidi M. Wind power statistics and an evaluation of wind energy density. Renewable Energy 1995;6(5):623-628
- [27] Jamil M, Parsa S, Majidi M. Wind power statistics and an evaluation of wind energy density. Renewable Energy 1995;6(5):623-628

- [28] Technical note of WMO, Meteorological Aspect of the Utilisation as an Energy Sources, N°175, 1981
- [29] A E M E, Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens, Guide, France, (2004
- [30] <https://images.app.goo.gl/dESwxQNKvjUkNAXj8>
- [31] <https://dateandtime.info/fr/citycoordinates.php?id=2508813>
- [32] <https://images.app.goo.gl/NLNTDhijVywH8Lu58>
- [33] Mémoire De Du Diplôme Master En Physique Energétique Université Ahmed Draya Adrar Etude de performance d'une éolienne dans un milieu saharien en particulier station éolienne de Kabertène BILLAH MOHAMMED LAHBIB MEBAREK 2016
- [34] <https://goo.gl/maps/wPRCVt76Cged9QZv8>
- [35] Rapport sur le stage effectué du 17 /02/2019 au 17/03/2019 Dans la Société de Sonelgaz Présenté par : Mlle AKACEM Soumia2018/2019
- [36] FICHE TECHNIQUE CENTRALE EOLIENNE KABERTENE 10,2 MW
- [37] CEGELEC Ferme éolienne de Kabertène Présentation des systèmes électrique
- [38] FICHE TECHNIQUE Gamesa G52/850kW
- [39] Fichier SKTM. Rapport de production générale (kWh) mars16
- [40] <https://eolienne.ooreka.fr/astuce/voir/376182/hauteur-d-une-eolienne>

ملخص

في هذه المذكرة قمنا بعرض المعايير المختلفة لإنشاء مزرعة رياح بنجاح. قمنا كذلك بدراسة وصفية وكمية لمحطة كابرتين لطاقة الرياح الواقعة جنوب غرب الجزائر بولاية أدرار. الهدف من ذلك يتمثل في عرضين أساسيين وهما: أولاً معرفة مدى استيفاء المحطة لهذه المعايير وثانياً إجراء مقارنة بين مزرعة افتراضية للرياح في المسيلة والمزرعة المتواجدة في كابرتان من أجل تقييم جدوى مشروع مماثل في موقع بالمسيلة. أظهرت نتائج الدراسة أن موقع كابرتان فعلاً مثالياً لإقامة هذا المشروع باستثناء العوامل المناخية الحدية التي تؤثر سلباً على مردودية المحطة وكذا مدة صلاحيتها. أما فيما يخص المحطة الافتراضية فهي قابلة للتحقيق تقنياً ومجدية اقتصادياً.

الكلمات المفتاحية: طاقة الرياح، سرعة الرياح، مزرعة رياح، توزيع فايبول، الاستطاعة الفعلية، معامل الاستطاعة، التوزيع التراكمي، معامل السلم، معامل الشكل، الطاقة الكهربائية المنتجة، كابرتين، مسيلة، الجزائر.

Résumé

Le présent mémoire expose les différents critères pour réussir la mise en place d'un parc éolien. Une étude quantitative et qualitative a été menée sur la centrale éolienne de Kabertène situé dans le Sud-ouest de l'Algérie dans la Wilaya d'Adrar. L'étude a pour double buts à savoir, primo de voir à quel niveau ces critères sont-ils satisfaits et secundo effectuer une comparaison entre un parc virtuel à M'sila et la station existante, afin d'évaluer la faisabilité d'un projet similaire sur le site de M'sila. Le résultat de notre étude a montré que le site de Kabertène est effectivement optimal à l'exception des conditions climatiques sévères qui peuvent affecter les performances et la durée de vie de l'installation. La station virtuelle est techniquement réalisable et économiquement rentable.

Mots clés : Potentiel éolien, vitesse du vent, ferme éolienne, distribution de Weibull, puissance effective, facteur de puissance, distribution cumulée, facteur d'échelle, facteur de forme, énergie électrique produite, Kabertène, M'sila.

Abstract

This memory presents briefly the various criteria for successfully setting up of a wind farm. A quantitative and qualitative study was carried out on the Kabertène wind station located in the southwest of Algeria in the Wilaya of Adrar. The study aims: firstly, to see how much these criteria are covered, and secondly, to carry out a comparison between a virtual park in M'sila and the existing one, in order to assess the feasibility of a similar project at the M'sila site. The result of our study showed that the Kabertène site is indeed optimal, except for critical climatic conditions, which can affect the performance and the service life of the installation. The virtual station is technically feasible and economically profitable.

Keywords : Wind potential, wind speed, wind farm, Weibull distribution, effective power, power factor, cumulative distribution, scale factor, form factor, produced electrical energy, Kabertène, M'sila, Algeria.