



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العلمي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel
Spécialité : Génie Industriel

Thème

**Analyse des données d'implémentation et estimation de
production d'un projet d'énergie renouvelable-éolienne :
phase de conception**

Présenté et soutenu publiquement par :

AMARA Chahinez

HAMIMED Chaimaa

Devant le jury composé de :

Mr. KEDDAR Mohammed	MAA	Univ. Oran-2, IMSI	Président
Mr. Abderrahim BENFEKIR	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	Encadreur
Mr. BENARBIA Taha	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	Examineur

Décembre 2020

Dédicaces

Avec tout respect et amour Je dédie ce mémoire :

A ma chère grande mère « Boudia Zohra » dieu a pitié et fait de son paradis.

Ma source de tendresse, l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager, de prier pour moi et de me donner toutes leurs peines et sacrifices, Pour me voir réussir dans la vie. Aucune dédicace ne serait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous que vous n'avez pas cessé de me donner depuis ma naissance.

Je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond amour.

Je prie Dieu, le tout-puissant, de vous accorder la santé, la longue vie et le bonheur. .

A ma mère « Kheira » et son époux « Boualem » et mes frères « Abed El-Rahmane », « Mohammed » et « Tadjjo »

A mon grand cher frère « Ali » et sa femme « Nadia » et ces enfants « Mostafa » et « Ritadjj ».

A mon cher frère « Hacem » et sa femme « Fatima » et ces enfants « Adam », « Dahou », « Nihal », « Zohra ».

A mon cher frère « Smaine » et ces filles « Nesrine », « Yasmine », « Chiraz ».

A ma chère sœur « Fatima » et ses enfants « Marwa », « Hacem », « Imad », « Chaimaa », « Anfal », « Nour ».

A ma chère sœur « Hadjira » et son époux « Abed », ses enfants « Killian », « Rayan », « Iyad », « Serina ».

A ma chère sœur « Sarah » et son époux « Saada », ses enfants « Mohammed », « Abed El-Madjid », « Israa », « Yasmine », « Malak », « Abed El-Hak ».

Pour le partenaire de ma vie et précieux à mon coeur : mon fiancé bien-aimé « Fouad ».

A ma belle famille « Abdelhadi ».

A Toute la famille « Hamimed » sans exception et spécialement a ma grande mère « Fatima ».

A Mon binôme « Chahinaz » et sa famille « Ammara »

A mes amis avec qui j'ai partagé tant de moments de vie, heureux ou difficiles, et qui m'ont aidé à traverser certaines épreuves au cours de cette période « Sarah », « Assia », « Ikram », « Karima », « Nour El-Houda », « Razika », « Bouchra », « Hadjer », « Youcef ».

Chaimaa

Dédicaces

AVEC L'EXPRESSION DE MA RECONNAISSANCE, JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL A CEUX QUI, QUELS QUE SOIENT LES TERMES EMBRASSES, JE N'ARRIVERAIS JAMAIS A LEUR EXPRIMER MON AMOUR SINCERE.

A LA FEMME QUI A SOUFFERT SANS ME LAISSER SOUFFRIR, QUI M'A ARROSE DE TENDRESSE ET ESPOIRS, A CELLE QUI M'A APPRIS, M'A SUPPORTE ET MA DIRIGE, A LA SOURCE D'AMOUR : MON ADORABLE MERE.

A L'HOMME, MON PRECIEUX OFFRE DU DIEU QUI DOIT MA VIE, MA REUSSITE ET TOUT MON RESPECT : MON CHER PERE.

A MON FRERE ET MES CHERES SŒURS, QUI N'ONT PAS CESSEE DE ME CONSEILLER, ENCOURAGER ET SOUTENIR TOUT AU LONG DE MES ETUDES.

QUE DIEU LES PROTEGE ET LES OFFRE LA CHANCE ET LE BONHEUR.

A MA PETITE NIECE MARIA QUI SAIT TOUJOURS COMMENT PROCURER LA JOIE ET LE BONHEUR POUR TOUTE LA FAMILLE.

A MES GRANDS-MERES, MES ONCLES ET MES TANTES. QUE DIEU LEUR DONNE UNE LONGUE ET JOYEUSE VIE.

A TOUS LES COUSINS ET LES AMIS QUE J'AI CONNU JUSQU'A MAINTENANT.

MERCI POUR LEURS AMOURS ET LEURS ENCOURAGEMENTS.

SANS OUBLIER MON BINOME POUR SA PATIENCE ET SA COMPREHENSION TOUT AU LONG DE CE PROJET.

Chahinez



Remerciements

Avant tout nous remercions Allah tout puissant qui nous a donné la force, la volonté, la santé et la patience qu'il nous avons accordés durant toutes ces longues années d'études qui nous ont permis d'arriver là où nous sommes et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

*Nous tenons à exprimer nos plus sincères remerciements à notre encadreur, Monsieur **Benfekir Abderrahim**. Nous lui sommes reconnaissantes pour la confiance dont il nous a fait preuve, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail, malgré les charges qu'il assume actuellement et pour ses précieux conseils qui nous ont permis une progression concrète dans ce projet.*

Nous sommes honorés que Monsieur Keddar Mohammed d'avoir accepté de présider et d'honorer de sa présence le jury de soutenance du présent mémoire de Master. Qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance et de notre profond respect.

Nous sommes honorés que Monsieur Benarbia Taha d'avoir accepté d'évaluer notre travail en qualité d'examineur.

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



Résumé



Intitulé de sujet :

Analyse des données d'implémentation et estimation de production d'un projet d'énergie renouvelable-éolienne : phase de conception.

Résumé

Le sujet s'inscrit dans le cadre du développement durable et traite les problématiques de la conception et l'implémentation (installation) des systèmes à énergie renouvelable hybride à base d'une étude préalable des dangers et des risques naturels qui peuvent altérer le système d'énergie renouvelable (parc éolien, ferme de panneaux solaires,) en cas d'accident et justifie les mesures propres à réduire la probabilité et les effets d'un accident.

Dans ce contexte l'Algérie dispose de tous les atouts pour réussir un programme de développement des énergies renouvelables, notamment avec ses ressources naturelles et climatiques ainsi qu'en termes de technologies sert à exploiter son potentiel en matière des énergies renouvelables pour contribuer au développement de la production mondiale de l'énergie électrique afin d'assurer une sécurité énergétique vis à vis la hausse continue des besoins mondiaux en cette énergie. Ainsi que le développement des énergies renouvelables peut générer de grands investissements économiques et une importante valeur ajoutée pour la région de l'Afrique du Nord. Dans ce travail non essayons de contribuer à une mise en place d'une stratégie énergétique algérienne adoptant les énergies renouvelables comme suppléant aux énergies fossiles (pétrole et gaz).

Dans ce cadre, le travail de master proposé a pour objectif d'une Analyse des données d'implémentation et estimation de production d'un projet d'énergie renouvelable-éolienne dans la phase de conception en utilisent les données météorologiques.

Mots clé -- énergies renouvelables hybrides, éolienne, Analyse des données, estimation de production d'un projet d'énergie, Modélisation, conception d'un projet éolienne.



*Liste des
abréviations*



Liste des abréviations

J-C	Jésus-Christ.
USA	United States of American en anglais, c'est-à-dire les États-Unis d'Amérique
KW	kilowatt-heure ou kilowattheure, est une unité d'énergie
GWEC .	le Global Wind Energy Council, c'est-à-dire Conseil mondial de l'énergie éolienne
EnR	désigne énergie renouvelable.
PV	photovoltaïque.
CEGELEC :	est un groupe industriel français présent dans l'ingénierie technique et les services technologiques aux entreprises privées et aux collectivités, filiale de Vinci Énergies.
ETTERKIB	société du Groupe Sonelgaz assure une mission de montage et de maintenance des ouvrages et installations industriels depuis 1978
INERGA	Entreprise Nationale De Réalisation D'Infrastructures Energétiques.
Cp	Le coefficient de performance.
dB	Unité de puissance sonore, dixième partie du bel (symbole dB).
CEI 61400	Sécurité et conception des éoliennes, Cette partie spécifie les exigences de conception essentielles pour assurer l'intégrité technique des éoliennes.
MEASNET	est l'acronyme de Measuring Network of Wind Energy Institutes. En termes simples, il s'agit d'un groupe d'institutions commerciales qui collaborent en permanence pour s'assurer que chaque membre offre des mesures de qualité tout aussi élevée pour l'industrie mondiale.
FUTUREN	est un producteur d'électricité à partir de l'énergie éolienne. Le Groupe conçoit, construit et exploite des parcs éoliens terrestres en Allemagne, France, Maroc et Italie.
Logger	Enregistreur de données, logiciel qui enregistre des données séquentielles dans un fichier journal.
GSM	Global System for Mobile Communications, est une norme développée par l'Institut européen des normes de télécommunications (ETSI) pour décrire les protocoles des réseaux cellulaires numériques de deuxième génération (2G) utilisés par les appareils mobiles tels que les téléphones mobiles et les tablettes.
SODAR .	Sonic Detection and Ranging, est un outil de mesure à distance utilisé pour les mesures météorologiques
LIDAR	Light Detection and Ranging, est une méthode pour mesurer des distances (télémétrie) en éclairant la cible avec une lumière laser et en mesurant la réflexion avec un capteur.
GPS	Global Positioning System, est un système de radionavigation par satellite appartenant au gouvernement des États-Unis et exploité par la United States Space Force.

Liste des abréviations

Weibull .	La distribution Weibull est l'une des distributions de durée de vie les plus largement utilisées dans l'ingénierie de la fiabilité
MT	moyenne tension.
MB .	basse tension
MTEP .	mégatonne équivalent pétrole est une unité d'énergie qui correspond à un million de tonnes d'équivalent pétrole soit 41,868 PJ (10 Pcal)
MADA .	la machine asynchrone à double alimentation
MSAP	la machine synchrone à aimant permanent.
LCOE	Levelized Cost Of Energy.
PVC	present value cost
AIE	Agence Internationale de l'Energie
MRNF	ministère des Ressources naturelles et de la faune.
SDO	La Société de Distribution d'électricité et de gaz de l'Ouest.
Wpd	est un énergéticien européen qui développe, construit et exploite des parcs éoliens terrestres et maritimes (offshore) dans une vingtaine de pays à travers le monde.
ENERRCON	est un fabricant d'éoliennes basé à Aurich, en Basse-Saxe, en Allemagne. Il est le leader du marché en Allemagne depuis le milieu des années 90.
SYNC	synchronisation



*Liste des
figures*



Liste des figures

CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes à énergies renouvelables

Figure I.1	Les énergies renouvelables	4
Figure I.2	L'énergie hydraulique	5
Figure I.3	L'énergie solaire	5
Figure I.4	L'énergie géothermie	6
Figure I.5	L'énergie biomasse	7
Figure I.6	Eoliennes terrestres	7
Figure I.7	Eoliennes offshore	7
Figure I.8	Moulin à vent Géant à Cleveland, Ohio de F. BRUSH	10
Figure I.9	Éolienne de Poul La cour	10
Figure I.10	Éolienne de Darrieus	11
Figure I.11	Capacité éolienne cumulée en GW dans le monde de 1996 à 2014	12
Figure I.12	La première éolienne installée en Algérie	14
Figure I.13	Eolienne amont et aval	15
Figure I.14	Éolienne de type Savonius	16
Figure I.15	Éolienne à cône	16
Figure I.16	Éolienne de type Darrieus	17
Figure I.17	Schématisation des systèmes éoliens mécaniques et électriques pour le pompage de l'eau	18
Figure I.18	Ferme éolienne	18
Figure I.19	Principe de la conversion d'énergie	19
Figure I.20	Les composants d'un aérogénérateur	20

CHAPITRE II : Faisabilité de réalisation d'un projet éolien

Figure II.1	Le mât de mesures	26
Figure II.2	Un anémomètre	26
Figure II.3	La girouette	27
Figure II.4	Manche à air	27
Figure II.5	Sodar et Lidar	29
Figure II.6	la rose des vents	32
Figure II.7	Carte annuelle des vents à 10 m du sol pour les 87 points de mesure (m/s)	32
Figure II.8	Eolienne à vitesse fixe	34
Figure II.9	Eolienne à vitesse variable	35

CHAPITRE III : Choix du site

Figure III.1	Localisation de Sénia sur la carte géographique	41
Figure III.2	Localisation d'Arzew sur la carte géographique	42
Figure III.3	Localisation de Port d'Oran sur la carte géographique	42
Figure III.4	L'effet de tunnel	43
Figure III.5	L'effet de colline	44
Figure III.6	Aménagement des plateformes de grutage	45
Figure III.7	Organisation générale du raccordement électrique d'un parc éolien au réseau de distribution	45

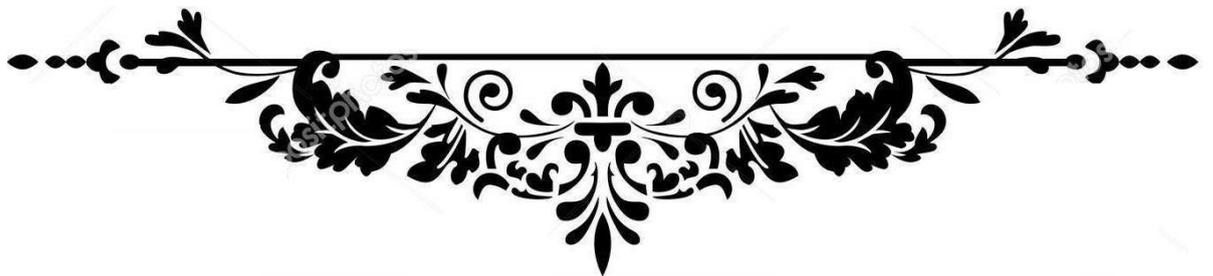
Figure III.8	Maintenance de l'éolien	46
Figure III.9	Maintenance de l'éolien	47
Figure III.10	Sécurité de l'éolien	47

CHAPITRE IV : Modélisation simulation et dimensionnement

Figure IV.1	Éolienne Enercon E53/800	53
Figure IV.2	Courbe et coefficient de puissance de l'éolienne Enercon E53/800	53
Figure IV.3	Niveau de puissance acoustique de l'éolienne Enercon E53/800	54
Figure IV.4	Les données de vent mensuelle de vitesse maximal et vitesse moyenne durant les années 1995 jusqu'à 2005, Zone d'Oran- Arzew	55
Figure IV.5	Le bilan annuel: Représentation des moyennes des données de vitesse mensuelle des 11 années 1995-2005 Zone d'Oran- Arzew	56
Figure IV.6	Prédiction de puissance max et min annuelle produite par un éolien basé sur le choix adéquat de l'aérogénérateur/ Zone d'Oran- Arzew (Watt)	56
Figure IV.7	Les données de vent mensuelle de vitesse maximal et vitesse moyenne durant les années 1995 jusqu'à 2005, Zone d'Oran-Port	57
Figure IV.8	Le bilan annuel: Représentation des moyennes des données de vitesse mensuelle des 11 années 1995-2005, Zone d'Oran-Port	57
Figure IV.9	Prédiction de puissance max et min annuelle produite par un éolien basé sur le choix adéquat de l'aérogénérateur/ Zone d'Oran-Port (Watt)	58
Figure IV.10	Les données de vent mensuelle de vitesse maximal et vitesse moyenne durant les années 1995 jusqu'à 2005, Zone ORAN-Es-Senia	58
Figure IV.11	Le bilan annuel: Représentation des moyennes des données de vitesse mensuelle des 11 années 1995-2005 Zone ORAN-Es-Senia	59
Figure IV.12	Prédiction de puissance max et min annuelle produite par un éolien basé sur le choix adéquat de l'aérogénérateur/ Zone Es-senia-Oran(Watt)	59
Figure IV.13	Bilan annuel de prédiction de puissance moyenne mensuelle produit par un aérogénérateur (Zone d'Oran-Arzew)	62
Figure IV.14	Bilan annuel de prédiction de puissance moyenne mensuelle produit par un aérogénérateur (Zone d'Oran-Port)	62
Figure IV.15	Bilan annuel de prédiction de puissance moyenne mensuelle produit par un aérogénérateur (Zone d'Oran-Es senia)	63



*Liste des
Tableaux*



Liste des tableaux

CHAPITRE I : généralité sur les systèmes à énergies renouvelables

Tableau I.1	Les composants d'un aérogénérateur	20
-------------	------------------------------------	----

CHAPITRE II : La faisabilité de réalisation d'un projet éolien en Algérie

Tableau II.1	L'échelle de Beaufort	30
--------------	-----------------------	----

Tableau II.2	Comparaison des éoliennes a vitesse fixe et a vitesse variable	35
--------------	--	----

Tableau II.3	Variation du coût des éoliennes avec la puissance nominale.	37
--------------	---	----

CHAPITRE III : Choix du site

Tableau III.1	L'étude de l'impact	40
---------------	---------------------	----

CHAPITRE IV : Modélisation, simulation et dimensionnement

Tableau IV.1	Résultats statistiques des données de vent et synthèse de prédiction de puissance et d'énergies	61
--------------	---	----



*Liste des
symboles*

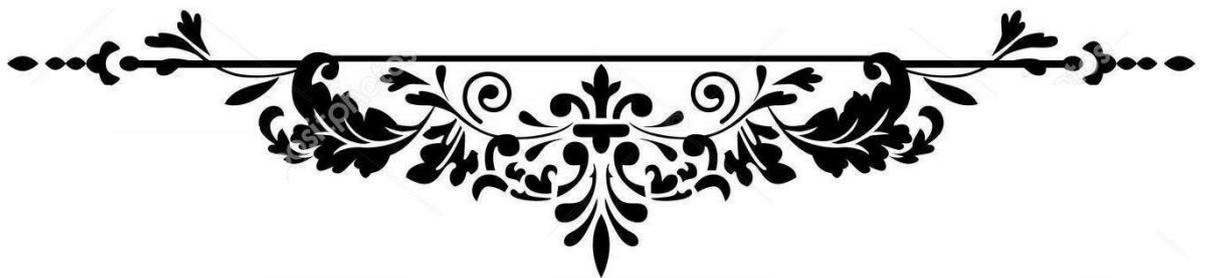


Liste des symboles

ρ	la densité de l'air (Kg /m ³).
V_{moy}	La vitesse moyenne du vent en (m/s).
E	énergie produite en kWh.
T_h	période de temps en h.
$P_i(V)$	puissance en (kW) donnée par aérogénérateur à la vitesse V_i .
Q	Facteur de capacité
I	dimension du terrain perpendiculaire à la direction prédominante du vent.
L	dimension du terrain parallèlement à la direction prédominante du vent.
D	diamètre du rotor de la machine.
H	hauteur du pylône.
N1	nombre d'aérogénérateurs par rangée.
N2	nombre de rangée d'aérogénérateurs.
N	nombre total d'aérogénérateurs à placer sur le site.
$P(V)$	densité de probabilité de la vitesse V
K	facteur de forme de la courbe (sans dimension) .
C	facteur d'échelle de la courbe en (mètre/secondes).
V_{max}	La vitesse moyenne du vent en (m/s).



Sommaire



Introduction general.....	1
Chapitre I : Généralité sur les systèmes à énergies renouvelables	
I-1.Introduction	3
I-2. Definition d'énergies renouvelables	4
I-2-1.Energie hydraulique	4
I-2-2 .Energie solaire	5
I-2-3.Enrgie geothermie	6
I-2-4.Energie biomasse	6
I-2-5. Energie eolienne	7
I-3. Avantage des energies renouvelables	8
I-4. Inconvenients des energies renouvelables	8
I-5. Generalites sur un systeme eolien.....	9
I-6. Energie eolienne dans le monde.....	12
I-7. Differents types d'eoliennes	14
I-7-1. Eoliennes a axe horizontal.....	14
I-7-2. Eoliennes a axe vertical.....	15
I-8. Domaines d'utilisation des eoliennes	17
I-8-1. Eolienne de pompage mecanique	17
I-8-2. Eolienne de pompage électrique	17
I-9. Fermes eoliennes	18
I-9-1. Principe de fonctionnement	18
I-9-2. Éléments constitutifs d'un aerogenerateur	19
I-9-3. Avantages et inconvenients de l'énergie eolienne	21
I-10.Conclusion	23
Chapitre II: Faisabilite de realisation d'un projet	
II-1. Introduction.....	24
II-2.Evaluation du potentiel eolien dans une region donnee	24
II-2-1. Vent.....	25
II-2-2. Mesure du vent sur un site	25
A. Anemometers.....	26
B. Girouettes.....	27
C. Manche a air (manche a vent).....	27
D. Mesure des autres donnees meteorologiques.....	28
E. Collecte des donnees	28
II-2-3.Interpretation des donnees de vent	30
II-2-4. Variations journalieres.....	31

II-2-5. Variation saisonniere.....	31
II-2-6. Rose des vents.....	31
II-2-7. carte des vents en algerie.....	32
II-3. Analyse des differentes configurations d'emplacements d'aerogenerateurs d'un parc eolien donne.....	33
II-3-1. parc eolien.....	33
II-3-2. Aerogenerateur.....	33
II-4. Étude sur les differentes solutions techniques relatives a l'integration des eoliennes.....	33
II-4-1. Besoin de l'integration de l'energie eolienne dans le reseau electrique.....	33
II-4-2. eoliennes connectees au reseau electrique.....	34
II-4-2-1. Eolienne a vitesse fixe.....	34
II-4-2-2. Eolienne a vitesse variable.....	34
II-5. Estimation du cout du kilowattheure produit.....	35
II-6. Critères de choix d'un terrain d'implantation des éolienne.....	36
II-7. Conclusion.....	38
Chapitre III: Choix du site	
III-1. Introduction.....	39
III-2. Mise en place d'un projet eolien.....	39
III-2-1. etude de prefaisabilite.....	39
III-2-3. Etude d'impact.....	39
III-3. Evaluation du potentiel eolien.....	40
III-4. Etudes techniques.....	40
III-4-1. acces au site.....	40
III-4-2. Implantation des machines.....	42
III-4-3. etudes de sols.....	43
III-4-4. determination aires de grutage.....	44
III-4-5. possibilites de raccordement electrique.....	45
III-4-6. reseau inter-eolien.....	45
III-5. Telesurveillance et maintenance d'un parc eolien.....	46
III-5-1. Telesurveillance.....	46
III-5-2. Maintenance.....	46
III-6. Securite du site.....	47
III-6-1. Consignes de securite.....	47
III-6-2. Securite incendie.....	47
III-7. Conclusion.....	48

Chapitre Iv : Modelisation simulation et dimensionnement

Iv-1. Introduction	49
Iv-2. Donnees meteorologiques.....	49
Iv-2-1. Fonction de distribution des vitesses de weibull.....	50
Iv-2-2. Techniques de dimensionnement	51
Iv-3. Choix de la turbine eolienne	52
Iv-4. Modelisation et dimensionnement du projet eolien	54
Iv-4-1. Resultats de simulation des donnees de vent.....	55
Iv-4-2. Analyse et synthese des predictions de puissance et d'energie produit.....	59
VI-5. Conclusion	63
Conclusion générale.....	64



Introduction
générale



Introduction générale

La consommation énergétique mondiale évolue rapidement dans toutes les régions du Monde. Cette évolution va continuer à cause de l'augmentation de la population mondiale. Les sources d'énergies existantes n'arrivent plus à satisfaire la demande et de plus elles diminuent de jour en jour. Ainsi, les énergies renouvelables sont celles qui vont s'imposer bientôt à cause de la facilité de leurs exploitations. Elles sont devenues une forme d'énergie indispensable par leur souplesse, la simplicité d'utilisation et la multiplicité des domaines d'activités où elles sont appelées à jouer un rôle. Ces modes de production ainsi que les moyens de distribution associés sont influencés par plusieurs paramètres tels que: la pression atmosphérique, l'humidité relative, la température, la vitesse du vent.

La maîtrise de ces énergies devient une nécessité. Ceci amène beaucoup de chercheurs à réfléchir sur l'amélioration de ces énergies renouvelables. L'une d'elles est l'énergie éolienne qui utilise la force du vent. Le vent est un phénomène aérodynamique par nature très complexe. Par suite de la variabilité des très nombreux paramètres qui le gouvernent, sa vitesse horizontale instantanée présente un caractère Spatio-temporel fluctuant qui justifie des considérations spectrales. Une approche simple qui est valable pour les zones climatiques sahariennes.

L'objectif de ce travail, réalisé à Oran, dans l'ouest d'Algérie, est de voir l'impact des paramètres météorologiques que sont : la vitesse moyenne et la vitesse maximale et la direction et la fréquence du vent disponible sur le site ainsi que leurs influences sur la puissance énergétique délivrée par le système éolien étudié dans le site.

Cette mémoire de master se compose de quatre chapitres présentée comme suite :

Après une introduction générale, le premier chapitre a présenté des généralités sur l'énergie renouvelable le développement de l'énergie éolienne suivi par un état de l'art sur les aérogénérateurs. Ensuite, une brève présentation des caractéristiques des éoliennes a été énoncée ainsi qu'une description profonde des principaux constituants.

Dans le deuxième chapitre on va présenter l'évolution, sur site d'Oran, des différents paramètres météorologiques intervenant dans les études sur le choix des sites d'implantation des parcs éoliens.

Le chapitre 3 traite les différentes méthodes et modèles à travers un itinéraire méthodologique du choix d'un site favorable capable d'acquies un projet de parc éolien. Au préalable, tout projet éolien se base sur une analyse détaillée du site à l'état vierge et de son environnement.

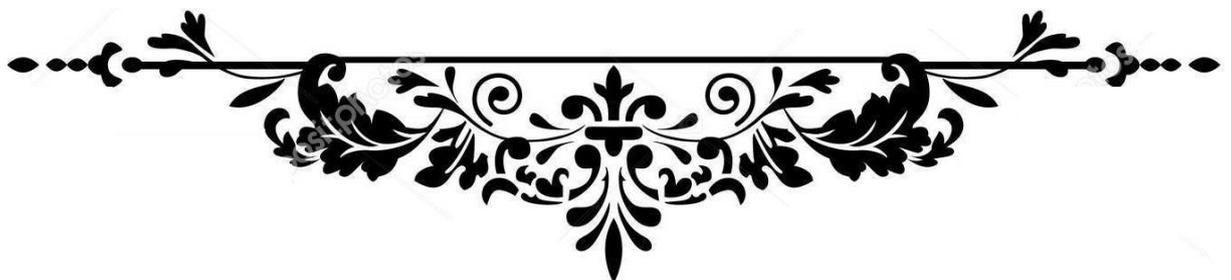
Le dernier chapitre est consacré aux lois mathématiques permettant de dimensionner le potentiel éolien et d'estimer la production énergétique annuelle de chaque éolienne. L'introduction de la loi de Weibull s'impose et permet de caractériser la distribution des fréquences de vitesses du vent.

On terminera notre travail par une conclusion générale.



Chapitre I

*Généralité sur les systèmes à
énergie renouvelable*



Chapitre 1

Généralité sur les systèmes à énergie renouvelables

I-1.Introduction

Une grande partie de l'énergie utilisée aujourd'hui dans le monde (plus de 80 %) provient de gisements de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium. Ces gisements, ces stocks, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique, sont évidemment en quantité limitée : ils sont épuisables.

Par opposition, les énergies fournies par le soleil, le vent, les chutes d'eau, la croissance des végétaux, les marées, la chaleur de la terre sont renouvelables. Toutes ces énergies renouvelables n'ont d'ailleurs en définitive que deux sources : le soleil (puisque celui-ci est à l'origine du vent, du cycle de l'eau, des marées, de la croissance des végétaux) et la terre (qui dégage de la chaleur). Et le plus important Ce qui le distingue, c'est qu'il est propre et respectueux de l'environnement, car il ne laisse pas de gaz nocifs tels que le dioxyde de carbone, n'affecte pas négativement l'environnement environnant, et ne joue pas un rôle qui affecte le niveau de température. Les sources d'énergie renouvelables sont tout à fait en contradiction avec leurs sources non renouvelables, comme le gaz naturel et les combustibles nucléaires, qui conduisent au réchauffement climatique et à la libération de dioxyde de carbone lorsqu'elles sont utilisées.

Sur la base de l'importance des énergies renouvelables, un nouveau type d'entreprise a récemment émergé sous le nom du commerce des énergies renouvelables, et la plupart de ses travaux ont porté sur l'exploitation des sources d'énergie renouvelables, et de l'utiliser pour être une source de revenus et d'avantages matériels, par le développement de celui-ci, et sur la base du coût élevé de l'exploitation des énergies renouvelables et le manque de mécanismes et de techniques adéquats, mais il ya un grand nombre de pays se préparent à lancer des projets d'investissement dans l'énergie renouvelable, tout en travaillant à développer et à développer et à développer ces politiques.

On assimile souvent l'énergie tirée des déchets à une énergie renouvelable : on peut en effet considérer que l'activité humaine ou animale est perpétuelle, et donc source de déchets sans cesse renouvelés. Souvent on englobe sous le nom de biomasse l'énergie d'origine végétale, encore appelée « houille verte » (bois et biocarburants), et les déchets humains, végétaux ou animaux.

L'utilisation de ces énergies renouvelables n'est évidemment pas nouvelle. Depuis des temps ancestraux, on a utilisé la chaleur du soleil, on a brûlé du bois ou des déchets, on a utilisé dans les régions volcaniques la chaleur de la terre, on a fait tourner les moulins à vent ou les moulins à eau, on a exploité la force des marées.

Dans ce sujet de notre mémoire, nous ferons la lumière sur l'énergie renouvelée et en particulier, nous parlerons de l'énergie éolienne ; sa position en Algérie et dans le monde ; ses avantages et inconvénients et tout ce qui y est lié.

I-2. Définition d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables appelées également énergies vertes sont des énergies inépuisables. Elles sont issues des éléments naturels : le soleil, le vent, les chutes d'eau, les marées, la chaleur de la Terre, la croissance des végétaux... On qualifie les énergies renouvelables d'énergies "flux" par opposition aux énergies "stock", elles-mêmes constituées de gisements limités de combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz, Uranium). Contrairement à celle des énergies Fossiles, l'exploitation des énergies renouvelables n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir. Mais elles sont encore sous-exploitées par rapport à leur potentiel puisque ces énergies renouvelables ne couvrent que 20 % de la consommation mondiale d'électricité [1].

Utiliser l'énergie renouvelable présente de nombreux avantages. Cela aide à lutter contre l'effet de serre, en réduisant notamment les rejets de gaz carbonique dans l'atmosphère. Cela participe de plus à une gestion intelligente des ressources locales et à la création d'emplois. Voyons donc quelles sont les énergies renouvelables qui sont classées en 5 familles et comment elles fonctionnent?



Figure I.1: Les énergies renouvelables.

I-2-1. Energie hydraulique

Est l'énergie mécanique produite par les mouvements et le cycle de l'eau, actionnés par la gravité ou les astres : chutes d'eau, cours d'eau, vagues, courants marins ou marées.

C'est une énergie propre, dont la force dépend de la hauteur des chutes ou du débit de l'eau, et peut être utilisée directement ou indirectement. Depuis l'Antiquité, son utilisation directe se sert de la force de l'eau pour faire tourner la roue des moulins, et aujourd'hui de norias également ou encore de défibreurs (qui servent à la production de pâte à papier).

En utilisation indirecte, l'énergie hydraulique est convertie en une autre énergie, autrefois mécanique mais principalement électrique depuis le début du XXe siècle [2].



Figure I.2: L'énergie hydraulique

I-2-2 .Energie solaire

Est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.

L'énergie solaire est propre, n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le soleil bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous, est gratuite, inépuisable et disponible partout dans le monde [3].



Figure I.3: L'énergie solaire.

➤ **Le solaire photovoltaïque** : L'électricité est produite à partir de la lumière du soleil au moyen d'installations photovoltaïques. Celles-ci alimentent des sites isolés ou le réseau de distribution général [1].

➤ **Le solaire thermique** : On utilise des capteurs solaires pour produire de l'eau chaude sanitaire. Ce procédé peut aussi permettre le chauffage, notamment par le sol [1].

I-2-3. Energie géothermie

La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol. L'utilisation des ressources géothermales se décompose en deux grandes familles : la production d'électricité et la production de chaleur. En fonction de la ressource, de la technique utilisée et des besoins, les applications sont multiples. Le critère qui sert de guide pour bien cerner la filière est la température. Ainsi, la géothermie est qualifiée de « haute énergie » (plus de 150°C), « moyenne énergie » (90 à 150°C), « basse énergie » (30 à 90°C) et « très basse énergie » (moins de 30°C) [4].

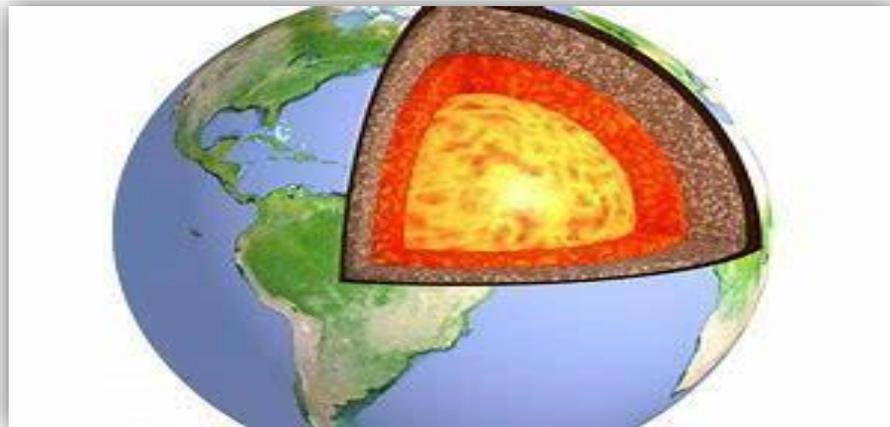


Figure I.4: L'énergie géothermie.

I-2-4. Energie biomasse

L'énergie issue de la biomasse est une source d'énergie renouvelable qui dépend du cycle de la matière vivante végétale et animale.

L'énergie biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasses [5].

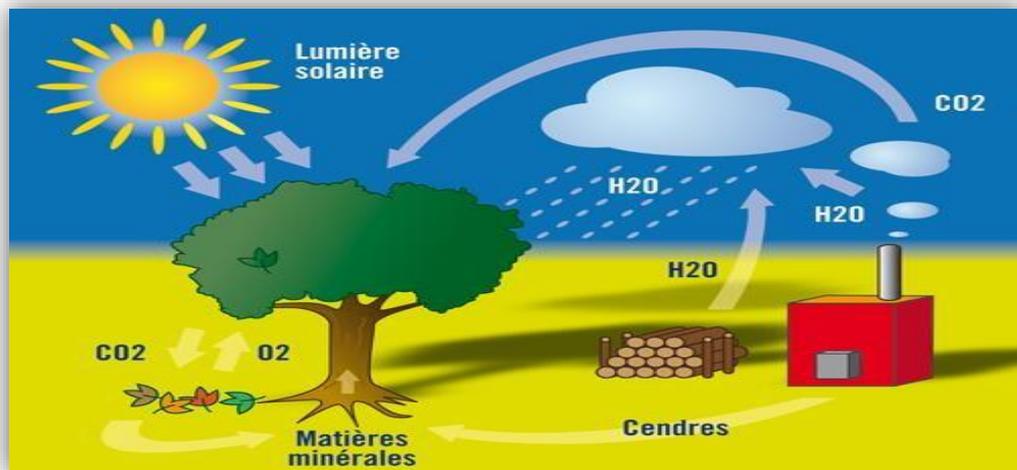


Figure I.5: L'énergie biomasse.

I-2-5. Energie éolienne

Est l'énergie du vent, dont la force motrice (énergie cinétique) est utilisée dans le déplacement de voiliers et autres véhicules ou transformée au moyen d'un dispositif aérogénérateur, comme une éolienne ou un moulin à vent, en une énergie diversement utilisable.

L'énergie éolienne est une source d'énergie intermittente qui n'est pas produite à la demande, mais selon les conditions météorologiques ; elle nécessite donc des installations de stockage ou de production de d'indisponibilité.

La production électrique éolienne peut être prévue avec une assez bonne précision. Sa part dans la production mondiale d'électricité atteignait 4,4 % en 2017 et était estimée à 4,7 % en 2018. Les principaux pays producteurs sont la Chine (31 % du total mondial en 2018), les États-Unis (23 %) et l'Allemagne (9 %) [6].

L'énergie éolienne tire son nom d'Éole (en grec ancien Αἴολος, Aiolos), le dieu des vents dans la mythologie grecque.



Figure I.7 : Eoliennes offshore.



Figure I.6: Eoliennes terrestres.

I-3. Avantage des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables suscitent de plus en plus l'engouement, aussi bien de la part des foyers que des entreprises. Cela s'explique par diverses raisons :

- Des énergies propres et donc écologiques et peu polluantes : tous ceux qui se soucient de l'environnement savent que ce type d'énergie est ce qu'il faut privilégier au quotidien étant donné qu'il ne dégrade pas, voire très peu, la nature au sein de laquelle nous évoluons.

- Des énergies gratuites : puisqu'elles sont issues de notre environnement, ces énergies sont gratuites. Avant d'en profiter, il faut toutefois prévoir quelques frais pour l'installation du système permettant de les exploiter. Une fois le système en place et opérationnel, vous n'aurez plus à payer la facture d'électricité et de chauffage.

- Des énergies inépuisables : le soleil, l'air, l'eau et la géothermie existent en quantité infinie dans l'environnement. Cela signifie qu'une fois le système d'exploitation mise en place, vous pourrez en bénéficier sur plusieurs années, voire indéfiniment à condition d'entretenir régulièrement le matériel. En ce qui concerne la biomasse, elle est également considérée comme étant une énergie renouvelable. Mais attention, la quantité des matières organiques peut être limitée si on ne les renouvelle pas. Ainsi, chaque fois que vous couperez du bois, pensez à en planter d'autres pour que le cycle reste équilibré.

- Des énergies plus sûres, car elles engendrent un minimum d'accident.

- Des énergies peu polluantes : elles sont recyclables, ne produisent qu'une toute petite quantité de CO₂ et de déchets radioactifs [7].

I-4. Inconvénients des énergies renouvelables

Malgré les nombreux avantages qu'elles apportent, les énergies renouvelables ont aussi quelques défauts à ne pas négliger :

- Elles sont dépendantes des caprices de la nature : par un temps couvert, l'énergie solaire baisse en performance. Par absence de vent, l'énergie éolienne perd également en performance...

- Leur coût d'installation est assez important : pour optimiser leur performance, les énergies renouvelables nécessitent un équipement d'exploitation performant qui peut coûter assez cher. Certes, il s'agit d'un investissement, mais la rentabilité peut mettre quelques années avant d'arriver.

- L'énergie biomasse n'est pas illimitée donc n'est pas adaptée à une exploitation intensive. Elle peut, sur le long terme, engendrer une importante déforestation et une dégradation de la biodiversité.

- Les systèmes éoliens nécessaires pour l'exploitation de l'énergie éolienne émettent des bruits qui peuvent gêner les habitants et exigent un emplacement dans une zone très venteuse. Leur présence dans le paysage peut également être perçue de manière négative.

- Les barrages hydroélectriques influent négativement sur la faune, car ils modifient leur écosystème naturel [7].

I-5. Généralités sur un système éolien

Depuis longtemps, l'homme utilise l'énergie éolienne, au début, elle a été utilisée pour faire avancer les bateaux, moulin du grain ou pomper de l'eau. Par la suite pendant plusieurs décennies, l'énergie éolienne a servi à produire de l'énergie électrique, que ce soit à l'échelle individuelle avec le petit éolien ou à grande échelle avec le grand éolien, l'énergie du vent peut contribuer à diversifier la production d'énergie électrique, en outre, l'énergie éolienne est, une énergie propre, renouvelable qui peut pallier aux problèmes environnementaux. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Elle peut être utilisée de deux manières ; directe ou indirecte [8].

A. Direct :

L'énergie mécanique est conservée ainsi on utilise le vent pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail).

B. Indirect :

Pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique, une éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer un courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

Historique et développement : L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les installations de pompage d'eau. Les premières utilisations connues remontent à l'an 2000 avant J.-C [9]. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. Les Chinois ont également exploités la puissance du vent pour les systèmes de pompage de l'eau [10].

On estime aussi que le principe de l'éolienne était déjà connu 200 ans avant J.-C, chez les perses qui utilisaient des moulins à vents afin de moulinier le grain. Ce n'est qu'au Moyen Âge que les moulins à vent se sont considérablement développés notamment aux Pays Bas qui s'en servaient et même aujourd'hui pour pomper l'eau des rivières et des canaux ainsi que la moulinier de grains.

L'idée d'une éolienne daté »e de 1802 où Lord Kelvin un physicien anglais, associa une génératrice d'électricité à un moteur éolien. La première éolienne construite et destinée à produire de l'électricité fut construite par Charles F. Brush en 1887 (Figure I.8). Composée de 144 pâles et d'un diamètre de 17 m, elle produisait 12 kW. Ensuite il expérimenta en 1890 un moulin à vent géant à Cleveland, Ohio, USA pour produire de l'électricité (Figure I.8).

En 1891, Le météorologiste danois Poul La Cour avait mené des recherches dans une soufflerie aérodynamique pour améliorer l'efficacité des moulins à vent et améliorer l'invention de Charles F. Brush. Il conclut ainsi qu'une éolienne à rotation rapide (Figure I.9) ayant un nombre de pales limité produisait plus d'électricité et ceci en associant une dynamo à l'éolienne qui l'a appelée Lykkegard, dont il aura vendu 72 exemplaires en 1908.

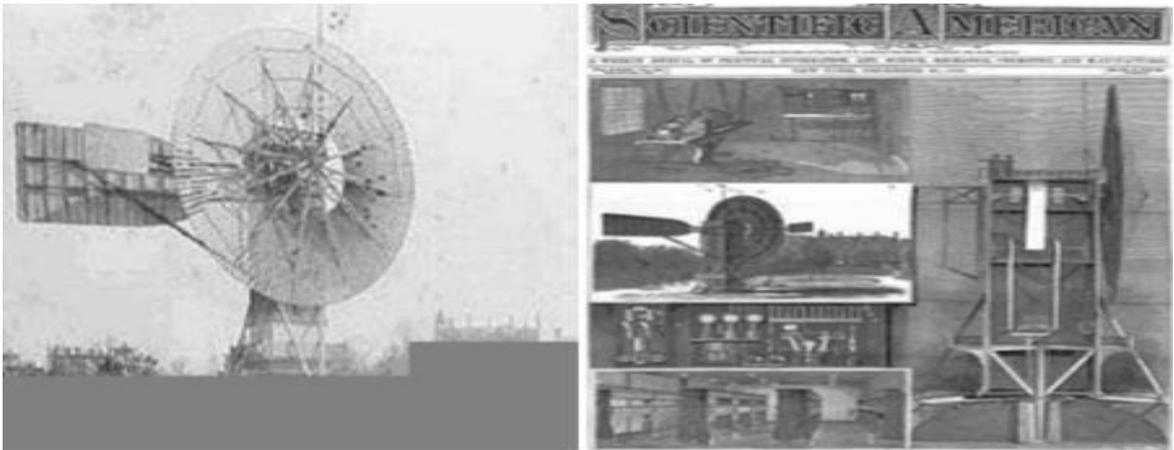


Figure I.8 : Moulin à vent Géant à Cleveland, Ohio de F. BRUSH .



Figure I.9 : Éolienne de Poul La cour .

Dans les années 1950, Johannes Juul devint aussi un pionnier dans l'utilisation de l'énergie éolienne en construisant les premières éoliennes produisant du courant alternatif. Puis en 1956, Il conçut et construisit "La turbine de Gedser" de 200 kW qui fonctionna pendant 11 ans, et

qui devint le modèle de référence pour le développement futur de tous les autres aérogénérateurs (éoliennes équipées d'un générateur électrique) [11].

Plus tard, Darrieus, un ingénieur français fit construire en 1920 la première éolienne à axe vertical munie d'un rotor bipale, d'une hauteur de 20 mètres et d'une puissance de 10 kW (Figure I.10) [11]. Le fonctionnement de cette éolienne repose sur l'effet de portance subit par un profil soumis à l'action d'un vent relatif (effet qui s'exerce sur les ailes d'un avion). Cette configuration présente un avantage important sur les éoliennes classiques, où l'éolienne peut fonctionner quelle que soit la direction du vent. Des recherches sont en cours actuellement visant à améliorer ce système qui reste fragile en cas de vents violents.



Figure I.10 : Éolienne de Darrieus..

L'industrie espagnole de l'énergie éolienne a remporté des victoires remarquables tant dans la conception que dans la fabrication des aérogénérateurs. Les États-Unis d'Amérique ont notamment lancé en Californie une opération à grande échelle au début des années 1980 en passant de 7 MW en 1981 à 386 MW en 1985, à 16 813 MW en 2007, à 25 170 MW en 2008 et en 2009 35 159 MW qui occupe la première place en production d'énergie éolienne. En 1991, l'Espagne avait seulement 7 MW de puissance installée ; à la fin de 2008, elle cumulait 16 689 MW de puissance installée et se hissait au troisième rang, et au quatrième rang en 2009 avec 19 149 MW, de tous les pays du monde en matière de production d'énergie éolienne [10].

Aujourd'hui, les études portent sur l'amélioration des matériaux ainsi que sur la chaîne de conversion de l'énergie du vent en énergie électrique exploitable par le réseau. Les premières éoliennes mettent en œuvre une génératrice asynchrone liée aux pales par l'intermédiaire d'une boîte de vitesse, qui fonctionne à vitesse fixe et sont directement reliées au réseau à pas d'interface électronique. Cette technologie était surtout employée au Danemark dans les années 1970. Les systèmes les plus récents se dirigent d'une part vers la vitesse variable pour maximiser la puissance captée du vent avec l'insertion d'interface électronique entre la génératrice et le réseau.

Depuis ces dernières années, la production d'électricité provenant de l'énergie éolienne s'est considérablement développée dans le monde entier grâce aux nouvelles technologies notamment dans le développement et la conception des formes aérodynamiques spécifiques (Figure I.11). Ceci est principalement dû à deux raisons : La première est de Produire une énergie propre durable et environnementale, le deuxième est de consolider l'idée d'une alternative aux combustibles fossiles épuisables et polluante. À la fin 2014, la puissance éolienne installée dans le monde atteignait 369.6 GW, en augmentation de 51.5 GW en un an. La Chine a installé à elle seule une part de 23.35 GW, soit 45.2 %, dont 31 % de parcs éolien.

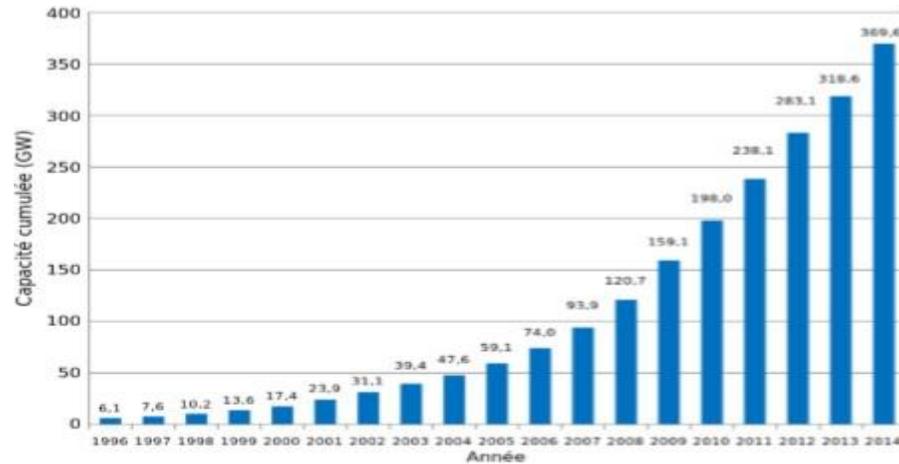


Figure I.11 : Capacité éolienne cumulée en GW dans le monde de 1996 à 2014.

Les États-Unis et la Chine représentent ensemble 38.4 % de la part énergétique éolienne mondial. Les cinq premiers pays (États-Unis, Chine, Allemagne, Espagne et Inde) représentent à eux seuls environ 72.9 %. Pour la première fois, l'Europe représente moins de la moitié de la Capacité totale d'éoliennes installées. Une dégression a été enregistrée allant de 65.5 % en 2006 à 47.9 % en 2009. L'Amérique latine et l'Afrique restent les parents pauvres avec un taux d'utilisation de 0.4 % [11].

I-6. Energie éolienne dans le monde

Au cours de la dernière décennie, la capacité de production mondiale d'énergie éolienne a connu une croissance fulgurante estimée à 28 % annuellement¹⁰. Plusieurs facteurs expliquent cette expansion spectaculaire. D'une part, cette source d'énergie renouvelable aide les États à augmenter leur production d'électricité sans augmenter leur production de gaz à effet de serre.

D'autre part, plusieurs de ces pays voient dans le développement de la filière éolienne une étape importante vers une diminution de leur dépendance aux combustibles fossiles, dont les prix ne cessent d'augmenter. En 2019; le Global Wind Energy Council (GWEC), association représentant la filière éolienne au niveau mondial, a publié son rapport annuel le 25 mars. État des lieux.

Capacités installées, production et facteurs de charge moyens, près de 60,4 GW de capacités éoliennes ont été installées dans le monde (dont 6,1 GW offshore), soit 19% de plus qu'en 2018 (50,7 GW). Il s'agit de « la deuxième meilleure année » de développement dans l'histoire de la filière. Au total, la puissance installée du parc éolien mondial atteignait 651 GW à fin 2019.

Ces données de puissance doivent être rapportées à la production d'électricité associée. Selon le GWEC, le parc éolien mondial a généré 1 390 TWh en 2019. Cette production équivaldrait ainsi à près de 5,8% de la consommation annuelle d'électricité dans le monde.

Les facteurs de charge moyens des parcs éoliens au niveau mondial sont estimés par le GWEC à 23% pour les installations terrestres et à 40% pour celles implantées en mer [12].

Energie éolienne en Algérie : En Algérie, la première expérience avec l'éolienne remonte à l'année 1957 avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger) qui fut racheté de l'Angleterre par la société « Electricité et Gaz d'Algérie » puis démontée et installée en Algérie.

Malgré les importants investissements dans le domaine de la recherche et développement des éoliens qu'a connu le monde après le premier choc pétrolier, l'Algérie fonce dans ce domaine en adoptant le programme national de développement des énergies renouvelables (EnR) approuvé en 2011 et révisé en 2015 avec un objectif d'atteindre en 2030 une puissance totale de 22000 MW dont l'éolien se réserve la part de 5010 MW après la part des photovoltaïques (PV) avec 13575 MW². Cette importance donnée à l'énergie éolienne en Algérie est due essentiellement à l'amélioration nette du coût moyen de cette énergie (estimé d'une baisse de 26 à 35% du 2015 à 2025)³ et aux difficultés économiques que connaît l'Algérie depuis la baisse du prix du pétrole.

Le premier projet en la matière date de juin 2014 avec la première ferme éolienne implanté à Adrar d'une puissance de 10 MW qui représentait 5% environ de l'énergie électrique fournie par le réseau local (A titre indicatif, les USA comptent 696 projets avec une puissance de 62.234 MW) .

Cette nouvelle centrale de production d'électricité, première du genre à l'échelle nationale, est implantée sur une superficie de 30 hectares, dans la zone de Kabertène, 72km au nord de la wilaya d'Adrar. Elle est constituée de 12 éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85 MW chacune.

Dans le cadre de l'intégration nationale, les capacités de réalisation nationales ont été associées à ce projet attribué au consortium Algéro-Français (CEGELEC). C'est ainsi que deux sociétés du Groupe Sonelgaz, à savoir ETTERKIB et INERGA, ont pris en charge les travaux de génie civil et de montage des installations. L'implication de ces dernières traduit la vision stratégique du

Groupe Sonelgaz qui vise à développer tant l'intégration nationale que la maîtrise des nouvelles techniques dans le domaine des énergies renouvelables [13].



Figure I.12 : La première éolienne installée en Algérie.

I-7. Différents types d'éoliennes

L'énergie éolienne, considérée comme source non polluante, est une des options les plus durables parmi les possibilités futures. En fait, les capteurs éoliens sont classés par l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. De cette manière, il existe des capteurs à axe horizontal et des capteurs à axe vertical.

I-7-1. Eoliennes à axe horizontal

Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent.

Les éoliennes à axe horizontal dites "à hélice" sont les plus répandues, grâce à la simplicité de leur conception et à leurs performances d'ensemble. Il s'agit de modèles installés au sommet d'un pylône et équipées d'un système d'orientation par rapport au vent. Elles sont généralement formées de deux ou trois pales qui tournent de façon aérodynamique. Leur principe de fonctionnement est similaire à celui des turbines hydrauliques : la puissance mécanique du vent fait tourner des pales reliées directement ou via un multiplicateur de vitesse à un alternateur (Poitiers, 2003). Ce dernier produit de l'électricité. Une éolienne est formée de trois parties principales : le rotor, la nacelle et la tour. Il existe deux types d'éoliennes à axe vertical, qui se distinguent par le nombre de pales de l'hélice :

✓ **Eoliennes à rotation lente**, dites 'multipales' sont utilisées depuis des dizaines d'années dans les campagnes. Leur fonction quasi-exclusive est de servir au pompage de l'eau.

✓ **Eoliennes à rotation rapide**, les éoliennes à rotation rapide, à deux ou trois pales, forment l'essentiel du marché. Leur fonction essentielle étant de produire de l'électricité, elles sont dénommées "aérogénérateurs". Au-delà d'une certaine puissance, ces éoliennes sont souvent pourvues d'une hélice à pas variable, qui permet de modifier l'inclinaison des pales en fonction de la direction du vent. Il faut encore différencier l'aérogénérateur dont l'hélice est en amont de machine par rapport au vent « hélice au vent » et celle dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent « hélice sous le vent ». Les éoliennes à axe vertical Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et sont les premières structures développées pour produire de l'électricité [14].

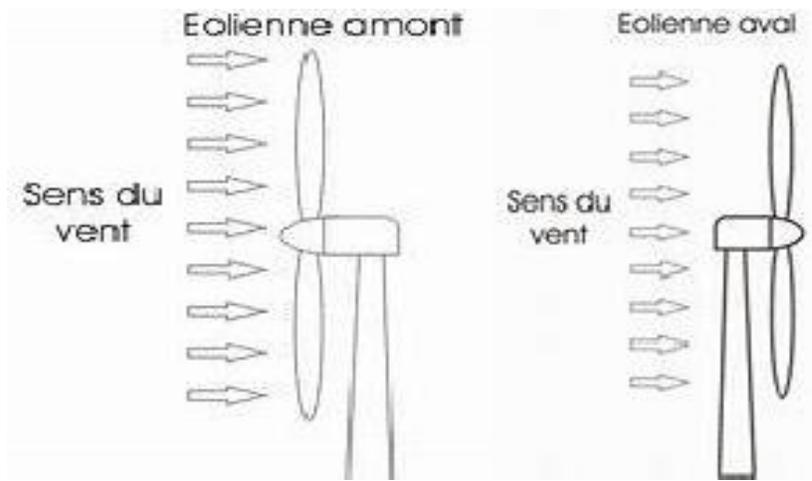


Figure I.13 : Eolienne amont et aval.

I-7-2. Eoliennes a axe vertical

Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et sont les premières structures développées pour produire de l'électricité.

Les éoliennes à axe vertical sont adaptées aux vents irréguliers, et donc plus adaptées aux villes. Elles possèdent l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation par rapport à la direction du vent, mais elles sont en général de conception compliquée, avec des technologies encore récentes et une productivité assez faible. De plus, il faut un permis de construire puisque la hauteur prise en compte est celle de l'équipement par rapport au sol, donc plus de douze mètres dans le cas d'un immeuble. Il existe trois types d'éoliennes à axe vertical : Savonius, Darrieus et à cône [15].

✓ **Éolienne de type Savonius** : Son rotor est composé par deux demi-cylindres qui tournent sur un même axe. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. Cette éolienne est caractérisée par sa forme esthétique et par sa faible vitesse de démarrage (2 à 3 m/s). Peu bruyante, elle s'intègre parfaitement en ville et son fonctionnement ne dépend pas de la

direction du vent. Le coefficient de performance, C_p peut atteindre la valeur de 0,3. Par contre, son rendement est faible et son poids est élevé.

✓ **Éolienne de type Darrieus** : Cette éolienne peut fournir une puissance plus élevée que celle du type Savonius. Par contre, elle ne peut pas démarrer toute seule. Son fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensités variables, la résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation d'une génératrice en moteur). Ces éoliennes sont la plupart du temps de puissance moyenne. Leur rendement est plus important que celui d'une éolienne de type Savonius.

✓ **Éolienne à cône** : L'éolienne à cône se compose de plusieurs couches minces de puces aérodynamiques (ailerons) connectés via des sous-fils à un point de distribution central où l'énergie du vent est exploitée par un dynamo et convertie en énergie électrique. Le centre du cône se compose d'une tige de distribution (en graphite) de poids léger. Les cônes ont une extrémité secondaire flexible qui permet aux cônes à poursuivre le chemin de vent et ainsi de recueillir un maximum. Éoliennes à cône assemblées pour l'usage individuel et sont facilement adoptées dans les milieux urbains.



Figure I.14: Éolienne de type Savonius.



Figure I.15: Éolienne à cône.



Figure I.16: Éolienne de type Darrieus.

I-8. Domaines d'utilisation des éoliennes

Les éoliennes sont utilisées principalement au pompage d'eau, à la production d'électricité et à l'alimentation des réseaux électriques [16] :

I-8-1. Eolienne de pompage mécanique

L'éolienne de pompage mécanique traditionnelle utilise un système bielle manivelle monté sur l'arbre du rotor. Elle possède normalement plusieurs pales montées sur un rotor qui tourne relativement lent. Le système bielle manivelle transforme le mouvement rotatif de la bielle en un mouvement rectiligne alternatif qui commande la pompe à piston installée dans un puits ou un étang, à la base de l'éolienne. Le mouvement alternatif du piston de la pompe assure le pompage de l'eau (la montée). Les éoliennes de pompage mécanique ont leurs avantages et leurs inconvénients. Elles sont généralement fiables, d'un entretien facile et d'un coût abordable. La contrainte principale réside dans le fait qu'elles doivent être installées directement au-dessus du puits ou de l'étang, ceci même l'eau doit être utilisée à une certaine distance de ce puits.

I-8-2. Eolienne de pompage électrique

Le système éolien électrique commande une pompe électrique, après conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, qui aspire l'eau de la source (un puits ou un étang) et la refoule à l'endroit de son utilisation (un abreuvoir à bétail, un étang, ou un système d'irrigation). Contrairement au système mécanique, le système éolien électrique n'est pas obligé de se trouver près de la source d'approvisionnement en eau. La quantité d'énergie consommée par la pompe électrique peut être adaptée à la puissance de sortie de l'éolienne, de manière à ce que l'énergie éolienne soit utilisée efficacement. Les éoliennes de pompage électrique ne comprennent pas des batteries, l'eau est stockée dans un réservoir qui sert de réserve d'énergie.

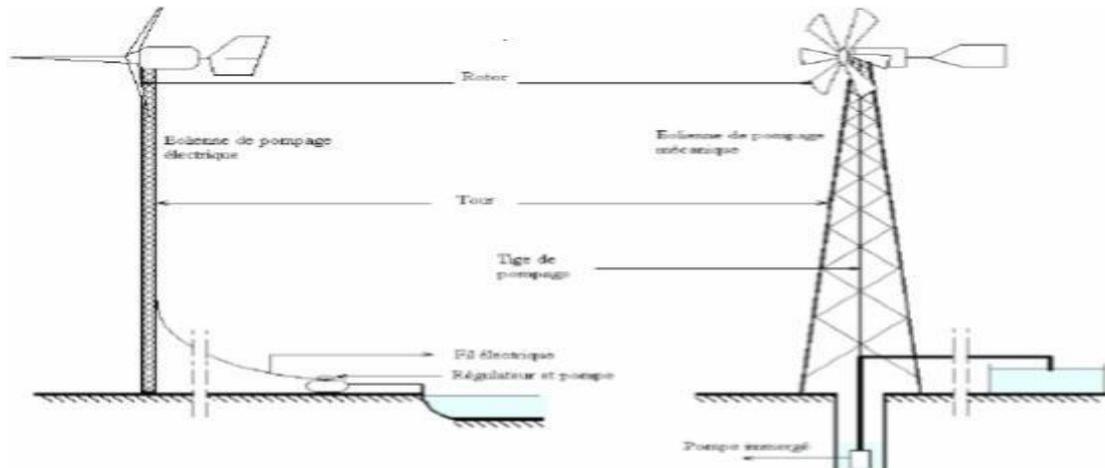


Figure I.17 : Schématisation des systèmes éoliens mécaniques et électriques pour le pompage de l'eau.

I-9. Fermes éoliennes

Elles sont constituées par un grand nombre d'éoliennes destinées à la production d'électricité. Ces éoliennes sont bien plus grandes, leurs pales vont de 20 à 30 m, leurs tours atteignent 50 m de hauteur et produisent autour de 500 kW. Dans les fermes éoliennes, des centaines de machines fonctionnent ensemble et suffisent pour alimenter une ville en électricité [16].



Figure I.18 : Ferme éolienne.

I-9-1. Principe de fonctionnement

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette Conversion se fait en deux étapes [17]:

- ✚ Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil, une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.
- ✚ Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Du fait de la non-maîtrise de l'énergie primaire, qui, de plus, est intermittente, il est difficile d'obtenir une conversion et une transmission de l'énergie régulières, puisque a priori la seule possibilité de stockage est inertielle, au prix d'une accélération de la turbine. Dans ces systèmes, la régularité de la transmission de l'énergie est donc tributaire d'un moyen de stockage en sus de l'inertie naturelle de la turbine. Le fonctionnement général est illustré par la Figure (I.19). L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique.

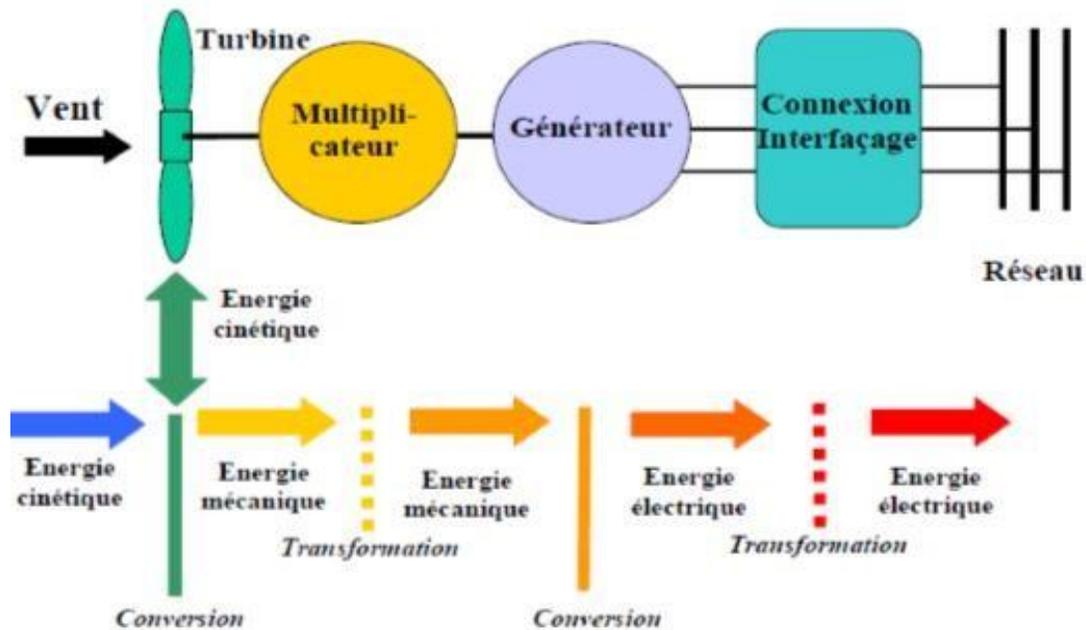


Figure I.19 : Principe de la conversion d'énergie.

I-9-2. Éléments constitutifs d'un aérogénérateur

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor. Cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans accumulateurs ou utilisée par des charges isolées [8].

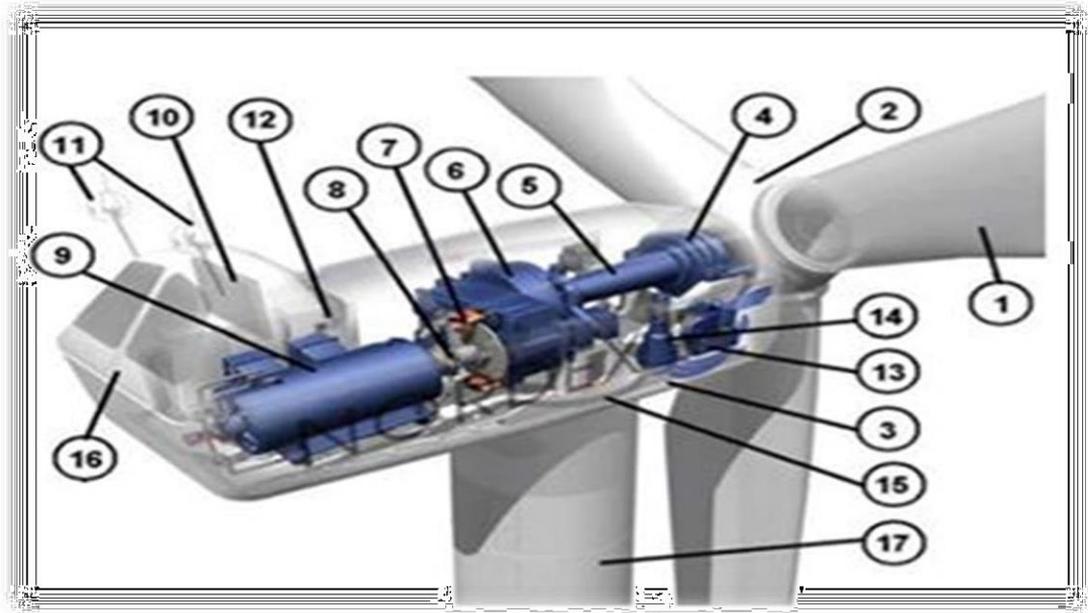


Figure I.20 : Les composants d'un aérogénérateur.

Tableau I.1 : Les composants d'un aérogénérateur.

N° d'organe	Nom d'organe	Description d'organe
1	Pâles	en composite fibre de verre. Pas fixe, profil de type stall (décrochage aérodynamique). Freins aérodynamiques d'extrémité pivotants.
2	Moyeu	du rotor en fonte.
3	Structure de la turbine	en fonte ductile ou en acier soudé galvanisé à chaud.
4	Paliers	du rotor à double rangée de billes.
5	Arbre lent	du rotor en acier haute résistance
6	Multiplicateur	de vitesse à 3 étages (1 train épicycloïdal et 2 trains parallèles).
7	Frein à disque	sur l'arbre rapide .avec témoin d'usure.
8	Accouplement	avec la génératrice de type flexible
9	Génératrice	(800/200 kW) asynchrone refroidie à l'eau
10	Radiateur de refroidissement	intégré au système multiplicateur générateur.
11	Système de mesure du vent	(anémomètre et girouette) transmet les signaux au système de contrôle de la turbine.
12	Système de contrôle	surveille et pilote la turbine.
13	Système hydraulique	pour les freins d'extrémité de pôle et le système d'orientation.
14	Entraînement d'orientation	de la tourelle à deux trains d'engrenages planétaires entraînés par des moteurs alimentés à fréquence variable.
15	Paliers du système d'orientation	équipés d'un frein à disque.
16	Capot de la nacelle	en structure acier recouverte de composite fibre de verre.

17	Tour	en acier tubulaire (plusieurs hauteurs possibles).
----	------	--

I-9-3. Avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne

a. Avantages

▪ L'énergie éolienne, propre, fiable, économique [18], et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement [19].

▪ Bien que ne pouvons pas envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂, etc. [20].

▪ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuite, et inépuisable [21].

▪ Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique [20].

▪ Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance [22].

▪ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs [23].

▪ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique [23].

▪ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace [24].

▪ C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales [24].

▪ La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [25].

▪ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [26], le coût de l'éolienne à diminuer presque de 90% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie éolienne

continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines [25].

- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer [23].

- L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà [23].

- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple [24].

b. Inconvénients

- Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages : L'impact visuel : Cela reste néanmoins un thème subjectif [23]. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien [20].

- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation nouveaux profils [23], extrémités de pale, mécanismes de transmission etc. et ne sont plus une gêne, même proche des machines (50-60 dB équivalent à une conversation). Une distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer aucun bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne [20].

- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux [24].

- La source d'énergie éolienne étant stochastique [26], la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.

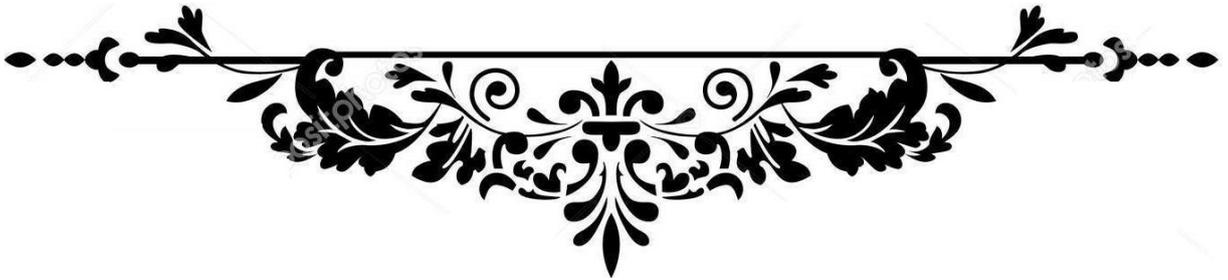
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien [27].

I-10. Conclusion

Les énergies renouvelables représentent une grande partie de notre avenir énergétique. Elles permettent le développement futur et sont une solution de nos problèmes énergétiques et environnementaux. Il y a plusieurs énergies renouvelables qui existent mais sont peu utilisées par l'Homme car elles ont un coût élevé. Leur création est dû aux changements climatiques et à la pollution et aux gaz échappés des industries. Elles ont des avantages propres à elles : elles sont inépuisables, respectueuses de l'environnement (aucun déchets rejetés dans la nature) comparées aux énergies fossiles comme le charbon ou le pétrole. Elles aident aussi à lutter contre l'effet de serre et la pollution atmosphérique. Elles sont aussi source d'emplois. Un argument permet de parler plus des énergies renouvelables, c'est l'épuisement des énergies fossiles (charbon, pétrole,...). Finalement, les éoliennes sont une perspective d'avenir. Elles sont composées de beaucoup d'éléments mais en réalité leur fonctionnement est simple. De plus elles sont très intéressantes par rapport aux autres sources d'énergie comme les centrales nucléaires ou à charbon qui rejettent du CO₂ ce qui est néfaste pour l'environnement.



Chapitre II



CHAPITRE II :

Faisabilité de réalisation d'un projet éolien

II-1. Introduction

En Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes.

Le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200Km et un relief montagneux, représenté par deux chaînes de l'atlas tellien et l'atlas saharien ; entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

Le sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le Sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au sud &u l'air le plus froid (le plus lourd). La direction des vents générés de cette façon est généralement grandement modifiée par la force de Coriolis résultant de la rotation de la terre. On estime la valeur moyenne de la vitesse de vent en Algérie à 10 m/s.

II-2.Evaluation du potentiel éolien dans une région donnée

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

La mesure doit être effectuée sur une période significative, 3 mois étant considéré comme un minimum dans l'industrie éolienne. Le mieux d'avoir une année complète de mesure, voire plus.

Le croisement de l'ensemble de ces données permet d'obtenir une évaluation cohérente du gisement éolien sur le long terme, statistiquement représentative pour la durée de vie du futur parc éolien.

Ce gisement éolien long terme sera ensuite utilisé comme référence pour l'étude du potentiel éolien du parc envisagé [28].

II-2-1. Vent

Est un déplacement de l'air qui se forme lorsque l'air d'une zone de haute pression se déplace vers une zone de basse pression ; la différence de pression est la conséquence d'un réchauffement ou d'un refroidissement différencié de l'air [29].

L'air constituant l'atmosphère est essentiellement composé d'oxygène, de vapeur d'eau et d'azote et est caractérisé par sa pression, sa température et son humidité [30].

Par ailleurs, il est à noter que l'air est sous l'action de quatre forces, qui sont :

- Les forces de pression : La pression atmosphérique en un point est le résultat de la masse de la colonne d'air au-dessus de ce point. Les différences de pression qu'on note sur le globe terrestre sont dues aux différences de température entre ces points en fonction de la latitude et des influences continentales et océaniques. Cette différence est la force qui déplace l'air [30].
- Les forces de Coriolis : Cette force est liée à la rotation de la terre sur son axe. Elle est perpendiculaire et proportionnelle à la vitesse du vent et est orientée vers l'est (la droite) dans l'hémisphère nord et vers l'ouest (la gauche) dans l'hémisphère sud. Elle n'est significative que pour les déplacements atmosphériques de haute altitude (les vents géostrophiques que nous appelons aussi vents globaux) en raison de la négligence des autres forces à ce niveau [30].
- Les Forces de frottement : Ces forces traduisent la friction turbulente de l'air sur le sol [30].
- La force gravitationnelle : Elle est la conséquence de l'attraction mutuelle des corps, cette force intervient à cause de la grande masse de la terre. Elle est dirigée vers le centre de la terre [31].

II-2-2. Mesure du vent sur un site

La campagne de mesures de vent est une étape cruciale dans le développement d'un projet éolien. La précision et la cohérence des données collectées sont essentielles pour la conception et l'optimisation du projet, ainsi que l'analyse de faisabilité et, en dernier lieu, le financement du parc. Plusieurs méthodes de mesures sont utilisées aujourd'hui par les analystes en ressource éolienne parmi lesquelles les plus répandues sont présentées dans cette mémoire [28].

Mât de mesures : Cette méthode consiste à effectuer des mesures météorologiques par le moyen d'un mât de taille variable, équipé de matériels de mesure et de collecte de données.

Selon la taille et la complexité du terrain, plusieurs mâts peuvent être installés sur un même site. En vue de limiter au maximum les incertitudes liées à l'extrapolation verticale du profil du vent, la taille du mât doit de préférence être au moins égale aux 2/3 de la hauteur de moyeu de l'éolienne type qui sera retenue pour le site. L'analyste en ressource éolienne, assisté du chef de projet, déterminera l'emplacement le plus adapté pour l'installation du mât.



Figure II.1 : Le mât de mesures.

A. Anémomètres

Ils sont utilisés pour mesurer la vitesse du vent. Selon la taille du mât, 3 à 5 anémomètres peuvent être installés à diverses hauteurs afin de mesurer avec précision le profil vertical du vent. La longueur des bras de déport est déterminée selon les normes CEI 61400.

Chaque anémomètre est calibré par un institut spécialisé en conformité avec les normes internationales (MEASNET). La calibration s'effectue avant l'installation du mât de façon à garantir la qualité de la campagne.

Les anémomètres utilisés pour l'évaluation du gisement éolien se composent de trois demi-sphères tournant autour d'un axe vertical. Du matériel de pointe est utilisé par FUTUREN lors de ses campagnes de mesures afin d'éviter toute imprécision ou surévaluation de la vitesse de vent dans les données collectées.



Figure II.2: un anémomètre.

B. Girouettes

Les mâts sont également équipés de deux girouettes qui mesurent l'orientation du vent. Les girouettes doivent être positionnées sur un bras de déport horizontal placé aussi haut que possible sur le mât mais suffisamment éloigné du dernier anémomètre afin de réduire au maximum les effets de masque. Le positionnement de la girouette s'effectue en utilisant l'orientation du bras de déport, une boussole et une carte topographique.



Figure II.3 : La girouette.

C. Manche a air (manche a vent)

La manche à air est un instrument qui nous indique l'origine du vent et nous donne aussi une approximation de la vitesse du vent. C'est un tube de toile souple fermé à l'une des extrémités que l'on appelle manchon et fixé à un mât. Le vent s'engouffre par l'ouverture et soulève le manchon. Il y a toujours au moins trois bandes rouges et deux bandes blanches qui s'alternent. Ces bandes nous permettent une approximation de la vitesse du vent. Chaque bande correspond à une vitesse de 5 nœuds (environ 9 km/h). Alors quand il y a cinq bandes du tube de toile complètement à l'horizontal on peut dire qu'il y a un vent d'au moins 25 nœuds (environ 45 km/h). Le tube de toile peut aussi pivoter sur son axe alors il nous permet de connaître la direction du vent. Le manchon pointe vers où le vent se dirige.



Figure II.4 : Manche à air.

D. Mesure des autres données météorologiques

L'humidité, la pression atmosphérique et la température de l'air influencent la production éolienne. Il est donc utile de collecter ces données au cours de la campagne de mesures.

La mesure du taux d'humidité est particulièrement utile pour prévoir le risque lié au gel des turbines et anticiper les mesures préventives à mettre en œuvre telles que l'acquisition d'un système de pâles chauffantes.

La température influe sur la densité de l'air et, de ce fait, impacte directement la production du parc éolien.

Le matériel mesurant ces différents facteurs peut être placé sur le mât. Les informations peuvent également être obtenues par des stations météorologiques environnantes dans la mesure où ces données exigent une moins grande précision.

E. Collecte des données

Les données mesurées par les différents capteurs équipant le mât sont enregistrées et stockées à intervalles réguliers dans un boîtier (appelé communément « logger ») lui-même logé dans une armoire métallique située dans la partie inférieure du mât. L'alimentation électrique des équipements électroniques est assurée par des panneaux photovoltaïques.

Le transfert des données contenues dans le logger s'effectue par transmission téléphonique filaire ou GSM. Après collecte des données, l'analyste en ressource éolienne se chargera de vérifier leur cohérence et de compléter les séquences manquantes.

Les informations sont alors traitées par un logiciel spécifique en vue de générer l'évaluation du productible du site.

Appareils de mesure à distance :

Le SODAR, acronyme qui signifie Sonic Detection and Ranging, est un outil de mesure à distance utilisé pour les mesures météorologiques.

Les données atmosphériques sont calculées en utilisant la vitesse du son. Les mesures sont effectuées par l'émission d'un signal acoustique dont l'écho est analysé afin d'évaluer la vitesse et la direction du vent, ainsi que les turbulences atmosphériques.

D'une manière similaire, le LIDAR (Light Detection and Ranging) analyse le profil du vent au moyen d'un faisceau laser. Comme pour le SODAR, un rayon lumineux tridimensionnel de forme conique est envoyé dans l'atmosphère. Le décalage Doppler des émissions laser diffusées par les particules atmosphériques est mesuré en vue de définir les caractéristiques du vent.

Les mesures SODAR et LIDAR offrent la possibilité d'analyser des profils de vent à diverses altitudes et sur l'intégralité de la surface du rotor ce qui est d'autant plus intéressant

pour des projets comprenant des éoliennes à grand rotor et/ou pour des hauteurs de moyeu importantes.

Les données sont alors enregistrées directement dans le SODAR ou le LIDAR et peuvent être ensuite transmises à distance par email, internet ou GSM.

De même que pour les mâts de mesures, les appareils de mesure à distance peuvent fonctionner de manière autonome. Toutefois, si le SODAR peut être alimenté par des panneaux photovoltaïques, les besoins en électricité du LIDAR sont plus importants et sont assurés au moyen d'une pile à combustible ou par connexion directe au réseau, ce qui peut s'avérer plus complexe notamment pour une utilisation sur site isolé.

La durée d'une campagne de mesures SODAR ou LIDAR est généralement de quelques semaines et les données collectées sont souvent utilisées pour corrélérer ou extrapoler des mesures obtenues via l'installation d'un mât.



Figure II.5 : SODAR et LIDAR.

Les techniques de mesures à distance peuvent être utilisées à de nombreuses reprises pendant le développement du projet ou l'exploitation du parc. Elles permettent par exemple d'évaluer la courbe de puissance des turbines, de calculer l'impact des effets thermiques sur la production d'énergie, d'optimiser la conception d'un projet ou d'effectuer des analyses en site complexe.

Par rapport aux solutions traditionnelles de mesures, les appareils de télédétection présentent l'avantage d'un encombrement réduit, d'un déploiement rapide sur site et de l'absence de procédures administratives préalablement à leur installation. Dans certaines situations, elles apparaissent comme une alternative financièrement avantageuse par rapport à la mise en place d'un mât de mesures.

Bien que les techniques de mesures à distance intéressent de plus en plus les professionnels du secteur, le recours au mât de mesures reste indispensable lors du développement d'un projet. Les mesures SODAR et LIDAR sont souvent utilisées de manière complémentaire aux données collectées au moyen d'un mât et permettent d'affiner les données existantes en améliorant la compréhension du profil de vent dans les zones complexes d'un site donné.

II-2-3. Interprétation des données de vent

Le vent est par essence même, l'exemple typique de variable vectorielle tridimensionnelle qui s'exprime par une orientation (la direction) et un module (la vitesse). La direction s'exprime par rapport au Nord et par un angle dont l'unité est le degré (notation °). Les angles évoluent dans le sens des aiguilles d'une montre. Il est important de noter que les vents sont repérés en fonction de leur direction d'origine : un vent d'est, est un vent qui souffle d'est en ouest, et forme un angle de 90° par rapport au Nord. Les vitesses s'expriment le plus couramment en mètres par seconde (notation m/s ou $m\ s^{-1}$) et sont parfois classées selon l'échelle de Beaufort qui s'applique au vent moyen mesuré dix minutes avant l'heure de référence (tableau I.1) [32].

Tableau II.1 : L'échelle de Beaufort.

Degrés	Termes descriptifs	Vitesse moyenne en nœuds	Vitesse moyenne en km/h	Éléments généraux de détermination de la vitesse	État des eaux
0	calme	< 1 kt	< 1 km/h	La fumée monte verticalement	comme un miroir
1	très légère brise	1 à 3 kt	1 à 5 km/h	La fumée, mais non la girouette, indique la direction du vent.	Quelques rides sur l'eau
2	légère brise	4 à 6 kt	6 à 11 km/h	On sent le vent sur la figure; les feuilles bruissent; les girouettes bougent.	vaguelettes ne déferlant pas
3	petite brise	7 à 10 kt	12 à 19 km/h	Feuilles et brindilles bougent sans arrêt; les petits drapeaux se déploient.	les moutons apparaissent
4	jolie brise	11 à 16 kt	20 à 28 km/h	Poussière et bouts de papier s'envolent; les petites branches remuent.	petites vagues, nombreux moutons
5	bonne brise	17 à 21 kt	29 à 38 km/h	Les petits arbres feuillus se balancent.	vagues modérées, moutons, embruns
6	vent frais	22 à 27 kt	39 à 49 km/h	Les grosses branches bougent.	lames, crêtes d'écume blanche, embruns
7	grand frais	28 à 33 kt	50 à 61 km/h	Des arbres tout entiers s'agitent.	lames déferlantes, traînées d'écume
8	coup de vent	34 à 40 kt	62 à 74 km/h	Des petites branches se cassent.	tourbillons d'écume à la crête des lames, traînées d'écume
9	fort coup de vent	41 à 47 kt	75 à 88 km/h	Peut endommager légèrement les bâtiments.	lames déferlantes grosses à énormes, visibilité réduite par les embruns
10	tempête	48 à 55 kt	89 à 102 km/h	Peut déraciner les arbres, endommager sérieusement les bâtiments.	
11	violente tempête	56 à 63 kt	103 à 117 km/h	Très rare; gros dégât	
12	Ouragan	63 kt	117 km/h	Très rare.	

II-2-4. Variations journalières

Les phénomènes journaliers sont dus aux phénomènes thermiques liés au rayonnement solaire (souvent car l'écart de températures entre la mer et la terre est plus important le jour que la nuit), les variations de la température en fonction de l'altitude créent des courants. La vitesse moyenne du vent est plus faible pendant la nuit ou elle varie peu puis augmente à partir du lever du soleil avant d'atteindre son maximum entre 12h et 16h Les vents sont également plus turbulents le jour que la nuit et ont tendance à changer de direction plus fréquemment. Ce phénomène peut être un avantage pour les producteurs d'énergie éolienne du fait que la consommation électrique est elle aussi plus importante le jour que la nuit.

II-2-5. Variation saisonnière

En hiver, le vent est de direction sud-ouest dans le nord, alors qu'il est nord-ouest dans le sud en été.

II-2-6. Rose des vents

Les vents les plus forts soufflent en général d'une direction particulière.

Afin de mieux se faire une idée de la distribution des vitesses et des directions du vent, on peut construire une rose des vents à partir des observations météorologiques faites dans une région donnée [31].

La rose des vents peut être divisée en plusieurs secteurs angulaires. Pour chaque secteur, sont présentés [32] :

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

Comme elle donne la répartition du vent pour les différentes directions. La distribution des vitesses et des directions peut-être divisée en 8, 12, 16 ou 32 secteurs qui représentent les différentes directions.

Les sections marquées en rouge et en orange sont les plus importantes car l'énergie du vent varie avec le cube de sa vitesse, et dans la Figure (II-6) nous voyons que les directions dominantes sont le sud-ouest et le nord-ouest la rose. Par ailleurs, cette rose des vents de 18 directions est construite selon une échelle, où chaque cercle présente un pourcentage de 5%; par exemple pour la plus direction prédominante, on trouve un pourcentage d'environ 12%.

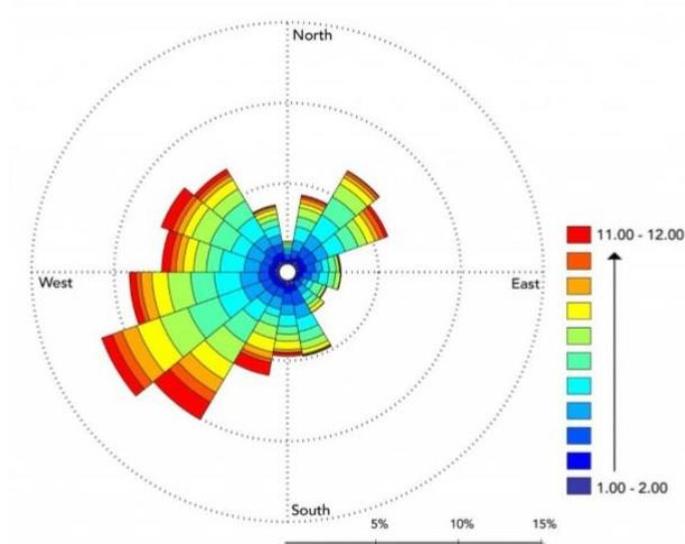


Figure II.6 : la rose des vents.

II-2-7. Carte des vents en Algérie

L'estimation de l'énergie éolienne disponible dans une région donnée reste l'une des étapes les plus importantes avant une éventuelle implantation d'un parc éolien. Pour cela, il faut d'abord quantifier le gisement énergétique disponible par l'établissement de l'atlas éolien de la région. On peut citer quelques travaux effectués pour tracer l'Atlas du vent en Algérie. En 2000, la carte des vents a été tracée par Kasbadji-Marzouk en utilisant les données répertoriées en 1990 par Hammouch . En 2011, Chellali et al. ont contribué à l'actualisation de la carte des vents en utilisant 37 points de mesure à travers le pays [33].

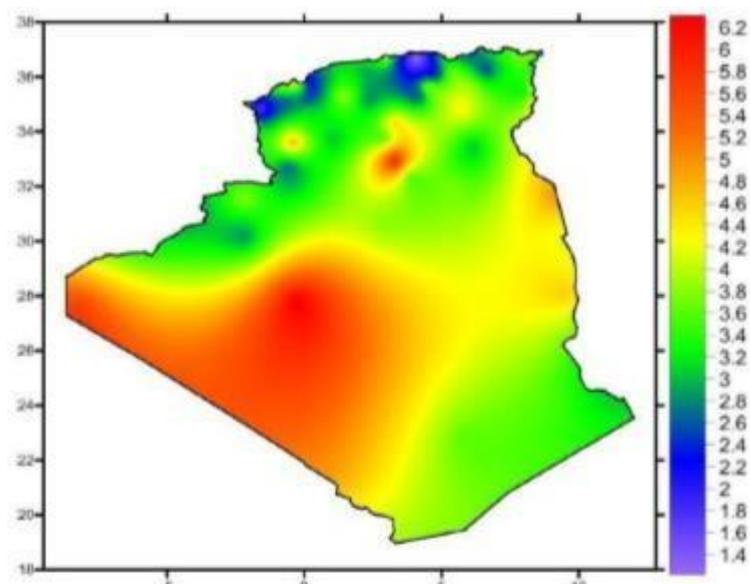


Figure II.7 : Carte annuelle des vents à 10 m du sol pour les 87 points de mesure (m/s).

Selon la cartographie représentée à la figure 7, le gisement éolien en Algérie est très diversifié. Il varie d'une zone à une autre, mais on peut dire que le meilleur potentiel d'énergie éolienne est dans le sud du pays et particulièrement dans la région du sud-ouest où la vitesse du vent est plus grande que 6 m/s.

II-3. Analyse des différentes configurations d'emplacements d'aérogénérateurs d'un parc éolien donne

II-3-1. Parc éolien

Un parc éolien est un ensemble d'aérogénérateurs de même marque, appartenant à un même propriétaire et transmettant l'énergie électrique produite par un seul raccordement au réseau. Sur un grand territoire propice à l'énergie éolienne, les parcs peuvent se côtoyer. Avant qu'un parc soit opérationnel, un plan d'intervention est établi avec les pompiers. Ils savent quel chemin mène à quelle éolienne. Il est peu probable que tous ces chemins soient connus des GPS. En cas d'accident, les agents de maintenance ne peuvent se contenter d'appeler les secours. Ils travaillent par équipe et sont formés à se porter mutuellement assistance.

II-3-2. Aérogénérateur

Un aérogénérateur est une éolienne puissante installée sur un mât de grande hauteur qui fournit du courant électrique. Dans les champs éoliens, on trouve deux sortes d'aérogénérateurs :

- les machines dont l'hélice est directement reliée au rotor de la génératrice de courant sont courtes et de grand diamètre. Elles ont souvent une forme d'œuf.
- les machines équipées d'une génératrice à grande vitesse de rotation, nécessitent d'interposer un multiplicateur de vitesse entre l'hélice et cette dernière. Elles ont plutôt la forme d'un cigare : grande longueur et faible section [34].

II-4. Étude sur les différentes solutions techniques relatives a l'intégration des éoliennes

II-4-1. Besoin de l'intégration de l'énergie éolienne dans le réseau électrique

Une des conséquences de l'ouverture du marché de l'électricité est le développement d'une production décentralisée, de sources d'énergie renouvelable.

L'intégration dans les réseaux électriques des sources à énergie renouvelables, et plus particulièrement celles soumises aux aléas du climat telles que les énergies éolienne et solaire, et d'une manière plus générale de la production décentralisée va nécessiter d'importants aménagements de ces réseaux, ainsi que la mise en œuvre de nouveaux équipements et de nouvelles méthodes de gestion. Le défi est de maintenir la fiabilité et la qualité de l'alimentation des particuliers et des entreprises en énergie électrique malgré la libéralisation du marché de l'électricité et l'utilisation croissante de sources à énergies renouvelables.

En théorie, l'énergie d'origine éolienne pourrait satisfaire la demande mondiale d'électricité. Les partisans de l'énergie éolienne ne prétendent pas de se contenter de cette énergie toute seule mais bien au contraire une intégration avec le réseau conventionnel sous divers niveaux de tensions est souhaitable voire même impérative [35].

II-4-2. Éoliennes connectées au réseau électrique

Aujourd'hui, on peut recenser deux types d'éoliennes raccordées sur les réseaux électriques : les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces dernières (MADA et MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage [37].

II-4-2-1. Éolienne à vitesse fixe

Les turbines éoliennes peuvent également être classifiées en des turbines à vitesse fixe, et autres à vitesse variable. Comme leur nom l'indique les turbines à vitesse fixes tournent à une vitesse relativement constante. Cette vitesse est déterminée par le rapport du réducteur de vitesse, la fréquence du réseau électrique et le nombre de pôles de la génératrice. Ces turbines atteignent un rendement de conversion maximum uniquement pour une vitesse de vent donnée, et l'efficacité du système dégrade une fois la vitesse de vent change. La turbine à vitesse fixe est protégée par un contrôle aérodynamique des éventuelles rafales de vent, elle génère une puissance électrique très fluctuante par rapport aux autres sources d'énergies qui offrent une énergie constante dans le temps et facilement réglable.

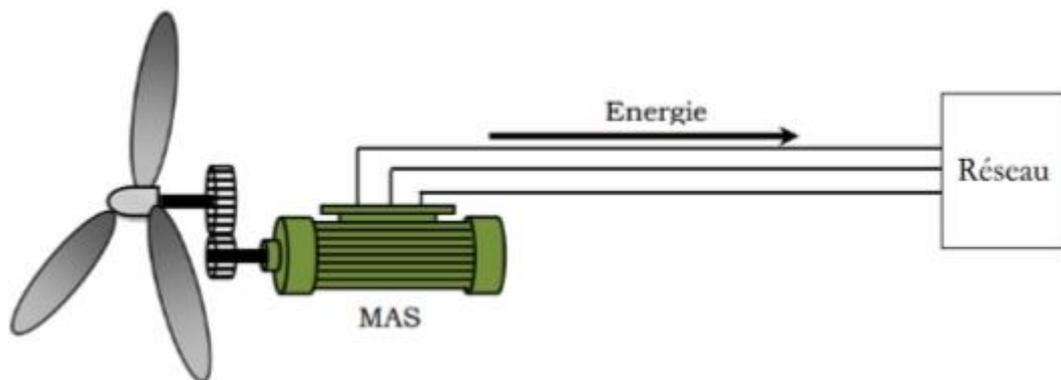


Figure II.8 : Éolienne à vitesse fixe.

II-4-2-2. Éolienne à vitesse variable

D'une autre part les turbines à vitesse variable, peuvent atteindre un rendement de conversion d'énergie sur une vaste plage de vitesse de vent. La turbine change constamment sa vitesse de rotation dépendamment de la vitesse du vent pour maximiser la puissance. Dans ce cas, la vitesse spécifique λ , qui représente la vitesse du bout de la pale par rapport à la vitesse du vent, peut être maintenue dans ces valeurs optimales de manière à réaliser une extraction maximale de la puissance électrique. Afin que la vitesse de la turbine soit ajustable, l'éolienne est connectée au réseau électrique via des convertisseurs de puissance. Comme le montre le tableau ci-dessous, les principales avantages des turbines à vitesse variable sont leurs rendements de conversion d'énergie élevés, une énergie électrique de bonne qualité et qui ne

présente aucune nuisance pour le réseau électrique, et finalement le stress mécanique réduit sur l'ensemble de la chaîne mécanique. Leurs principaux inconvénients sont le coût de construction et les pertes énergétiques dues à l'utilisation des convertisseurs de puissance. Toutefois, ce coût additionnel et les pertes sont compensés par la forte production d'énergie électrique.

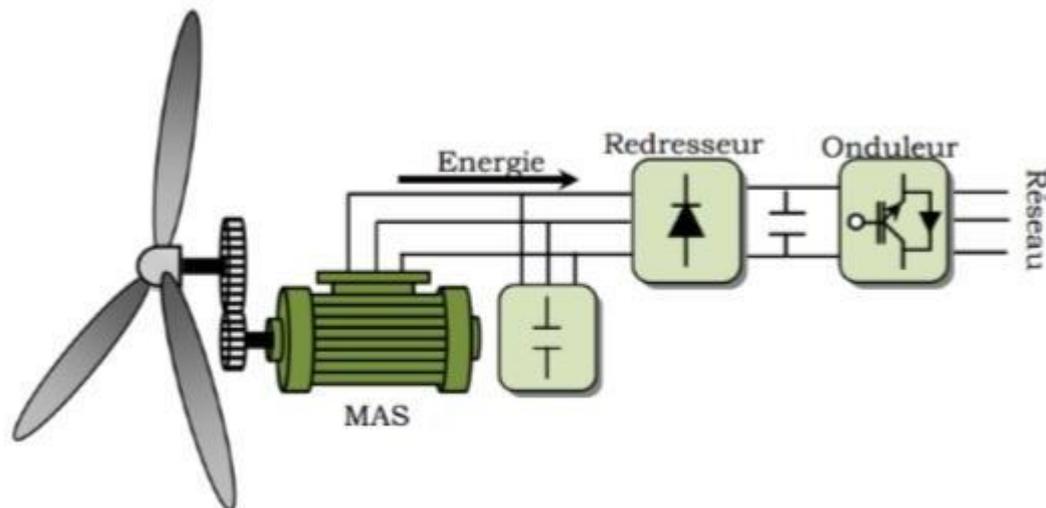


Figure II.9 : Éolienne à vitesse variable.

Tableau II.3: Comparaison des éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable[40].

Fonctionnement à vitesse fixe	Fonctionnement à vitesse variable
<ul style="list-style-type: none"> -Simplicité du système électrique. -Plus grande fiabilité. -Faible probabilité d'entrée en résonance des éléments de l'éolienne. -Moins cher. -Fonctionnement à vitesse variable (≠30% de vitesse nominale). 	<ul style="list-style-type: none"> -Augmentation du rendement énergétique. -Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance. -Réduction des efforts subis par le train de puissance. -Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

II.5. Estimation du coût du kilowattheure produit

Le coût de production moyen de l'électricité d'origine éolienne a été calculé à partir de la formule générale du 'Levelized Cost Of Energy' or present value cost' (LCOE ou bien PVC) reconnue au niveau international. Avec cette formule, les coûts de production dits 'complets' (LCOE) correspondent, selon l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) à 'la valeur présente de la somme des coûts actualisés divisés par la production totale ajustée à sa valeur temps économique. Une autre façon de considérer ce coût est de dire qu'il est égal au coût de production moyen actualisé intégrant les dépenses opérationnelles et le coût d'investissement pendant la phase d'exploitation d'un parc éolien. [38] Les principaux paramètres régissant le coût de production de l'énergie éolienne sont les suivants :

- Les coûts d'investissement (y compris les frais auxiliaires pour les fondations, le raccordement au réseau, etc.).

- les frais d'exploitation et d'entretien.
- la production d'électricité / vitesse moyenne du vent.
- la durée de vie de la turbine.
- le taux d'actualisation.

Ces facteurs peuvent varier d'un pays à l'autre et selon les régions. Cependant, parmi tous les paramètres énumérés, le prix de l'éolienne et les autres coûts d'investissement sont les plus importants. Le coût spécifique d'une éolienne varie considérablement d'un fabricant à l'autre.

Le choix de l'aérogénérateur idéal est donc essentiel pour assurer la viabilité économique, alors que la production d'électricité est fortement dépendante des conditions de vent.

La méthode PVC est adoptée dans ce travail parce qu'elle estime le développement dynamique des facteurs économiques pertinents et les différentes variables de coûts et de revenus, qui sont pris en compte indépendamment du fait que l'argent a été ou sera payé ou reçu dans le passé ou dans l'avenir, grâce à la déduction du coût accumulé en intérêt (actualisation) de l'ensemble des flux de paiement, à un temps de référence commun.

La valeur actuelle des coûts (PVC) est déterminée à l'aide de la relation suivante :

$$PVC = C_i + C_{omr} \times \left[\frac{1+i}{r-i} \right] \times \left[1 - \left(\frac{1+i}{1+r} \right)^t \right] - S \times \left(\frac{1+i}{1+r} \right)^t \quad (II.1)$$

Où, r , représente le taux d'intérêt, i , le taux d'inflation, t , la durée de vie de l'éolienne, S , les frais supplémentaires C_{omr} et C_i , les coûts d'opération, de maintenance et de réparation.

Pour estimer le PVC, les grandeurs et hypothèses suivantes sont retenues :

1. Le taux d'intérêt (r) et le taux d'inflation (i) sont, respectivement de 8 % et 6 %.
2. La durée de vie (t) de la machine est de 20 ans [43].
3. Les coûts O&M : constituent une part importante des coûts totaux annuels d'exploitation d'une éolienne, mais leur valeur n'est pas fixée. Les coûts d'exploitation varient chaque année avec les variations des taux d'inflation et d'intérêt. Cependant, il est admis qu'ils (C_{omr}) varient de 15 à 30 % du coût total d'investissement (coût de l'éolien + autre coût). Dans cette étude, nous admettons que les coûts C_{omr} annuels sont de l'ordre de 25 % du coût d'investissement du système éolien étudié (prix du système / durée de vie).
4. Le facteur (S) est un coût supplémentaire pour la plupart des fermes éoliennes, situées à proximité de zones rurales du pays. Donc les coûts liés à l'installation {notamment le coût des travaux de génie civil, le transport de la turbine et la construction de routes} sont toujours élevés, comparés aux coûts qui seraient encourus si les éoliennes étaient installées dans une zone urbaine. Il est admis ici que (S) est égal à 10 % du prix de l'éolienne.
5. L'investissement (I) est la somme du prix de l'éolienne et d'autres coûts initiaux, y compris ceux du génie civil, des infrastructures, de l'installation et de l'intégration au réseau. Ils peuvent être estimés à 20 % du prix de l'éolienne.

6. Le coût de la turbine spécifique dépend de la puissance nominale du rotor éolien, mais varie selon les fabricants. Nous avons choisi le coût de la turbine spécifique en considérant trois intervalles (valeurs maximales et minimales) comme on le voit dans le tableau ci-dessous.

Le coût de kWh produit (LCOE) est déterminé par l'expression suivante [39]:

$$\text{LCOE} = (\$/\text{kWh}) = \text{PVC} / \text{A. E. P}_t \quad (\text{II.2})$$

Dans le tableau (II.4) [44], on constate que le coût par kW diminue avec l'augmentation de la taille de l'éolienne. Pour la taille de la machine ci-dessous de 200 kW, le coût moyen d'une éolienne est de l'ordre de 1150 \$/kW.

Tableau II.3 : Variation du coût des éoliennes avec la puissance nominale.

Taille des éoliennes (kW)	Coût spécifique (\$kW)	Coût moyen (\$kW)
< 20	2200-3000	2600
20 – 200	1250-2300	1775
> 200	700-2600	1150

Le coût de la turbine dépend de la puissance nominale, mais varie également selon les fabricants. Ainsi, le choix du coût de la turbine peut être fait en considérant un intervalle de bande (valeurs maximales et minimales). Le tableau 1 présente le coût des éoliennes pour différentes gammes de tailles. Comme on peut le voir dans ce tableau, le coût par kW diminue avec l'augmentation de la taille de l'éolienne. Pour la taille de la machine supérieure à 200 kW, le coût de la turbine peut être considérée comme 1150 \$/kW (la moyenne entre un minimum de 700 \$/kW et un maximum de 1600 \$/kW) [44].

II.6. Critères de choix d'un terrain d'implantation des éoliennes

Les critères de choix de l'implantation éolienne dépendent de la taille, puissance et du nombre d'unités. Ils incluent la présence d'un vent régulier et diverses conditions telles que : présence d'un réseau électrique pour recueillir le courant, absence de zones d'exclusion (dont périmètre de monuments historiques, sites classés..), terrain approprié, etc. Un bon site éolien doit présenter les qualités suivantes [45] :

- Site venté
- Peu de turbulences
- Une bonne facilité d'accès
- Proche du réseau électrique

Il faut de préférence avoir une vue aussi dégagée que possible dans la direction des vents dominants ainsi certains sites proches de grands obstacles (arbres, bâtiments, escarpements complexes, etc.) sont à proscrire car le vent y est trop turbulent. Il faut qu'il y ait aussi une rugosité aussi faible que possible dans cette direction. Il est nécessaire de procéder à une étude des obstacles environnants, plus particulièrement dans la direction des vents

dominants. Les écrans peuvent être constitués par des obstacles naturels ou artificiels (arbres, broussailles, falaises, chaos rocheux, maison...) On se placera à une distance qui dépendra de la forme de l'obstacle :

- Tour ou pylône cylindrique : 10 fois le diamètre
- Mur ou maison: 10 fois la hauteur
- Arbres: 6 fois la hauteur

Dans le cas particulier de deux éoliennes dans le sillage l'une de l'autre :

- Minimum: 6 fois le diamètre de l'hélice.
- Maximum: 12 fois le diamètre de l'hélice

Un autre critère tout aussi important que les obstacles sera celui des accidents de terrain au voisinage de l'aéromoteur. Les pentes supérieures à 45° ou les falaises sont à l'origine de perturbations susceptibles de provoquer la détérioration de la machine en provoquant des variations de vitesse et de direction du vent dans un espace restreint. Les variations de vitesse provoquent des contraintes dissymétriques sur l'aéromoteur et les variations de direction entraînent des désorientations avec des accélérations variables qui imposent des contraintes sur toutes les parties de la machine (couples gyroscopiques). Certains sites bien spécifiques augmentent la vitesse du vent et sont donc plus propices à une installation éolienne :

- L'effet tunnel ou Venturi.
- Les collines, surtout si leur pente est douce et progressive permettant l'apparition d'effet de colline.
 - La mer et les lacs sont aussi des emplacements de choix : il n'y a aucun obstacle au vent, et donc, même à basse altitude, les vents ont une vitesse plus importante et sont moins turbulents. La proximité d'une côte escarpée créera également des turbulences, usant prématurément certains composants mécaniques de l'éolienne.
 - Les zones côtières, les hauts plateaux, les montagnes et Certaines plaines dégagées.

Autres critères :

D'autres critères sont pris en compte pour le choix du site [40].

- La nature du sol.
- L'accessibilité du site.
- La connexion au réseau électrique.
- Les éoliennes.
- Impact sonore.

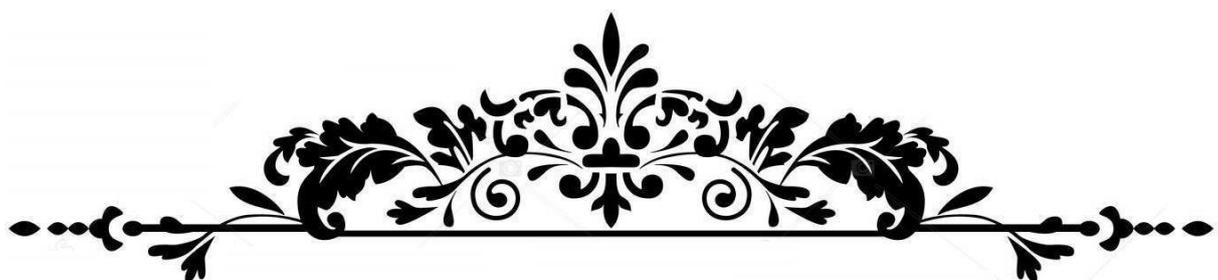
II.7. Conclusion

L'implantation du parc éolien apporte d'une part une activité économique sur le territoire : la construction répartie sur 18 mois, l'entretien du site et la maintenance des installations génèrent une activité pour les fournisseurs, entreprises, restauration et commerces locaux sur la durée d'exploitation qui peut dépasser 30 ans. D'autre part, l'implantation

d'éoliennes permet des retombées économiques pour les propriétaires (revenu dans le cadre d'un bail de mise à disposition de son terrain) et aux collectivités locales (percevant les taxes d'activités professionnelles). Elle est réversible : un parc éolien est limité dans le temps, puisque complètement démantelé en fin de vie, dont le coût lié à cette opération est anticipé et intégré dans la rentabilité du projet (des garanties financières sont également prévues en cas de défaillance de l'exploitant du parc).

Elle est une énergie d'avenir, en constituant un nouveau domaine de recherche pour les écoles techniques, secteur créateur d'emplois.

L'énergie éolienne est donc l'une des sources de production d'électricité permettant de parvenir à moindre coût à la réalisation des objectifs que s'est fixée l'Union Européenne pour 2020 et participant à la réalisation de la transition énergétique.



Chapitre III



Chapitre III

Choix du site

III-1.Introduction

Notre étude porte sur la région d'Oran, où nous avons choisi trois sites, Arzew, Es Sénia et Port d'Oran. Ces choix sont justifiés par la disponibilité des bases des données de fréquence des vitesses moyenne et maximale du vent sur une période de 11 ans, de plus ces derniers sont parmi les régions plus ventées en Algérie. Les détails des sites étudiés sont récapitulés dans le tableau II.1 et les positions géographiques de ces stations sont données dans la figure III.2, III.1 et III.3 [41].

III-2.Mise en place d'un projet éolien

L'utilisation des éoliennes pour la production d'électricité est devenue une des méthodes prépondérantes de production d'énergie renouvelable et contribue activement à la lutte pour la réduction de l'émission de gaz à effet de serre. Cependant, malgré l'avantage écologique que représente l'éolien par rapport à d'autres sources d'énergie, l'implantation de nouveaux parcs éoliens est soumise à des règles très strictes afin de rentabiliser au maximum les infrastructures et ainsi proposer aux consommateurs un prix au kWh le plus compétitif possible, en dépit de solutions alternatives parfois plus économiques mais également plus polluantes.

La mise en place d'un projet éolien se déroule globalement de la façon suivante:

III-2-1.Étude de préfaisabilité

Elle permet de savoir s'il est intéressant d'employer davantage de moyens et de temps pour évaluer la pertinence du projet, en s'appuyant sur : -une estimation de la taille du projet - une évaluation rapide du potentiel éolien -une analyse du branchement au réseau électrique existant -une budgétisation de l'installation -une estimation des obstacles potentiels à venir Cette étude, réalisée en quelques jours, doit mettre en évidence les problèmes majeurs pouvant apparaître [42].

III-3-2.Étude d'impact

Le développeur a l'obligation de réaliser une étude d'impact pour chacun de ses projets. Il s'agit d'une démarche globale d'évaluation des impacts du projet sur l'environnement et la biodiversité, les riverains, le paysage et le patrimoine local. Ces études sont réalisées par des bureaux d'études indépendants et spécialisés dans différents domaines : acoustique, biodiversité, paysage, etc.

L'étude d'impact est accompagnée d'une étude de dangers, conformément à la réglementation relative aux installations classées pour la protection de l'environnement dont font partie les parcs éoliens [43].

Tableau III.1 : L'étude de l'impact.

ETUDE DE L'IMPACT \ LES ZONES	SENIÀ	ARZEW	PORT D'ORAN
Le paysage	-La commune de Sénia est une plaine caractérisée par son sol rouge et les terres agricoles réparties sur toute la commune. -Sénia a deux sebkhas, le petit sebkha du lac au nord-est et le sebkha d'Oran au sud.	-Arzew est un terrain plat entouré d'une chaîne de montagnes et tout ce terrain surplombe la mer Méditerranée qui s'étend sur 20 km.	-situé dans la Baie d'Oran.
La faune	flamants roses. -Les limicoles. - Les grues. -Les tadornes.		
L'archéologie		-Des ruines romaines, il exportait du grain et du sel. -Raffinerie de pétrole.	-À l'époque romaine, le port d'Oran et Marsa alkbir commune comme dvin (Portus Divini)
Les monuments historiques ou les sites sensibles et protégés	-La zone industrielle d'Es Sénia. -Daïra d'Es Sénia. -Aéroport. - Centre commercial d'Es senia.	-Square centrale d'Arzew -Plage de saint Michel -Fontaines des Gazelles -Vue panoramique vers la zone industrielle	

III-3.Evaluation du potentiel éolien

Le choix final du terrain se fait sur la base d'un ensemble de mesures destinées à connaître, le gisement éolien du lieu. Pour cela des campagnes sont réalisées à l'aide de mâts de mesure. Elles durent de 6 à 12 mois.

Les principales mesures concernent la vitesse du vent, l'orientation du vent, et des données sur l'humidité, la pression atmosphérique et la température de l'air. Autant d'éléments qui influencent la future production éolienne [44].

Nous avons collecté des informations que nous avons pu obtenir à partir d'Office Nationale de Météorologique qui sont représentées en vitesse maximale ; vitesse moyenne du vent en plus de la fréquence sur les sites étudiés.

III-4.Etudes techniques

III-4-1.Accès au site

Il est nécessaire pour implanter la tour de mesure puisqu'il serait inutile de mesurer le vent en un lieu où l'accès est impossible. Si le terrain appartient au gouvernement, il est nécessaire de suivre les directives du ministère des Ressources naturelles et de la faune (MRNF). Si le terrain est détenu par un propriétaire privé, il faut définir :

-Le droit d'étude du terrain pour une période suffisamment longue pour permettre la réalisation du programme de mesure de vent.

-L'obligation de location du terrain pour une durée minimale de 20 ans, l'exploitation y est intéressante.

-Le droit d'utilisation du terrain pour toutes les structures à installer.

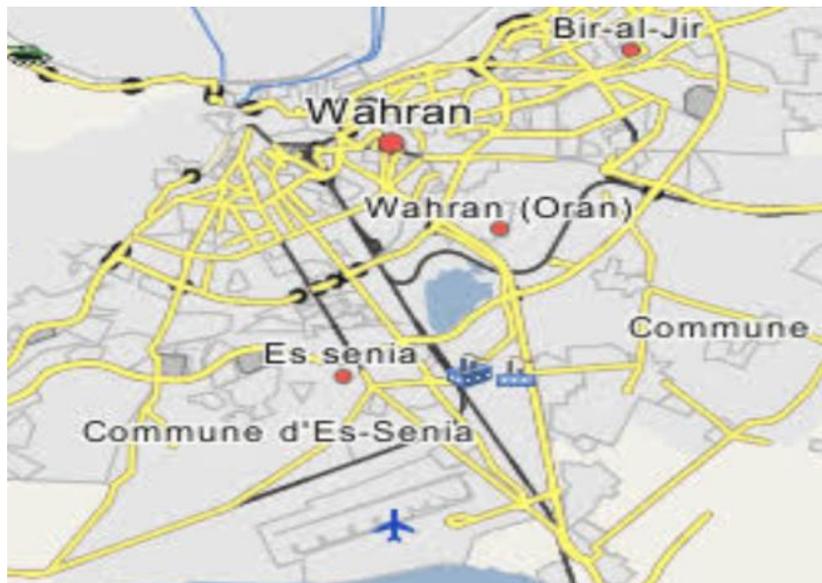


Figure III.1 : Localisation de Es sénia sur la carte géographique.

-La compensation financière accordée au propriétaire, suivant un taux fixe ou un pourcentage des recettes de production.

Aussi il y a les évaluations environnementales doivent être réalisées si une des lois l'exige ou si une demande du gouvernement est exprimée. Elles seront nécessaires à l'obtention des autorisations pour le terrain ou l'accès au réseau. Ces évaluations environnementales pourront porter sur l'impact de la présence d'éoliennes sur le paysage, sur la faune et la flore, ainsi que sur l'influence du parc sur les habitations et villes alentours [45].

1) Sénia : La municipalité d'As-Senia est située dans l'État d'Oran (République d'Algérie) et est considérée comme l'une des municipalités les plus importantes de l'État. Elle est bordée au nord par la municipalité d'Oran et à l'ouest par la municipalité de Masergin et à l'est par la municipalité de Sidi El-Chehemi et la municipalité de Karma au sud-est, et Sebkhia Oran 7 au sud. 5 km au sud, et la distance entre la commune d'Es Senia et le centre-ville d'Oran est de 6,4 km. Sa superficie est d'environ 48,51 km² et sa population est d'environ 93 500 personnes, selon les statistiques de 2006 [46].

2) Arzew : La ville d'Arzew est située à l'ouest de l'Algérie et est affiliée à la division algérienne de l'état d'Oran. La ville est située à l'est d'Oran, de sorte qu'elle est au milieu de la distance entre la wilaya d'Oran et Mostaganem, de sorte qu'elle est à environ 35

km d'Oran et 40 km de Mostaganem. La route la longe. National No. 11 a une population d'environ 80 000 personnes. [47].



Figure III.2 : Localisation d'Arzew sur la carte géographique.

3) **Port d'Oran** : Le port d'Oran est l'un des ports algériens situé à l'ouest du pays, précisément dans la ville d'Oran surplombant la mer Méditerranée, et il est considéré comme l'un des ports importants dans les domaines du transport commercial et maritime. [48].



Figure III. 3 : Localisation de Port d'Oran sur la carte géographique.

III-4-2. Implantation des machines

L'implémentation choisie, ainsi que le choix de machines performantes au niveau acoustique a permis de réduire les impacts potentiels prévus en phase d'exploitation. En complément, afin de respecter les contraintes réglementaires liées aux émergences prévisionnelles, un plan de bridage adapté sera défini en fonction des vitesses de vent.

Les mesures effectuées pour l'établissement de l'état initial sont représentatives de la situation acoustique actuelle du site, mais l'ambiance sonore peut changer entre la réalisation des études et la mise en service des éoliennes. De plus, entre la réalisation de l'étude acoustique et la construction du parc, les performances acoustiques des éoliennes peuvent évoluer et de nouveaux modes de bridage plus efficaces peuvent apparaître. Pour ces raisons, une réception acoustique sera effectuée après la mise en service du parc, dans le but de s'assurer du respect de la réglementation et d'établir un éventuel plan bridage qui

correspondra aux conditions réelles de fonctionnement des éoliennes sur le site. Par conséquent, l'impact sonore lié à l'exploitation du parc éolien est très faible, voire nul [49].

III-4-3. Etudes de sols

Il doit être suffisamment résistant pour supporter les fondations de l'éolienne. Ce critère n'est pas déterminant car dans le cas d'un sol meuble, des pieux seront alors enfoncés sous les fondations de l'éolienne.

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

1) *L'effet Venturi* : lorsque l'air s'engouffre entre deux obstacles comme deux montagnes ou deux grands bâtiments, il est accéléré par effet venturi. De même, lorsqu'il rencontre une colline, l'air est accéléré au niveau du sommet. Ils sont cependant le plus souvent de surface restreinte. [50].

2) *Effet tunnel* : Cet effet se crée lorsque le vent en mouvement passe entre deux grands obstacles formant ainsi un col étroit (Figure III.4). Le vent se trouve comprimé sur les deux côtés qui s'accélèrent considérablement. L'installation d'une éolienne dans un tel tunnel est donc plus avantageuse d'un point de vue énergétique. Cependant, le tunnel doit être enclavé de pentes douces pour éviter les turbulences qui peuvent changer la vitesse et la direction de vent [51].



Figure III.4 : L'effet de tunnel

3) *Effet colline* : La colline est un petit relief à pente plus élevée jusqu'à 40% que le paysage environnant. Le vent s'accélère à la rencontre d'une colline à cause de la différence de pression à l'avant et l'arrière de celle-ci (Figure III.5). Ainsi le vent se trouve comprimé par la face exposée au vent de la colline, et s'étant en s'accélération le long de la pente, vers l'autre côté de la colline qui dispose d'une zone de basse pression. une colline accidentée ou à pentes raides peut provoquer de fortes turbulences qui risquent d'entraver cet avantage [52].



Figure III.5 : L'effet de colline.

4) **La mer et les lacs** : (à proximité d'une côte non escarpée) sont aussi des emplacements de choix : il n'y a aucun obstacle au vent, et donc, même à basse altitude, les vents ont une vitesse plus importante et sont moins turbulents.

a. L'altitude: Le vent est engendré par une différence de température ou de pression. Il est ralenti par les obstacles, et la rugosité du sol, et est généralement plus fort en altitude. Les plaines ont des vents forts parce qu'il y a peu d'obstacles. Les cols de montagne ont eux aussi des vents forts, parce qu'ils canalisent les vents de haute altitude. Dans certains cols, les vents proviennent de l'écart de température entre les deux versants. [53].

b. Sénia : Bien qu'il ne soit pas loin de la côte, son climat est légèrement différent de celui de la ville d'Oran, et cela est dû à sa présence entre deux sebkhas: le sebkha du «petit lac» au nord-est et le sebkha d'Oran au sud, ce qui affecte son climat et le rend plus frais en hiver et plus chaud en été. La commune de Sénia est une plaine caractérisée par son sol rouge et les terres agricoles réparties sur toute la commune.

c. Arzew : La ville est un terrain plat entouré par une chaîne de montagnes, et tout ce terrain surplombe la mer Méditerranée qui s'étend sur 20 km. Le climat est le climat méditerranéen. La région est caractérisée par un vent continu.

d. Port d'Oran : Le Port d'Oran est l'un des ports algériens situé à l'ouest du pays, précisément dans la ville d'Oran surplombant la mer Méditerranée, et il est considéré comme l'un des ports importants dans les domaines du transport commercial et maritime [54].

III-4-4. Détermination aires de grutage

Les surfaces de grutage correspondent à des aires stabilisées de faible pente sur lesquelles les engins de terrassement et d'approvisionnement peuvent circuler et qui accueillent les grues utilisées pour le montage des éoliennes. Leur revêtement est sensiblement identique à celui des chemins d'accès (empierrement, géotextile). Le niveau altimétrique de l'aire de montage doit être supérieur à celui du sol afin de garantir l'évacuation des eaux superficielles. Pour chaque éolienne, il sera réalisé un aménagement spécifique en fonction du relief du terrain tant pour la création des accès que pour l'implantation des éoliennes elles-mêmes. Ainsi, suivant les cas, le nivelage rendu nécessaire entraînera des opérations de remblais et de déblais plus ou moins importants. [55].



Figure III.6: Aménagement des plateformes de grutage.

III-4-5. Possibilités de raccordement électrique

Le nouveau parc éolien devra évidemment être intégré au réseau d'énergie électrique et celui-ci doit être en mesure de supporter cette nouvelle capacité de production intermittente. L'incidence de ce branchement sur le réseau devra être évaluée car elle dépend de la taille du parc éolien et de la production estimée. Les modalités et certifications nécessaires à la connexion varient suivant l'intégration de la puissance éolienne dans le circuit. [55].

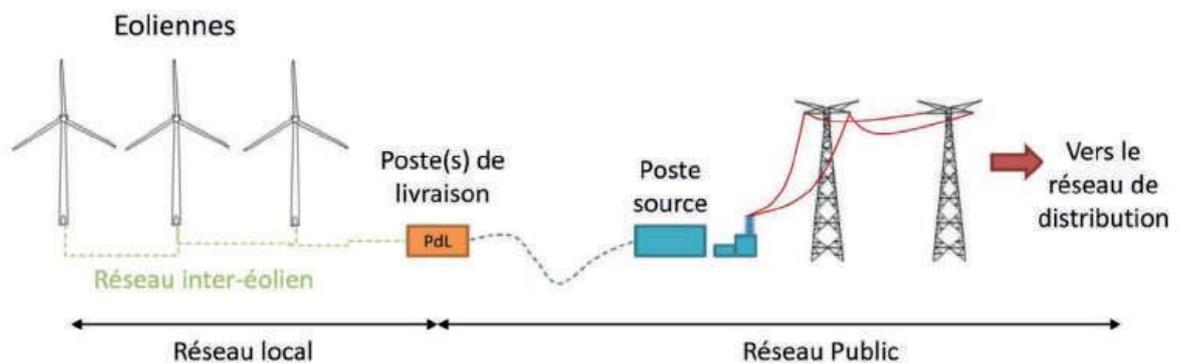


Figure III.7 : Organisation générale du raccordement électrique d'un parc éolien au réseau de distribution.

1) **Sénia** : La Société de Distribution d'électricité et de gaz de l'Ouest (SDO) est en charge de la distribution et de la commercialisation d'électricité en tant que filiale de la Sonelgaz à Es Senia et dans toute la wilaya d'Oran.

2) **Arzew** : La Société de Distribution d'électricité et de gaz de l'Ouest (SDO) est en charge de la distribution et de la commercialisation d'électricité en tant que filiale de la Sonelgaz à Arzew et dans toute la wilaya d'Oran.

3) **Port d'Oran** : La Société de Distribution d'électricité et de gaz de l'Ouest (SDO) est en charge de la distribution et de la commercialisation d'électricité en tant que filiale de la Sonelgaz à Arzew et dans toute la wilaya d'Oran. [54].

III-4-6. Réseau inter-éolien

Le réseau inter-éolien permet de relier le transformateur, intégré ou non dans le mât de chaque éolienne, au point de raccordement avec le réseau public. Ce réseau comporte également une liaison de télécommunication qui relie chaque éolienne au terminal de

télesurveillance. Ces câbles constituent le réseau interne de la centrale éolienne, ils sont tous enfouis à une profondeur minimale de 80 cm. [52].

III-5. Télésurveillance et maintenance d'un parc éolien

III-5-1. Télésurveillance

Le fonctionnement du parc éolien est entièrement automatisé et contrôlé à distance. Tous les paramètres de marche de l'aérogénérateur (conditions météorologiques, vitesse de rotation des pales, production électrique, niveau de pression du réseau hydraulique, etc.) sont transmis par fibre optique puis par liaison sécurisée au centre de commande de du parc éolien.



Figure III.8 : Maintenance de l'éolien

III-5-2. Maintenance

Il existe deux types d'intervention sur les aérogénérateurs : les interventions préventives et les interventions correctives. Généralement, un programme de maintenance s'établit à trois niveaux préventifs :

- niveau 1 : vérification mensuelle des équipements mécaniques et hydrauliques ;
- niveau 2 : vérification annuelle des matériaux (soudures, corrosions), de l'électronique et des éléments de raccordement électrique ;
- niveau 3 : vérification quinquennale de forte ampleur pouvant inclure le remplacement de pièces.

Les constructeurs fournissent systématiquement à l'exploitant le manuel d'entretien des aérogénérateurs, qui répertorie notamment la nature et la fréquence des opérations d'entretien. Le constructeur transmettra aussi à l'exploitant l'ensemble des protocoles de maintenance ainsi que les fiches d'intervention de maintenance lui permettant de construire le registre de maintenance.

La maintenance des éoliennes est gage de sécurité et de bon fonctionnement. Généralement, c'est le constructeur qui a la charge de la maintenance car il est le plus à même de paramétrer les éoliennes pour que l'usure soit minimale et la production maximale. La maintenance est assurée par du personnel compétent, bénéficiant de formations régulières et d'accréditations adéquates (travail en hauteur, certification moyenne tension, etc.), conformément à l'article 17 de l'arrêté du 26 août 2011.

Les câbles électriques et les postes de livraison seront maintenus en bon état et inspectés régulièrement.

La filiale française de la société wpd windmanager sera l'interlocuteur unique des différents prestataires intervenant sur le parc à partir de sa mise en service et assurera la coordination des opérations de maintenance pour la bonne exploitation du parc éolien. [55].



Figure III.9. Maintenance de l'éolien.

III-6. Sécurité du site

III-6-1. Consignes de sécurité

L'accès aux aérogénérateurs et aux postes de livraison sera fermé à toute personne étrangère au personnel de l'installation. La porte des aérogénérateurs est équipée d'un système de verrouillage à clé. Les prescriptions à observer à proximité des éoliennes en matière de risques (consignes de sécurité, interdiction d'accès, risques d'électrocution et risque de chute de glace en cas de températures négatives) seront affichées sur le chemin d'accès de chaque aérogénérateur.

Les abords des aérogénérateurs seront maintenus propres. Notamment, aucun produit inflammable ou dangereux ne sera entreposé sur le site.



Figure III.10: Sécurité de l'éolien.

III-6-2. Sécurité incendie

Les abords du site seront entretenus par l'exploitant (débroussaillage) afin de limiter le risque de propagation d'un incendie et de favoriser l'accès au site par les secours. Des

extincteurs en état de bon fonctionnement seront disponibles dans les aérogénérateurs et dans le poste de livraison.

Pour permettre l'accessibilité des secours durant le chantier mais également lors de l'exploitation du parc, des pistes d'accès carrossables relient la voirie publique aux éoliennes et au poste de livraison.

Une procédure d'alerte des services d'urgence en moins de 15 minutes a été mise en place par WPD windmanager, société assurant le suivi de l'exploitation' du parc après sa mise en service (en annexe de l'étude de dangers). [50].

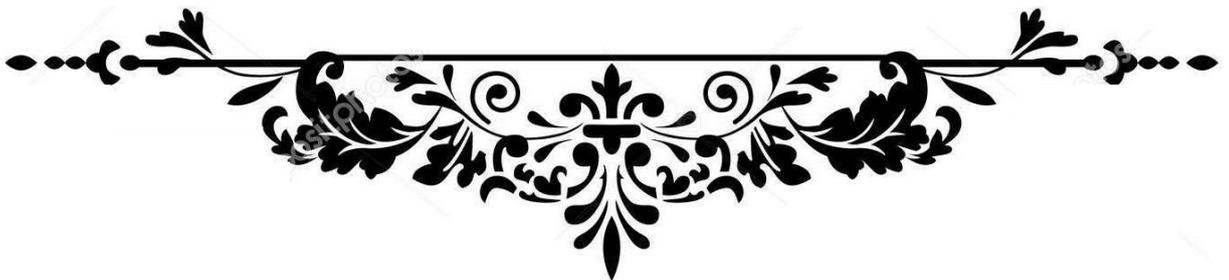
III-7.Conclusion

Dans ce chapitre nous traitons les différentes techniques d'identification d'un site venteux favorable à l'installation d'un éventuel projet de parc éolien qui pourrait être connecté au réseau. La prospection des zones venteuses favorable à ce type de projet, repose initialement sur toutes les recherches et mesures météorologiques enregistrées pendant plusieurs années sur l'étendue du territoire nationale.

En étudiant et analysant les données de la région d'Oran, telles que les influences locales qui affectent le comportement des vents, la possibilité de se connecter au réseau électrique nationale, les différentes restrictions réglementations, l'environnement, les conditions et les paysages, on peut connaitre l'étendue de la réussite du projet.



Chapitre IV



CHAPITRE IV

Modélisation simulation et dimensionnement

IV-1. Introduction

L'analyse de la vitesse du vent sur un site représente la première étape de tout projet éolien, qui permet d'estimer le potentiel venteux d'une région. Le vent présente un caractère aléatoire, son analyse doit se baser sur des méthodes statistiques. Ainsi, les paramètres qui vont caractériser le régime des vents sur un site seront la valeur de la vitesse moyenne et les lois statistiques régissant les variations temporelles.

Parmi ces lois, il est impératif d'utiliser la loi de Weibull qui permet de caractériser la distribution des fréquences de vitesses de vent. Deux paramètres caractérisent cette loi et qui sont à l'origine de nombreuses études menés dans d'autres pays [56]. En effet, ces deux paramètres sont le facteur de forme "k" et le facteur d'échelle "c" qui dictent la manière dont la vitesse du vent varie statistiquement durant une période donnée et distinguent les caractéristiques de chaque site. D'autre lois sont utilisés qui calcul la densité de puissance moyenne et la densité énergétique moyenne du vent. La vitesse du vent à l'entrée de la voilure d'éolienne n'étant pas la même que celle enregistrée au niveau du mât de mesure, c'est pour cette raison l'extrapolation verticale intervient pour estimé le potentiel éolien à l'hauteur des éolienne destinés au projet éolien.

Ce chapitre présente aussi les différents modèles utilisés pour l'estimation de la production énergétique d'une éolienne et l'évaluation du potentiel énergétique totale de toute une ferme éolienne pendant une année type. Ces modèles mathématiques probabilistiques seront réunis dans un programme de calcul avec l'environnement Matlab. Ce résultat facilite le repérage de l'emplacement précis d'un ensemble de turbines éoliennes.

IV-2. Données météorologiques

Les conditions climatiques sont d'une importance capitale dans la gestion des risques de catastrophes et la détermination de la variation saisonnière ou inter annuelle du vent qui nécessite la disponibilité d'une masse importante des données météorologiques. La donnée de base n'est plus la vitesse maximale annuelle, mais la vitesse moyenne (sur 10 minutes) mesurée dans chaque station météorologique avec une période de 3 heures. Le potentiel éolien dans une région donnée se calcul à partir des distributions de la vitesse moyenne. 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 du vent.

La modélisation de la distribution de la vitesse du vent se fait à partir de plusieurs modèles [8], présents dans la littérature qui sont utilisés pour ajuster les distributions de la vitesse

du vent sur une période de temps. Le modèle le plus utilisé pour caractériser la distribution des vitesses du vent est la distribution de probabilité de Weibull [57]. Les avantages de l'utilisation de la fonction de Weibull à deux paramètres k et c .

IV-2-1. Fonction de distribution des vitesses de weibull

La distribution de Weibull est utilisée pour représenter la variation annuelle de la distribution de probabilité de la vitesse du vent d'un site [58]. Cette variation est caractérisée par deux fonctions. D'abord, la fonction de densité de probabilité qui indique la fraction de temps (ou probabilité) pendant laquelle le vent est à une vitesse donnée. Ensuite, la fonction de distribution cumulative de la distribution de Weibull qui attribue la fraction de temps (ou probabilité) à laquelle la vitesse du vent est égale ou inférieure à 'V', indique la variabilité aléatoire de la vitesse du vent exprimée en (m/s).

Comme c'est difficile de manipuler l'ensemble des données relatives à une distribution de la fréquence du vent, il est plus convenable pour des considérations théoriques, de modéliser l'histogramme des fréquences des vitesses du vent par une fonction mathématique continue que par une table de valeurs discrète.

On peut donc opter pour le modèle de Weibull. En effet, pour des périodes allant de quelques semaines jusqu'à une année, la fonction de Weibull représente raisonnablement les vitesses observées. Il s'agit d'une fonction de densité de probabilité, s'exprimant sous la forme :

$$P(V) = \left(\frac{K}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right) \quad (\text{IV.1})$$

Avec: $P(V)$: est la densité de probabilité de la vitesse V . K est le facteur de forme de la courbe (sans dimension), Il représente la nature (variabilité ou stabilité) du vent et caractérise la forme de la distribution de fréquence. Sa valeur varie entre (1,51 à 2,99)[59], une faible valeur de k correspond à un vent très variable ou à des rafales, cependant une grande valeur de k correspond à un vent modéré et indique un vent stable et régulier. C est le facteur d'échelle qui détermine la qualité du vent. Il est étroitement lié à la vitesse moyenne du vent et exprimé en (m/s). Ces deux paramètres peuvent être calculés suivant la méthode de l'écart-type de la vitesse moyenne du vent comme suit [59] :

$$\begin{cases} C = \frac{1.125 V_{moy}}{1-B} \\ K = 1 + 0.483(V_{moy} - 2)^{0.25} \\ B = 1 - 0.81(V_{moy} - 1)^{0.089} \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

Cette fonction densité de probabilité s'appelle la distribution de Rayleigh, lorsque $K = 2$.

La vitesse moyenne du vent peut être trouvée en intégrant la fonction densité de probabilité, soit donc la formule (IV.1):

$$V_{moy} = \int V \cdot P(V) dv \quad (IV.3)$$

En remplaçant par sa formule on obtient :

$$V_{moy} = \int V \cdot \left(\frac{K}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right) dv \quad (IV.4)$$

Ainsi, la distribution de Weibull peut faciliter beaucoup de calculs rendus nécessaires par l'analyse des données du vent.

IV-2-2. Techniques de dimensionnement

a. Puissance éolienne :

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (IV.5)$$

$$V_{moy} = \sum_{i=1}^n V_i f_i \quad (IV.6)$$

Où P est La puissance du vent s'écoulant avec une vitesse V , capturé perpendiculairement par une surface transversale d'une pale d'une éolienne type à un instant donné, ρ est la densité d'air (considéré égal à 1.225 kg/m^3 pour une température de 15°C et une pression standard de 1013 mb). S est la surface de la pale perpendiculaire au vent. n : le nombre des données disponible de V et $f_i = 1/n$.

b. Énergie fournie par un aérogénérateur :

Pour produire une grande quantité d'énergie il va de soit d'installer une multitude de turbine éolienne constituant une ferme éolienne. Ainsi, l'énergie extraite d'une éolienne peut être calculée en fonction du temps en heure dans une période T par la formule suivante :

$$E = T_h \sum P_i(V) f_i(V) \quad (IV.7)$$

Avec: est E l'énergie produite en kWh, T_h la période de temps en heure et $P_i(V)$ est la puissance en kW donnée par aérogénérateur à la vitesse V_i .

Lorsque plusieurs turbines sont installées en bloc, la turbulence due à la rotation des lames d'une turbine peut affecter les turbines à proximité. Afin de minimiser l'effet de cette turbulence induite par le rotor, un espacement de l'ordre 3 à 4 DT (DT est le diamètre du rotor) est fourni à l'intérieur des rangées choisies du site.

Quelques autres pertes qui peuvent influencer sur l'aérogénérateur :

Les pertes d'immobilisation qui représentent l'énergie perdue lorsque la turbine est hors ligne en raison d'une maintenance programmée ou de réparation.

- Les pertes aérodynamiques qui résultent de l'interférence entre les éoliennes dans un parc éolien (effet de sillage).
- Les pertes électriques telles que les transformateurs et les pertes dues au câblage.

c. Facteur de capacité :

$$Q(\%) = \frac{100 \times P_{moy}}{P_{max}} \quad (IV.8)$$

d. Nombre total des éoliennes à placer dans le site:

Conditions à respecter :

$$\begin{cases} (N1 + 1) \times 10H < I \\ (N2 + 1) \times 3D < L \\ N = N2 \times N1 \end{cases} \quad (IV.9)$$

- I = Dimension du terrain perpendiculaire à la direction prédominante du vent,
- L = Dimension du terrain parallèlement à la direction prédominante du vent,
- D = Diamètre du rotor de la machine,
- H = Hauteur du pylône H,
- N1 = Nombre d'aérogénérateurs par rangée,
- N2 = Nombre de rangée d'aérogénérateurs,
- N = Nombre total d'aérogénérateurs à placer sur le site.

IV-3. Choix de la turbine éolienne

Le choix type des aérogénérateurs éoliens destinés à l'installation de la centrale éolienne sont dépendantes des caractéristiques de site étudié. Chaque éolienne est caractérisée généralement par; sa puissance nominale, son rendement, sa hauteur du moyeu, son diamètre du rotor, la surface de balayage, sa connexion au réseau de distribution d'électricité. Dans le cas de l'étude présente, l'optimisation de l'éolienne type se consacre à ces paramètres. L'investissement économique n'est pas pris en compte lors de cette optimisation.

D'autres sites requièrent une optimisation plus complexe qui concerne; la complexité des composants utilisés, l'accessibilité au site, les propriétés géographiques et météorologiques du site.

Dans le cas d'étude présent, plusieurs éoliennes ont été analysées. L'accent a été mit sur l'élément le plus important qui est la courbe de puissance de chaque aérogénérateur pour adapter l'éolienne qui correspond le mieux aux caractéristiques générales de la région étudiée. En effet, la région dispose majoritairement d'une fréquence de vitesses de vent allant de 2.5 jusqu'à 10 m/s.

Par conséquent, Le choix résolu est un générateur allemand tripale qui s'appelle: ENERRCON E53/800 (Figure IV.1) [60]. Sa puissance nominale est estimée de 800 kW. Le diamètre de rotor fait 52.9 m, qui balaye une surface équivalente de 2 198 m². La Hauteur maximale de la nacelle est estimée de 75 m où la densité de puissance peut atteindre 2.75 kW/m². Le concept de cette éolienne est qu'elle ne dispose pas d'une boîte de vitesse, son régime de rotation est variable et l'orientation des pales est individuelle. Le générateur est de type: SYNC Wounded où sa vitesse maximale de rotation vaut 28,3 tours/minute et une tension de sortie entre 400 - 690 V. Il est disponible à la vente et mit en service depuis l'année 2006.



Figure IV.1 : Eolienne Enercon E53/800 [60].

La courbe de puissance de l'éolienne E53/800, ainsi que son coefficient de puissance sont fournis par le constructeur dans la fiche des données officielles de cette éolienne (Figure IV.2).

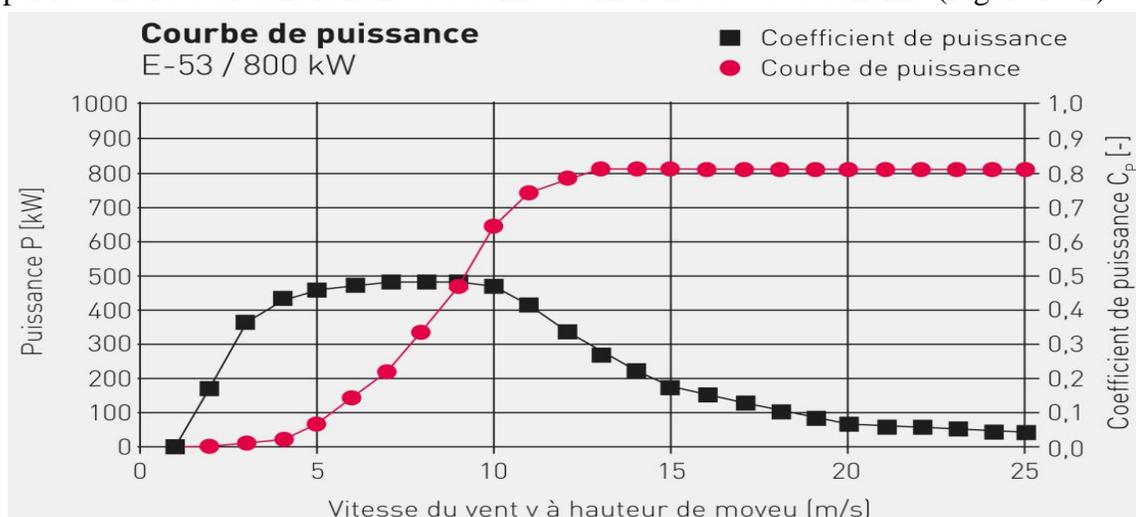


Figure IV.2 : Courbe et coefficient de puissance de l'éolienne Enercon E53/800 [60].

A partir de la courbe de puissance en rouge, il est perceptible que la puissance produite par cet aérogénérateur commence à produire à une faible vitesse du vent estimé à 2 m/s et atteint sa puissance nominale qui vaut 820 kW à une vitesse de vent estimé de 13 m/s. La puissance nominale produite reste constante au dessus de la vitesse de vent supérieur à 13 m/s jusqu'a 25 m/s où l'éolienne se met en drapeau par mesure de sécurité.

Le coefficient de puissance est affiché en noir, il atteint une valeur maximale estimé de 0.49 à une vitesse de vent très précoce et équivaut à 5m/s. Cette valeur représente un quotient très excellent en comparant avec la limite de betz. Cette performance démontre la grande efficacité de cette éolienne.

L'impact acoustique en fonction des vitesses de vent de cette éolienne est présenté dans la figure ci-dessous (Figure IV.3). Il est remarquable que le niveau de puissance acoustique de cette éolienne ne dépasse pas les 102 dB(A) et reste constant à une vitesse élevée de l'ordre de 10 m/s. Les valeurs évoquées dans cette courbe ont servis au calcul de l'impact sonore émis par chaque éolienne de la ferme.

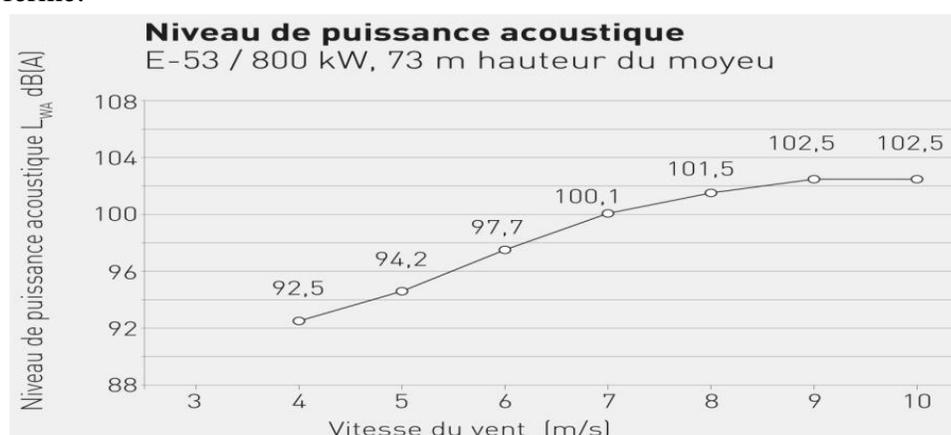


Figure IV.3 : Niveau de puissance acoustique de l'éolienne Enercon E53/800 [60].

IV-4. Modélisation et dimensionnement du projet éolien

Il est nécessaire d'avoir une description plus proche et plus complète du fonctionnement réel de l'éolienne afin d'avoir une modélisation plus fine du fonctionnement du système éolien et de son interaction avec le vent. La modélisation dépend de l'existence de cartes topographiques numérisées et de données antérieures ou récentes sur la vitesse du vent et la topographie du sol terrestre spécifique à la région étudiée.

Dans ce travail nous somme limité uniquement à l'étude et l'analyse de la turbulence du vent dans différentes région de la Willaya d'Oran où un banque des données météorologique des vitesses du vent mensuelle est mette à notre disposition par le Bureau national de météorologie d'Oran des trois sites : Es-Sénia, Arzew et Port d'Oran durant la période des années 1995-2005. L'étude de site comporte plusieurs emplacement optimaux qui peuvent accueillir plusieurs

éolienne disposés d'une façon à maximisé la production annuelle énergétique et minimiser les pertes d'énergie. Permet d'envisager très sérieusement la modélisation du système éolien.

IV-4-1. Résultats de simulation des données de vent

Les histogrammes (idem la ligne continue avec étoile) ci-dessous (Figures IV.4, IV.7 et IV.10) représentent des vitesses maximales de vent (idem des vitesses moyennes de vent) des régions étudiées (Arzew, Port d'Oran et Es-Sénia respectivement) durant les années d'observations utilisées (1995-2005). Le repère des x décrit les 12 mois de l'année. Le repère des y décrit la vitesse en m/s de chaque valeur mesurée de vent. De ces figures, on remarque que la vitesse moyenne du vent pendant la période entre mai et Octobre est stable quelques légers changement, cela provoque la continuité de production d'énergie de manière continue, ininterrompue avec des quantités assai stable. Alors que la vitesse du vent reste instable, c'est clair durant la période entre Novembre et Avril, et cela peut s'expliquer par des attentes à la sécurité des aérogénérateurs, mais aussi la production d'énergie est garantie.

Pour optimisé ce travail, nous avons résumé notre étude en calculant la vitesse moyenne du vent pour chaque moi à travers les données des années disponible pour chaque moi séparément (voir les figures IV.5, IV.8 et IV.11). Les figures IV.6, IV.9 et IV.12 présente le bilan prédictive de puissance maximale et minimale qui peut produite par un éolien basé sur le choix adéquat de l'aérogénérateur (voir IV.3).

L'analyse des courbes des figures (IV.4 au IV.11) provoquent que la puissance de sortie d'une éolienne dépend du profil de vent d'un site et des caractéristiques des éoliennes, telles que l'efficacité, la taille et la courbe de puissance (figures IV.6, IV.9 et IV.12). La puissance de sortie augmente quand la vitesse du vent augmente jusqu'à la vitesse nominale à laquelle la puissance de sortie maximale de l'éolienne est atteinte.

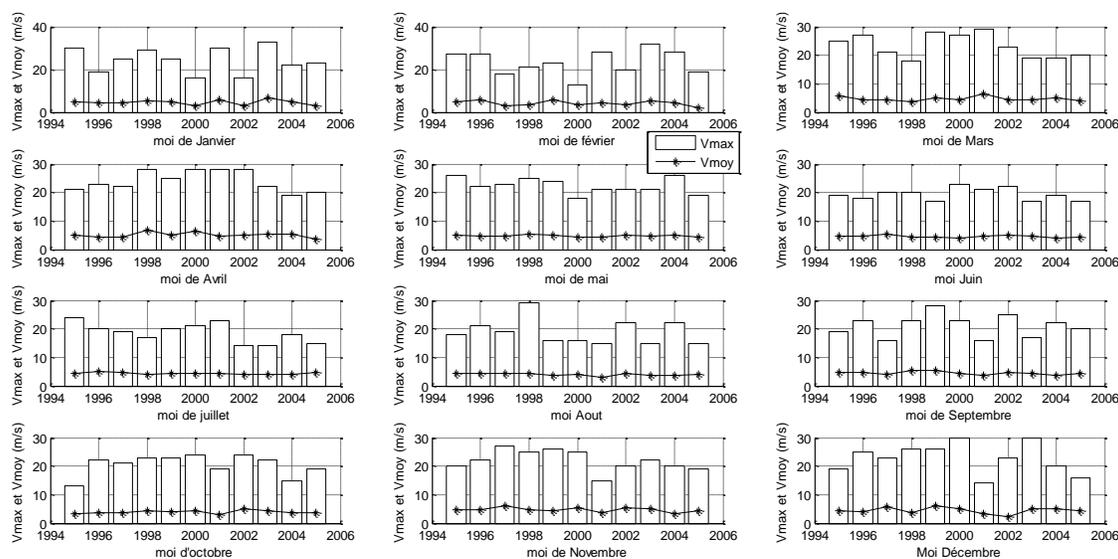


Figure IV.4 : Les données de vent mensuelle de vitesse maximal et vitesse moyenne durant les années 1995 jusqu'à 2005, Zone d'Oran- Arzew.

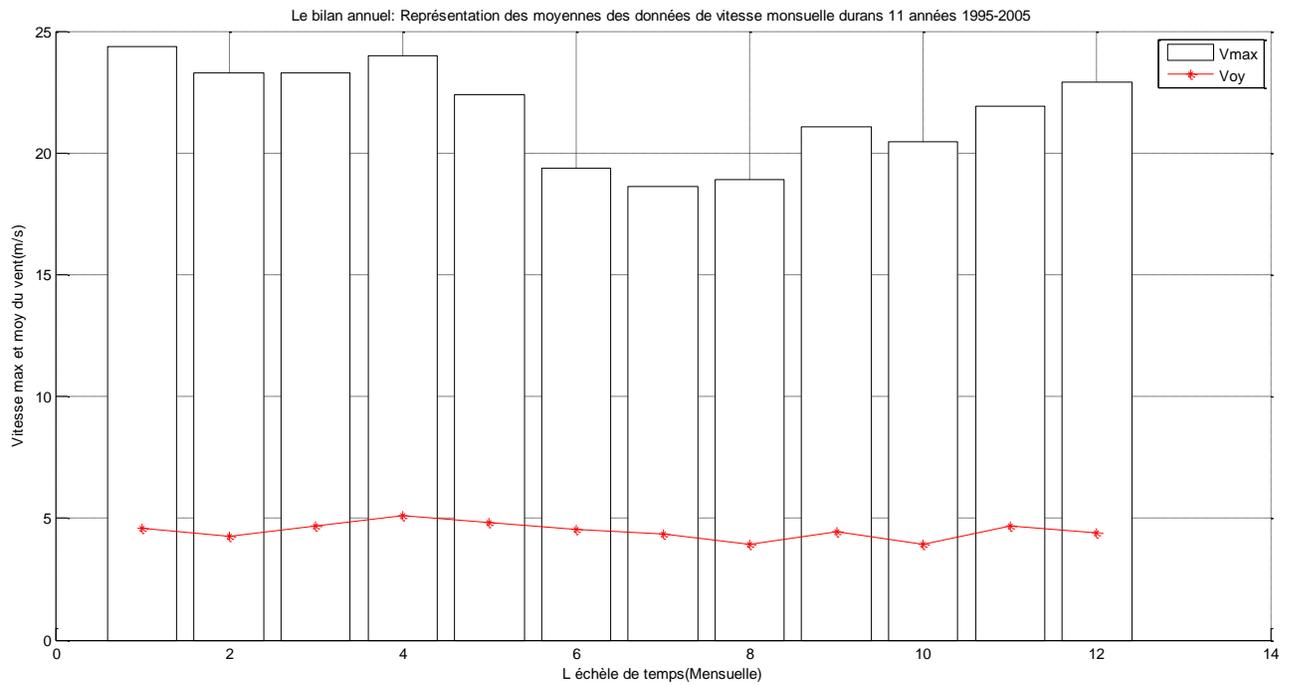


Figure VI.5 : Le bilan annuel : Représentation des moyennes des données de vitesse mensuelle des 11 années 1995-2005 Zone d’Oran- Arzew.

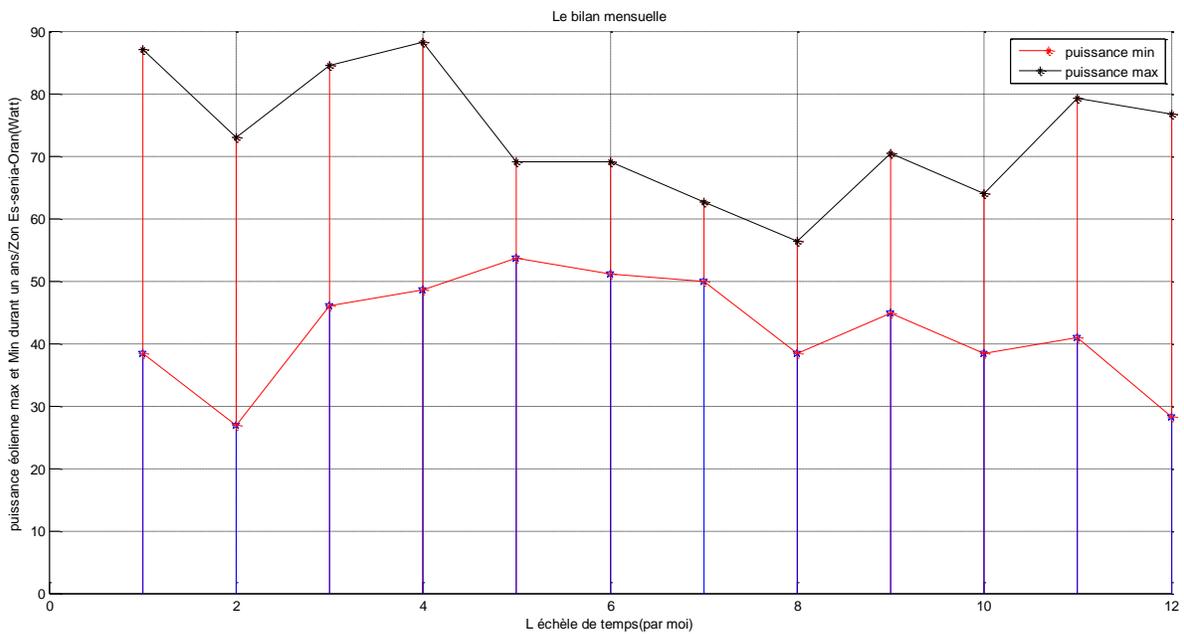


Figure IV.6 : Prédiction de puissance max et min annuelle produite par un éolien basé sur le choix adéquat de l’aérogénérateur/ Zone d’Oran- Arzew (Watt).

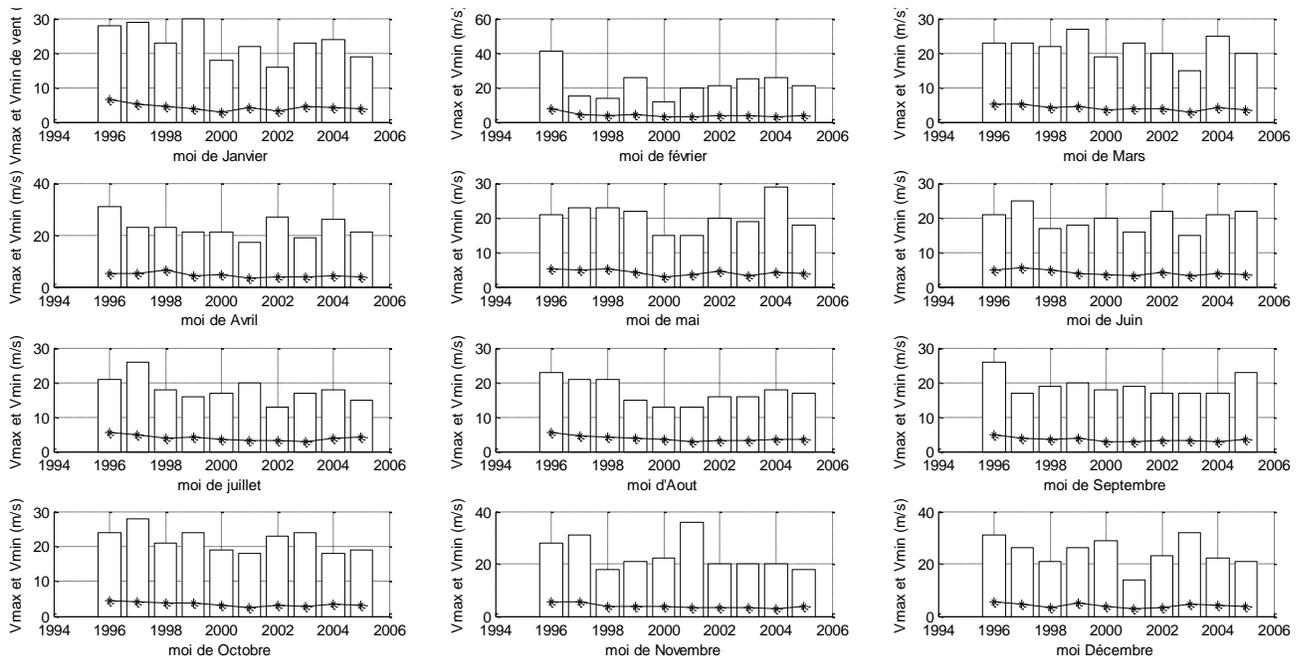


Figure IV.7 : Les données de vent mensuelle de vitesse maximal et vitesse moyenne durant les années 1995 jusqu'à 2005, Zone d'Oran-Port.

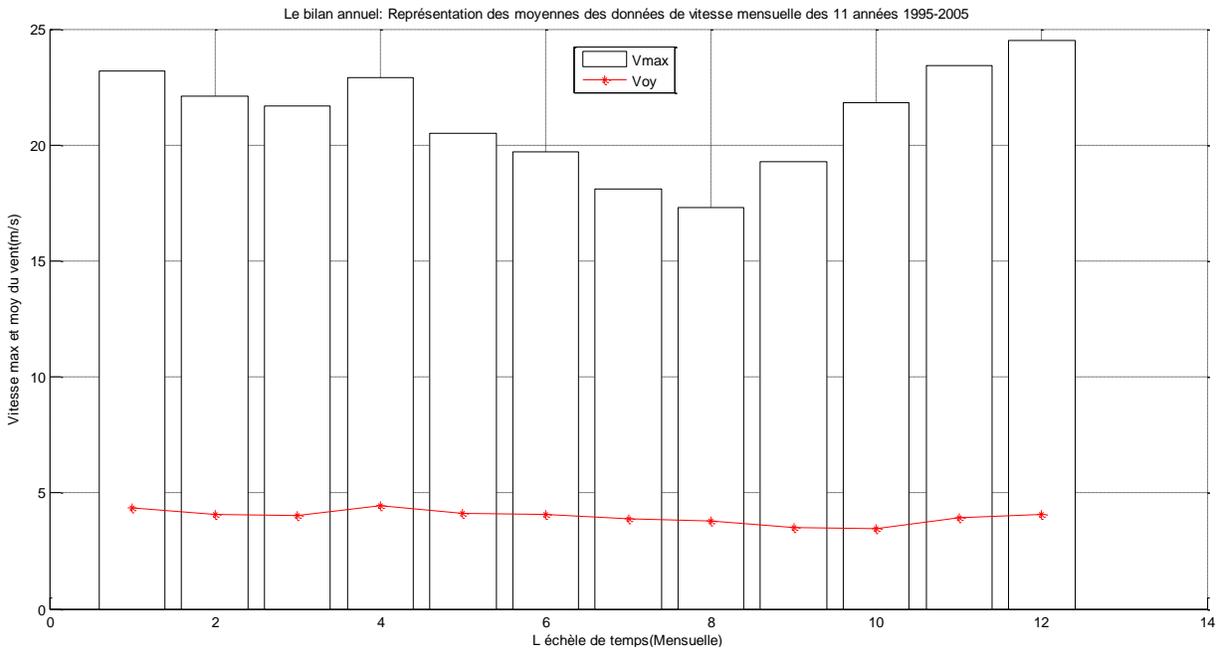


Figure IV.8 : Le bilan annuel: Représentation des moyennes des données de vitesse mensuelle des 11 années 1995-2005, Zone d'Oran-Port.

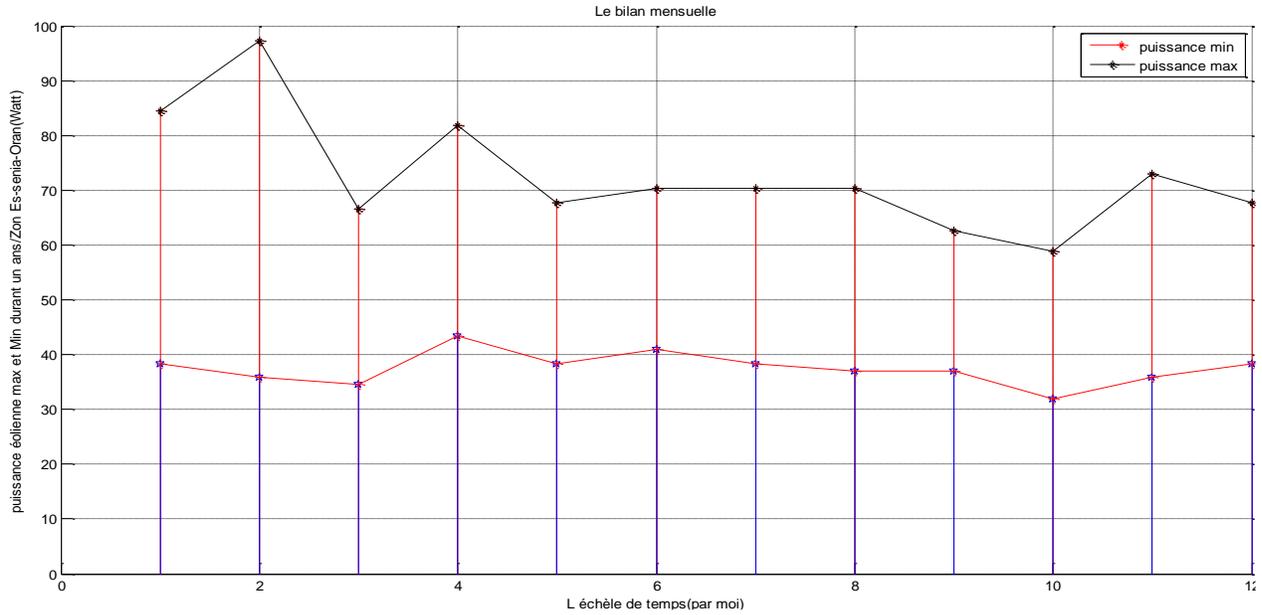


Figure IV.9 : Prédiction de puissance max et min annuelle produite par un éolien basé sur le choix adéquat de l'aérogénérateur/ Zone d'Oran-Port (Watt).

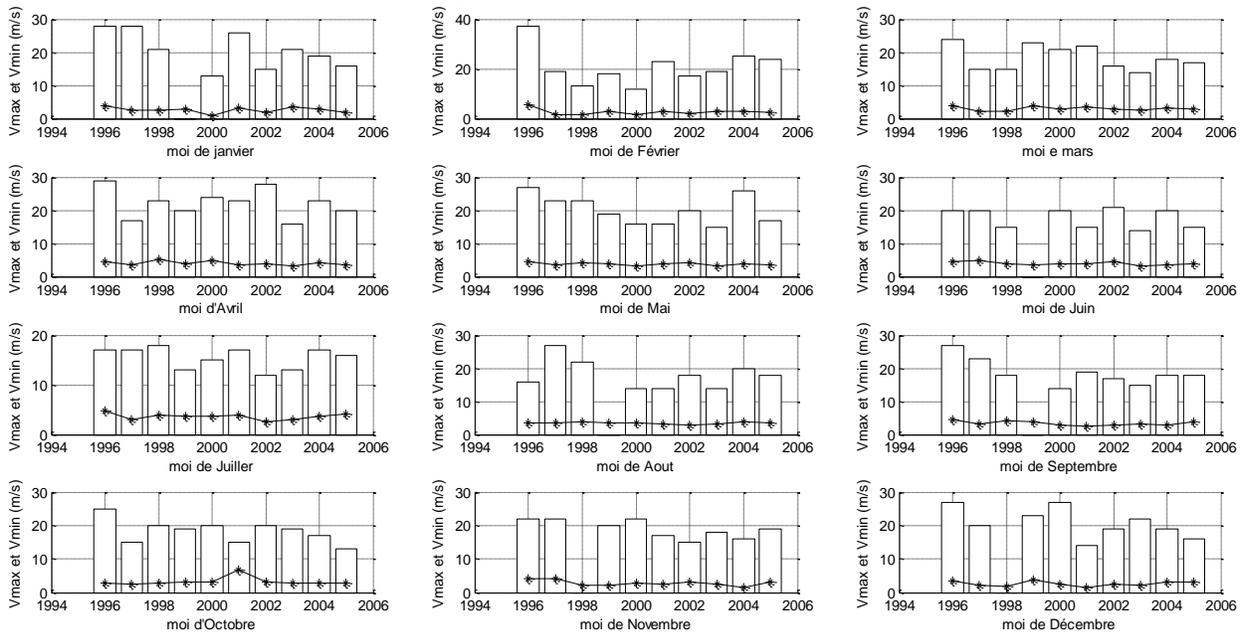


Figure IV.10 : Les données de vent mensuelle de vitesse maximal et vitesse moyenne durant les années 1995 jusqu'à 2005, Zone ORAN-Es-Senia.

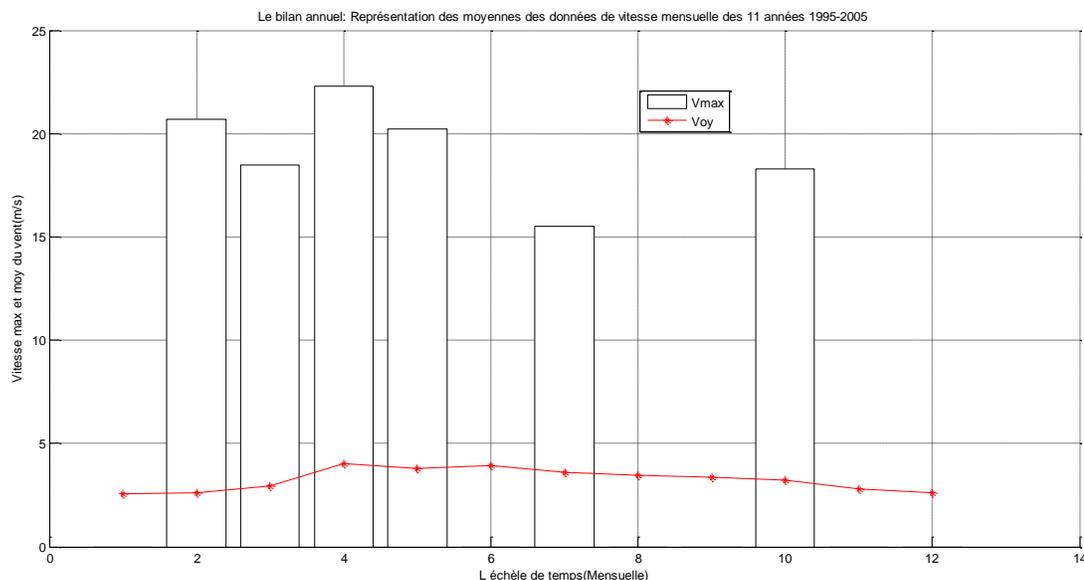


Figure IV.11 : Le bilan annuel : Représentation des moyennes des données de vitesse mensuelle des 11 années 1995-2005 Zone ORAN-Es-Senia.

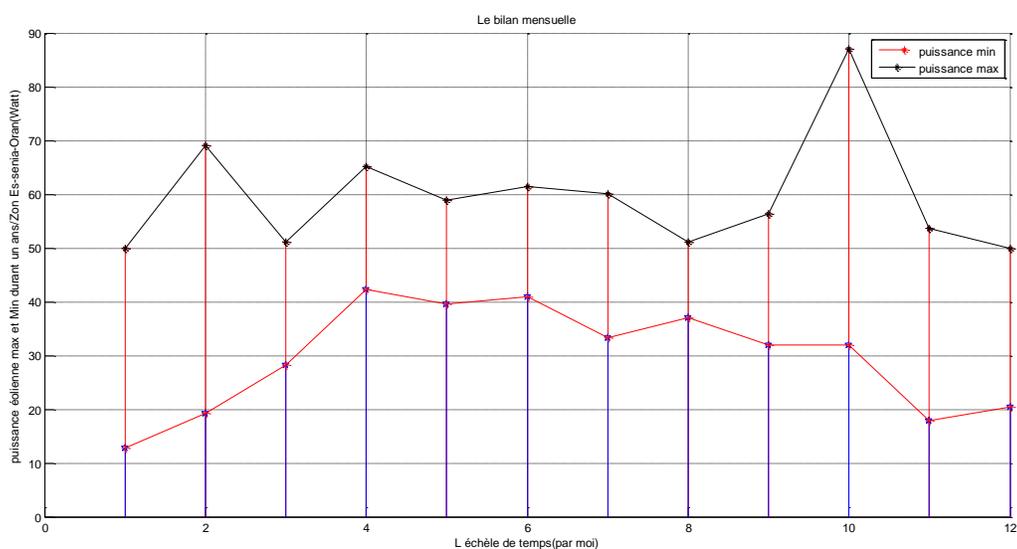


Figure IV.12 : Prédiction de puissance max et min annuelle produite par un éolien basé sur le choix adéquat de l'aérogénérateur/ Zon Es-senia-Oran(Watt).

IV-2. Analyse et synthèse des prédictions de puissance et d'énergie produit

Le Tableau ci-dessous (Tableau IV.1) regroupe en fonction des 3 régions d'Oran les résultats d'analyse des données des vents; les fréquences des vitesses du vent, les paramètres k et c de Weibull, la vitesse moyenne annuelle de vent, la puissance de densité annuelle de vent et la prédiction d'énergie en MW qui fournir par un aérogénérateur, ainsi que la synthèse de dimensionnement du nombre d'éoliens qui peut supporté dans la ferme éolienne, le but est de garantir les besoins énergétique de la wilaya d'Oran estimé par 143,83 GW/ ans selon le bilan du juin 2019 déclaré par la société SONALGAZ.

A partir du tableau, il est remarquable que la densité de puissance annuelle moyenne de vaut est 2 MW/m² maximal supporté. Cette valeur désigne que chaque mètre carré en extrapolation horizontale est verticale peut occasionner cette moyenne capacité. Mais vue le fais d'installé plusieurs éoliennes, la surface balayer sera très imposante induisant l'intensification de la puissance récupéré.

Plusieurs autres informations sont déduites à l'égard de cette représentation de Weibull tel que la vitesse moyenne annuelle de vent, la densité de puissance moyenne de vent, les paramètres k et c de Weibull. La vitesse moyenne annuelle de vent et le paramètre c de qualité de vent sont de l'ordre de 45.25 m/s et 43.8 m/s respectivement pour la Zone d'Oran-Arzew et de l'ordre de 49.13 m/s et 40.46 m/s respectivement pour la Zone d'Oran-Port. Ces valeurs indiquent la région dispose d'une qualité très moyenne des vitesses de vent. Le valeur du paramètre k est estimé de 4 pour les deux zone, indiquant que la région ardent des vents quotidiennement; ce qui présente un fort avantage à l'exploitation éolienne à moyenne échelle. Ces résultats expriment que les sites disposent d'une assez bonne ressource éolienne particulièrement en tenant compte de l'avantage de pénurie des fréquences inférieur à 3m/s.

La synthèse de cette étude à montré que pour satisfait le besoin énergétique de la Wilaya d'Oran provoque trois proposition possible d'implantation de ferme éolienne :

1. Une ferme installée au niveau d'Arzew support environ 150000 éolienne de marque Enercon E53/800 avec un facteur de capacité : $Q = 0.75\%$.
2. Une ferme installée au niveau d'Oran-Port support environ 100000 éolienne de marque Enercon E53/800 avec un facteur de capacité : $Q = 0.67\%$.
3. deux fermes installées dans les deux zone.

Tableau IV.1 : Résultats statistiques des données de vent et synthèse de prédiction de puissance et d'énergies.

La region	Le moi	résultats d'analyse des données de vent					Puissance disponible [W/m ²]*10 ⁷	Synthèses
		Moyenne des vitesses max durant les années (m/s)	Moyenne des vitesses moy. durant les années (m/s)	la densité de probabilité de la vitesse	le facteur de forme <i>k</i>	le facteur d'échelle <i>c</i> (m/s)		
Zone d'Oran-Arzew	01	24.3636	45.8182	0.0113	4.3204	45.3655	1.8500	Énergie fournie par un aérogénérateur = E = 1.00 M W ----- Facteur de capacité : Q = 0.75% ----- Nombre aérogénérateurs = 1.5062e+004
	02	23.2727	42.4545	0.0135	4.1879	42.3280	1.6125	
	03	23.2727	46.7273	0.0090	4.3554	46.1830	1.6125	
	04	24.0000	51.0909	0.0065	4.5185	50.0879	1.7684	
	05	22.3636	48.3636	0.0067	4.4174	47.6510	1.4308	
	06	19.3636	45.4545	0.0057	4.3063	45.0381	0.9288	
	07	18.6364	43.4545	0.0063	4.2278	43.2332	0.8280	
	08	18.9091	39.5455	0.0100	4.0688	39.6837	0.8649	
	09	21.0909	44.4545	0.0083	4.2673	44.1366	1.2002	
	10	20.4545	39.2727	0.0129	4.0574	39.4350	1.0948	
	11	21.9091	46.8182	0.0074	4.3588	46.2647	1.3453	
	12	22.9091	44.1818	0.0110	4.2566	43.8904	1.5381	
Zone d'Oran-Port	01	23.2000	43.5000	0.0122	4.2296	43.2743	1.5974	Énergie fournie par un aérogénérateur = E = 1.50 M W ----- Facteur de capacité : Q = 0.67% ----- Nombre aérogénérateurs = 9.7637e+003
	02	22.1000	40.6000	0.0140	4.1125	40.6442	1.3808	
	03	21.7000	40.4000	0.0136	4.1042	40.4622	1.3072	
	04	22.9000	44.7000	0.0104	4.2769	44.3580	1.5362	
	05	20.5000	41.3000	0.0105	4.1411	41.2805	1.1021	
	06	19.7000	40.5000	0.0102	4.1084	40.5532	0.9780	
	07	18.1000	39.0000	0.0094	4.0460	39.1860	0.7586	
	08	17.3000	37.8000	0.0095	3.9952	38.0889	0.6624	
	09	19.3000	35.3000	0.0167	3.8866	35.7932	0.9197	
	10	21.8000	34.5000	0.0242	3.8511	35.0556	1.3253	
	11	23.4000	39.3000	0.0185	4.0586	39.4598	1.6391	
	12	24.5000	40.5000	0.0186	4.1084	40.5532	1.8813	
Zone d'Oran-Es senia	01	NaN	25.7000	NaN	3.4270	26.8318	NaN	Non définie Manque des données du vent de la zone donc impossible de prédire l'énergie dans cette région
	02	20.7000	26.3000	0.0434	3.4581	27.3997	1.1346	
	03	18.5000	29.4000	0.0277	3.6134	30.3158	0.8100	
	04	22.3000	40.2000	0.0149	4.0960	40.2802	1.4186	
	05	20.2000	37.8000	0.0145	3.9952	38.0889	1.0544	
	06	NaN	39.1000	NaN	4.0502	39.2773	NaN	
	07	15.5000	36.1000	0.0085	3.9218	36.5294	0.4764	
	08	NaN	34.6000	NaN	3.8555	35.1479	NaN	
	09	NaN	33.8000	NaN	3.8196	34.4090	NaN	
	10	18.3000	32.3000	0.0201	3.7510	33.0192	0.7840	
	11	NaN	27.9000	NaN	3.5394	28.9084	NaN	
	12	NaN	26.0000	NaN	3.4426	27.1159	NaN	

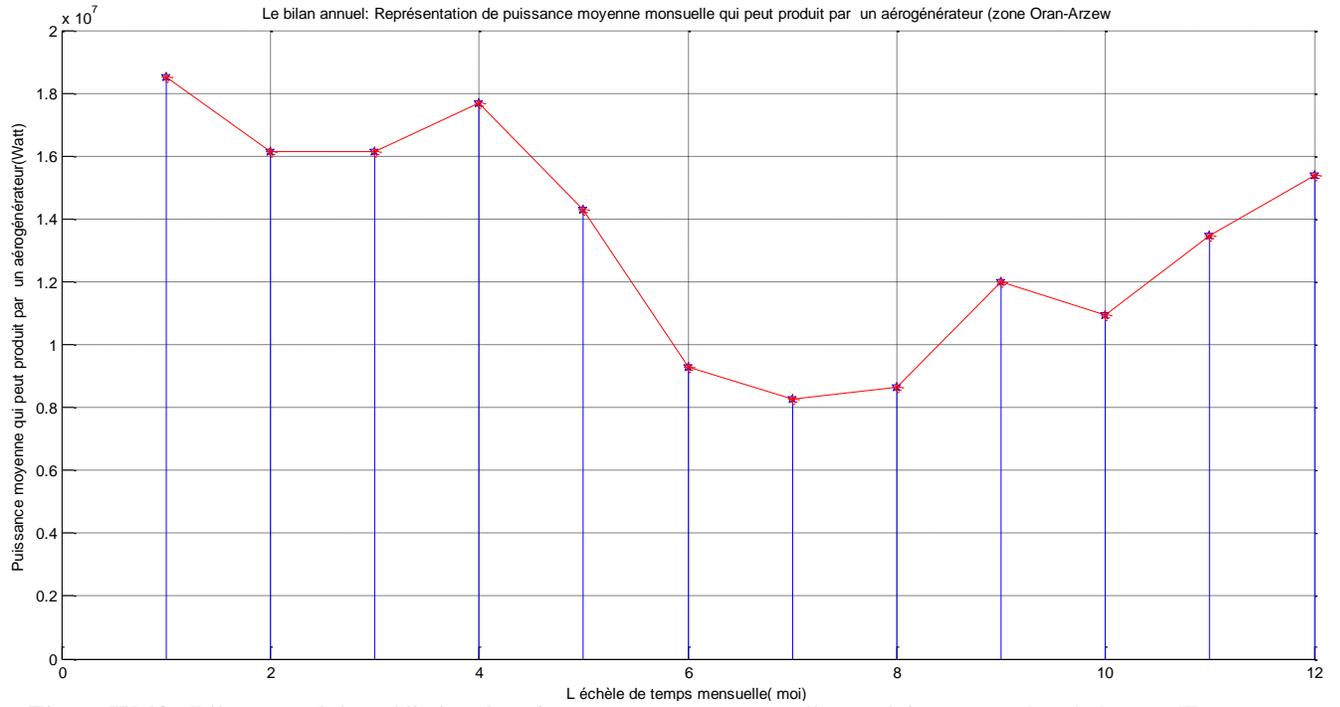


Figure IV.12 : Bilan annuel de prédiction de puissance moyenne mensuelle produit par un aérogénérateur (Zone d’Oran-Arzew).

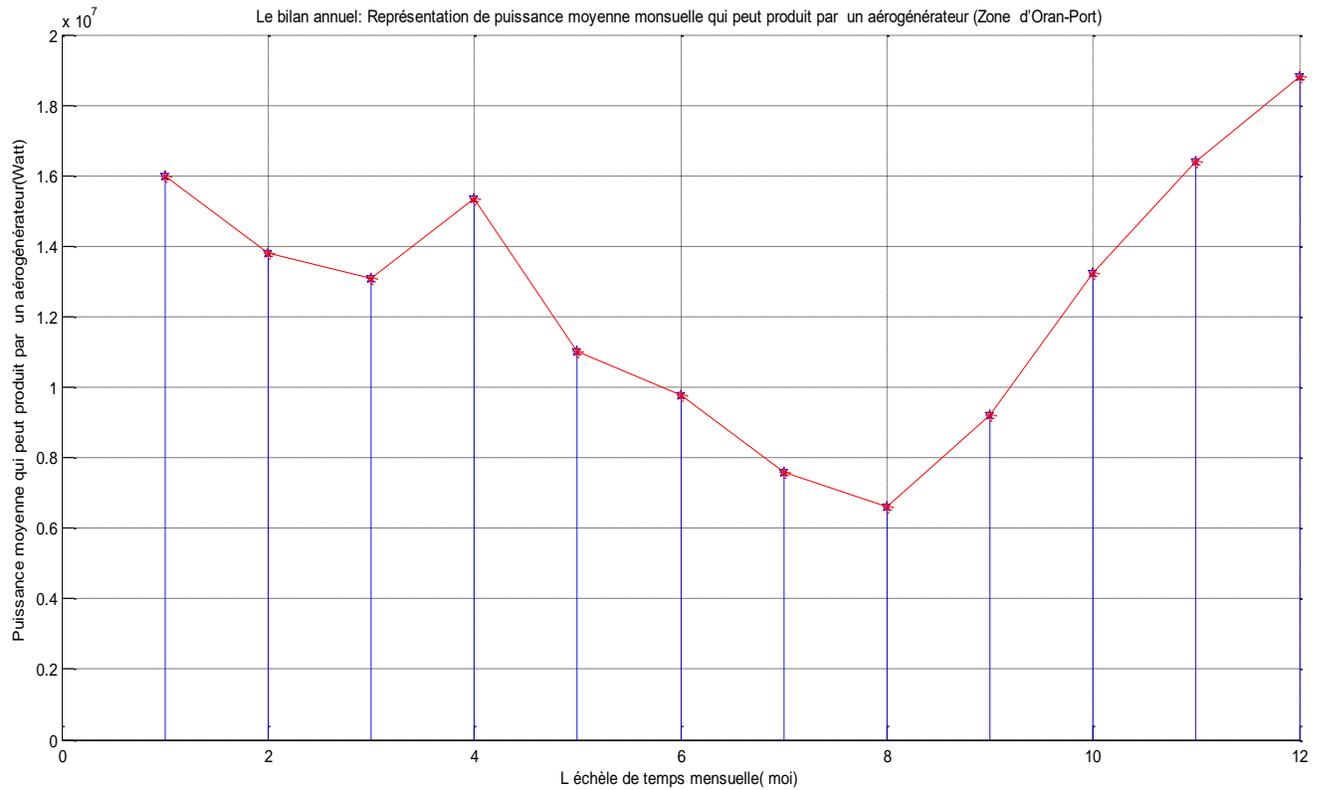


Figure IV.13 : Bilan annuel de prédiction de puissance moyenne mensuelle produit par un aérogénérateur (Zone d’Oran-Port)

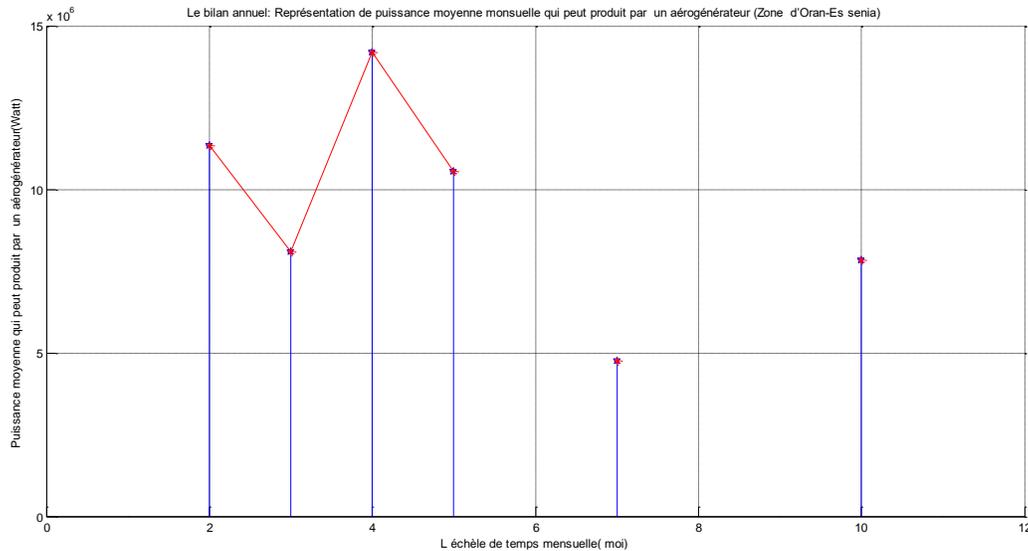


Figure IV.12 : Bilan annuel de prédiction de puissance moyenne mensuelle produit par un aérogénérateur (Zone d'Oran-Es senia).

VI-5. Conclusion

Ce dernier chapitre, se consacre à la présentation des résultats relatifs à l'étude d'éolien dans la wilaya d'Oran caractérisé par deux zone, comprenant aussi l'estimation de la production énergétique annuelle d'une ferme éolienne d'une puissance nominale de 143,83 GW/ ans, La simulation et l'optimisation présenté a été effectué par le biais du Logiciel Matlab.

Les vents sont généralement caractérisés par : les vitesses moyennes (horaires, journalières et mensuelles), les directions prédominantes, les fréquences de chacune des vitesses et des directions.

Une bonne connaissance de ces caractéristiques s'avère importante dans la mesure où elles interviennent dans : le choix des aérogénérateurs et l'évaluation de leurs performances et l'implantation.



*Conclusion
générale*



CONCLUSION GÉNÉRALE

Le vent est une source d'énergie éolienne renouvelable exploitable au biais des aérogénérateurs pour produire de l'électricité. Cette énergie est en plein essor dans le monde entier, où l'Algérie est l'un des pays qui encourage son utilisation, son développement, son industrialisation et investit dans les études qui mènent à détecter les emplacements les plus appropriés pour accueillir des centrales éoliennes fiables sur l'étendue du territoire national.

Les résultats de ce travail de mémoire sont les fruits d'une étude, d'investigations scientifiques, d'analyses des concepts et de modèles pour le choix le plus judicieux d'une assiette propice, capable de recevoir une ferme éolienne, qui répond à toutes les normes de sécurité, de l'environnement et de la production énergétique. Ces travaux sont menés avec une conduite et méthodologie des nouvelles techniques et technologiques d'appoints, à travers la modélisation, les modèles de connaissances, la récolte des données et leurs exploitations pour diverses variantes d'études et de conceptions organiques et architecturales, pour aboutir ainsi, à un choix unique parmi toutes les variantes étudiées.

De ce fait, ce travail s'adresse aux études d'intégration d'une ferme éolienne dans une région non traitée auparavant. Cette région est bien celle de la Wilaya d'Oran. En premier lieu, l'étude s'est consacrée sur une méthodologie complète pour étudier et estimer la ressource éolienne en tenant compte des données métrologiques. Au fait, cette évaluation s'appuie sur la fonction probabiliste de la distribution de Weibull qui entraîne la connaissance détaillée de la vitesse et la densité de puissance éolienne moyenne annuelle de vent de la région.

Ces modèles de dimensionnement ont été introduits dans un programme Matlab qui fait office de simulations, d'optimisations et de conception d'un projet éolien. Cette technique a permis le dimensionnement de la ressource éolienne disponible sur chaque région d'Oran.

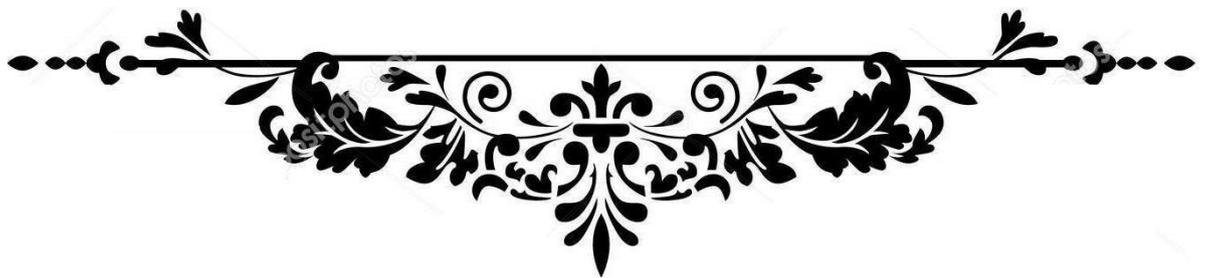
Comme résultats de simulations, la densité de puissance annuelle moyenne est estimée de $2\text{MW}/\text{m}^2$. La vitesse moyenne annuelle de vent et le paramètre "c" de qualité de vent sont de l'ordre de 4.15 m/s et 4.3 m/s respectivement. Ces valeurs indiquent que la région dispose d'une qualité

très moyenne des vitesses de vent. La valeur du paramètre k indiquant que la région arde des vents quotidien ; ce qui présente un avantage important à l'exploitation éolienne.

Comme perspectives, beaucoup de travaux restent à réaliser dans le domaine, notamment dans l'investigation et la prospection sur l'étendue du territoire national et la définition de sites favorables aux installations éoliennes y compris la projection de ce projet.



BIBLIOGRAPHIE



BIBLIOGRAPHIE

- [1] : <https://www.edfenr.com/lexique/energies-renouvelables/>, consulté le 18/11/2020.
- [2] : <https://positivr.fr/definition/energie-hydraulique/>, consulté le 18/11/2020.
- [3] : Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique, BOUZIANE Afaf, Évaluation du rayonnement solaire en Algérie pour des applications photovoltaïques , UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA ,2017/2018.
- [4] : GEOTHERMIE blog avocats Par bertrand.degerando le jeu, 03/06/2010 - 20:38.
- [5] : Le Nouvelliste ; Dieudonné Joachim ; Publié le 2016-12-16.
- [6] : file:///C:/Users/hp/Downloads/Energie%20éolienne(4).pdf ;Cours énergies renouvelables 1^{er} année SM ; consulté le 27/11/2020.
- [7] : <https://www.quelleenergie.fr/magazine/energies-renouvelables/energies-renouvelables-avantages-inconvenients-46047/> , visité le 25/10/2020.
- [8] : file:///C:/Users/hp/Downloads/merged_7.pdf, visité le 28/11/2020-12:23.
- [9] : A . Benretem , D. Khalfa , N. Zerari , « Assessment of the Wind Field in the East Coast Algerian Regions for the Installation of Wind Farms » ,Laboratory of Electromechanical Engineering Badji Mokhtar-Annaba University – Algeria ,16emes Journees Internationales de Thermique ,Marrakech (Maroc), du 13 au 15 Novembre, 2013.
- [10] : H. GLAUERT, «The Elements of Aerofoil and Airscrew Theory». Cambridge University Press, New York (New York, États-Unis), 2e édition.1947.
- [11] : THÈSE(Conception, modélisation, simulation et optimisation d'un projet d'une ferme éolienne Implantation sur site favorable) ; FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE Pour l'obtention du diplôme de : DOCTORAT LMD Par : Mr HADJIDJ Mohammed Salim le 06/2019.
- [12] : Global Wind Energy Council. Wind Energy Outlook . 2010. p.8
- [13] : L'énergie Eolienne En Algérie Potentiel Et Réalisations, Université de Blida2 (Lounici Ali) ; réalisé par : AHMED CHOUMANE et OUISSEM BOUKHARI .
- [14] : UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR ; Mémoire de Master (Etude des paramètres météorologiques intervenant dans la simulation d'un parc éolien - Cas du site d'Adrar) réalisé par : AKRABOU Omar et AICHAOUI Belkheir ; le 22 / 05 / 2017.
- [15] : Université Libanaise, Faculté de Génie 1, Tripoli, Liban(Etude comparative entre éolienne à axe horizontal et éolienne à axe vertical); NASR SARAH et MOUBAYED NAZIH ; 2011.

- [16] : A.Hariz, Mémoire de Etat de l'Art sur les Energies Solaire et Eolienne en Algérie , Année 2010.
- [17] : Hamrouni N. and all, « New Control Strategy for 2-Stage Grid-Connected Photovoltaic System», Science Direct, Renewable Energy Journal, Vol. 33, pp. 2212-2221, 2008.
- [18] : T. Grignoux, R. Gibert, P. Neau, C. Buthion, « Eoliennes en milieu urbain -État de l'art », janvier 2006, pp. 1-129.
- [19] : J. Chen, C. Nayar, L. XU, « Design and FE analysis of an outer-rotor PM generator for directlycoupled wind turbine applications », proceeding of the IEEE industry applications conference, New York, USA, 1998, vol 1, pp. 387-394.
- [20] : S El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).
- [21] : R. Michaux, P. Letellier, « Les machines discoïdes à champs axial dans les systèmes de production électrique », revue de l'électricité et de l'électronique, N° 3, mars 1997, pp. 37-42.
- [22] : Bernard Multon, Gael Robin, Marie Ruellan, Hamid Ben Ahmed, « 3ème situation énergétique mondiale à l'aube du millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables », revue 3Ei No36 mars 2004, pp. 1-14
- [23] : H. Ben Ahmed, « Généralités sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés et convertisseurs associés », séminaire électrotechnique de l'académie de Rennes, 9 mars 2004.
- [24] : « L'éolien, un gisement d'énergie renouvelable exploitable en Ile- de France », agence régionale de l'environnement et de nouvelles énergies, <http://www.arenidf.org>
- [25] : J.W. Smith, J.A. Taylor, D. L. Books, R.C. Dugan, « Interconnection studies for wind generation », conference papers IEEE2004, paper N° 04 C3, pp. C3-1.C3-8.
- [26] : R. Ramakumar, P. Chiradeja, « Distributed generation and renewable energy systems 3 », 2002 37th intersociety energy conversion engineering conference, IECEC 2002 paper N° 20027, pp. 716-724.
- [27] : www.rncan.gc.ca/penser. Programme d'encouragement aux systèmes d'énergie renouvelables.
- [28] : Baptiste Ruille , mai 2011, <https://www.futuren-group.com/experts/comment-realiser-la-mesure-du-vent-sur-un-site>
- [29] F .Chellali , «Etude du comportement stochastique et cyclique du vent en Algérie», Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger. 2011.
- [30] : Multon. B, Gergaud. O, Ben Ahmed. H, Roboam. X, Astier. S : Etat de l'art des aérogénérateurs. L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables, ed. NOVELECTECRIN, pp.97-154, 2002.

[31] :Y. Himri, B. Draoui, S. Himri, "Wind characteristics of Algeria", Nanotechnology Conference and Trade Show June 1-5 Boston Massachusetts U.S.A. 2008.

[32] :BENMEDJAHED, M. (2014). Choix du site et optimisation du dimensionnement d'une installation éolienne dans le nord Algérien et son impact sur l'environnement (Doctoral dissertation).

[33] : BOUDIA Sidi Mohammed «Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie » Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen. 2013

[34] :Hervé Caspani, 100 mots pour comprendre(L'énergie éolienne).2011

[35] : Mémoire de Fin d'Etudes en vue de l'obtention du diplôme de Master 'Intégration des éoliennes dans un réseau d'énergie électrique' ; Bouameur Ilias et Belkahla Kadda ;2015.

[36] : Ziraoui Salah Eddine, « Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau» , Mémoire de Master, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNAB,2017.

[37] : E. Hau, 'Wind Turbines Fundamental, Technologies, Applications, Economics', Second Edition Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 752–772, 2006.

[38] : S. Diaf and G. Notton, 'Evaluation of Electricity Generation and Energy Cost of Wind Energy Conversion Systems in Southern Algeria', Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 23, pp. 379 – 390, 2013.

[39] : Guide des Energie Renouvelables, Ministère de l'Energie et des Mines Algériennes ;Edition 2007.

[40] : <http://perso.numericable.fr/~flopark/tpe/>

[41] : [https:// ar.m .wikipedia.org/Sénia/](https://ar.m.wikipedia.org/Sénia/), consulté le 11/11/2020.

[42] : [https:// ar.m .wikipedia.org/Arzew/](https://ar.m.wikipedia.org/Arzew/), consulté le 11/11/2020.

[43] : [https:// ar.m .wikipedia.org/Port d'Oran/](https://ar.m.wikipedia.org/Port d'Oran/), consulté le 11/11/2020.

[44] : Mémoire présenté dans le cadre du programme de maitrise en ingénierie en vue de l'obtention du grade de maitre en science appliquées 'évaluation du potentiel éolien d'une par modélisation sur ordinateur : comparaison des résultats du logiciel anémoscope avec les données de référence en fonction du relief'', Présenté par : RICHARD VAGLIANI le Février 2012.

[45] : <https://www.creuse.gouv.fr/l'implémentation des machines/>, consulté le 21/11/2020.

[46] : <https://www.techno-science.net/Les études de sols />, consulté le 21/11/2020.

[47] : <https://www.creuse.gouv.fr/détermination des grutage/>, consulté le 21/11/2020.

[48] : <http://algerie-electricite.com/raccordement électrique Sénia/>, consulté le 21/11/2020.

- [49] : [http://algerie-electricite.com/raccordement électrique Arzew/](http://algerie-electricite.com/raccordement_electrique_Arzew/), consulté le 21/11/2020.
- [50] : [http://algerie-electricite.com/ raccordement électrique Port d'Oran/](http://algerie-electricite.com/raccordement_electrique_Port_dOran/), consulté le 21/11/2020.
- [51] : [https://www.researchgate.net/Le réseau inter-éolien /](https://www.researchgate.net/Le_reseau_inter-éolien/), consulté le 16/11/2020.
- [52] : [https://www.creuse.gouv.fr/La télésurveillance/](https://www.creuse.gouv.fr/La_télésurveillance/), consulté le 21/11/2020.
- [53] : [https://www.creuse.gouv.fr/La maintenance/](https://www.creuse.gouv.fr/La_maintenance/), consulté le 21/11/2020.
- [54] : [https://www.creuse.gouv.fr/Consignes de sécurité/](https://www.creuse.gouv.fr/Consignes_de_sécurité/), consulté le 21/11/2020.
- [55] : [https://www.creuse.gouv.fr/Sécurité incendie/](https://www.creuse.gouv.fr/Sécurité_incendie/), consulté le 21/11/2020.
- [56] : L Yang, M. Xie, «Efficient Estimation of the Weibull Shape Parameter Based on a Modified Profile Likelihood». Journal of Statistical Computation and Simulation. Feb; 73(2):115-123,2003.
- [57]: S. Diaf, D. Diaf,, M. Belhamel, M. Haddadi , A. Louche «A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system » Energie Policy (2007) doi 10.1016/j.enpol.2007.06.020.
- [58]: A. Betz, "Wind- Energie und ihre Ausnutzung durch Windmuehlen " Vandenhoeck et Ruprecht, Gottingen 1926.
- [59]: Mémoire pour l'obtention Du diplôme de Master (Évaluation du gisement éolien en Algérie à l'aide du logiciel RETScreen) ,Par: TOUAMA Nour el Houda ,2018.
- [60]:enercon GmbH. 2007. Wind turbine model: e53. fatails available at "<http://www.enercon.de/de/en/contact/firma> last accessed on 25 august 2017.