



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA-1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES



Mémoire
Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER
ENERGIES RENOUVELABLES
OPTION : CONVERSION THERMIQUE

THEME

**Etude et simulation de la ferme éolienne
KABERTENE DE 10 MW de capacité**

REALISE PAR :

BOUAZIZ Mouad

Soutenu devant le jury composé par :

Madame F.FERRADJI	USDB	Présidente
Monsieur K.KACI	USDB	Examineur
Madame N.KHELALFA	USDB	Examinatrice
Monsieur Y.HIMRI	UTMB	Promoteur
Madame N.KASBADJI	UDES	Co-Promoteur

**Année universitaire
2022/2023**

Remerciement

Tout d'abord, je tiens à remercier Allah d'avoir accompli mes études et de m'avoir donné le pouvoir de continuer à avancer. Je tiens à remercier tous les jurés d'avoir accepté de discuter de mon travail. Ensuite, Je ne peux manquer de remercier Mr Y. Himri, surtout Mme N. Kasbadji, de m'avoir guidé dans ce travail.

DEDICACE

*Je dédie ce travail à mes parents, qui m'ont toujours soutenu(e)
dans mes efforts et qui ont été une source constante
d'encouragement.*

*Je souhaite également dédier ce travail à mes frères et ma sœur,
qui ont toujours été là pour moi.*

*Et enfin, je souhaite exprimer ma gratitude envers tous mes
amis, qui ont apporté joie, soutien dans ma vie.*

ملخص

والهدف الرئيسي من هذا العمل هو إصلاح استخدام طاقة الرياح لتوليد الكهرباء. وللقيام بذلك، قمنا باتخاذ عدة خطوات. بادئ ذي بدء، يتعلق الأمر بالتحقق من صحة تحليل الطاقة النظيفة من خلال مقارنة الإنتاج الفعلي للرياح بالتقديرات التي تم الحصول عليها باستخدام نموذج RETScreen. بعد ذلك، يتم إجراء تحليل شامل لبيانات الرياح والطاقة التي تنتجها مزرعة الرياح في كابارتن. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم جدوى مزرعة الرياح من حيث الأداء الكهربائي، مع التركيز على إنتاج الطاقة الكهربائية وعامل القدرة. أخيرًا، يتم إجراء فحص لتحديد ما إذا كانت توربينات الرياح من فئة الرياح المنخفضة (IEC III) تنتج كهرباء أكثر من تلك الموجودة في فئتي الرياح IEC I و IEC II في ظل نفس ظروف الرياح في موقع مزرعة الرياح Kabartene.

الكلمات المفتاحية: كابارتن، RETScreen، الطاقة الكهربائية، توربين

RESUME

L'objectif principal de ce travail consiste à réformer l'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité. Pour ce faire, plusieurs étapes sont entreprises. Tout d'abord, il s'agit de valider l'analyse de l'énergie propre en comparant la production effective d'énergie éolienne avec les estimations obtenues à l'aide du modèle RETScreen. Ensuite, une analyse approfondie des données éoliennes et de l'énergie produite par le parc éolien de Kabartene est réalisée. Cette étude vise à évaluer la faisabilité du parc éolien en termes de performances électriques, en se concentrant sur la production d'énergie électrique et le facteur de capacité. Enfin, une vérification est effectuée pour déterminer si les éoliennes de la classe de vent faible (IEC III) produisent plus d'électricité que celles des classes de vent IEC I et IEC II dans les mêmes conditions de vent sur le site du parc éolien de Kabartene.

Mots clés : KABERTENE, RETScreen, énergie électrique, aérogénérateur.

ABSTRACT

The main objective of this work is to reform the use of wind energy for electricity generation. To do this, several steps are undertaken. First of all, it's about validating the clean energy analysis by comparing the actual production of wind with the estimates obtained using the RETScreen model. Then, a thorough analysis of the wind data and the energy produced by the KABARTENE wind farm is carried out. This study aims to assess the feasibility of the wind farm in terms of electrical performance, focusing on the production of electrical energy and capacity factor. Finally, a check is carried out to determine whether the wind turbines of the low wind class (IEC III) produce more electricity than those of the wind classes IEC I and IEC II under the same wind conditions at the KABARTENE wind farm site.

Keywords: KABERTENE, Wind Park, RETScreen, electric energy, wind turbines.

Nomenclatures

α : l'exposant de cisaillement du vent	/
Γ : Fonction Gamma	/
η : Rendement de la machine	/
ρ : Masse volumique de l'air	kg/m^3
A : Surface de la roue d'une éolienne	m^2
C : Facteur d'échelle de Weibull	m/s
C_f : Facteur de Capacité.	/
ff_0 : Fréquence de la vitesse du vent nulle	/
$f(V)$: Fréquence de la vitesse du vent	/
K : Facteur de forme de Weibull	/
P_m : Puissance moyenne disponible	W
P_{moy} : Densité de puissance moyenne disponible	W/m^2
P_{um} : Puissance moyenne utilisable	W
$P_{uti.m}$: Puissance moyenne réellement utilisable	W
$v_{hauteur\ du\ mât}$ La vitesse du vent à la hauteur du moyeu de l'éolienne	m/s
V : Vitesse du vent	m/s
V_a : Vitesse d'arrêt	m/s
V_D : Vitesse de démarrage	m/s
V_n : Vitesse nominale	m/s
V_m : Vitesse moyenne du vent	m/s
V_m^3 : Vitesse cubique moyenne du vent	m^3/s^3

SOMMAIRE

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

INTRODUCTION GENERALE	1
1.1. HISTORIQUE DE L'ÉOLIENNE.....	3
1.2. DEFINITION D'UNE EOLIENNE	4
1.3. SOURCE D'ENERGIE	4
1.4. FONCTIONNEMENT D'UNE EOLIENNE	4
1.5. PRODUCTION D'ELECTRICITE DANS L'ÉOLIENNE	6
1.6. TYPE D'EOLIENNES	6
1.6.1. EOLIENNES A AXE VERTICAL.....	6
1.6.2. EOLIENNES A AXE HORIZONTAL	8
1.7. TECHNIQUES PRINCIPALES POUR LA REGULATION DE PUISSANCE.....	9
1.8. PUISSANCE D'UNE EOLIENNE.....	10
1.9. PUISSANCE INSTALLEE DANS LE MONDE	11
1.10. CAS DE L'ALGERIE.....	12
1.10.1. LE DEVELOPPEMENT DES CARTES DE VENTS EN ALGERIE	14
1.11. CONCLUSION.....	16

CHAPITRE 2 : OUTILS D'ANALYSE DE SYSTEME D'ENERGIE RENOUVELABLE

2.1. INTRODUCTION.....	17
2.2. NOTION DE BASE.....	17
2.3. METHODES D'OPTIMISATION.....	17
2.4. OUTILS D'ANALYSE DES ENERGIES RENOUVELABLES	18
2.2.1. IPSYS	18
2.2.2. ARES	18
2.2.3. iHOGA	19
2.2.4. HOMER	19
2.2.5. HYBRID 2	19
2.2.6. RETSCREEN.....	19
2.5. CONCLUSION.....	21

CHAPITRE 3 : MODELISATION

3.1.	INTRODUCTION.....	22
3.2.	MATERIELS ET METHODES	22
3.2.1.	CARACTERISTIQUES DU SITE D'ADRAR.....	22
3.2.2.	DONNEES VENTS UTILISES	23
3.2.3.	LOGICIEL UTILISE	23
3.3.	MODELISATION DU VENT	24
3.3.1.	PUISSANCE EOLIENNE PRODUITE	24
3.3.2.	DISTRIBUTION DE LA VITESSE DU VENT.....	25
3.3.1.	METHODE D'ANALYSE DE LA PUISSANCE UTILE SELON RETSCREEN	26
3.4.	SELECTION DE L'EOLIENNE OPTIMALE.....	26
3.5.	CARACTERISTIQUES DES EOLIENNES	27
3.6.	CONCLUSION.....	27

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION

4.1.	INTRODUCTION.....	28
4.2.	ANALYSE DES DONNEES VENT	28
4.2.1.	VARIATION ANNUELLE ET MENSUELLE DE LA VITESSE DU VENT	29
4.2.2.	ROSE DES VENTS.....	31
4.2.3.	ANALYSE DES VENTS DE SABLE	31
4.2.4.	EFFET DE LA TEMPERATURE AMBIANTE.....	32
4.3.	EOLIENNES ETUDIEES.....	33
4.3.1.	CHOIX DES EOLIENNES SELON LES CLASSES DE VENT	33
4.3.2.	CARACTERISTIQUES DES EOLIENNES ETUDIEES	34
4.4.	PRODUCTION D'ENERGIE DU PARC EOLIEN DE KABARTENE	35
4.5.	ANALYSE DE LA PRODUCTION MOYENNE ANNUELLE DE LA FERME EOLIENNE.....	39
4.6.	COMPARAISON DE LA PRODUCTION ESTIMEE ET REELLE DE L'AEROGENERATEUR GAMESA.....	40
4.7.	COMPARAISON DE L'ENERGIE OPTIMUM DE VESTAS AVEC LA PRODUCTION REELLE	41
4.8.	CONCLUSIONS.....	42
	REFERENCES.....	44

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

FIGURE 1– MOULIN A VENT	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 2–EOLIENNES MODERNES.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 3 – CONVERSION DE L'ÉNERGIE CINÉTIQUE EN ÉNERGIE ÉLECTRIQUE. ...	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 4 – SCHEMA D'UNE ÉOLIENNE « SOUS LE VENT » ET « FACE AU VENT » ..	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 5– ANCIEN MOULIN A VENT CHINOIS A AXE VERTICAL	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 6– SCHEMA DU ROTOR DE DARRIEUS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 7 – SCHEMA DU ROTOR DE DARRIEUS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 8 - DESCRIPTION D'UNE ÉOLIENNE "COMPOSANTS GÉNÉRAUX".	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 9 – DIAGRAMME DE LA PUISSANCE UTILE SUR L'ARBRE EN FONCTION DE LA VITESSE DU VENT	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 10 –COEFFICIENTS DE PUISSANCE ET DE COUPLE EN FONCTION DE LA VITESSE NORMALISÉE Λ POUR DIFFÉRENTS TYPES DE TURBINES	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 11 – LA PUISSANCE ÉOLIENNE INSTALLÉE DANS LE MONDE DE 2004 A 2019..	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 12 – CARTE DES VENTS EN AFRIQUE	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 13 – POMPAGE ÉOLIEN EN : (A) ADRAR, (B) SAIDA, (C) DJELFA ET (D) DOUAR EL MAË (EL OUED)	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 14 – AÉROGÉNÉRATEUR ANDREAU EN FLIÉ À GRAND VENT (ALGÉRIE) .	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 15 - CARTES DES VENTS À 10 M DU SOL ÉTABLIES EN 2000	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 16 - CARTES DES VENTS À 10 M DU SOL ÉTABLIES EN 2006	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 17 - CARTES DES VENTS À 10 M DU SOL ÉTABLIES EN 2018	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 18 - CARTES DES VENTS À 10 M DU SOL ÉTABLIES EN 2019	16

CHAPITRE 3 : MODELISATION

FIGURE 19 - PARC ÉOLIEN DE KABARTENE DANS LA RÉGION D'ADRAR...	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
FIGURE 21 - ALGORITHME D'OPTIMISATION DU RETSCREEN.....	26
FIGURE 22 - PROFIL DE CISAILEMENT VERTICAL DU VENT EN FONCTION DE LA VITESSE MOYENNE DU VENT POUR LE SITE DE KABARTENE.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION

FIGURE 23 - VARIATION MENSUELLE DE LA VITESSE MOYENNE DU VENT À DIFFÉRENTS HAUTEURS POUR LE SITE DE KABARTENE.....	30
FIGURE 24 - VARIATION DIURNE DE LA VITESSE DU VENT À KABARTENE.....	30
FIGURE 25 - DIAGRAMME DE LA ROSE DES VENTS SAISONNIÈRE POUR LE SITE DE KABARTENE.....	31
FIGURE 26 - TYPE DE VENT DE SABLE DANS LES RÉGIONS DU SUD DE L'ALGÉRIE	32
FIGURE 27 - VARIATION DE LA TEMPÉRATURE AMBIANTE PENDANT L'ANNÉE	33
FIGURE 28 - COURBES DE PUISSANCE DES TROIS ÉOLIENNES.....	34
FIGURE 29 - ÉLECTRICITÉ PRODUITE PAR LE PARC ÉOLIEN DE 12 ÉOLIENNES DE 52-0,85 MW DE GAMESA. PÉRIODE 2014 A 2017	36
FIGURE 30 - COMPARAISON DE LA PRODUCTION ÉLECTRIQUE ANNUELLE DES AÉROGÉNÉRATEURS...	38
FIGURE 31 - VARIATION JOURNALIÈRE DE LA PUISSANCE MOYENNE BRUTE	39

FIGURE 32 - DONNEES RECUEILLIES DANS LE PARC EOLIEN DE KABARTENE DU 01/01/2015 AU 31/12/2015.....	40
FIGURE 33 - PRODUCTION D'ENERGIE MOYENNE ANNUELLE.....	41

Liste des tableaux

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

TABLEAU 1 - ENERGIE RENOUVELABLE : OBJECTIFS DE L'ALGERIE.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
---	-------------------------------------

CHAPITRE 2 : OUTILS D'ANALYSE DE SYSTEME D'ENERGIE RENOUVELABLE

TABLEAU 2 - PARAMETRES D'ENTREES ET DE SORTIES DES LOGICIELS ...	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
TABLEAU 3 - PLATEFORME ET LE TYPE D'ANALYSE DES OUTILS.....	21

CHAPITRE 3 : MODELISATION

TABLEAU 4 – VITESSE MOYENNE MAXIMAL ET MINIMAL DU SITE DE 2014 A 2017.	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
TABLEAU 5 -VITESSES DE VENTS MOYENNE POUR CHAQUE MOIS.....	23
TABLEAU 6 - TEMPERATURE AMBIANTE DU SITE KABERTENE.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION

TABLEAU 7- IEC 61400-1 RELATIF AUX CLASSES DE VENT	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
TABLEAU 8 - CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES EOLIENNES.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
TABLEAU 9 - ÉLECTRICITE PRODUITE PAR LE PARC EOLIEN DE 12 EOLIENNES DE 52-0,85 MW DE GAMESA. PERIODE 2014 A 2017	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
TABLEAU 10 - PUISSANCE MOYENNE BRUTE (PMB), FACTEUR DE CAPACITE BRUT (FCB) ET ENERGIE NETTE (EN) CALCULES POUR LES TROIS TYPES D'EOLIENNES.	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
TABLEAU 11 - DONNEES RECUEILLIES DANS LE PARC EOLIEN DE KABARTENE DU 01/01/2015 AU 31/12/2015.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
TABLEAU 12 – PRODUCTION D'ENERGIE MOYENNE ANNUELLE ET FACTEUR DE CAPACITE	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
TABLEAU 13 - PRODUCTION ESTIMEE DE 12 AEROGENERATEURS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

INTRODUCTION

GENERALE

l'être humain aurait utilisé de l'énergie pour la première fois en produisant du feu pour se réchauffer et cuire des aliments il y a 500 000 ans. Un grand pas a été fait vers 15 000 ans avant J.-C., lorsque des animaux domestiques ont été pour la première fois harnachés pour accomplir certaines tâches. Ensuite, les bateaux à voile, les moulins à vent, etc., jusqu'aux énergies dont la recherche et l'usage demandent des moyens complexes (gaz, charbon, pétrole, énergie nucléaire, etc.).

Les études démographiques indiquent que la population des pays en développement va croître très vite et leurs besoins en énergie seront très importants.

Aujourd'hui, l'utilisation des énergies d'origine fossile représente actuellement 90% de la consommation mondiale d'énergie. Les deux chocs pétroliers des années soixante-dix ont ouvert des perspectives nouvelles quant à l'exploitation des sources d'énergie fossile, afin de réduire les émissions toxiques, qui contribuent à la formation de l'effet de serre, responsables du réchauffement climatique qui bouleverse les équilibres environnementaux, économiques et sociaux des pays. L'actualité montre que les premiers touchés par ces dérèglements sont particulièrement les pays en développement.

Le monde occidental prend donc brutalement conscience des conséquences de sa dépendance en matière d'énergie et décide de réagir. Certains pays s'engageaient dans des programmes de développement de l'énergie nucléaire à grande échelle, d'autres ont lancé des recherches dans le domaine des énergies renouvelables.

Pour ces bonnes raisons, nous devons construire dès maintenant un avenir énergétique différent. Cet avenir passe par deux voies :

- ✓ Économiser l'énergie pour que, sans compromettre notre niveau de vie, nous dépensions moins pour obtenir les mêmes résultats (la co-génération, les lampes et moteurs basse consommation) en d'autres termes maîtriser l'énergie ;
- ✓ Développer les énergies renouvelables (énergie éolienne, énergie solaire, biomasse, biogaz, géothermie, etc.).

Ces dernières (énergies renouvelables) se caractérisent par :

1. Une préservation de l'environnement souci majeur de 3^{ème} millénaire.
2. Une source d'énergie gratuite, non polluante et inépuisable.

D'où le recours à l'énergie renouvelable.

Le passage du système énergétique actuel, se basant sur les combustibles fossiles vers un approvisionnement énergétique qui s'appuierait essentiellement sur les sources d'énergie renouvelables doit être considéré comme un des éléments essentiels du développement durable.

Bref toute amélioration de la situation, ne peut être assurée qu'à travers la promotion de l'homme qui est "cause à effet". C'est à ce titre que les orientations générales du pays de monde sont pour la promotion de l'environnement et le développement durable, or la majorité des problèmes environnementaux sont liés avec l'augmentation de la consommation d'énergie donc il faut explorer les moyens les plus performants pour produire, distribuer, consommer et maîtriser l'énergie, accroître l'utilisation des systèmes énergétiques écologiquement rationnels et plus particulièrement ceux des énergies renouvelables.

En effet, la distribution de l'électricité en Algérie, connaît depuis quelques années de fortes perturbations du fait d'une augmentation croissante de la demande intérieure. Produire de l'électricité à partir de l'énergie renouvelable telle que l'énergie éolienne demeure la principale

préoccupation des producteurs d'électricité. Mais l'électricité produite par une éolienne dépend de l'énergie disponible dans le vent.

Le sujet porte donc sur le recours à l'éolien pour la production d'énergie électrique. L'objectif principal de ce travail est :

- Validation de l'analyse d'énergie propre en comparant la production réelle d'énergie éolienne avec celle estimée à l'aide de RETScreen modèle.
- Analyse des données éoliennes ainsi que de l'énergie produite par le parc éolien de Kabartene.
- Etude de faisabilité de ce parc éolien en termes de performances électriques, à savoir la production d'énergie électrique et le facteur de capacité.
- Vérification que les éoliennes de la classe de vent faible (IEC III) produisent plus d'énergie électrique que celles des classes de vent IEC I et IEC II pour les mêmes conditions de vent sur site du parc éolien de Kabartene.

Pour cela notre manuscrit serait structuré selon le plan suivant :

Nous présentons donc dans le premier chapitre, un bref état de l'art qui a pour objectif de décrire les diverses technologies et les principales caractéristiques des éoliennes proposées dans la littérature et une description sommaire des capacités installées dans l'Afrique du nord et précisément la puissance installée en Algérie.

Le deuxième chapitre a pour objectif de faire une étude plus ou moins détaillée sur les caractéristiques du vent et donner quelques éléments de base sur les mécanismes qui engendrent et dirigent le vent.

L'objectif du troisième chapitre est de donner une description détaillée du modèle RETScreen

Pour terminer, nous présentons dans le chapitre quatre l'étude expérimentale et simulation du parc éolien de Kabatene (10 MW), l'Algérie. Nous faisons également une étude de faisabilité en termes de performance électrique à savoir la production d'énergie électrique et le facteur de capacité et nous achèverons notre manuscrit par une conclusion.

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

1.1. HISTORIQUE DE L'EOLIENNE

il y a bien longtemps que les hommes ont imaginé des moyens pour exploiter le vent. Dès le Vème siècle avant Jésus-Christ, des traces de l'utilisation de moulins sont repérées en Egypte et en Asie. Ils servaient à l'époque à moudre du grain ou pomper de l'eau.

C'est en Perse en 134 avant J-C que les moulins à vent ont été fabriqués et fonctionnaient grâce à un mur protégeant les pales du vent au cours de leur retour [1]. Il s'agissait d'ailleurs d'un instrument de libération pour certains agriculteurs, car les seigneurs imposaient l'usage des rivières qui coulent sur leurs terres.

Vint alors l'idée d'utiliser le vent et d'échapper ainsi au joug et aux impôts des princes. Le moulin est même devenu un personnage de littérature de Cervantès avec son Don Quichotte au célèbre moulin d'Alphonse Daudet.

C'est à partir du XII^{ème} siècle qu'apparaissent en Europe jusqu'en Grèce, les premiers moulins à vent, qui servaient surtout à remplacer les animaux pour les travaux harassants.



Figure 1. 1-Moulin à vent

Les premiers moulins à vent apparaissent en Europe dans le courant du XIII^{ème} siècle (Figure 1.1) avec le retour des Croisés, qui les ramèneront de leurs voyages en Orient [2]. Ils sont rapidement utilisés aux actuels Pays-Bas pour assécher les terres inondées.

Ce sont les colons espagnols qui introduisent les premiers moulins à vent dans le nouveau monde (l'Amérique) au XVI^{ème} siècle. Durant l'ère coloniale, ils sont utilisés pour moudre le grain. Vers le milieu du 19^{ème} siècle, un nouveau type de moulin à vent apparaît aux Etats-Unis [2].

Beaucoup moins élégants que les moulins de types européens, qu'on le nomme "éoliennes multi-pales" ou "éoliennes américaines". Elle reste pour de nombreuses personnes, l'image traditionnelle d'une éolienne diffusée dans le grand public par les westerns.



Figure 1. 2–Eoliennes modernes.

1.2. DEFINITION D'UNE EOLIENNE

L'origine du mot "éolienne" provient du nom Eole, dieu du vent dans la mythologie grecque. Une éolienne " Moteurs à vent " est une haute tour (le vent souffle davantage en hauteur en béton ou en métal), ressemblant à des derricks pétroliers, au sommet de laquelle tourne une pale ou hélice généralement de 40 à 107 m.

1.3. SOURCE D'ENERGIE

L'éolienne fonctionne sur le même principe que le moulin à vent. En d'autres termes, une éolienne est une machine qui capte l'énergie du vent et le transforme en énergie mécanique [3] ou électrique.

Cette énergie peut donc avoir différentes applications comme actionner des moulins ou des stations de pompage d'eau ou encore produire de l'électricité. On parle alors d'aérogénérateur.

1.4. FONCTIONNEMENT D'UNE EOLIENNE

Si l'on se réfère à l'histoire de l'aventure éolienne et plus précisément au début de l'utilisation de l'énergie éolienne pour produire de l'énergie électrique en 1891, on ne constate pas vraiment de changements fondamentaux dans les principes de fonctionnement.

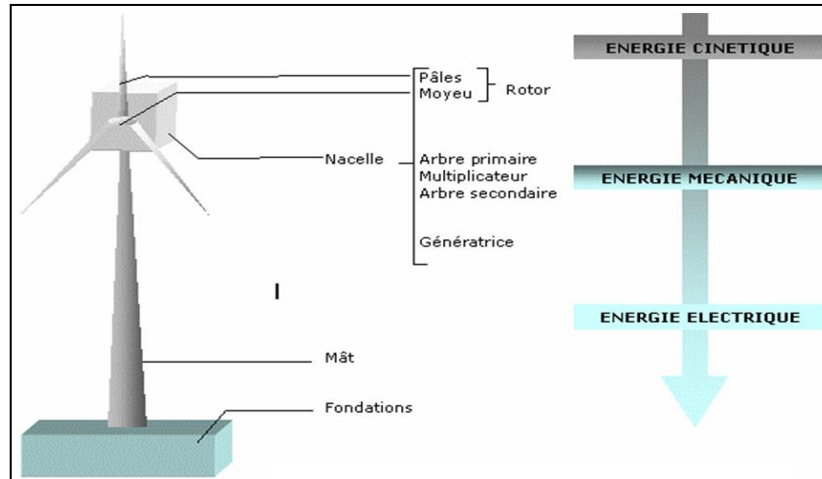


Figure 1. 3– Conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique.[4]

Il faut d'abord lever bien haut l'éolienne pour qu'elle puisse profiter au maximum des vents, ceci nécessite une tour toujours élevée par rapport à la taille de l'éolienne proprement dite « Une petite éolienne va être installée au moyen à 10 mètres de hauteur, c'est-à-dire au moins aussi haut que le sommet des poteaux électriques. Une grande éolienne s'élèvera à plus de 100 mètres ce qui correspond à la hauteur d'un immeuble de 30 étages » [4]. Elles peuvent fonctionner face au vent ou sous le vent comme nous pouvons voir sur la figure 1.4[5]

✚ EOLIENNES SOUS LE VENT « AUTO ORIENTABLE »

Le rotor est placé du côté sous le vent de la tour. L'éolienne s'oriente automatiquement dans le lit du vent comme une girouette [1]. C'est une technique qui a fait ses preuves pour les grands aérogénérateurs tels que les aérogénérateurs NEYRPIC [6]. L'avantage fondamental des machines sous le vent est donc qu'il est possible de les construire plus légères que les éoliennes face au vent.

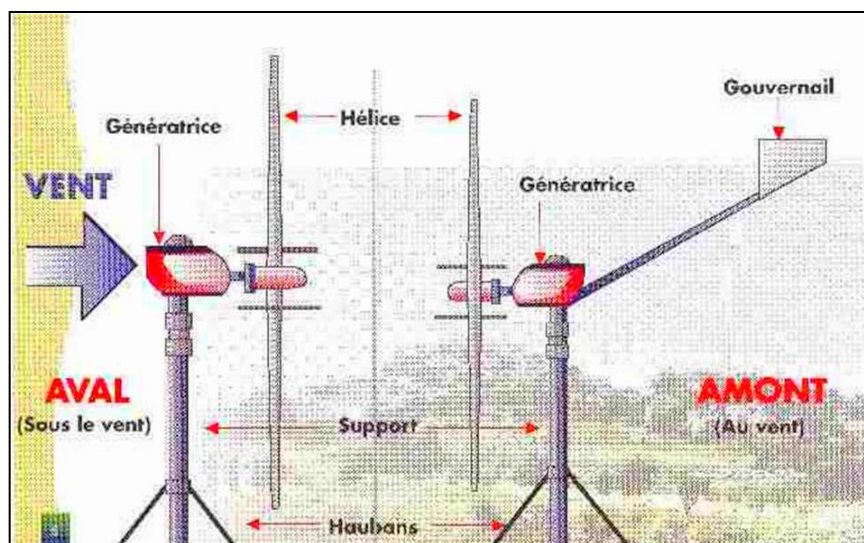


Figure 1. 4– Schéma d'une éolienne « sous le vent » et « face au vent ».[6]

✚ EOLIENNES FACE AU VENT

Comme son nom l'indique, le rotor d'une éolienne est en face du vent. Les petites éoliennes nécessitent une dérive « gouvernail à l'arrière qui l'oriente », tandis que pour les grandes éoliennes l'orientation est actionnée par un servomoteur recevant des informations et commandes de la part d'une girouette.

La grande majorité des éoliennes sont en effet conçues de cette façon, un certain effet d'abri est cependant également créé devant la tour, ce qui fait que le vent commence à dévier bien avant qu'il n'arrive à la tour, même lorsque celle-ci est ronde et lisse [7]. Lorsque le vent se met à souffler (à partir de 2 ou 3 m/s soit environ 7 km/h), il exerce un système de forces sur les pales qui alors se met à tourner, le mouvement du rotor est transmis à une génératrice de courant.

Les génératrices étant prévues pour tourner plus vite que les rotors d'éoliennes, la transmission se fait alors à travers un multiplicateur de vitesse qui a pour rôle de démultiplier la vitesse de rotation, dans le but d'obtenir une vitesse suffisamment importante pour la génératrice. Certains constructeurs ont mis au point des modèles qui fonctionnent avec des génératrices à basse vitesse qui ne nécessitent pas de multiplicateur. La génératrice délivre alors un courant électrique qui est ensuite stockée dans des batteries pour les plus petits modèles d'éoliennes ou transféré sur le réseau électrique pour les autres.

1.5. PRODUCTION D'ELECTRICITE DANS L'EOLIENNE

Les premières applications concernant l'exploitation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité remontent à 1891, lorsque le météorologue danois Poul La Cour expérimenta pour la première fois, sur un système basé sur l'installation d'un générateur à courant continu actionné par un moulin à vent ordinaire. Plus tard, l'un de ses étudiants Johannes Juul, fut le premier à mettre au point une éolienne moderne capable de produire du courant alternatif [3].

En 1956-1957, il conçut et construisit la désormais classique éolienne de 200 kW, l'éolienne Gedser [8], qui devint le modèle de référence pour le développement futur de tous les autres aérogénérateurs (éoliennes équipées d'un générateur électrique). Les principes de l'éolienne sont anciens de telle sorte que la conception de celle-ci n'a guère changé au cours des siècles, mais les matériaux et la technologie ont évolué. Le développement technique des éoliennes modernes a emprunté beaucoup à l'aviation. Bref le but de l'éolienne est plutôt simple, convertir l'énergie mécanique venant de la vitesse du vent en une énergie électrique.

1.6. TYPE D'EOLIENNES

La longue maturation des technologies dans les années 70-80 a fait émerger deux types de machines : les éoliennes à axe horizontal et celles à axe vertical. Ces deux types peuvent être utilisés indifféremment dépendant principalement des préférences visuelles, des puissances nécessaires et de la ressource en vent.

1.6.1. EOLIENNES A AXE VERTICAL

Les éoliennes à axe vertical ont été probablement les premières utilisées (Figure 1.5) par la suite elles ont été abandonnées au profit des éoliennes à axe horizontal [6].

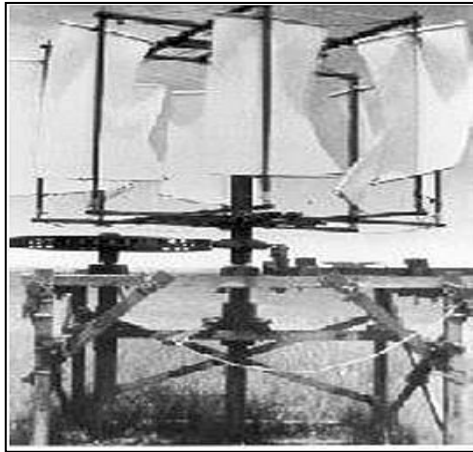


Figure 1. 5– Ancien Moulin à vent Chinois à axe vertical [6].

C'est assez récemment qu'elles ont été redécouvertes et ont fait l'objet de nombreuses études notamment de la part des chercheurs Canadiens car elles présentent plusieurs avantages. Tout d'abord l'accès au générateur et aux principales composantes mécaniques est situé aux pieds de la tour. De plus, elles sont opérationnelles avec des vents multidirectionnels et sont plus efficaces avec des vents à faible vitesse. Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables. On les doit aux inventeurs Savonius et Darrieus.

✚ TYPE "SAVONIUS" [2].

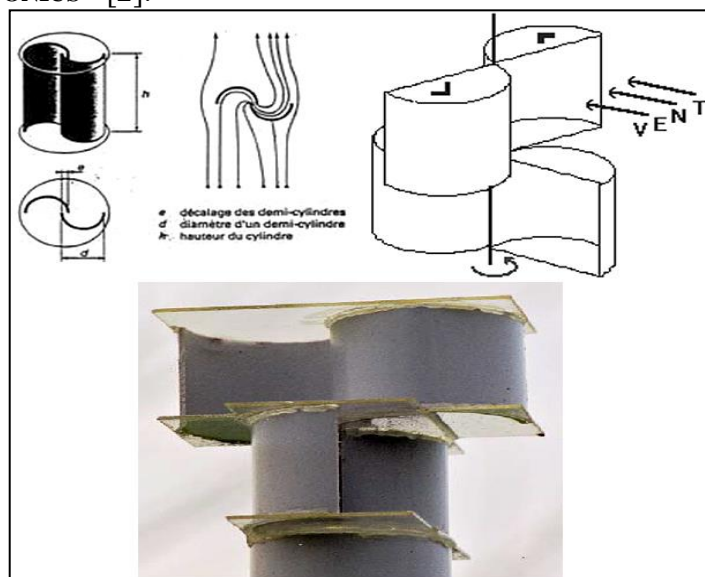


Figure 1. 6– Schéma du rotor de Darrieus

✚ TYPE "DARRIEUS" [2].

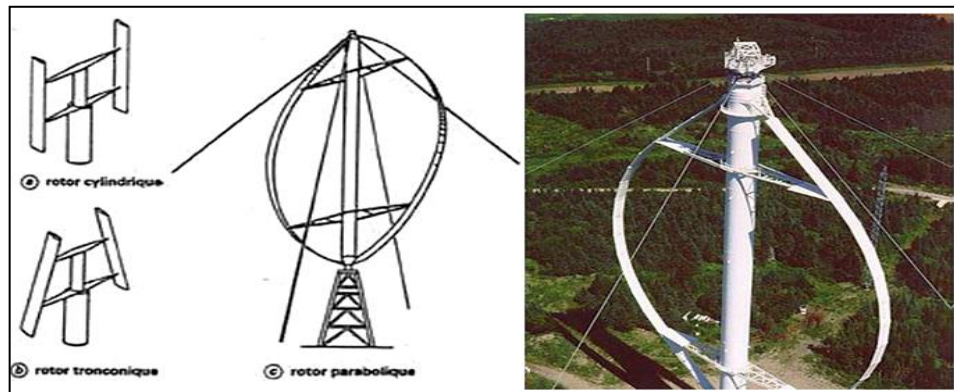


Figure 1. 7– Schéma du rotor de Darrieus

1.6.2. EOLIENNES A AXE HORIZONTAL

La plupart des éoliennes modernes sont à axe horizontal (ou à hélice) et sont munies de 3 pales, mais il existe des éoliennes à 2 pales [5]. Les éoliennes à axe horizontal sont de conception plus simple et ont un rendement élevé. Ce sont les modèles commerciaux les plus répandus [6]. Sur base du nombre de pales que compte l'hélice, on peut distinguer deux groupes :

- ✚ A ROTATION LENTE
- ✚ A ROTATION RAPIDE

L'éolienne a axe horizontal se décompose en trois parties : la tour (axe central), le rotor pourvu le plus souvent de trois pales et la nacelle abritant les machines (figure 1.8).

- La tour "mât".
- Rotor et ses pales.
- La nacelle.
- Génératrice.

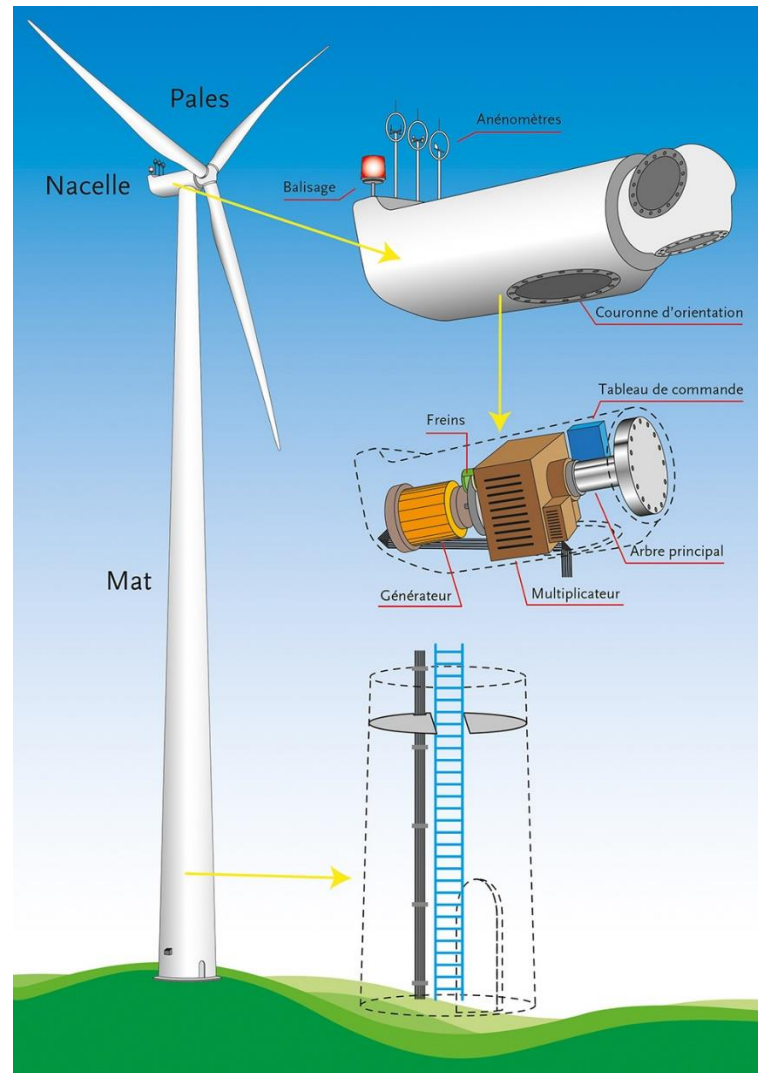


Figure 1. 8- Description d'une éolienne "Composants Généraux".ref

1.7. TECHNIQUES PRINCIPALES POUR LA REGULATION DE PUISSANCE

Dès que le vent augmente une pompe hydraulique fait pivoter légèrement les pales autour de leur axe longitudinal pour que la surface balayée par le vent de la pale soit plus petite donc pour diminuer la puissance en sortie de l'éolienne, afin d'éviter que l'éolienne tourne à de trop grandes vitesses et diminue les contraintes mécaniques qui pourraient entraîner la destruction de la machine.

Dans le cas de réduction de la vitesse du vent, les pales de l'éolienne pivotent en sens inverse pour que la surface balayée par le vent soit plus importante. Lors du changement d'orientation de pales, celles-ci pivotent toutes en phase.

Dans ce but divers systèmes permettent de limiter ces contraintes et de réguler la vitesse. Il semble actuellement que pour les éoliennes rapides la technique de variation du calage des pales, s'impose de plus en plus (Pour les éoliennes lentes divers systèmes à empennage permettent de ne plus avoir l'éolienne face au vent) [6].

Il existe deux techniques principales pour cette régulation de puissance :

1. Le calage variable de pale « à pas variable ou à pale orientable » [11].
2. Le calage fixe de pale « calage constant » [12].

1.8. PUISSANCE D'UNE EOLIENNE

L'énergie recueillie à la sortie du système éolien complet va dépendre des caractéristiques techniques de la machine, de celle du vent au lieu d'implantation, son prix d'achat et sa rentabilité à long terme.

Les constructeurs fournissent les courbes de puissance en fonction de la vitesse du vent, la plupart des machines éoliennes ont une courbe de puissance du type de celle présentée à la figure 1.9.

Entre V_D et V_n la puissance est directement proportionnelle au cube de la vitesse du vent, à partir de V_n le système éolien est régulé et délivre une puissance constante égale à P_n la vitesse V_D correspond au seuil de production de la machine. A partir d'une vitesse élevée V_M (la vitesse maximale du vent), pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour des raisons de sûreté de fonctionnement. Les vitesses V_D , V_n et V_M définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent [13]:

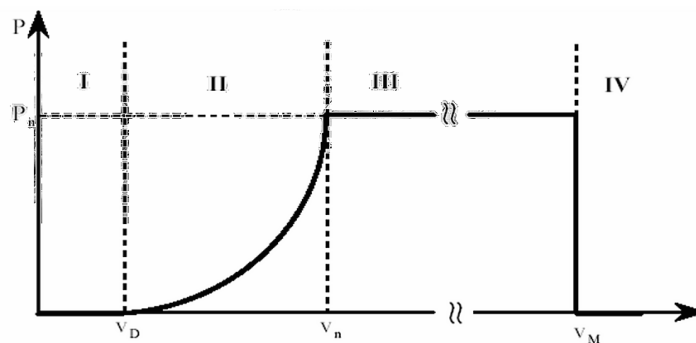


Figure 1. 9– Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent [14].

Ainsi la caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones [15] :

- La zone I, où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas c'est à dire ne fournit pas de puissance) ;
- La zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent v ;
- La zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_n ;
- La zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

Sur le plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients aérodynamiques de puissance ou de couple en fonction de la vitesse normalisée λ .

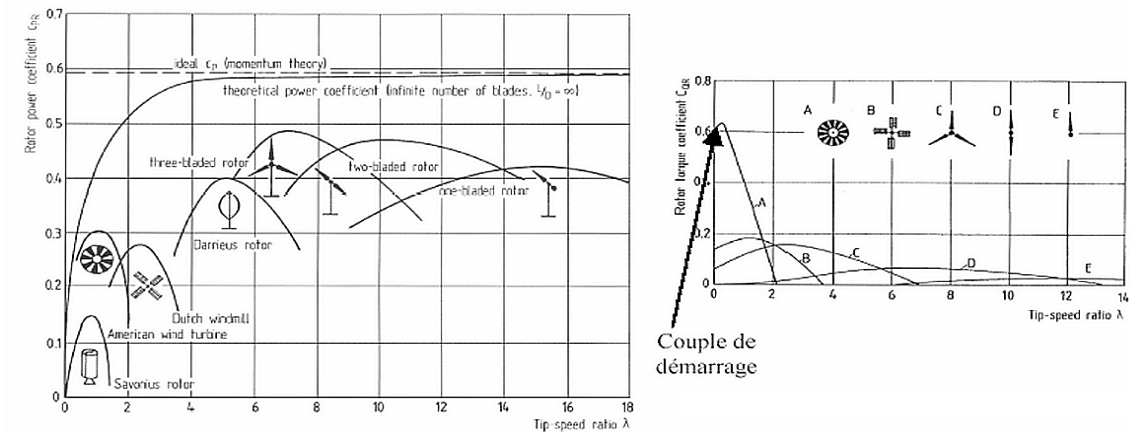


Figure 1. 10–Coefficients de puissance et de couple en fonction de la vitesse normalisée λ pour différents types de turbines [16].

On peut noter ainsi que les courbes $C_p(\lambda)$ montrent que les turbines à axe horizontal à faible nombre de pales (3, 2,1) ont un coefficient supérieur à ceux à axe vertical ou aux multiples avec des paramètres de vitesse plus élevés cela veut dire en termes de puissance elles sont avantageuses par rapport aux autres.

1.9. PUISSANCE INSTALLEE DANS LE MONDE

En 1981 il n'y 'avait que 15 MW éoliens installés dans le monde dont la majoritaire était dans l'Amérique du nord, ainsi la production mondiale d'énergie éolienne a connu une croissance rapide à partir du début des années 90[5]. Entre 2011-2014 le marché atteint 349 GW, puis en 2015 à presque de 416 GW et en 2018 s'établit à 563.5GW pour passer à 732GW en 2020 (Figure 1.11) [18]

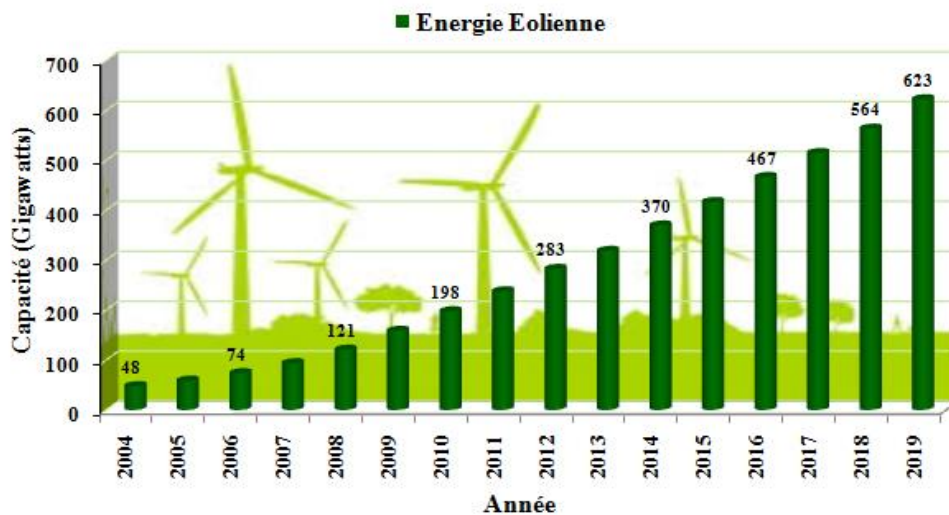


Figure 1. 11– La puissance éolienne installée dans le Monde de 2004 à 2019.[18]
L'énergie éolienne pourrait couvrir jusqu'à 29% des besoins mondiaux en énergie électrique d'ici 2030 [19]. Il convient de noter que la majeure partie de la capacité installée est en Europe.

Les organisations internationales du système des Nations Unies, notamment (UNESCO), s'étaient penchées depuis assez longtemps sur l'utilisation des énergies renouvelables. C'était le cas du programme de l'UNESCO pour les zones arides puis du congrès international « Le Soleil au service de l'humanité ».

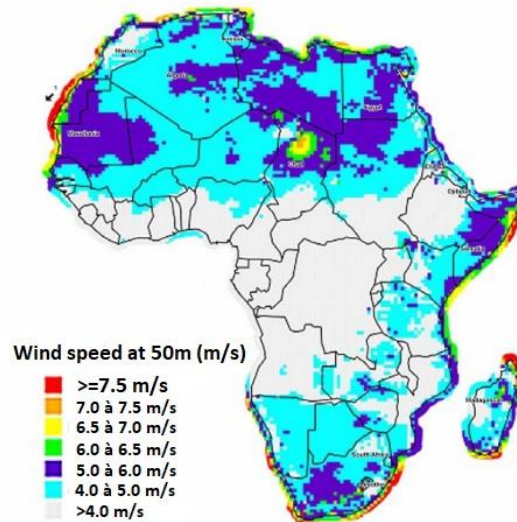


Figure 1. 12– Carte des vents en Afrique [20]

Il est à noter que des moulins à vent pour le pompage mécanique d'eau ont été fabriqués en Afrique du Sud depuis 1871. Il est estimé que plus de 3×10^5 éoliennes sont installées et que plus de 90% d'entre elles sont construites localement [21].

En termes de ressources éoliennes, la carte des vents ainsi obtenue montre que les meilleurs vents en Afrique se retrouvent principalement dans le nord du continent, à ses extrêmes à l'est, à l'ouest et au sud comme le montre la Figure 1.12 [20].

Projets de production éolienne à grande échelle visant à l'exploitation de cette ressource énergétique abondante sont en cours de développement en Maroc, Afrique du Sud, Algérie, etc. Cependant, la capacité éolienne en exploitation est de 7GW, y compris le Moyen Orient, contre 732 GW (capacité installée mondiale) [22].

1.10. CAS DE L'ALGERIE

L'Algérie est un pays continental situé dans le nord-ouest de l'Afrique. Les éoliennes de pompage existaient, depuis longtemps à la période coloniale, dans les grandes régions Algériennes telles que Adrar, Saida, Djelfa, etc. (Figure 1.13). Ces pompes éoliennes exploitent les nappes phréatiques pour le pompage de l'eau vers des réservoirs d'accumulation [23].

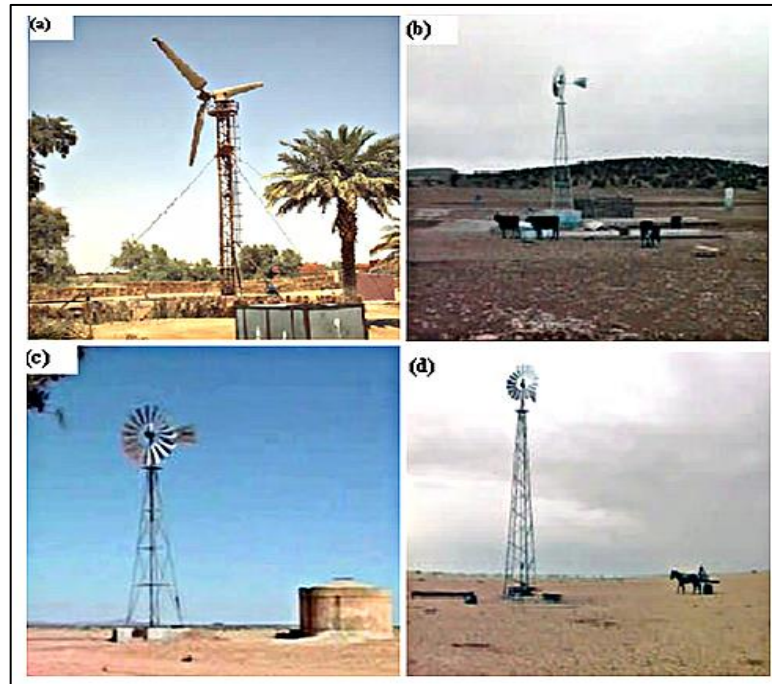


Figure 1. 13– Pompage éolien en Algérie : (a) Adrar, (b) Saïda, (c) Djelfa et (d) Douar El Maa (El oued) [23].

L'aérogénérateur Andreau Enflied de 100 kW fut acheté en 1957 par l'Electricité et Gaz d'Algérie (EGA), actuellement SONELGAZ pour être exploité la colline des grands vents, El Achour Alger (Algérie) [2].

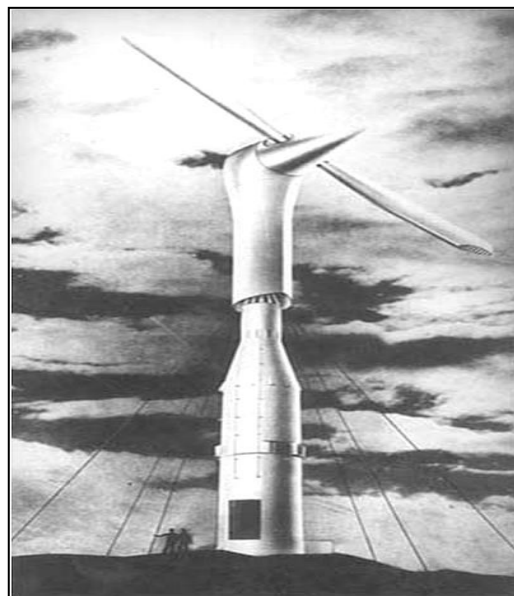


Figure 1. 14– Aérogénérateur AndreauEnflied à grand vent (Algérie) [24].

Ces dernières années, la distribution d'électricité a été gravement perturbée en raison de l'augmentation croissante de la demande intérieure. Selon le groupe SONELGAZ, la demande en électricité augmente presque de 6% par an, donc la consommation d'énergie électrique devient de plus en plus considérable, elle a atteint une puissance de 21 GW en fin 2018[25].

Le marché des Energies Renouvelables (ER) est prometteur et sa promotion est l'un des principaux objectifs de la politique énergétique et environnementale du pays. Dans le cadre de

la construction d'un parc éolien de 10 MW, la région d'Adrar a été choisie comme l'une des meilleures régions en Algérie présentant un potentiel éolien élevé.

Le parc éolien de Kabartene, le premier du genre dans le pays, d'une capacité de 10,2 MW, est implanté sur une superficie de 30 hectares. Il est composé de 12 éoliennes de type Gamesa G52 d'une puissance unitaire de 850 kW.

En 2015, la puissance totale de tous les projets achevés dans le domaine des énergies renouvelables, à l'inclusion des centrales hydroélectriques, a atteint 533 MW, soit 3% de la capacité installée pour la production d'électricité [26].

La même année, le pays a annoncé son intention d'installer environ 22 GW de capacité d'énergie renouvelable d'ici 2030. Il comprendra 1 GW de bioélectricité à partir des déchets, 13,5 GW de solaire photovoltaïque, 2 GW de CSP, 15 MW de géothermie, 400 MW de cogénération et enfin 5 GW d'éolien, comme indiqué dans le tableau 1.1.

Tableau 1. 1- Energie renouvelable : Objectifs de l'Algérie

Sources renouvelables	Première phase 2015-2020	Seconde phase 2021-2030	Total (MW)
Photovoltaïque	3000	10575	13575
Energie éolienne	1010	4000	5010
CSP	-	2000	2000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1000
Géothermie	05	10	15
Total (MW)	4525	17475	22000

1.10.1. LE DEVELOPPEMENT DES CARTES DE VENTS EN ALGERIE

Au milieu des années 80, les seules mesures des paramètres du vent disponibles en l'Algérie étaient rapportées dans les bulletins météorologiques de l'ONM qui donnent les vitesses et les fréquences moyennes des vents pour les différentes stations météorologiques. En 1990, Hammouche a édité " l'atlas de vent de l'Algérie " donnant les résultats de l'étude statistique de 37 stations en utilisant le logiciel Wasp utilisé pour la cartographie éolienne de l'Europe [31]. Les résultats sont donnés sous forme de tableaux regroupant les paramètres annuels de Weibull à 10, 50 et 100 m, les fréquences directionnelles des vitesses pour un pas donné et les vitesses arithmétiques moyennes mensuelles et annuelles.

Pour l'identification des sites favorables au développement de l'exploitation de l'énergie éolienne, plusieurs cartes ont été établies :

la première carte des vitesses vent moyennes disponibles en Algérie a été publiée par Dr N.K. Merzouk en 2000.[1] Les résultats de Hammouche ont été utilisés pour établir la première carte du vent de l'Algérie par Kasbadji-Merzouk, [32]. Cette carte a été améliorée par le même auteur en 1999, en portant le nombre de stations à 46 et en utilisant la distribution hybride de Weibull

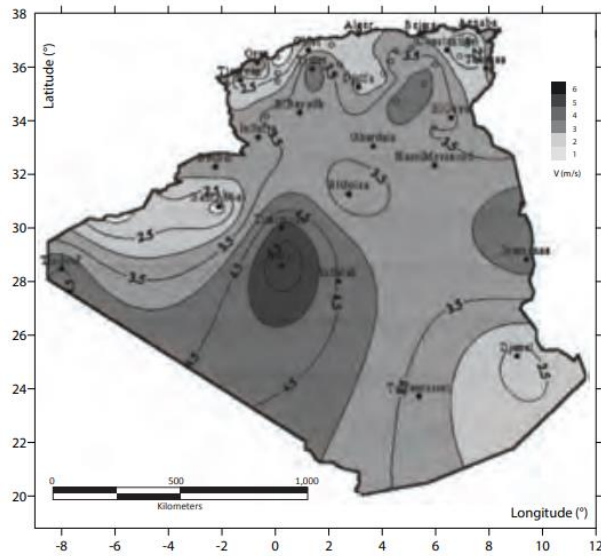


Figure 1. 15- Cartes des vents à 10 m du sol établies en 2000[1]

Enfin un Atlas réalisé à l'aide d'un système d'information géographique a été mis en place en 2006 par le même auteur [36]. La carte proposée est donnée par figure 1.16. En parallèle, le modèle Aiolos a été utilisé pour l'établissement des cartes relatives aux microclimats des régions accidentées en Algérie. Les résultats obtenus ont permis de détecter des zones ventées en Algérie, [34,35]. La carte des vents de l'Algérie, estimée à 10 m du sol est présentée en figure 1.16 Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s.

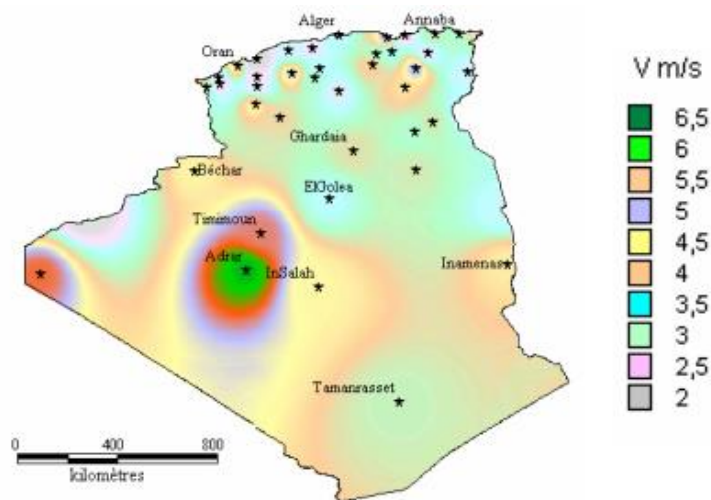


Figure 1. 16- Cartes des vents à 10 m du sol établies en 2006[1]

Nedjari et al. En 2018 a développé la carte de vent en Algérie par augmentation station météorologique est en suit les extrapolée. Toutes ces cartes sont basées sur les données collectées au niveau des stations météorologiques de l'office national de la Météorologie et ont actualisé la carte éolienne de l'Algérie.

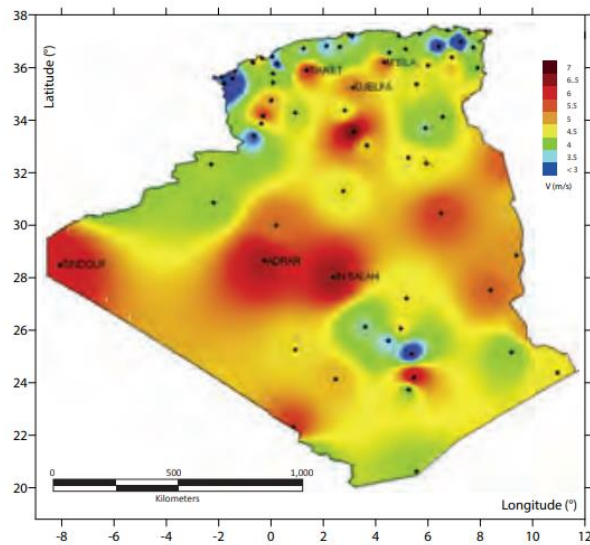


Figure 1. 17- Cartes des vents à 10 m du sol établies en 2018[1]

En 2019, une nouvelle carte indiquant à la fois les vitesses de vent moyennes disponibles et la direction dominante des vents a été établie par S.M Boudia et J.A. Santos. Cette dernière est basée sur des données EraInterim.

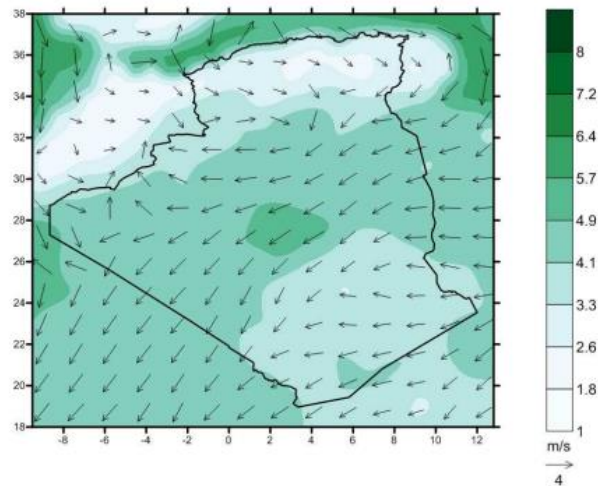


Figure 1. 18- Cartes des vents à 10 m du sol établies en 2019[1]

1.11. CONCLUSION

Le continent africain est doté d'un potentiel énorme d'énergies renouvelables dont l'exploitation est à peine commencée. La position de l'Algérie désormais claire dans le contexte de partenariat internationale suite à la signature de l'accord de paris, l'Algérie doit proposer une production d'énergie renouvelable à hauteur de 30% d'ici 2030. Il existe des opportunités pour l'énergie éolienne principalement dans les sites de littorale, les hauts plateaux, montagne et en Sahara. Des études ont été faites pour l'évaluation de cette ressource à travers l'Algérie.

D'où l'intérêt de notre étude est de comparer les données de logiciel Retscreen avec la donnée real de la ferme Kabertene en Algérie. Et aussi en prend trois modèles des aérogénérateurs pour déterminer la machine selon la production électrique parmi les trois.

CHAPITRE 2

OUTILS D'ANALYSE DES

SYSTEMES D'ENERGIES

RENOUVELABLES

2.1. INTRODUCTION

Les outils comme les logiciels font partie des grandes réalisations concernant ces énergies à promouvoir. De nombreux logiciels existent maintenant pour modéliser, optimiser ou dimensionner les différents systèmes conçus à partir d'énergie renouvelable. Beaucoup de ces logiciels sont spécialisés pour un type d'énergie particulier. Il en existe un bon nombre pour le solaire photovoltaïque ainsi que pour l'énergie éolienne. Les logiciels qui font référence à plusieurs sources d'énergie sont, quant à eux, plus rares [26].

Dans ce chapitre on va se concentrer sur les logiciels de modélisations qui font appel au domaine de l'énergie éolienne. Ces logiciels sont couramment utilisés pour concevoir des systèmes éoliens dans le monde entier.

2.2. NOTION DE BASE

- **Optimisation** : Elle est une démarche qui consiste à rendre optimal le fonctionnement d'un système, en maximisant ou en minimisant des fonctions associées au sens d'un certain critère. En pratique l'optimisation est souvent utilisée pour augmenter la rentabilité ou diminuer les coûts. Avant toute chose, il faut formaliser correctement le problème d'optimisation. Cette formulation passe par 3 étapes fondamentales qui sont la base des données utilisateur des logiciels d'optimisation à savoir i) définir les variables d'optimisation, ii) définir la fonction objective iii) définir les contraintes.
- **Simulation** : Elle est un outil informatique permettant de prédire le comportement d'un projet non encore réalisé. Il peut s'agir du comportement d'un objet physique et de toute structure organisée en quelque domaine que ce soit. En effet elle permet d'étudier les réactions d'un système à différentes contraintes en dispensant de l'expérimentation.
- **Dimensionnement** : l'aspect conception ou dimensionnement est une étape qui consiste à déterminer la taille, la configuration, et le potentiel de production énergétique d'un système en s'appuyant sur le choix de la machine sélectionnée et ses caractéristiques.
- **Modélisation** : Elle est la représentation d'un système par un autre, plus facile à appréhender grâce à un modèle ou une équation mathématique. Il peut s'agir d'un système mathématique ou physique. L'observation du comportement du modèle permet de tirer des enseignements sur le phénomène d'intérêt.

2.3. METHODES D'OPTIMISATION

- **Méthode graphique** : Cette méthode permet la résolution de problèmes linéaires à deux ou trois variables de décision en traçant graphiquement toutes les contraintes. La solution optimale de la fonction objective peut être déterminée par inspection visuelle de la région réalisable. L'inconvénient de cette méthode est qu'il n'est pas possible d'illustrer graphiquement plus de trois dimensions.
- **Méthode itérative** : En mathématique, une méthode itérative est un procédé algorithmique qui utilise une valeur initiale pour générer une séquence d'amélioration de solutions approchées pour un problème d'optimisation. Cette valeur initiale est considérée comme un début de solution, la méthode procède par itérations au cours desquelles elle détermine une succession de solutions approximatives raffinées qui se rapprochent graduellement de la solution cherchée.
- **Méthode probabiliste** : La méthode probabiliste est un type d'échantillonnage où les individus d'une population sont tirés au hasard. La probabilité que le résultat soit d'un certain type est plus que zéro. En effet l'approche probabiliste permet de quantifier la variation et l'incertitude, en principalement utilisant des distributions de probabilités plutôt que des valeurs fixes (Chelbi, 2019).

- **Programmation linéaire:** La programmation linéaire est une technique mathématique utilisée pour déterminer la valeur optimale (maximale ou minimale) d'une fonction à objectif linéaire sous des contraintes ayant la forme d'inéquations linéaires. La méthode du simplexe est parmi les méthodes qui permettent de résoudre le modèle de la programmation linéaire (Maurras, 2022). La méthode heuristique est une méthode de résolution purement algorithmique qui permet d'obtenir une solution approchée, la meilleure possible, dans un délai de temps raisonnable. Quant à la méta-heuristique. Elle est généralement un algorithme stochastique itératif, qui progresse vers un optimum global, par échantillonnage d'une fonction objectif. Cette méthode est souvent inspirée par des systèmes naturels dans de nombreux domaines tels que : la biologie (algorithme génétique) la physique (recuit simulé), et aussi l'éthologie (algorithme de colonie de fourmi) (Taillard,2002) (Layeb,2009).

2.4. OUTILS D'ANALYSE DES ENERGIES RENOUVELABLES

Les systèmes éoliens ont été développés et ces outils aussi. Il existe des outils pour simuler et optimiser les systèmes d'énergies hybrides comme HOMER, iHOGA d'autres pour évaluer la production énergétique et mener une étude de faisabilité économique (RETScreen, SAM) ou pour analyser et planifier les systèmes (EnergyPLAN, windPRO), certains sont destinés à l'industrie (Heliciel, Aria Wind, Mecaflex), certains sont développés pour la surveillance et le contrôle des systèmes installés (Dewesoft, SKYVIEW) ou encore pour l'évaluation de site (WAsP) et finalement, il existe des outils disponibles en ligne, facilement accessibles tel que (WindTunnel). [27]

Les critères de sélection pour choisir des logiciels sont basées sur :

- ✚ Disponibilité : accessible sur internet, gratuit, facile à utiliser et documentation en ligne
- ✚ Langue : Il faut que ces logiciels soient d'une langue compréhensible par tout le monde comme l'anglais par exemple
- ✚ Variété des scénarios possibles : Vu le sujet de la recherche, le logiciel support la simulation des systèmes hors réseau et connectés au réseau qui est l'objet de cette étude
- ✚ Etude économique : l'outil de simulation doit permettre une évaluation du coût de la production d'énergie renouvelable.
- ✚ Base de données météorologique : logiciel intègre une base de données météorologique pour les sites à étudier
- ✚ Optimisation énergétique : le logiciel doit capable optimiser les systèmes énergétiques et d'offrir des solutions les plus performantes

Dans ce qui suit on va discuter sur les logiciels concernant l'énergie éolienne tels que IPSYS, ARES, iHOGA, HOMER, Hybrid2, et enfin RETScreen qui est le logiciel qu'on a choisi pour notre étude.

2.4.1. IPSYS

IPSYS "Integrated Power System"– NREL (États-Unis), il est utilisé pour la simulation des systèmes hybride pour la production d'électricité via PV (photovoltaïques), éolienne, générateur diesel, batteries, hydraulique, pile à combustible ainsi que turbine à gaz.[33]

2.4.2. ARES

ARES « Autonomous Renewable Energy Systems » est un outil développé par Cardiff School of Engineering, Royaume-Uni pour la simulation des systèmes PV – éolien – batterie. Ce logiciel est capable de calculer la probabilité de perte de charge et l'autonomie du système, et ce, grâce à

la prédiction de la tension de la batterie de stockage sous réserve de fournir la charge d'entrée et le profil météorologique. Le logiciel existe en deux versions : ARES-I et ARES-II [34].

ARES-I, est composé de sous-programme suivant :

- Statistiques météorologiques
- Production photovoltaïque
- Production éolienne
- Calcul de la charge,
- Source et courant de charge combinés
- Tension de batterie,
- Action du contrôleur,
- Présentation des résultats.

ARES-II exige comme entrées la charge et de profil météorologique, il estime la probabilité de perte de charge et l'autonomie du système à l'aide de la prévision de la tension de la batterie de stockage.

2.4.3. iHOGA

(Hybrid Optimization by Genetic Algorithm) est un logiciel d'optimisation développé par l'Université de Zaragoza, Espagne, et disponible seulement en espagnole.

Ce logiciel permet de dimensionner d'une manière optimale un système d'énergie hybride composé d'un PV, d'une éolienne, d'une pile à combustible, d'un système de stockage, ainsi que d'un système de génération à base de combustible fossile, etc.

Il utilise l'optimisation mono-objectif et multi-objectif via l'algorithme génétique. iHOGA permet de calculer les émissions du cycle de vie, d'analyser l'achat et la vente d'énergie au réseau électrique.[33]

2.4.4. HOMER

HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable) est un logiciel développé NREL (US National Renewable Energy Laboratory). Il permet de faire des simulations des systèmes hybrides combinant différentes sources d'énergie qu'elle soit renouvelable ou fossile, ensuite optimiser les systèmes et pour finalement terminer avec des analyses de sensibilité sur ces systèmes optimisés.

La solution obtenue par HOMER est la solution la moins coûteuse parmi différentes combinaisons de systèmes d'énergies renouvelables, d'énergies fossiles ou de systèmes hybrides comprenant deux sources d'énergie ou plus [28]

2.4.5. HYBRID 2

Il est à la fois conçu par National Renewable Energy Laboratory (NREL) et Renewable Energy Research Laboratory (RERL) de l'Université du Massachusetts, USA. HYBRID 2 est un logiciel permettant d'effectuer des performances détaillées à long terme et une analyse économique sur une grande variété de systèmes d'alimentation hybrides. Il est un modèle informatique probabiliste/chronologiques, utilisant des données de séries chronologiques pour les charges, la vitesse du vent, l'irradiation solaire, la température et le système d'alimentation conçu afin de prédire les performances du système d'alimentation hybride.[29]

2.4.6. RETSCREEN

Le logiciel d'analyse de projets d'énergies renouvelables RETScreen (CANMET -LRDÉC) de Ressources naturelles Canada, apporte une solution rapide, simple et complète pour tout projet d'implantation de centrale d'énergie renouvelable. En plus, l'utilisation de RETScreen est

rentable car il simplifie et accélère la réalisation de l'étude de faisabilité avant toute implantation de projet d'énergie renouvelable. Chaque projet est développé à l'aide de six pavés de calcul dont on retrouve les rubriques suivantes :

1. Modèle énergétique RETScreen
2. Caractéristiques des Équipements RETScreen
3. Analyse des Coûts RETScreen
4. Analyse des GES (Gaz à Effet de Serre)
5. Sommaire financier Analyse de coûts Equipement

Le modèle pour énergie éolienne du RETScreen couvre également les applications éoliennes hors réseau et comprend également des systèmes autonomes, hybrides et de pompage d'eau. Il possède une base de données mondiale sur les données climatiques de plus de 6000 stations au sol, des cartes de ressources éoliennes, des données hydrologiques, ressource solaire, des données de produits comme les détails des panneaux solaires photovoltaïques et les courbes de puissance des éoliennes. Il fournit également un lien vers les bases de données climatiques de la NASA.

Les avantages et les inconvénients de ces outils vont être abordés dans la section suivante sous forme des points saillants illustrés dans des tableaux. [30, 31]

Tableau 2. 1- Paramètres d'entrées et de sorties des logiciels

Outil	Entrée	Paramètre	Sortie
RETScreen	– Caractéristique système	du	– Analyse d'énergie
	– Paramètres pour évaluation économique	pour	– Analyse de risque ou sensibilité
	– Données climatique		– Analyse du coût
			– Analyse des émissions
			– Analyse financière
Ihoga	– Contraintes		– Optimisation Multi objective
	– Resource data		– Cycle de vie
	– Composants data		– Analyse achat/ vente d'énergie
	– Données économiques		
HYBRID 2	– Courbe de charge		– Analyse technique
	– Ressources		– Dimensionnement optimal
	– Détail des composants du SMS	des	– Evaluation financière
	– Données financières		
HOMER	– Profil de la charge		– Dimensionnement
	– Coût des composants		– Coût de l'énergie
	– Irradiation solaire et vitesse du vent	et	– Coût d'investissement
	– Donnée d'émission		– Capacité de stockage
	– Ressources d'énergie		– Energie excédentaire et Fraction d'énergie renouvelable
	– Contraintes		– Consommation de carburant

Les points les plus appropriés, la plateforme et le type d'analyse des cinq outils sont indiqués dans le tableau 2.2 ci-dessous.[32]

Tableau 2. 2- Plateforme et le type d'analyse des outils

Outils d'analyse	Plateforme	Type d'analyse	Méthodologie
RETScreen	Excel, Visual Basic, C	– Financière – Environnementale	Simulation
iHOGA	C++	– Emission de cycle de vie – Analyse des Achat-vente – Production d'énergie	Optimisation heuristique
HYBRID 2	Visual Basic	– Technique – Economique	Statistique et probabiliste
HOMER	Visual C++	– Technique – Economique – Environnementale	Simulation et optimisation

2.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a présenté les différents outils d'analyse des énergies renouvelables qui permettent soit de simuler, d'optimiser, de dimensionner ou les trois fonctions à la fois. Ces outils sont destinés à estimer une certaine configuration du système énergétique et prédire le comportement de ses paramètres clés. RETSCREEN est parmi les outils les plus utilisés dans l'analyse des énergies renouvelables à travers le monde. Ce logiciel est utilisé pour calculer la production énergétique et mener une étude de faisabilité économique de projets de l'énergie renouvelable et effectuer une analyse des émissions des gaz à effet de serre.

CHAPITRE 3

MODELISATION

3.1. INTRODUCTION

La principale étape pour les applications éoliennes (offshore ou onshore) consiste à connaître localement la nature des vents du lieu où l'on souhaite implanter des machines éoliennes. D'autre part, les données du vent permettent de définir le potentiel du site ainsi que la nature des éoliennes à utiliser et leur répartition optimale. Dans le présent chapitre nous allons donner les définitions de base permettant d'estimer le potentiel énergétique d'éolien d'un site et présenter certains modèles d'extrapolation utilisées afin de choisir le modèle optimal pour bien déterminer le potentiel onshore à une hauteur désirée.

Les génératrices étant prévues pour tourner plus vite que les rotors d'éoliennes, la transmission se fait alors à travers un multiplicateur de vitesse qui a pour rôle de démultiplier la vitesse de rotation, dans le but d'obtenir une vitesse suffisamment importante pour la génératrice. Certains constructeurs ont mis au point des modèles qui fonctionnent avec des génératrices à basse vitesse qui ne nécessitent pas de multiplicateur. La génératrice délivre alors un courant électrique qui est ensuite stockée dans des batteries pour les plus petits modèles d'éoliennes ou transféré sur le réseau électrique pour les autres.

Les génératrices étant prévues pour tourner plus vite que les rotors d'éoliennes, la transmission se fait alors à travers un multiplicateur de vitesse qui a pour rôle de démultiplier la vitesse de rotation, dans le but d'obtenir une vitesse suffisamment importante pour la génératrice. Certains constructeurs ont mis au point des modèles qui fonctionnent avec des génératrices à basse vitesse qui ne nécessitent pas de multiplicateur. La génératrice délivre alors un courant électrique qui est ensuite stockée dans des batteries pour les plus petits modèles d'éoliennes ou transféré sur le réseau électrique pour les autres.

3.2. MATERIELS ET METHODES

3.2.1. CARACTERISTIQUES DU SITE D'ADRAR

Situé à proximité d'un poste électrique de Sonelgaz (nœud) et à environ 73 km au nord de la ville d'Adrar, ce site se trouve à une altitude d'environ 260 m et a pour coordonnées géographiques 28°27' 7.44 N 0°02' 59.08 W. Le parc éolien de Kabartene contenant 12 éoliennes Gamesa G52-850 avec une hauteur de moyeu de 55 m, un diamètre de rotor de 52 m, et 0,85 MW de puissance nominale. Les éoliennes sont distantes de 200 m (presque 4 diamètres de rotor) les unes des autres et sont alignées sur une seule rangée selon la direction dominante nord-est, comme le montre la Fig. 19



Figure 3-1- Parc éolien de Kabartene dans la région d'Adrar

Algérie Différents facteurs ont été pris en compte pour choisir ce site pour la construction d'une ferme éolienne, notamment : l'altitude, les obstacles, la direction des vents, le réseau électrique de distribution, la superficie disponible, la géographie et la géomorphologie (qualité des sols,

topographie), les possibilités d'accès, l'axe routier menant à la prochaine ville portuaire, ainsi que les éléments réglementaires tels que l'éloignement suffisant par rapport au plan d'extension de la ville, aux radars et à l'aéroport. Ces facteurs ont été minutieusement étudiés pour optimiser le choix du site, en comparant notamment le potentiel éolien avec les coûts de construction du parc sur cet emplacement.[36]

3.2.2. DONNEES VENTS UTILISES

Les données vents utilisés sont citées au tableau 3.1 et 3.2.

Tableau 3. 1– Vitesse Moyenne maximal et minimal du site de 2014 à 2017.

Année	2014	2015	2016	2017
Vmoy(max) m/s	10.76	10.57	11.2	11.41
Vmoy(min) m/s	0.275	0.45	0.316	0.25

Tableau 3.2– Vitesses de vents moyenne pour chaque mois [ref]

Mois	Vmoy(m/s) 2014	Vmoy(m/s) 2015	Vmoy(m/s) 2016	Vmoy(m/s) 2017
Janvier	4.2	4.1	3.8	3.9
Février	4.3	4.2	4.0	4.4
Mars	4.6	4.9	4.4	4.6
Avril	5.0	4.1	4.3	4.8
Mai	4.9	4.7	5.0	4.7
Juin	4.7	5.4	4.9	4.9
Juillet	4.0	5.3	5.1	5.6
Août	4.8	4.5	5.2	5.0
Septembre	3.4	4.0	3.8	4.7
Octobre	4.6	3.6	4.2	5.1
Novembre	4.2	5.1	4.4	3.8
Décembre	4.3	5.2	5.4	5.2

3.2.3. LOGICIEL UTILISE

RETScreen est un outil d'analyse des énergies renouvelables qui est recommandé par les programmes d'incitatifs liés aux énergies propres de nombreux gouvernements, organisations internationales et services publics [37]. Il est utilisé pour réaliser l'étude de faisabilité et l'analyse économique des projets d'énergie renouvelable. Dans ce travail, seule la partie énergie éolienne de ce modèle RETScreen est appliquée et les données de vent sont analysées en introduisant les vitesses moyennes annuelles et mensuelles du vent pour évaluer la production d'énergie (E_{out}) et le facteur de capacité (C_f) d'un parc éolien installé.

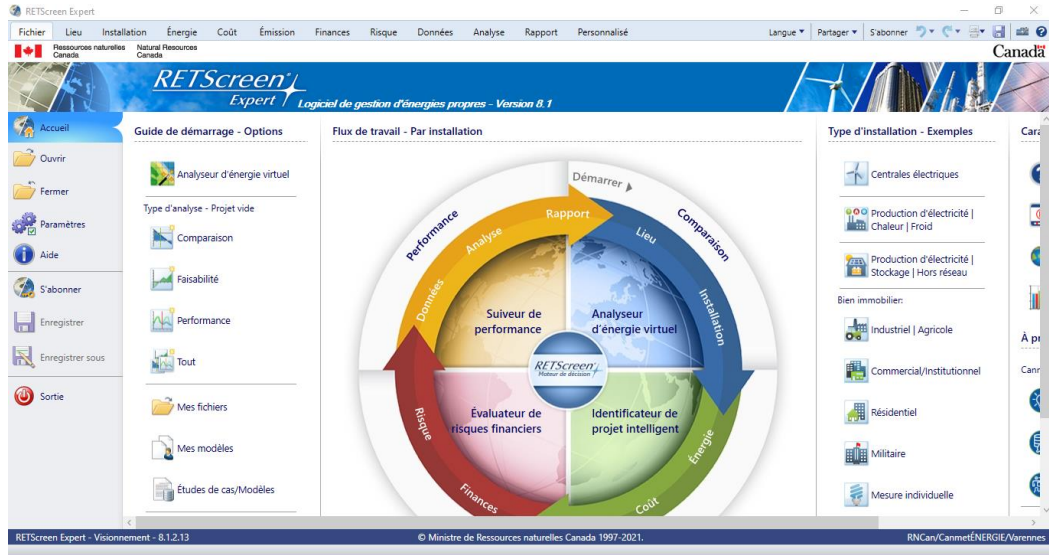


Figure 3. 2- Interface du logiciel RETScreen

3.3. MODELISATION DU VENT

3.3.1. PUISSANCE EOLIENNE PRODUITE

On peut écrire la puissance utilisable selon la forme suivante

$$P_{um} = \frac{1}{2} \rho A V_{um}^3 \dots\dots 1$$

Ce dernier peut être décomposée selon les conditions de fonctionnement de l'éolienne :

$$P_{um} = \frac{1}{2} \rho A V_{um}^3 = \begin{cases} 0 & \text{pour } V < V_d \\ \frac{1}{2} \rho A V_m^3 & \text{pour } V_d \leq V \leq V_n \\ \frac{1}{2} \rho A V_n^3 & \text{pour } V_n \leq V \leq V_a \\ 0 & \text{pour } V \geq V_a \end{cases} \dots\dots 2$$

V_d : la vitesse de démarrage ;

V_n : la vitesse nominale ;

V_a : la vitesse d'arrêt ;

V_{um}^3 : la vitesse moyenne utile cubique.

Avec :

$$V_{um}^3 = \left[\Gamma_n \left(\left(\frac{V_n}{c} \right)^k, 1 + \frac{3}{k} \right) - \Gamma_n \left(\left(\frac{V_d}{c} \right)^k, 1 + \frac{3}{k} \right) \right] V_m^3 + V_n^3 \left[\exp \left(- \left(\frac{V_n}{c} \right)^k \right) - \exp \left(- \left(\frac{V_a}{c} \right)^k \right) \right] \dots\dots 3$$

$$\Gamma_n(x, a) = \frac{\Gamma(x, a)}{\Gamma(x)} \dots\dots 4$$

La vitesse cubique moyenne est donnée par :

$$V_m^3 = \int_0^\infty V^3 f(V) dV \dots\dots 5$$

la vitesse est obtenue après intégration sous la forme suivante :

$$V_m^3 = C^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \dots\dots 6$$

Puissance utile

La puissance éolienne utile s'écrit :

$$P_{uti,m} = \eta P_{um} \dots\dots 7$$

η : Représente le rendement mécanique-électrique de la machine

3.3.2. DISTRIBUTION DE LA VITESSE DU VENT

La distribution de la vitesse du vent, est calculée comme une fonction de la densité de probabilité de Weibull. Cette distribution est souvent utilisée en génie énergétique éolien, car elle correspond bien à la distribution des vitesses du vent, observée à long terme sur un grand nombre de sites.

Dans certains cas, le modèle utilise également la distribution de Rayleigh de la vitesse du vent, qui est un cas particulier de la distribution de Weibull, avec un facteur de forme (décrit ci-dessous) égal à 2.

La fonction de la densité de probabilité de Weibull représente la probabilité $p(v)$ d'avoir une vitesse du vent v pendant l'année, comme le montre l'expression suivante (Hiester et Pennell, 1981) : [40]

$$p(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \dots\dots 8$$

Cette expression est valable pour un facteur de forme $k > 1$, une vitesse du vent $v \geq 0$ et un facteur d'échelle $C > 0$. Le facteur de forme k est spécifié par l'utilisateur. De façon générale le facteur de forme est compris entre 1 et 3. Pour une vitesse moyenne du vent donnée, un faible facteur de forme indique que la distribution des vitesses du vent est relativement large de part et d'autre de la moyenne, alors qu'un facteur de forme élevé indique que la distribution des vitesses du vent est relativement étroite de part et d'autre de la moyenne.

Pour une vitesse moyenne du vent donnée, un faible facteur de forme conduira normalement à une production d'énergie plus élevée. C'est le facteur d'échelle, calculé à partir de l'équation suivante (Hiester et Pennell, 1981) : [40]

$$C = \frac{v}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \dots\dots 9$$

Comme les données de vitesse du vent mesurées ne sont pas disponibles à la hauteur du moyeu des éoliennes choisies, elles ont été extrapolées à l'aide de l'équation ci-dessous:

$$v_{hauteur\ du\ mât} = v_{10} \cdot \left(\frac{h_{hauteur\ du\ mât}}{10}\right)^\alpha \dots\dots 10$$

Où $v_{hauteur\ du\ mât}$ est la vitesse du vent à la hauteur du moyeu de l'éolienne

α est l'exposant de cisaillement du vent

L'équation (10) est universellement utilisée pour extrapoler la vitesse du vent à des hauteurs plus élevées. Les mesures du vent à la hauteur du moyeu ne sont généralement pas effectuées et les études de faisabilité sont basées sur l'extrapolation. Un coefficient de cisaillement du vent de 0,14 a été utilisé pour déterminer la vitesse du vent à la hauteur du moyeu de l'éolienne.

3.4. METHODE D'ANALYSE DE LA PUISSANCE UTILE SELON RETSCREEN

La faisabilité d'un projet selon Retscreen est évaluée à partir du rendement énergétique et du facteur de capacité. Le modèle utilise l'équation suivante pour calculer ces paramètres :

$$E_{out} = E_u \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot (1 - \lambda_{sillage}) \cdot (1 - \lambda_{autres\ arrêts}) \cdot (1 - \lambda_{encrassement\ des\ pales}) \cdot (1 - \lambda_{diverses}) \dots\dots 11$$

$$C_f = \frac{E_c}{P_r \cdot 8760} \dots\dots 12$$

Où $\lambda_{sillage}$, $\lambda_{autres\ arrêts}$, $\lambda_{encrassement\ des\ pales/verglas}$ et $\lambda_{diverses}$ sont respectivement les pertes par effet de sillage, les autres pertes et causes d'arrêts les pertes par encrassement des pales et/ou verglas , les pertes diverses. Les valeurs des autres paramètres sont les suivantes :

P_0 :101.3 kPa (pression atmosphérique standard)

P:pression atmosphérique moyenne annuelle

T_0 : 288.1 K (température absolue standard)

T: température absolue moyenne annuelle

L'algorithme d'analyse d'optimisation du RETScreen est résumé dans la Fig.21

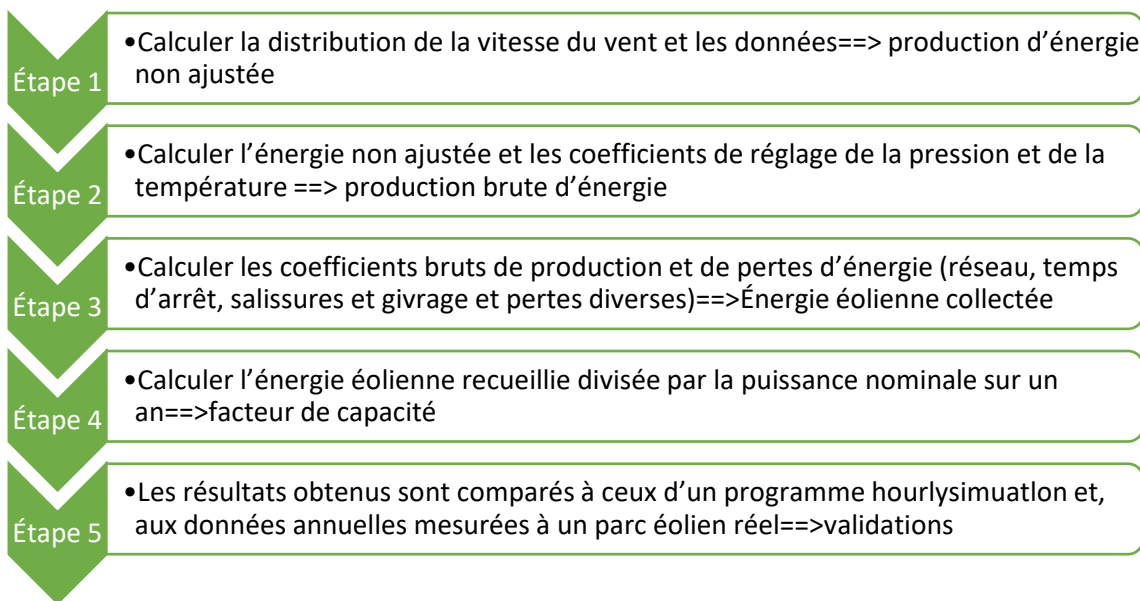


Figure 3. 3- Algorithme d'optimisation du RETScreen

Enfin le modèle RETScreen est utilisé pour comparer la production électrique avec les données d'un parc éolien réel de Kabartene situé dans la région d'Adrar (Algérie).

3.5. SELECTION DE L'EOLIENNE OPTIMALE

Le choix optimal d'une éolienne destinée à un site doit être basé sur la connaissance des caractéristiques de vent du site où ce système va être implanté. Ces caractéristiques interviennent en effet sur le type d'utilisation et sur le choix des machines (puissance nominale, vitesse de démarrage, vitesse nominale, vitesse d'arrêt, etc.). La puissance d'éolienne est proportionnelle au

produit de la densité de l'air ρ , à la surface balayée $A_{balayée}$, au cube de la vitesse du vent v et au coefficient de puissance C_{pmax} . Mathématiquement, la formule peut être exprimée comme suit:

$$P_{éolienne} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{p \max} \cdot A_{balayée} \cdot v^3 \dots\dots 13$$

La quantité d'énergie produite dépend directement de la vitesse moyenne du vent, de la surface balayée par le rotor et de la densité de l'air.

- Vitesse du vent élevée : La vitesse du vent augmente avec la hauteur au-dessus du sol, ce qui signifie que plus la hauteur du moyeu est élevée, plus la production d'énergie est importante.
- Grande surface balayée : Plus la surface balayée est grande, plus la puissance du vent est importante, ce qui nécessite un rotor de plus grand diamètre.
- Densité de l'air plus élevée : Les éoliennes installées dans des zones où la densité de l'air est plus élevée peuvent produire plus d'énergie.

3.6. CARACTERISTIQUES DES EOLIENNES

Dans le présent travail, le choix de l'éolienne est effectué en fonction des classes de vents IEC, du diamètre du rotor, de la hauteur du moyeu et des caractéristiques de la vitesse du vent, telles que la vitesse nominale et la vitesse de démarrage.

La vitesse nominale de l'éolienne peut être estimée à l'aide de l'équation suivante [41] :

$$V_{nominale} = 1.65 \cdot v_{moyenne} \dots\dots 14$$

Où $V_{nominale}$ est la vitesse nominale du vent et $V_{moyenne}$ est la vitesse moyenne du vent.

L'Association européenne de l'énergie éolienne a présenté l'équation empirique suivante pour l'estimation de la hauteur de moyeu $h_{hauteur \ de \ moyeu}$ d'une éolienne avec un diamètre de rotor de D :

$$h_{hauteur \ de \ moyeu} = 2.7936 \times D^{0.7663} \dots\dots 15$$

3.7. CONCLUSION

L'extrapolation des données a permis de déterminer le potentiel du vent au niveau de l'aérogénérateur choisi. Enfin la puissance utilisable et le secteur dominant ont été développés

CHAPITRE 4
RESULTATS ET
DISCUSSION

4.1. INTRODUCTION

Adrar est l'une des meilleures régions d'Algérie avec très fort vent et une très forte chaleur presque toute l'année. Elle devient une région pionnière pour l'exploitation de l'électricité renouvelable. La plupart des projets d'énergie renouvelable en Algérie devraient être mis en œuvre au Sahara. Jusqu'à présent, l'évolution de l'énergie éolienne en Algérie reste faible, avec une seule centrale éolienne connectée au réseau électrique à Adrar. Dans cette région la vitesse de vent atteint 6 m/s à 10 m au-dessus du sol. Cette vitesse de vent est adéquate pour le fonctionnement des éoliennes. Afin d'optimiser l'exploitation d'un parc éolien, certaines mesures doivent être prises en considération, notamment :

- Sélection du site présentant un potentiel éolien intéressant
- Choix optimal d'un système éolien destiné à couvrir en totalité ou partiellement les besoins énergétiques d'un site
- Implantation optimale du parc éolien, etc.

En effet, un choix inapproprié de certains paramètres pourrait être préjudiciable à un parc éolien [46]. Ainsi, une phase d'étude préliminaire est d'une grande importance dans la mesure où elle permet d'identifier les conditions et les contraintes à prendre en compte dans la réalisation d'un projet de parc éolien. L'étude de faisabilité d'un parc éolien, avant sa mise en œuvre, portant sur les caractéristiques du vent, la production d'énergie, le coût de l'énergie et la prédiction de la disponibilité de l'énergie dans le domaine temporel futur est essentielle. Ceci peut être réalisé par la simulation de parcs éoliens à l'aide du modèle. Seules quelques études traitant de la validation de l'analyse des énergies propres en comparant la production réelle d'énergie éolienne avec celle estimée ; comme le logiciel RETScreen.

Ce travail vise à analyser les données de vent ainsi que l'énergie produite par le parc éolien de Kabartene et à étudier la faisabilité de ce parc éolien en termes de performance électrique, à savoir la production d'énergie électrique et le facteur de capacité.

Cette partie est organisée comme suit : la section 2 présente les matériels et méthodes. La section 3 est consacrée à l'interprétation des résultats et discussions. La dernière, section 4, présente la conclusion.

4.2. ANALYSE DES DONNEES VENT

Pour cette étude, les données utilisées, de la vitesse du vent ont été recueillies sur le site éolien sur une période de 4 ans 2014 -2017. Les mesures de la vitesse du vent sont effectuées à 10 m au-dessus du sol et extrapolées à différentes hauteurs de moyeu de 55, 68,5 et 105 m.

La figure 4.1 représente le profil vertical de cisaillement du vent pour les hauteurs de 10 m et 55, 68,5 et 105 m.

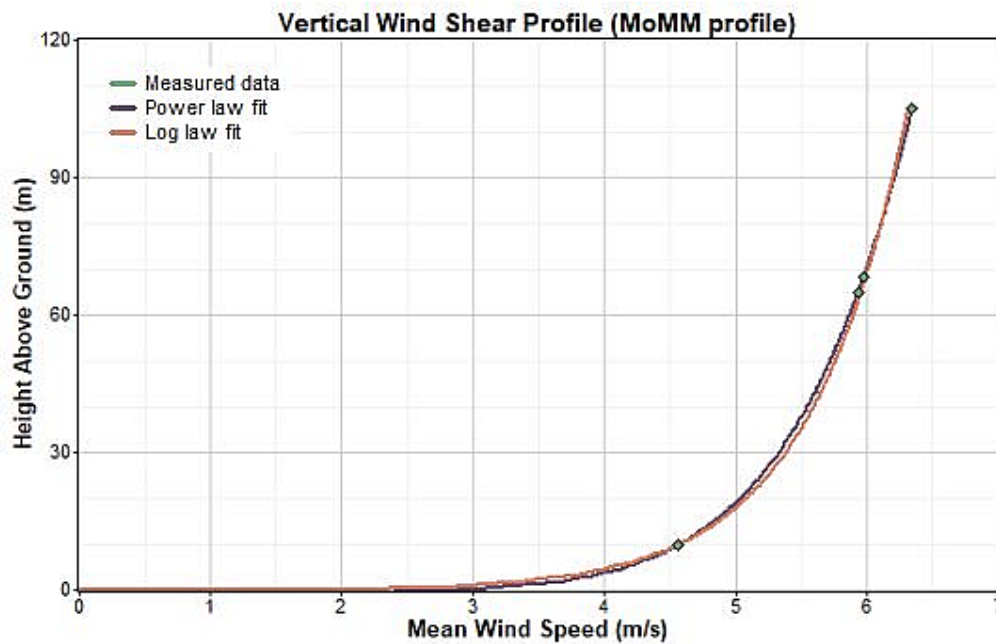


Figure 4.1- Profil de cisaillement vertical du vent en fonction de la vitesse moyenne du vent pour le site de Kabertene

Comme on peut le voir sur la figure 4.1, le profil de cisaillement vertical du vent obtenu à l'aide des ajustements de la loi de puissance et de la loi logarithmique (dans le cas du sable, la longueur de rugosité $z_0=0,005$) suit la même tendance que les données mesurées.

4.2.1. VARIATION ANNUELLE ET MENSUELLE DE LA VITESSE DU VENT

Les données relatives aux vitesses moyennes mensuelles du vent à différentes hauteurs de moyeu (10, 55, 68,5 et 105 m) sont illustrées à la figure 4.2. La vitesse moyenne mensuelle du vent est supérieure à 5 m/s à toutes les hauteurs, sauf à 10 m.

En figure 4.2, sont tracés l'évolution mensuelles de la vitesse du vent aux altitudes de 55, 68,5 et 105 m. On voit que les courbes de variation de la vitesse moyenne mensuelle varient en fonction des hauteurs selon les mois, mais suivent la même tendance que celle à 10 m.

Les vitesses moyennes annuelles du vent à 10, 55, 68,5 et 105 m pour Kabartene sont respectivement de 4,57, 5,93, 5,97 et 6,34 m/s.

Le profil diurne de la vitesse du vent aux hauteurs respectives pour le site du parc éolien de Kabartene est illustré à la figure 4.3.

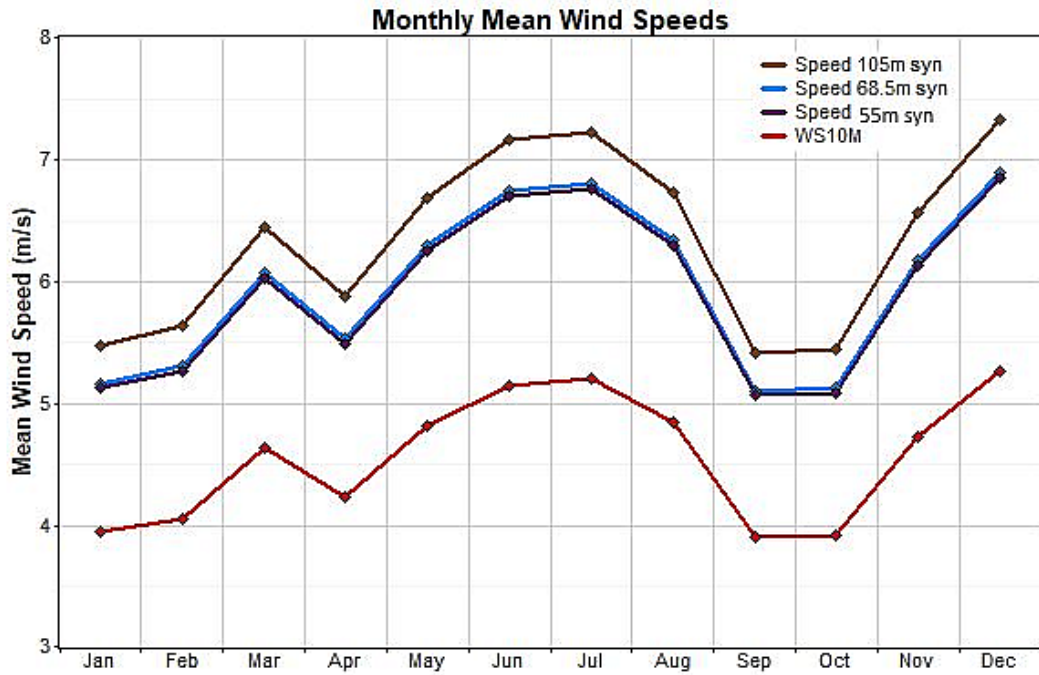


Figure 4.2- Variation mensuelle de la vitesse moyenne du vent à différentes hauteurs pour le site de Kabartene.

Les vitesses moyennes diurnes du vent à 10m sont de l'ordre de 5m/s entre 09h00 et 17h00 tandis elles sont faibles pendant le reste de la journée. Pour les autres hauteurs, la vitesse du vent est supérieure à 5 m/s pendant toute la journée.

Le cycle mensuel et diurne de la vitesse moyenne du vent semble convenir à la charge. Les vitesses de vent les plus élevées ont été observées durant les mois d'été et pendant la journée entre 06h00 et 18h00 ;

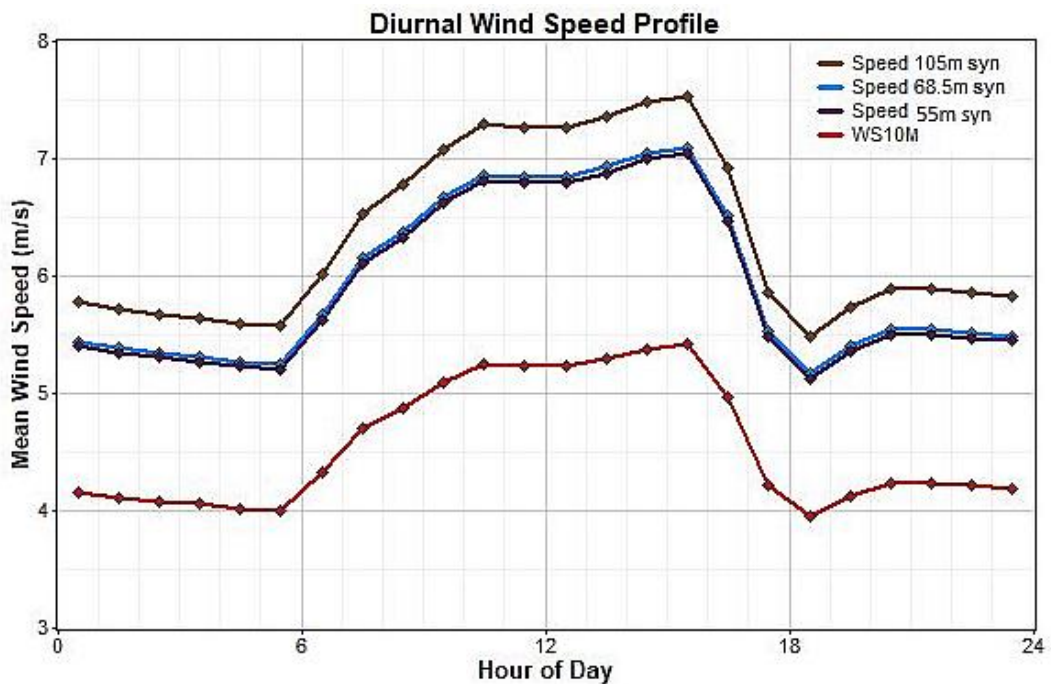


Figure 4.3- Variation diurne de la vitesse du vent à Kabartene.

4.2.2. ROSE DES VENTS

Le diagramme de la rose des vents pour le site de Kabartene est fourni à la Fig.25.

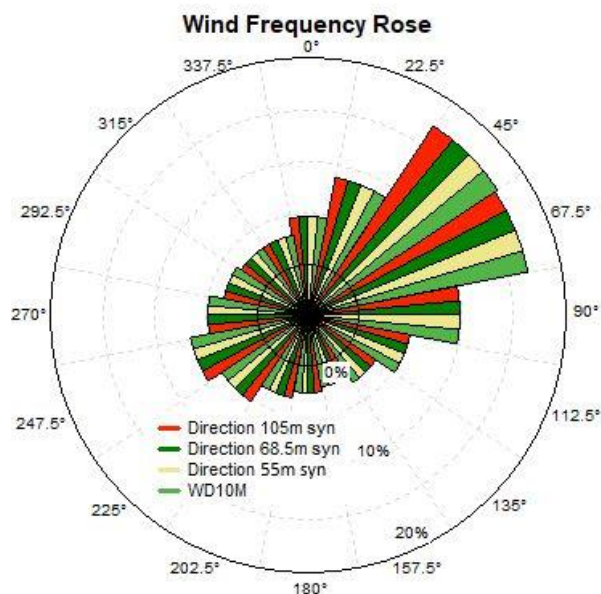


Figure 4.4- Diagramme de la rose des vents saisonnière pour le site de Kabartene.

On a remarqué que la direction du vent dominant se situait approximativement entre les secteurs 45° et 67.5° pour toutes les hauteurs (10, 55, 68,5 et 105m). Cela signifie que la direction du vent prédominante est celle du nord-est. Par conséquent, les éoliennes doivent être installées face cette direction pour un rendement énergétique optimal

4.2.3. ANALYSE DES VENTS DE SABLE

Le vent du sable est un aspect important à prendre en compte lors du choix d'une éolienne. Ce phénomène a un impact direct sur les composants mécaniques de l'éolienne. Il peut être atténué soit par un filtre, soit par le choix d'une éolienne sans multiplicateur.

Dans les régions du sud de l'Algérie, le climat est généralement aride, caractérisé par une température élevée et une sécheresse toute l'année. Ceci contribue à l'aridité des régions d'Adrar-Reggane-In Salah qui sont appelées la "zone du triangle de feu".

Les journées d'été sont longues et ensoleillées, avec une chaleur torride et des vents secs provenant du désert du sud du pays. Ces vents du sud (sirocco) sont souvent chargés de fines particules de sable ou de poussière. Ces vents sont plus fréquents du printemps à l'automne.

Les vents de sable sont classés en trois catégories selon ses critères :

1. Tempête de sable (TS) définie par une vitesse de vent le plus souvent supérieure ou égale à 16m/s, et un mode de transport des particules s'effectuant généralement par "saltation".
2. Chasse sable (CS) formée par de la poussière ou du sable soulevé du sol à faible hauteur, via un tourbillon.
3. Brume de sable (BS) est le résultat d'un soulèvement de particules beaucoup plus petites que des grains de sable, qui sont transportées, très haut, par "suspension-déposition".

En figure 4.5 sont tracés les histogrammes de l'occurrence des vents de sable dans les régions concernées sur une période d'observation de six mois de l'année **2008**. On remarque que seul le mois de décembre, janvier et juin présentent des journées avec des vent de sable importants. Par ailleurs, les brumes de sable dont les particules montent très haut sont les seuls qui peuvent

endommager les éoliennes. Le nombre de jours avec ce type de vent de sable est de cinq jours sur une période de six mois, ce qui représente un ratio de 2,7% (soit 10 jours/an). Ce qui est faible et indique que les éoliennes installées à Kabertene ne sont pas affectées par les vents de sable. Par conséquent l'effet des vents de sable sur le site de Karbetne est très faible.

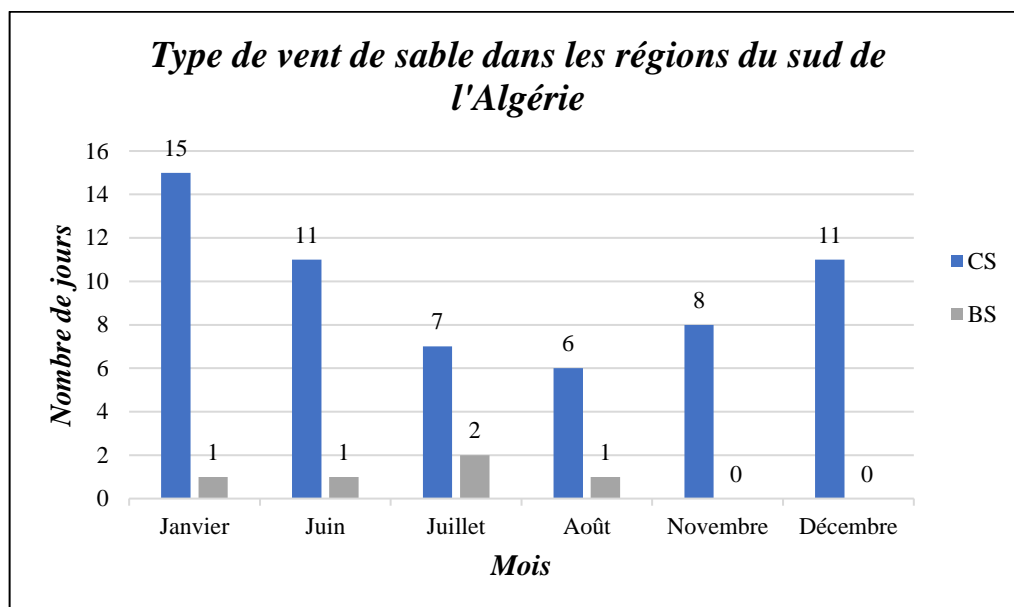


Figure 4.5- Type de vent de sable dans les régions du sud de l'Algérie

4.2.4. EFFET DE LA TEMPERATURE AMBIANTE

Lorsque les températures sont élevées, les éoliennes sont automatiquement arrêtées afin de protéger leurs composants mécaniques et électriques contre les dommages causés par tous les aspects naturels dangereux pendant leur durée de vie. La norme internationale IEC 61400-1 définit les exigences de conception pour toutes les tailles d'éoliennes. La plage de température extrême pour les classes standard d'éoliennes. Doit être comprise entre -20°C et +50°C [47].

A. La température moyenne mensuelle du site

Tableau 4. 1- Température ambiante du site KABERTENE

Mois	Ta[moy]	Ta[min]	Ta[max]
Janvier	12.8	1.4	25.0
Février	15.9	3.8	30.2
Mars	20.8	6.7	36.9
Avril	25.4	11.7	39.3
Mai	30.4	17.1	43.2
Juin	34.9	22.8	47.0
Juillet	38.2	27.0	48.6
Août	37.2	26.2	47.0
Septembre	33.2	21.1	45.3
Octobre	26.9	15.4	39.7
Novembre	18.8	5.6	33.7
Décembre	13.9	1.5	27.8

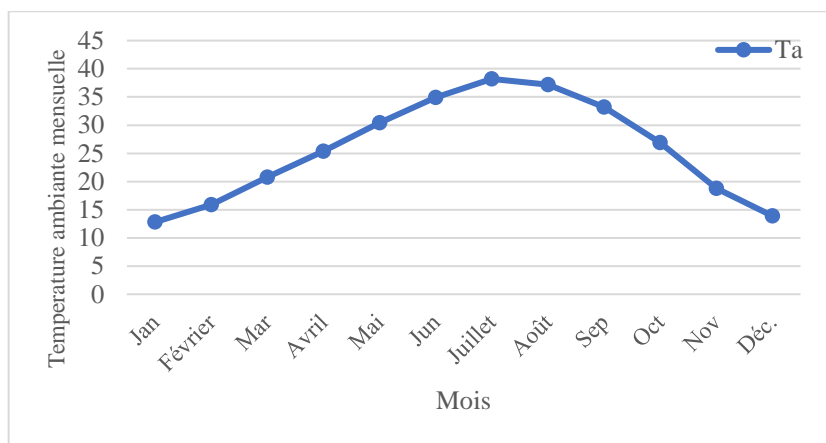


Figure 4.6- Variation de la température ambiante pendant l'année

4.3. EOLIENNES ETUDIEES

4.3.1. Choix des éoliennes selon les classes de vent

Au tableau 4.2 est donné les classes de vent selon la norme IEC61400-1. Comme mentionné précédemment, les vitesses moyennes annuelles du vent varient de 5,93 m/s à 6,34 m/s pour des hauteurs respectives allant de 55-105 m.

Selon les valeurs de la vitesse moyenne annuelle du vent au site de Kabartene, il peut être classé comme site de classe II ou III.

Deux éoliennes ont été sélectionnées de la bibliothèque de RETScreen pour analyser le site de Kabartene qui est considéré comme un site de vitesses de vent faible à modéré, selon la norme IEC61400-1 (voir Tableau 4.2).

Tableau 4. 2- IEC 61400-1 relatif aux classes de vent

	Classes de vents <i>IEC 61400-1</i>			
	I (vent fort)	II (vent moyen)	III (vent faible)	IV (vent très faible)
Vitesse du vent de référence $v_{reference}$ (m/s)	50	42.5	37.5	30
Vitesse moyenne annuelle du vent $v_{average}$ (m/s)	10	8.5	7.5	6
Rafale /50 ans $1.4 \times v_{reference}$ (m/s)	70	59.5	52.5	42
Rafale /1 an $1.05 \times v_{reference}$ (m/s)	52.5	44.6	39.4	31.5

Les éoliennes choisies pour cette étude sont DeWind D6 62 de 1.0MW et VESTAS V90 de 2.0MW. Reste à définir le diamètre et la hauteur de l'hélice.

En utilisant l'équation (15), qui permet d'estimer la hauteur du moyeu à partir du diamètre du rotor qui est 62 m. on évalue la hauteur du moyeu autour 66 m. Ainsi l'éolienne DeWind D6 62/1.0MW qui se rapproche des estimations du diamètre et de la hauteur du rotor est sélectionnée. Cette dernière est proposée pour des hauteurs de moyeu de l'ordre de 68,5 m et 91.5 m. Comme le coût global augmente avec la hauteur du moyeu, la hauteur optimale du moyeu qui garantit un coût minimum de l'énergie est choisie comme étant de 68,5 m, plutôt que de 91,5 m dans cette étude.

L'éolienne VESTAS V90-2.0-MW a un diamètre de rotor de 90 m, ce qui permet d'estimer la hauteur du moyeu à 88 m. Pour se rapprocher de cette valeur, l'éolienne VESTAS V90-2.0-MW est choisie comme référence avec une hauteur de moyeu de 105m.

Il faut ajouter que la ferme éolienne de Kabertene est composée de l'éolienne Gamesa 52/850 (0.85MW), de diamètre égale à 52m, avec une hauteur de moyeu de 55m.

4.3.2. Caractéristiques des éoliennes étudiées

Pour l'analyse des performances, la production d'énergie réelle de la turbine de l'éolienne Gamesa 52/850 (0.85MW qui est installée sur le site sera comparée avec les éoliennes sélectionnées (DeWind D6 62/1.0MW et VESTAS V90-2.0-MW).

Les spécifications techniques et les courbes de puissance des deux éoliennes sélectionnées DeWind D6 62/1.0MW, VESTAS V90-2.0-MW et de la Gamesa 52. 0.85MW installée sur le parc éolien de Kabartene sont données dans le Tableau 4.3 et la Figure.4.7 respectivement.

Tableau 4. 3- Caractéristiques techniques des éoliennes

Paramètres	Gamesa 52/850	DeWind D6 62/1000	VESTAS V90/2000
Hauteur du moyeu (m)	55	68.5	105
Diamètre du rotor (m)	52	62	90
Surface balayée (m ²)	2124	3019.1	6362
Puissance nominale (MW)	0.85	1	2
Vitesse du vent d'entrée (m/s)	4	3	4
Vitesse nominale du vent (m/s)	16	11.5	12
Vitesse de vent limite (m/s)	25	23	25
Classe de vent	IEC I	IEC II /IEC III	CEI III
Puissance spécifique (W/m ²)	400	331	314
Surface spécifique (m ² /kW)	2.5	3.0	3.2
Nombre d'éoliennes	12	10	5

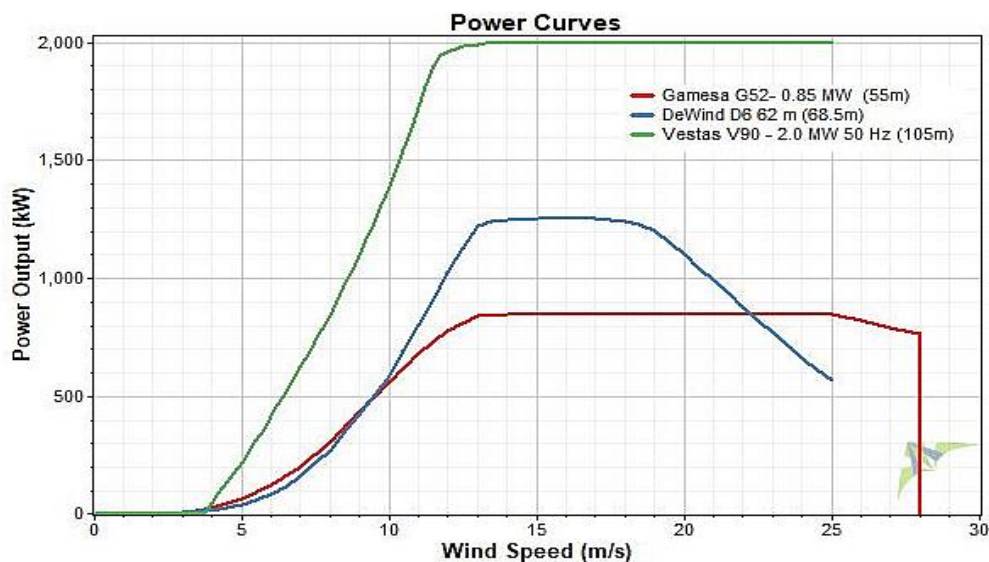


Figure 4.7- Courbes de puissance des trois éoliennes

Comme on peut le voir dans le tableau 4.3, VESTAS V90/2000 peut intercepter 111% et 199% de plus du flux de vent que DeWind D6 62/1000 et Gamesa 52/850 respectivement et, par conséquent, peut produire beaucoup plus d'électricité.

On observe également que la VESTAS V90/2000 avec un diamètre de rotor de 105 m a une puissance spécifique de 314 W/m² et une surface spécifique de 3.2 m²/kW. En revanche, Gamesa 52/850 et DeWind D6 62/1000 avec des diamètres de rotor de 52 et 62 m respectivement ont des puissances spécifiques de 400 W/m² et 331W/m² et des surfaces spécifiques de 2.5 m²/kW et 3.0 m²/kW. Cela est dû au fait les éoliennes avec des diamètres de rotor plus grands produisent plus.

4.4. PRODUCTION D'ENERGIE DU PARC EOLIEN DE KABARTENE

Cette section a fourni une analyse de la production d'énergie des éoliennes choisies en fonction des ressources éoliennes disponibles. L'énergie renouvelable fournie et le facteur de capacité pour les trois types d'éoliennes sont estimés en utilisant le modèle RetScreen et finalement ces valeurs calculées sont comparées avec l'énergie réelle produite par le parc éolien de Kabartene. Cette dernière est production d'énergie sur la période 2014-2017 réellement obtenue à partir d'un parc éolien existant d'une capacité totale de 10MW à Kabartene, (tableau 4.4.).

Tableau 4. 4- Électricité produite par le parc éolien de 12 éoliennes de 52-0,85 MW de Gamesa. Période 2014 a 2017

Électricité fournie (MWh)				
Mois	2014	2015	2016	2017
Jan	1184.00	1190.25	1027.76	1042.90
Février	1056.47	1130.97	1263.30	1259.94
Mar	1690.76	1773.76	1536.18	1523.51
Avril	1085.63	1078.76	1583.65	1587.84
Mai	1537.40	1531.29	1542.79	1527.84
Jun	1976.65	1972.27	1610.26	1606.61
Juillet	1933.46	1948.47	2156.21	2156.21
Août	1359.44	1358.52	1727.41	1723.29
Sep	983.83	990.43	1476.31	1477.70
Oct	790.10	789.26	1865.93	1882.49
Nov	1860.93	1862.84	914.18	915.19
Déc.	2059.39	2045.66	2047.31	2060.55
Total	17,518.06	17,672.50	18,751.30	18,764.07
PCF, %.	19.61	19.78	20.99	21.00

En figure 4.8 sont tracés les productions mensuelles du parc pour chaque année.

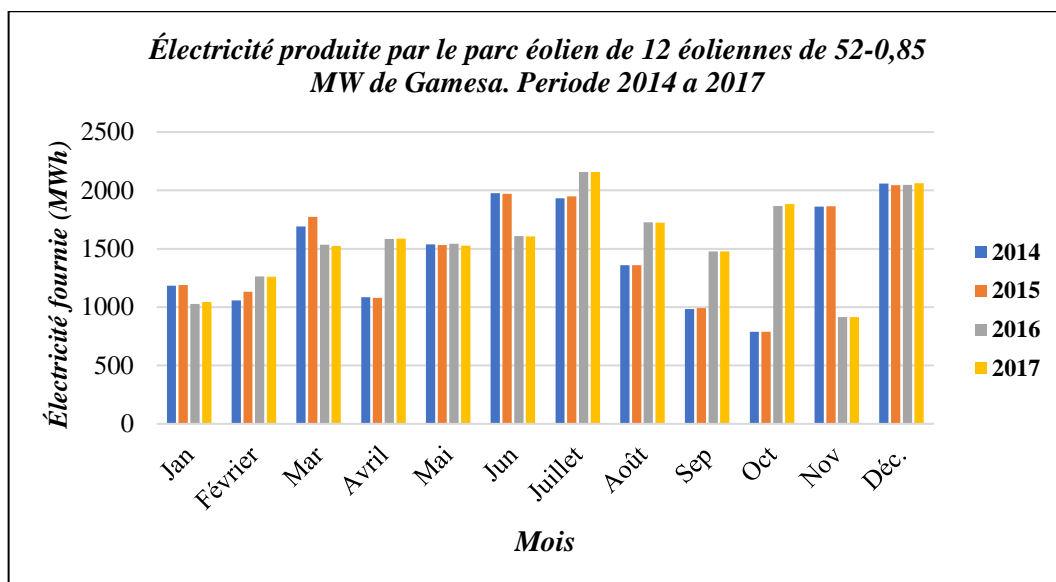


Figure 4.8- Électricité produite par le parc éolien de 12 éoliennes de 52-0,85 MW de Gamesa. Période 2014 a 2017

On remarque que les productions sont disparates pour certains mois. Ceci est principalement dû aux différents arrêts de maintenance ou de protection qui ont été réalisés en fonction de la demande.

Le tableau 4.5 présente la production moyenne d'électricité, le facteur de capacité et l'énergie nette estimées pour chaque type d'éolienne (Gamesa G52- 0,85 MW, DeWind D6 62 et Vestas V90 - 2,0 MW) sur une période de quatre ans (2014- 2017). Ces valeurs sont obtenues à partir de l'outil de simulation RETScreen en utilisant les données des éoliennes présentées dans le tableau 4.2.

L'électricité annuelle fournie au réseau par le parc éolien de Kabartene, composé de 12 éoliennes Gamesa 52-0.85MW développant chacune 1 MW, au cours des années 2014, 2015, 2016 et 2017 est estimée de 17518.06, 17672.50, 18751.30 et 18764.07 MWh respectivement. Les facteurs de capacité de puissance nette correspondants pour ces années sont de 19.61, 19.78, 20.99 et 21.00%.

Il est évident que l'énergie annuelle fournie au réseau et les facteurs de capacité diffèrent selon les années en raison, bien sûr, de la nature variable et intermittente du vent. De plus, les rendements énergétiques les plus élevés sont constatés pendant les saisons de printemps et d'été.

Le tableau 4.5 présente la puissance moyenne brute, les facteurs de capacité et l'énergie nette pour trois éoliennes (Gamesa G52 - 0,85 MW, DeWind D6 62 et Vestas V90 - 2,0 M

Tableau 4.5 - Puissance moyenne brute (PMB), facteur de capacité brut (FCB) et énergie nette (EN) calculés pour les trois types d'éoliennes.

	Gamesa G52- 0.85 MW(65m)			DeWind D6 62 m (68.5m)			Vestas V90 - 2,0 MW 50 Hz (105m)		
	PMB (kW)	FCB (%)	EN (kWh)	PMB (kW)	FCB (%)	EN (kWh)	PMB (kW)	FCB (%)	EN (kWh)
Jan	115.4	13.57	171 692.20	105.9	8.48	157 646.84	382.5	19.12	569 150.13
Février	129.8	15.27	177 580.31	126.0	10.08	172 431.34	415.9	20.79	568 883.13
Mar	177.2	20.85	263 673.72	181.3	14.50	269 716.50	556.2	27.81	827 684.19
Avril	137.2	16.14	197 502.80	130.3	10.42	187 582.52	444.2	22.21	639 690.94
Mai	189.2	22.26	281 562.09	192.1	15.37	285 863.28	593.6	29.68	883 228.56
Jun	214.5	25.24	308 942.53	221.3	17.71	318 714.13	666.2	33.31	959 298.75
Juillet	221.4	26.05	329 439.94	220.3	17.63	327 873.13	702.5	35.13	1 045 328.38
Août	177.1	20.83	263 486.56	164.4	13.15	244 591.59	579.6	28.98	862 430.25
Sep	112.7	13.26	162 289.70	105.0	8.40	151 264.20	367.2	18.36	528 782.88
Oct	114.8	13.51	170 860.69	107.6	8.61	160 148.19	373.4	18.67	555 625.13
Nov	184.5	21.7	265 666.97	182.0	14.56	262 060.16	585.4	29.27	842 979.31
Déc.	229.5	27.0	341 521.13	219.9	17.59	327 203.63	735.8	36.79	1,094,876.75
En général	167.2	19.68	2,934,220.25	163.3	13.06	2 865 087.00	534.5	26.73	9,377,955.00

Le maximum de puissance moyenne brute

- (PMB) a atteint de 534.5kW avec un facteur de capacité brute (FCB) de 26.7% par Vestas V90-2.0 MW.
- Pour Gamesa et DeWind, les valeurs de la PMB sont respectivement 167.2 kW et 163.3 kW, cependant, la valeur correspondante du FCB est donc égale à 19.68 et 13.06%.

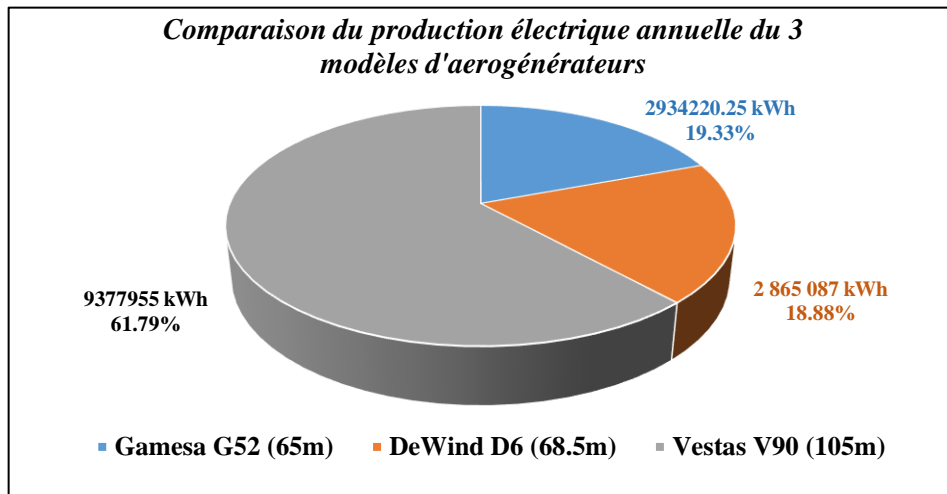


Figure 4.9- Comparaison de la production électrique annuelle des d'aérogénérateurs

L'énergie nette annuelle (EN) produite par Vestas V90-2.0 MW est maximale 9377955.00 kWh alors que pour les éoliennes Gamesa et DeWind, l'EN annuelle est identique. Cela montre que les éoliennes avec des diamètres de rotor plus grands peuvent fournir plus de puissance, et des facteurs de capacité plus élevés que ceux avec des valeurs plus faibles dans les mêmes conditions de vent.

En général, les éoliennes de classe III (faible vitesse du vent) peuvent capter plus d'énergie et fournir des facteurs de capacité plus élevés par rapport aux éoliennes de classe II ou I.

La figure 4.10 montre la variation diurne de la puissance produite par les trois éoliennes choisies. La puissance la plus élevée est générée pendant la journée à partir de 06h00-18h00. Entre 10h00 et 16h00, lorsque la demande en électricité est élevée, les éoliennes produisent une puissance plus élevée et presque constante. Cette tendance de production d'énergie sur ce site présente l'avantage supplémentaire de suivre le cycle de la charge diurne.

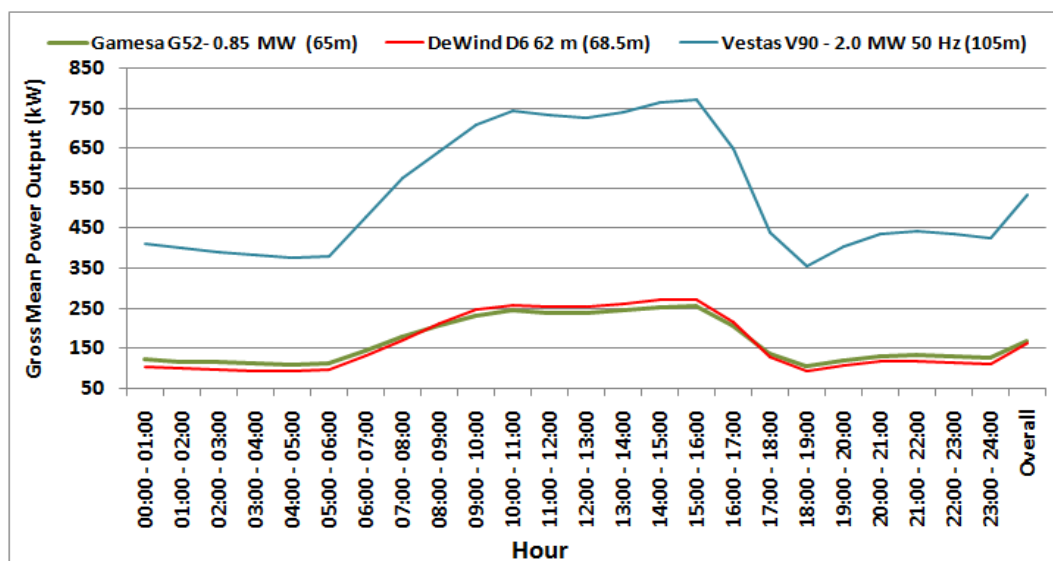


Figure 4.10- Variation journalière de la puissance moyenne brute

4.5. ANALYSE DE LA PRODUCTION MOYENNE ANNUELLE DE LA FERME EOLIENNE

Le tableau 4.6 résume l'énergie produite par chaque éolienne, WT01- WT12, et les facteurs de capacité correspondants pendant une période d'un an du 01/01/2015 au 31/12/2015.

On observe que WT01 a produit le maximum d'énergie pendant la période rapportée tandis que WT03 le minimum. En moyenne, le rendement énergétique annuel de 1792673 kWh est observé par chaque turbine avec un facteur de capacité de 24%. Le rendement énergétique annuel total de 21512071 kWh est obtenu du parc éolien avec un facteur de capacité de 24.08%.

Il est bien connu que pendant la première année d'exploitation d'un parc éolien, divers problèmes se posent jusqu'à ce que l'on parvienne à un fonctionnement stabilisé, régulier et continu de l'installation. Cet effet peut être visible par une quantité moindre de production d'énergie électrique que lors d'un fonctionnement normal [48]. En conséquence, les données de production d'énergie pour 2016 ou 2017, Tableau 4.4, sont utilisées pour une analyse plus approfondie. Les énergies moyennes annuelles réelles et estimées sont de 21 512,071MWh (tableau 4.6) et de 18 764,07MWh (voir tableau 4.4) pour l'éolienne Gamesa en 2017, comme le montre le tableau 4.7. La différence en pourcentage entre l'énergie et le facteur de capacité réels et estimés est de 13 %.

Tableau 4. 6- Données recueillies dans le parc éolien de Kabartene du 01/01/2015 au 31/12/2015.

N° Eolienne	Production (kWh)	Facteur de capacité "CF" (%)
WT01	2,250,284	30.22
WT02	1,697,193	22.79
WT03	6,97,817	9.37
WT04	1,906,719	25.61
WT05	1,944,630	26.12
WT06	2,387,932	32.07
WT07	1,875,750	25.19

WT08	2,200,120	29,55
WT09	1,952,431	26.22
WT10	1,162,480	15.61
WT11	1,894,519	25.44
WT12	1,542,196	20.71
Total	21,512,071	24.08

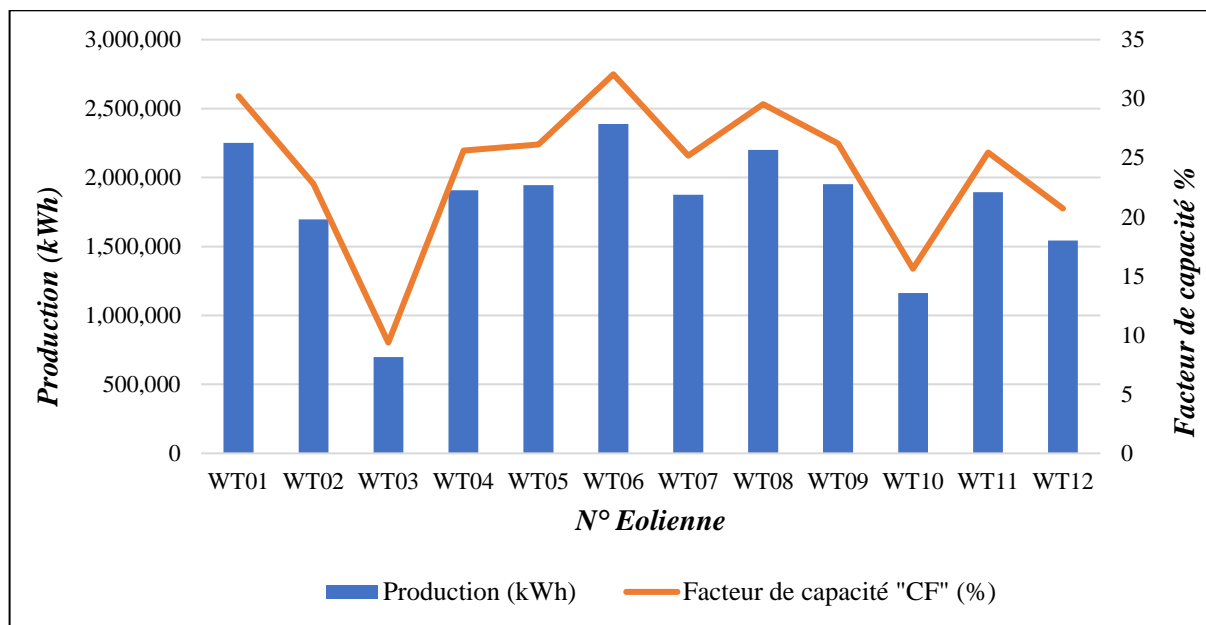


Figure 4.11- Données recueillies dans le parc éolien de Kabartene du 01/01/2015 au 31/12/2015.

4.6. COMPARAISON DE LA PRODUCTION ESTIMÉE ET REELLE DE L'AÉROGÉNÉRATEUR GAMESA

Tableau 4. 7– Production d'énergie moyenne annuelle et facteur de capacité

	Réelle	Estimée	Erreur (%)
Energie produite moyenne annuelle (MWh)	21,512.071	18,764.07	13
Facteur de capacité de puissance (%)	24.08	21.00	13

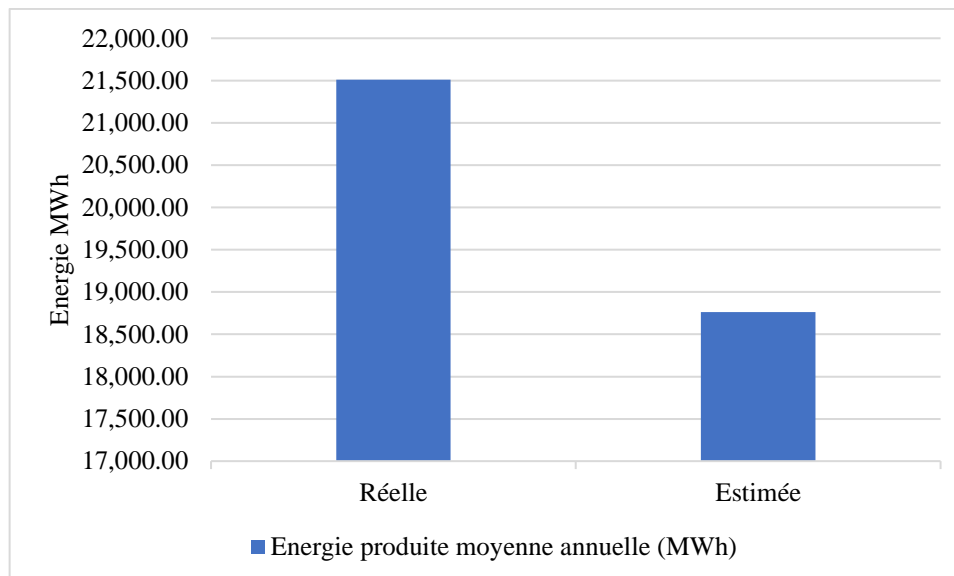


Figure 4.12- Production d'énergie moyenne annuelle

Le Résultat montre que l'estimation de RETScreen au parc éolien de Kabartene sous-estime le rendement énergétique moyen annuel de 13%. Cette différence peut être expliquée par différents facteurs tels que :

- La production moyenne d'énergie estimée pour Kabartene à partir de RETScreen est basée sur les données de vitesse du vent obtenues à partir de RETScreen (NASA).
- Les données de RETScreen ne prennent pas en compte l'orographie et la nature du terrain (environnement)
- Problèmes rencontrés au cours de la première année d'exploitation.
- Les pertes par effet de sillage, les autres pertes et causes d'arrêts les pertes par encrassement des pales et/ou verglas, les pertes diverses utilisées dans cette étude sont tirées de la littérature et peuvent ne pas être très représentatifs du site.
- Les perturbations locales dues aux turbulences ne sont pas prises en compte, par exemple les rafales de vent, etc.

4.7. COMPARAISON DE L'ENERGIE OPTIMUM DE VESTAS AVEC LA PRODUCTION REELLE

Tableau 4. 8- Production estimée de 12 aérogénérateurs

Mois	Énergie produite en MWh	
	Gamesa G52- 0.85 MW (65m)	Vestas V90 - 2,0 MW 50 Hz (105m)
Janvier	6829.80156	1042.9
Février	6826.59756	1259.94
Mars	9932.21028	1523.51
Avril	7676.29128	1587.84

Mai	10598.74272	1527.84
Juin	11511.585	1606.61
Juillet	12543.94056	2156.21
Aout	10349.163	1723.29
Septembre	6345.39456	1477.7
Octobre	6667.50156	1882.49
Novembre	10115.75172	915.19
Décembre	13138.521	2060.55
Totale	112535.46	18,764.07

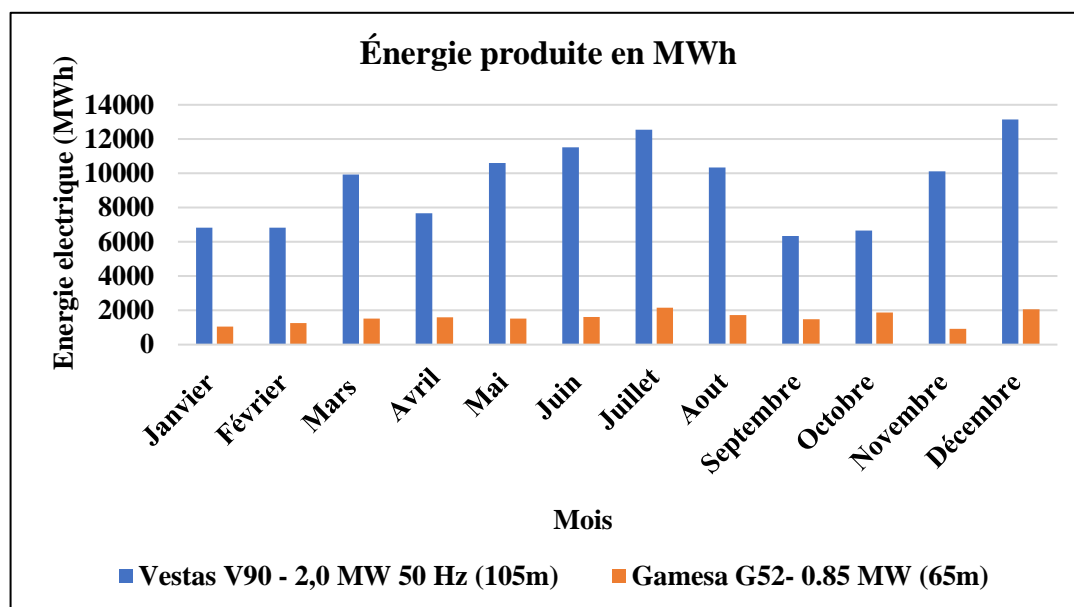


Figure 4.13- L'énergie produite de 12 aérogénérateurs

4.8. CONCLUSIONS

A fin de l'étude des données real fournie par SKTM et les données de logiciel RETScreen et on a comparé 2 machines éolienne de différentes caractéristiques avec l'éolienne installer dans la ferme pour déterminer l'aérogénérateur optimal.

L'étude suggère que les éoliennes Vestas V90-2.0 MW et DeWind D6 62 m peuvent générer annuellement une quantité d'énergie électrique de 9 377 955 et 2 865 087 MWh. en peut conclure que l'aérogénérateur Vestas V90-2.0 MW est le plus performant dans cette région

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, l'outil RETScreen est utilisé pour étudier la faisabilité en termes de production d'énergie électrique et de facteur de capacité pour un parc éolien existant d'une capacité totale installée de 10MW à Kabartene.

Les résultats de la production d'énergie électrique et le facteur de capacité estimés par le modèle RETScreen sont comparés aux données réelles du parc éolien. Le modèle a sous-estimé la production d'énergie et le facteur de capacité de 13% par rapport à l'électricité réelle fournie au réseau par le parc éolien de Kabartene. En ce qui concerne la pertinence du modèle RETScreen, on peut dire qu'il s'agit d'un outil pratique et utile pour l'étude de pré-faisabilité et qu'il peut estimer la viabilité potentielle d'un site de parc éolien.

Il est également constaté que les éoliennes, pour la classe de vitesse de vent faible (IEC III), produisent plus d'énergie électrique que les autres avec les classes de vent (IEC I et IEC II) pour les mêmes conditions de vent sur le site du parc éolien de Kabartene. Ceci peut être déduit de la faible puissance spécifique (W/m^2) et de la surface spécifique élevée (m^2/kW) de l'éolienne. Par conséquent, il est recommandé d'installer des éoliennes avec des classes de vent IEC III ou IEC II dans la région d'Adrar.

REFERENCES

- [1] S .Strandh, " Machines : Histoire illustrée ", Draeger, Paris 1979.
- [2] D. Le Gourieres, " Energie Eolienne: Théorie, Conception et Calcul Pratique des Installations ", Edition Eyrolle 1982.
- [3] H.Camblong , " Minimisation de l'Impact des Perturbations d'origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par les Aérogénérateurs à Vitesse Variable", Thèse de Docteur, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, décembre 2003.
- [4] ADEME, " Manuel Préliminaire de l'Etude d'Impact des Parcs Eoliens ", Département Energies Renouvelables, Novembre 2000.
- [5] L. Chang, " Systèmes de conversion de l'énergie éolienne ", Université du Nouveau-Brunswick, IEEE Canadien 2002.
- [6] J. Martin, " Technique de l'Ingénieur Energies Eoliennes ", 1999.
- [7] P. Leconte, M. Rapin & E. Szechenyi, " Eolienne ", Ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers et de l'École Supérieure des Techniques Aérospatiales (ONERA) 2002.
- [8] Suisse Eole, " Dans l'air du temps ", www.suisse-eole.ch ,La Sagne , 2000.
- [9] S. Gaury, " Etat des lieux de l'Eolienne en France ", Université Versailles Saint Quentin en Yvelines, Rapport IST 2003.
- [10] P . Salvi &W .Eddi, " Généralités sur l'Energie Eolienne " Espace Eolien Développement pour l'ARENE et l'ADEME, Document, Novembre 2002.
- [11] D. Barry, " l'Eolien: une énergie redécouverte ", Direction de la Planification et des Communications du Ministère des Ressources Naturelles, Brochure 2002.
- [12] T. Diveux , " Implantation d'un Système Eolien: Optimisation par Algorithmes Génétiques ", Thèse de Docteur , École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, Septembre 2000.
- [13] C. Nichita , E . Ceanga , A. Piel , J . J. Belhache&L .Protin, " Real time servosystem for a wind turbine simulator ", IEEE 3rd Intern Workshop on Advanced Motion Control, USA 1994.
- [14] O. Gergaud, " Modélisation Energétique et Optimisation Economique d'un Système de Production Eolien et Photovoltaïque couplé au Réseau et associé à un Accumulateur ", Thèse de Docteur, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Décembre 2002.
- [15] B.Multon , O . Gergaud, H .Ben Ahmed , X . Roboam, S. Astier, B. Dakyo& C. Nichita " État de l'art dans les aérogénérateurs électriques" , Mai 2002.
- [16] E . HAU, " Wind - turbines Fundamentals Technologies Application Economics", Editions Springer 2000.
- [17] A. Whiteman, S. Rueda, D. Akande, N. Elhassan, G. Escamilla, I. Arkhipova. Renewable Energy Statistics 2020. International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi. 2020.
- [18] J.L. Bal et B. Chabot, "Les énergies renouvelables. État de l'art et perspectives de développement", Paris, Sciences de la Terre et des planètes Earth and Planetary Sciences 333 (2001) 827-834, 2001
- [19] E. Ogguniyi, C. Pienaar. Paradox of Africa's Renewable Energy Potentials and Quest towards Powering Africa. 2019 IEEE PES/IAS Power Africa. 2019.
- [20] Renewable energy world publishers James & James, 8-12 Camden High Street, London NW 10JH, UK January 1999.
- [21] A. Lebedys, D. Akande, N. Elhassan, G. Escamilla, A. Whiteman, I. Arkhipova. Renewable Energy Statistics 2021. International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi. 2021
- [22] D. Bensid, "Le phare de l'Ouest", Bulletin d'information de SONELGAZ distribution Ouest, novembre 2007
- [23] SONALGAZ, " Guide Technique: Direction de la Distribution", Sous Direction

- [24] Ministère de l'Énergie. Bilan des réalisations du secteur de l'énergie année 2018. Edition 2019.
- [25] International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable Energy in the Arab Region Overview of Developments, IRENA, Abu Dhabi.2016.
- [26] Joséanne Bélanger-Gravel, .Analyse technico-économique d'un système hybride éolien photovoltaïque en comparaison avec les systèmes photovoltaïque et éolien seuls. Mémoire de Master, Montréal, Canada, 2011.
- [27] Martini, F. (2022). Modélisation et simulation des effets du givrage sur les performances aérodynamiques des éoliennes (Doctoral dissertation, Université du Québec à Rimouski).
- [28] Morgan TR, Marshall RH, Brinkworth BJ. ARES. A refined simulation program for the sizing an optimization of autonomous hybrid energy systems. Solar Energy 1997; 59(4-6):205–15
- [29] Kouam, A., & Tchuen, G. (2015). Optimisation d'un système hybride de production d'énergie pour site isolé: cas de la ville de Ngaoundéré. Journal of Renewable Energies, 18(4), 529-538.
- [30] Azli, H. Contribution à l'intégration des algorithmes d'ordonnancement dans les systèmes de production; Application aux systèmes de production d'énergie électrique. Thèse de Doctorat en Sciences. Université Ferhat Abbas – Setif, 2020.
- [31] Chelbi, N. Développement d'une nouvelle approche d'essais pour l'évaluation de systèmes avancés d'assistance et d'aide à la conduite (ADAS) dans les véhicules intelligents ou hautement automatisés sous de multiples conditions. Thèse de doctorat. Université de Sherbrooke Canada, 2019.
- [32] Maurras, J. F. (2002). Programmation linéaire, complexité: séparation et optimisation (Vol. 38). Springer Science & Business Media Méthodes méta-heuristique et heuristique
- [33] Taillard, E. D. (2002). Principes d'implémentation des métaheuristiques. Optimisation approchée en recherche opérationnelle, 57-79.
- [34] Layeb, A. (2009). Introduction aux métaheuristiques. Cours, Chapitre, 5, 1-15. Info fournir par SKTM (Spa) filiale sonelgaz.
- [35] B.Multon , O . Gergaud, H .Ben Ahmed , X . Roboam, S. Astier, B. Dakyo& C. Nichita " État de l'art dans les aérogénérateurs électriques" , Mai 2002.
- [36] Nichita , E . Ceanga , A. Piel , J . J. Belhache&L .Protin, " Real time servosystem for a wind turbine simulator ", IEEE 3rd Intern Workshop on Advanced Motion Control, USA 1994.
- [37] O. Gergaud, " Modélisation Energétique et Optimisation Economique d'un Système de Production Eolien et Photovoltaïque couplé au Réseau et associé à un Accumulateur ", Thèse de Docteur, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Décembre 2002.
- [38] (Martin, 1999) : J. Martin. Technique de l'ingénieur énergies éoliennes. 1999.
- [39] Ressources naturelles Canada, Centre de la technologie de l'énergie de CANMET, Centre d'aide à la décision sur les énergie propres RETScreen International. (2004). *Analyse de Projets d'énergies propres, Manuel d'ingénierie et d'Études de Cas Retscreen: Chapitre, analyse de projets de centrale éolienne.*
- [40] IRENA (2021), Renewable Energy Statistics 2021 The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [41] Rapport mondial sur l'énergie éolienne (GWEC). Disponible en ligne : <https://gwec.net/wind-can-power-3-3-million-new-jobs-worldwide-over-next-five-years>. (consulté le 28 décembre 2021).
- [42] Ministère de l'Énergie. Bilan des réalisations du secteur année 2016. Société du groupe SATINFO SONELGAZ, Alger, 2017.

- [43] Y. Himri, M. Merzouk, N. Kasbadji Merzouk, S. Himri. Potentiel et faisabilité économique de l'énergie éolienne dans la région du sud-ouest de l'Algérie. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 38 (2020) 100643.
- [44] Merzouk, N., Potentiel éolien de l'Algérie. *Énergies renouvelables*, 2000.
- [45] Hassan Faïda et Janah Saadi. Etude d'un projet de production d'énergie éolienne : Conception, suivi et impact sur le réseau électrique. *CGST-ACSE Journal*, volume 10, numéro 1, décembre 2010.
- [46] Himri, Y., Rehman, S., Himri, S., Mohammadi, K., Sahin, B., Malik, A. Investigation des ressources éoliennes dans la région de Timimoun, Algérie. *Ingénierie éolienne*, 2016.
- [47] M. Mujahid Rafique, Shafiqur Rehman, Md. Mahbub Alam et Luai M. Alhems. Faisabilité d'un parc éolien d'une capacité installée de 100 MW pour différentes conditions climatiques. *Énergies* 2018