الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محند أولحاج
- البويرة -

Faculté: Sciences et sciences appliquées

Département : Génie mécanique

Projet de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme master en Génie Mécanique

Option *: Énergétique*

Thème :

Étude et simulation d'un jumelage éolien-diesel sous HOMER

Devant le jury :

Mr Lekhal.R	Président	université AMO Bouira
Mr Laouari.A	Examinateur	université AMO Bouira
Mme Bouras.C	Examinateur	université AMO Bouira
Encadré par :		
Mme Baghdadi.F	Rapporteur	université AMO Bouira

Présenté par :

Loumi Maya

Hamitouche Salma

Promotion : 2018

Remerciements

Avant tous, Nous remercions en premier lieu notre dieu de nous donner la santé et la patience pour avoir terminer ce travail.

Nous remercions très vivement madame F.Baghdadi notre promotrice et Mr A.Laouari notre Co-promoteur à l'UniversitéAkli mouhand OUlhadj Bouira de nous avoir confié le sujet, et de l'aide précieuse qu'ils ont toujours bien voulu nous apporter. Qu'ils trouvent ici l'expression de nos sincères reconnaissances.

Nous adressons notre chaleureux remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et ce mémoire monsieur

Nos vifs remerciements vont également à l'ensemble des enseignants de département génie mécanique de l'université de Bouira pour la formation qu'ils nous ont assuré au long de notre cursus universitaire.

Nos vifs remerciements vont également à tous ceux qui ont participé de prés ou de loin à l'élaboration de ce travail, en particulier.

Nous tenons à remercier nos parents car ce travail représente un petit fruit de leur souffrance et qui sans eux on ne pouvait traverser ces longues années d'études et de travail.

Dédicaces

SALMA

Dédicaces

A la mémoire de mon père

A ma chère mère

A ma sœur et mes frères

A toute la famille Loumi et Ferradji à mes amis

MAYA

Résumé

Dans la plupart des sites isolés situés au Sud Algérien, les générateurs diesel sont la source majeure d'énergie électrique. En effet, l'alimentation de ces régions éloignées pose toujours des problèmes d'ordre (technique, économique et écologique).

L'électricité produite à l'aide de générateurs diesel est très chère et responsable de l'émission de CO_2. Ces sites isolés ont un potentiel d'énergie éolien significatif. Notre travail a pour premier objectif l'étude d'un système hybride composé: d'une turbine éolien, d'un générateur diesel et un système de stockage et en deuxième lieu l'analyse technico-économique de ce système hybride.

Dans cette étude, nous avons présenté une étude de simulation pour un système hybride éolien diesel avec la présence des batteries et un convertisseur, pour l'alimentation d'une charge donnée. La simulation est faite par le logiciel HOMER, qui nous permet de traiter des résultats basés sur des contraintes de coût et de variations d'entrées météorologiques du site étudié.

Mots clés : Éolien-Diesel, stockage, site isolé, simulation.

Abstract

In most isolated sites in southern Algeria, diesel generators are the major source of electrical energy. Indeed, the alimentation of these remote regions always poses problems of order (technical, economic and ecological).Electricity produced using diesel generators is very expensive and responsible for the emission of CO2. These isolated sites have significant wind energy potential. Our work focuses on the study of a hybrid system consisting of a wind turbine, a diesel generator and a storage system, and secondly the technical and economic analysis of this hybrid system. In this study, we presented a simulation study for a hybrid wind diesel system with the presence of batteries and a converter, for the supply of a given load. The simulation is done by the HOMER software, which allows us to process results based on cost constraints and meteorological input variations of the studied site.

Keywords: Wind-Diesel, storage system, isolated site, simulation.

ملخص:

في معظم المواقع المعزولة في جنوب الجزائر ، مولدات الديزل هي المصدر الرئيسي للطاقة الكهربائية. في الواقع ، تطرح هذه المناطق النائية مشاكل (التقنية والاقتصادية والبيئية). والكهرباء المنتجة باستخدام مولدات الديزل مكلفة للغاية ومسؤولة عن انبعاث ثاني أكسيد الكربون. هذه المواقع المعزولة لديها إمكانيات كبيرة من طاقة الرياح. يركز عملنا على دراسة نظام هجين يتكون من توربينات الرياح ، ومولدات الديزل ونظام التخزين ، و التحليل الفني والاقتصادي لهذا النظام الهجين. في هذه الدراسة ، قدمنا دراسة محاكاة لنظام الديزل الهجين مع وجود بطاريات ومحول ، لتوريد حمولة معينة. يتم إجراء المحاكاة بواسطة برنامج HOMER، مما يسمح لنا

بمعالجة النتائج بناءً على قيود التكلفة وتغيرات المعطيات المتيورولوجية للموقع المدروس.

الكلمات المفتاحية: توربينات الرياح ,الديزل ، التخزين ، موقع معزول ، المحاكاة.

Tables des matières

Remerciements……i

Dédicaces……...ii

Dédicaces……..iii

Résumé……..iv

Nomenclature……v

Liste des figures……..viii

Liste des tableaux……ix

Introduction générale…….....1

Chapitre I: Généralités sur les formes d'énergie

I-1.introduction……..3

I-2.Les transformations de l'énergie ……3

I-3.Principe de conservation de l'énergie…….....4

I-4.Les différentes sources d'énergie……4

I-4-1.Les énergies non renouvelables…….…4

I-4-1-1.Le charbon ……4

I-4-1-2.Le pétrole…….....5

I-4-1-3.Le gaz…….....5

I-4-1-4.L'uranium 235……....5

I-4-2.Les énergies renouvelables……6

I-4- 2-1.L'énergie solaire……6

I-4- 2-2.La biomasse……...7

I-4-2-3.L'énergie hydraulique……8

I-4-2-4.L'énergie géothermique……9

I-4-2-5.L'énergie des mers ou énergie marine……...9

I-4-2-6.L'énergie éolienne……...10

I-5.Avantages et inconvénients des différentes sources d'énergie……...…11
I-6.Conclusion……..12

Chapitre II : Généralités sur l'énergie éolienne

II-1.Introduction……...13
II-2.Généralités sur l'énergie éolienne…….....13
II-2-1.Historique de l'éolien……13
II-2-2.Définition de l'énergie éolienne…….....14
II-2-3.Architecture d'une éolienne……....15
II-2-3-1.Rotor ……...…..16
II-2-3-2.Nacelle……...……16
II-2-3-3.Mât……...…..…17
II-2-4.Principe de fonctionnement d'une éolienne……...……18
II-2-5.Principaux composants d'une éolienne……...…18
II-2-6.Chaine de conversion de l'énergie éolienne……20
II-2-7.Principe de conversion de l'énergie éolienne……..20
II-2-8.Les différentes formes des éoliennes…….…..21
II-2-8-1.Eolienne à axe horizontal…….……21
II-2-8-1-1.Avantage……....22
II-2-8-1-2.Inconvénients……...…..22
II-2-8-2.Eoliennes à axe vertical……....22
II-2-8-2-1.Avantages……....…..24
II-2-8-2-2.Inconvénients……...……24
II-2-9.Classifications des éoliennes selon la puissance…….……24

II-3-1.Formation du vent……...……24
II-3-1-1.La direction du vent……..…25
II-3-1-2.Forces agissant sur le vent…….……25
II-3-1-3.Force de Coriolis……...25
II-3-1-4.Forces de frottement……..…25
II-3-2.Caractérisation de la vitesse du vent……..…26

II-3-3.Classification du vent…….26
II-3-4.Instruments pour mesurer le vent ……..27
II-3- 4-1.La girouette……...…27
II-3- 4-2.La manche à air (manche à vent)……..28
II-3-4.3.L'anémomètre……....29
II-4.Choix du site et traitement des données……..…29
II-4-1.Critères de choix des sites éoliens…….30
II-4-2.Choix d'un site éolien…….....32
II-4-3.Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne…….....33
II-5.Production mondiale d'énergie éolienne……....34
II-5-1.Contexte actuel en Algérie……...35
II-5-2.Sonelgaz inaugure sa première ferme éolienne de 10 MW à Adrar……..…..36
II-5-3.Répartition régionale de la vitesse du vent……..37
II-5-4.L'Atlas de la puissance en Algérie……..38
II-5-5.Aspects économiques de l'éolienne…… 39
II-5-6.Impacts Environnementaux des éoliennes……...……40
II-6.Conclusion……...41

Chapitre III : Modélisation des éoliennes

III1.Introduction…….42

III-2.Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne…….....42
III-3.Notions théoriques sur l'éolien…….....43
III-3-1.Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique……...….43
III-3-2.Loi de Betz……....44
III-3-3.Vitesse spécifique ou normalisée……..…45
III-3-4.Coefficient de puissance……46
III-3-5.Coefficient de couple ……47
III-3-6.Distribution de Weibull……48
III.4.Conclusion……....48

Chapitre IV: Système de jumelage éolien-diesel avec stockage

IV-1.Introduction……..…49
IV-2.Systèmes hybrides: définitions et motivations……..…49
IV-3.Problématique des sites isolés……..50
IV-4.Solution apportée par les énergies renouvelables, dont principalement l'énergie éolienne……51
IV-5.Description du Système Hybride Eolien-Diesel SHED……...…51
IV-6.Principaux composants d'un SHED……..52
IV-6-1.Eolienne…….…52
IV-6-2.Groupe électrogène diesel……..…53
IV-7.Importance de l'hybridation entre l'éolien et le diesel……..53
IV-8.Régimes de fonctionnement d'un SHED……..54
IV-9. Nécessité du stockage d'énergie pour le SHED……...…56
IV-10.Problématique du jumelage éolien-diesel……...…56
IV-10-1.Charge minimale d'un générateur diesel……...…..56
IV-10-2.Le stockage de l'énergie……..57
IV-10-3.La stabilité du système……....57
IV-10-4.Le partage et l'équilibrage des sources de puissance……..58
IV-10-5.Gestion de l'énergie réactive……...…58
IV-11.Avantage du système de jumelage éolien-Diesel……...58
IV-12.Conclusion……59

Chapitre V: simulation et optimisation sous HOMER

V-1.Introduction……....60
V-2.Analyse du logiciel HOMER……60
V-2-1.Définition de logiciel HOMER…….……..60
V-2-2.Les paramètres……60
V-2-3.Les sorties……61
V-2-4.Le fonctionnement…….…..62
V-2-5.Les résultats à interpréter avec précautions……....62
V-2-6.Le bilan……..……..63
V-3.Caractéristiques du site étudié……...63

V-3-1.Situation géographique……63
V-3-2.Données météorologiques de la région d'Adrar……...63
V-3-3.Courbe de charge du site étudié……...65
V-4-1.Présentation de l'installation hybride étudiée…….…67
V-4-1-1.La turbine éolienne……67
V-4-1-2.Le générateur diesel……..69
V-4-1-3.Le système de stockage : Batterie…….....70
V-4-1-4.Le convertisseur……70
V-4-1-5.Bilan énergétique du système éolien-diesel …….....71
V-4-2.Optimisation et Simulation du système hybride éolien/diesel……...71
V-4-2-1.Interprétation et discussion des résultats……..72
V-4-2-2.Détails des composants du système étudié…….…..74
V-4-2-2-1.Détails de la turbine éolienne……..……74
V-4-2-2-2.Détails du Groupe électrogène……..…..75
V-4-2-2-3.Détails du système de stockage……..……75
V-4-2-3.Détails économiques……..…..76
V-4-2-4.Détails écologiques…….…78
V-4-4.Conclusion……..78
Conclusion générale et perspectifs……79
Bibliographie……...80

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unités
V_D	Vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine	m/s
V_n	Vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice	m/s
V_M	Vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales.	m/s
P	Puissance moyenne	w
ρ	Désigne la masse volumique	kg/m^3
S	Surface balayée par les pales de l'éolienne	m^2
V	Vitesse moyenne de vent	m/s
ρ	Densité volumique de l'air	Kg/m^3
v	Vitesse instantanée du vent	m/s
Ec	Energie cinétique du vent	Joules
Cp	Coefficient de puissance de l'éolienne	/
λ	Vitesse spécifique ou normalisée	/
ΩR	Rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine	/
R_t	Rayon de la surface balayée	m
V	Vitesse du vent	m/s
Ω_t	Vitesse de rotation avant multiplicatrice	rad/s
T_t	Couple de la turbine éolienne	N.m
K	Facteur de forme	/
C	Qualité du vent (facteur d'échelle)	/

Liste des abréviations

Abréviation :	**Définition :**
US	United States
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economiques. Conditions d'utilisation
SKTM	La Société Electricité Et de L'Energie Renouvelable
CDER	Centre de Recherche en Energies Renouvelables (CDER, Algérie)
SJED	Système de Jumelage Eolien-Diesel
SHED	un système hybride éolien-diesel
JED	Jumelage Éolien – Diesel
TPP	Le Taux de Pénétration en Puissance
TPE	Le Taux de Pénétration en Énergie
JEDHP	Jumelage Éolien - Diesel à Haute Pénétration
HOMER	Hybrid Optimization of Multiple Energy Ressources
WTG	Wind Turbin Generator
DG	Diesel Generator
BEES	Battery Energy Etorage System

Liste des figures

Figure :	Titre :	Page :
(I.1)	cellules photovoltaïques	7
(I.2)	fours solaires	7
(I.3)	énergie biomasse	7
(I.4)	énergie hydraulique	8
(I.5)	énergie géothermique	9
(I.6)	les énergies marines	9
(I.7)	énergie éolienne	10
(II.1)	Conversion de l'énergie cinétique du vent	15
(II.2)	Composants d’une éolienne	15
(II.3)	Eléments d’une nacelle	17
(II.4)	Composants électroniques dans le mât d’une éolienne	18
(II.5)	Principe de fonctionnement d'une éolienne	19
(II.6)	principe de la conversion de l’énergie éolienne	20
(II.7)	Eoliennes à axes horizontal	21
(II.8)	Eolienne à axe horizontal	22
(II.9)	Eoliennes de type Savonius	23
(II.10)	Eoliennes de type Darrius	23
(II.11)	Girouette	28
(II.12)	manche à air	29
(II.13)	Anémomètre	29
(II.14)	l'évolution des capacités éoliennes dans le monde 2000-2013	35
(II.15)	carte du potentiel éolien en Algérie	36

(II.16)	ferme éolienne à Adrar	36
(II.17)	Les régions ventées en Algérie	38
(II.18)	Comparaison entre les vitesses moyennes de sites ventés	38
(II.19)	Puissance énergétique récupérable à 50 m Algérie	39
(II.20)	Comparaison des puissances récupérables des Sites Ventés	39
(III.1)	Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent	42
(III.2)	Colonne d'air animée d'une vitesse V	43
(III.3)	Théorie de Betz : Schéma de principe	45
(III.4)	Vitesse de vent (V) et vitesse tangentielle de l'aubage $\Omega_t R_t$	46
(IV.1)	Schéma du système hybride éolien-diesel	52
(IV.2)	La ferme éolienne d'Adrar	53
(IV.3)	Variation de la puissance produite par un SHED et la consommation du carburant	55
(V.1)	vitesse annuelle du vent de l'année 2011 du site étudié	64
(V.2)	Profil journalier de la courbe de charge	66
(V.3)	Le profil de charge dans une année	66
(V.4)	Le profil de charge journalière suivant les saisons	66
(V.5)	Eolienne type Bergey Excel 10-R	68
(V.6)	Courbe de puissance relative de l'éolienne	69
(V.7)	Configuration de l'installation hybride étudiée	71
(V.8)	Résultats d'optimisation et classement des systèmes	72
(V.9)	La production électrique mensuelle moyenne	74
(V.10)	NPC détaillé de chaque composant du système	77

Liste des tableaux

Tableau :	Titre :	Page :
(I.1)	les durées de vie des réserves mondiales	5
(I.2)	Avantages et inconvénients des énergies renouvelables par technologies	10
(II.1)	Classification des éoliennes selon la puissance	24
(II.2)	classification du vent d'après l'échelle de Beaufort	26
(II.3)	Comparaison des émissions des centrales à charbon et à gaz avec les centrales éoliennes	41
(V.1)	Coordonnés géographiques du site choisi	63
(V.2)	Données climatiques du site étudié	64
(V. 3)	Relevés de la variation de la vitesse du vent pendant l'année 2011.	64
(V.4)	Caractéristiques techniques de Bergey Excel 10-R	68
(V.5)	caractéristiques du générateur diesel Generic 10kW Fixed Capacity Genset	69
(V.6)	Caractéristiques de la batterie Ni-MH	70
(V.7)	Energie électrique produite par le système DG	73
(V.8)	Energie annuelle consommée	73
(V.9)	Détails de la turbine éolienne dans le système hybride	74
(V.10)	Détails du groupe électrogène dans le système hybride	75
(V.11)	Détails du système de stockage dans le système hybride	76
(V.12)	Résumé détaillé des coûts en $ du système sur toute la durée de vie du projet	77
(V.13)	Comparaison économique entre les deux configurations	78
(V.14)	les émissions engendrées par le système	78

Introduction générale

Introduction générale

Le rayonnement solaire et la rotation de notre planète produisent des différences de températures et de pression sur la surface du globe qui se traduisent localement par la mise en mouvement de masses d'air, formant ainsi les vents.

La conquête de l'énergie éolienne ne date pas d'hier. L'histoire nous apprend que les moulins à vent existaient déjà dès la plus haute antiquité, en Perse, en Irak, en Egypte et en Chine. Ce n'est qu'au moyen âge qu'ils font leur apparition en Europe et leur utilisation se répand rapidement.

L'éolienne, que l'on nomme aussi aérogénérateur, est une machine qui permet la transformation de l'énergie du vent en mouvement mécanique, puis le plus souvent en électricité.

Lorsque l'on ne produit qu'une force mécanique pour actionner une pompe, on parlera seulement d'éolienne; par contre lorsque l'on produit de l'électricité, on parlera d'aérogénérateur.

Notre travail se résume sur le présent mémoire est partitionné en cinq chapitres, à savoir:

- Dans le premier chapitre, nous allons présenter des généralités sur l'énergie, ses formes et ses sources.
- Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter quelques généralités sur l'énergie éolienne, sa définition, la formation du vent et ses différents types, le principe de fonctionnement de l'éolienne, ainsi que les différents aérogénérateurs utilisés dans les systèmes éoliens, avec un aperçu donné sur les instruments de mesure de la vitesse du vent et le choix du site de traitement des données. Enfin, nous allons voir la production mondiale d'énergie éolienne et le contexte actuel en Algérie sur l'éolien, et à ce titre on va étudier la répartition régionale de la vitesse du vent et l'atlas de puissance en Algérie, ainsi que l'aspect économique et l'impact environnemental des éoliennes.
- Le troisième chapitre est consacré à l'étude de modélisation des éoliennes. Nous avons présenté une contribution sur la théorie générale de l'éolienne qui a été établie par Betz, la notion du coefficient de puissance, coefficient de couple, vitesse spécifique ou normalisée et la distribution de Weibull.
- Le quatrième chapitre porte sur un système hybride (éolien-diesel), les principaux composants et les régimes de fonctionnement du SHED à été présentée ainsi que le

rôle primordial de l'hybridation entre l'éolien et le diesel pour l'alimentation des sites isolés et éloignés.

- Le dernier chapitre nous donne une Simulation et d'optimisation sous HOMER.

Le travail est clôturé par une conclusion générale et des perspectives.

<u>Chapire I :</u> Généralités et revue bibiolgraphique

I-1.Introduction

Le mot énergie vient du grec et signifie « force en action » c'est à dire « capacité à produire un mouvement ». La notion n'énergie n'est pas évidente à définir car l'énergie n'est pas perçue en tant que telle. Pour faire simple, l'énergie, c'est ce qu'il faut donner à des systèmes pour qu'ils fonctionnent, c'est-à-dire qu'ils fournissent un travail en vue de produire un effet.

L'énergie existe sous diverses formes : cinétique, chimique, solaire, éolienne, holographique, électrique, nucléaire, mécanique, potentielle, thermique. Grâce à l'apport d'énergie, des systèmes peuvent produire des rayonnements - visibles ou invisibles (ex : lampe torche, radio…), de la chaleur (plaques de cuisson, chauffe-eau solaire…), se mettre en mouvement (ex : alternateur, turbine, éolienne…).

On trouve dans le dictionnaire Larousse la définition suivante de l'énergie : grandeur caractérisant un système physique, gardant la même valeur au cours de toutes les transformations internes du système (loi de conservation) et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en interaction.

Dans ce premier chapitre nous allons connaitre qu'est-ce que l''energie qu'elle se présente sous de nombreuses formes et provient de diverses sources.

I-2.Les transformations de l'énergie

L'énergie est donc une grandeur mesurable, qui se manifeste au cours de ses transformations, c'est-à-dire au cours de son passage d'une forme à une autre, par ex : dans la lampe torche, l'énergie chimique délivrée par la pile est transférée au filament de l'ampoule via la circulation d'un courant électrique. Ceci va provoquer l'échauffement du filament et son incandescence. [1]

L'énergie peut se transférer de 4 façons :

- via le travail électrique - circulation d'un courant électrique (exemple précédent),
- via le travail mécanique
- via la chaleur
- via le rayonnement

L'énergie subit une chaîne de transformations lorsqu'elle passe d'un système à un autre, ou qu'elle est modifiée au sein d'un même système. Par exemple : dans notre monde moderne, nous consommons énormément d'énergie interne dans les réactions chimiques

(combustion) ou nucléaires. Nous transformons cette énergie dans les moteurs thermiques en énergie mécanique. Nous utilisons cette énergie sous cette forme ou, après transformation, sous forme d'énergie électrique.

I-3.Principe de conservation de l'énergie

Toute augmentation (ou diminution) d'énergie d'un système s'accompagne d'une diminution égale (ou augmentation égale) de l'énergie d'autres systèmes.
La création spontanée d'énergie n'existe pas. [2]

I-4.Les différentes sources d'énergie

I-4-1.Les énergies non renouvelables

Les énergies fossiles sont issues de la matière vivante, végétale ou animale. Elles comprennent le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Leur utilisation, en tant que combustible, s'est véritablement développée au cours du 19ème siècle à une époque où les besoins en énergie ont fortement augmenté avec les débuts de la «Révolution industrielle».
Faciles à transporter et à stocker, les énergies fossiles présentent néanmoins quelques inconvénients:

- Coût très fluctuant (soumis aux aléas du marché et au contexte géopolitique).
- Émission de gaz à effet de serre : ce sont des gaz présents dans l'atmosphère, empêchant une partie de l'énergie solaire reçue par la Terre de repartir dans l'espace, ce qui permet de maintenir une température moyenne de 15°C autour de la planète. Depuis le début de l'ère industrielle, l'émission de ces gaz a augmenté dans l'atmosphère et pourrait, selon les experts internationaux, conduire à un réchauffement planétaire de 1,4°C à 5,8°C d'ici 2100 *(*responsables du réchauffement climatique) ;
- Diminution des réserves mondiales et concentration de celles-ci dans des zones géopolitiques perturbées. [1]

Actuellement, notre société exploite comme source d'énergie :

I-4-1-1.Le charbon : qui est la source d'énergie fossile la plus abondante et la mieux répartie dans le monde. Le charbon s'est formé il y a plus de 280 millions d'années à partir de végétaux engloutis par les eaux lors de bouleversements géologiques importants. Le charbon représente encore à ce jour le quart de l'énergie primaire mondiale. Il est surtout utilisé dans

les centrales thermiques de production d'électricité et pour le chauffage. La croissance de sa production est plus lente que celle du pétrole ou du gaz naturel (+1,6%/an). C'est aujourd'hui la principale réserve d'énergie fossile.

Malheureusement, l'émission de gaz à effet de serre due au charbon est le double en volume de celle liée au gaz naturel, à production d'énergie égale.

Basculer du gaz et du pétrole vers le charbon n'est pas une solution vis-à-vis de l'effet de serre.

I-4-1-2.Le pétrole: qui est la première source d'énergie mondiale. Formé à partir du plancton qui s'est déposé au fond des mers, le pétrole fournit près de la moitié de la demande totale en énergie primaire.

Il est maintenant admis qu'aujourd'hui, l'homme a consommé plus de pétrole qu'il ne pourra en extraire dans l'avenir. Pour l'avenir et malgré la crise actuelle, le coût va inexorablement monter.

I-4-1-3.Le gaz : qui s'est formé en même temps que le pétrole. Issu de la transformation naturelle durant des millions d'années de matières organiques, le gaz provient de couches géologiques du sous-sol où il se trouve soit seul, soit en association avec du pétrole.

Aujourd'hui, le gaz représente près de 23% de la consommation mondiale d'énergie primaire.

I-4-1-4.L'uranium 235: est utilisé dans les centrales nucléaires où il dégage de l'énergie par « fission ». Les centrales nucléaires belges fournissent environ
55 % de la consommation d'électricité du pays. Au rythme actuel de notre consommation, les réserves d'énergie d'origine fossile vont fondre comme neige au soleil et les prévisionnistes estiment les durées de vie des réserves mondiales. [3]

Tableau(I.1) : les durées de vie des réserves mondiales [1] :

Durées de vie des réserves mondiales d'énergie			
Charbon	Pétrole	Gaz naturel	Uranium 235
130 ans	40 ans	70 ans	70 ans

I-4-2.Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables constituent historiquement les premières sources d'énergies utilisées par les hommes.

Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau; ces énergies, par définition, se renouvellent naturellement après avoir été consommées et sont donc inépuisables (au moins sur des très grandes échelles de temps).

Aujourd'hui, elles servent surtout à la production d'électricité mais participent également à la production de chaleur.

Toutefois, un constat s'impose. Dans l'état actuel des techniques, les énergies renouvelables ne peuvent couvrir l'ensemble de nos besoins énergétiques.
Surtout si la croissance des consommations persiste.

Comme leur nom l'indique, il s'agit de sources qui se renouvellent et ne s'épuiseront donc jamais à l'échelle du temps humain ! Les sources non renouvelables sont les énergies fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz dont les gisements limités peuvent être épuisés. Les sources renouvelables sont l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marine et la biomasse. [4]

I-4- 2-1.L'énergie solaire

Ce terme désigne l'énergie fournie par les rayons du soleil. Le soleil est la source d'énergie la plus puissante et cette énergie est gratuite, il n'y a qu'à l'exploiter.

Les technologies sont réparties entre actives et passives. Les technologies actives transforment l'énergie solaire en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement. C'est le cas des cellules photovoltaïques qui transforment la lumière du soleil directement en énergie électrique des collecteurs solaires qui permettent de chauffer l'eau des maisons, du chauffage et du refroidissement solaire, des concentrateurs solaires qui utilisent des miroirs pour concentrer les rayons du soleil et générer une chaleur intense, transformant l'eau en vapeur et produisant de l'électricité grâce à certaines machines, et même des fours solaires.

Les technologies passives consistent à bien orienter les bâtiments par rapport au soleil ou à utiliser des matériaux spéciaux et des modèles architecturaux qui permettent d'exploiter l'énergie solaire. [4]

Figure (I.1) : cellules photovoltaïques

Figure (I.2) : fours solaires

I-4- 2-2.La biomasse

L'utilisation de la biomasse remonte au temps où l'homme découvrait le feu et se servait encore du bois pour se chauffer et cuire ses aliments. Il s'agit de l'énergie contenue dans les plantes et les matières organiques. La biomasse des plantes provient du soleil, quand la plante, grâce à la photosynthèse, absorbe l'énergie solaire. Ensuite, les animaux absorbent à leur tour ces plantes.

La biomasse provient de divers secteurs et matières comme le bois, les récoltes (cultivées spécialement pour la production d'énergie), les résidus agricoles et forestiers, les déchets alimentaires et les matières organiques issues des déchets municipaux et industriels. Il existe toute une variété de technologies pour convertir l'énergie de la biomasse en une forme réutilisable. Ces technologies changent l'énergie en formes utilisables directement (chaleur ou électricité) ou en d'autres formes telles que le biocarburant ou le biogaz. [4]

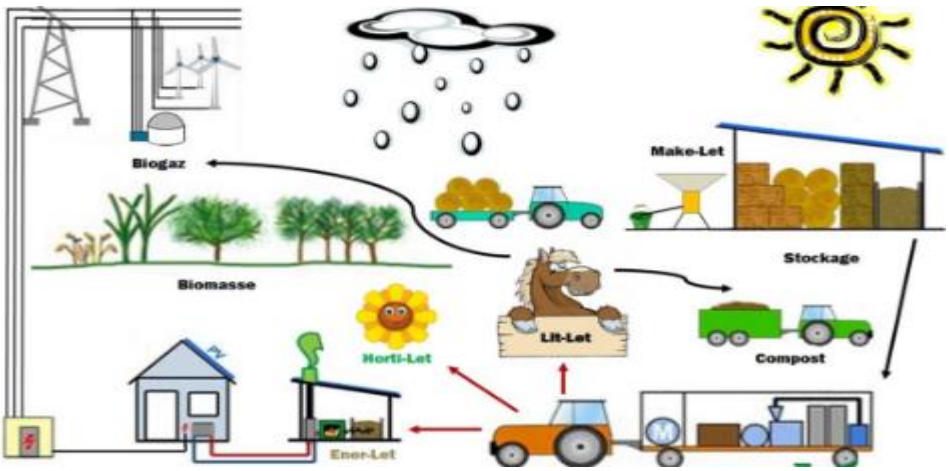


Figure (I.3) : énergie biomasse

I-4-2-3.L'énergie hydraulique

L'eau est également une source renouvelable puisqu'elle se régénère grâce au cycle d'évaporation et des précipitations. Sa force est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation.

Plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité. [4]

Figure (I.4) : énergie hydraulique

I-4-2-4.L'énergie géothermique

L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique.

Elle est parfois libérée à la surface par des volcans ou des geysers, mais elle peut aussi être accessible à tout moment, comme dans les sources d'eau chaude. La géothermie peut servir à produire de l'électricité ou à chauffer et refroidir. L'énergie est extraite de réservoirs souterrains enfouis très profondément et accessibles grâce au forage, ou de réservoirs plus proches de la surface. L'énergie géothermique peut également être employée dans un but domestique, grâce aux petites pompes à chaleur. [4]

Figure(I.5) : énergie géothermique

I-4-2-5.L'énergie des mers ou énergie marine

C'est une énergie renouvelable très peu exploitée jusqu'ici. Elle désigne l'énergie produite par les vagues et les marées, ainsi que l'énergie thermique de l'océan chauffé par les rayons du soleil. Les océans, qui couvrent presque 70 % de la surface du globe, pourraient constituer la source d'énergie renouvelable du futur, même si, pour l'instant, leur exploitation pour produire de l'électricité n'est pas rentable. [4]

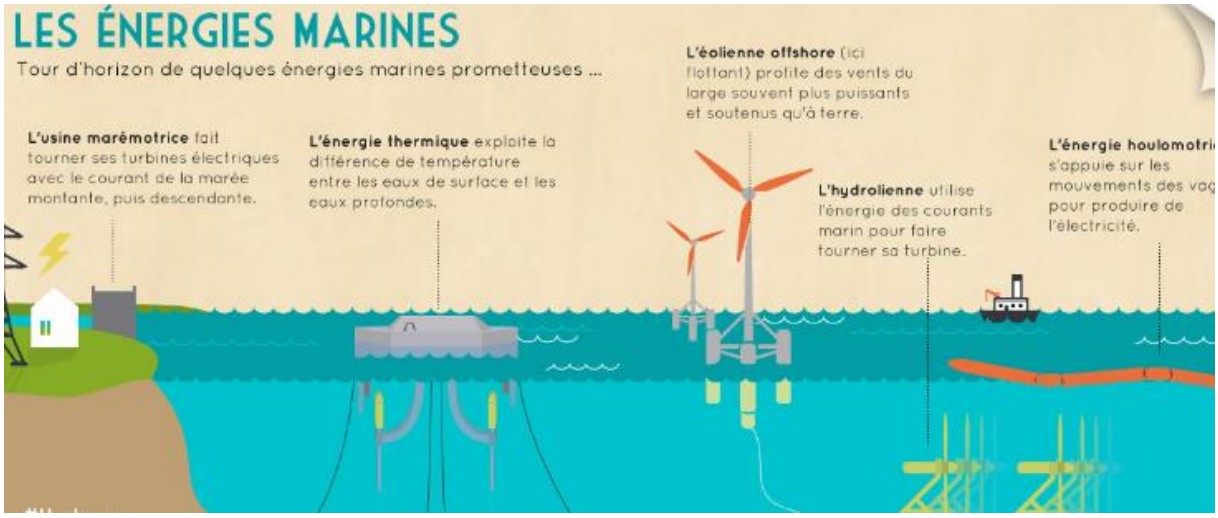


Figure (I.6) : les énergies marines

I-4-2-6.L'énergie éolienne

La force éolienne est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des moulins à vent et de la navigation, par exemple. Aujourd'hui, nous pouvons exploiter cette énergie à l'aide d'hélices spéciales qui emmagasinent le vent et de machines qui le

transforment en énergie électrique. Les éoliennes sont installées sur terre et en mer dans des endroits où le vent atteint une vitesse élevée et constante. [4]

Figure (I.7) : énergie éolienne

I-5.Avantages et inconvénients des différentes sources d'énergie

Tableau (I.2): Avantages et inconvénients des énergies renouvelables par technologies [3]

Technologie	**Avantages**	**Inconvénients**
Solaire	-Les panneaux solaires nécessitent très peu d'entretien et réduisent considérablement la facture domestique d'électricité ; - Les panneaux solaires sont simples et rapides à installer ; - Le système est silencieux et sans danger pour la santé;	-Les prix de fabrication et d'installation des panneaux sont assez élevés ; - Il est impossible d'obtenir une autonomie énergétique complète par le biais de panneaux solaires seulement; -Le rendement énergétique est plutôt faible.

Éolienne	- L'énergie éolienne ne nécessite aucun carburant, ne génère aucun gaz à effet de serre et ne produit pratiquement aucun déchet; - Les frais de fonctionnement sont limités et les coûts de production sont prévisibles et se stabilisent à long terme - La ressource principale (le vent) est à 100% renouvelable et son exploitation ne comporte pratiquement aucun effet néfaste pour l'environnement.	-Les vents peuvent parfois souffler à des intensités irrégulières ; -Impossibilité d'emmagasinage de la source (le vent); -La production dépend de l'intensité des vents et non de la demande en énergie; -Des dispositifs externes de stabilisation sont en général nécessaires
Hydraulique	- L'exploitation de barrages et de centrales hydroélectriques ne génère aucun déchet toxique; - Les infrastructures ont une très longue durée de vie et les coûts d'exploitation sont maîtrisables; - Possibilité d'emmagasiner de l'eau dans les barrages et de produire une énergie de grande qualité très rapidement lors des périodes de forte demande.	- Les coûts d'installation d'une centrale hydroélectrique sont très importants; - Les écosystèmes aquatiques originels et les débits saisonniers naturels des cours d'eau peuvent être bouleversés par les installations; -Inondation de grands espaces fertiles nécessitant souvent le déplacement des populations locales.

Biomasse	- Les ressources naturelles nécessaires sont disponibles en quantités abondantes La biomasse génère peu d'émissions polluantes;	-La biomasse possède un faible rendement énergétique ; -Utilisation de ressources naturelles précieuses comme source d'énergie (ex : les céréales pour la fabrication de 1'éthanol).

I-6.Conclusion

Dans ce premier chapitre nous allons connaitre qu'est-ce que l''energie qu'elle se présente sous de nombreuses formes et provient de diverses sources. Les ressources d'origine renouvelables telle que : l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marine et la biomasse, représentent un potentiel largement suffisant pour satisfaire nos besoins, notamment en énergie électrique.

<u>Chapitre II :</u> Etude d'équilibre thermodynamique

II-1.Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter des généralités sur l'énergie éolienne, sadéfinition, la formation du vent et ses différents types, le principe de fonctionnement de l'éolienne, ainsi que les différents aérogénérateurs utilisés dans les systèmes éoliens, avec un aperçu est donné sur les instruments de mesure de la vitesse du vent et le choix du site de traitement des données. Enfin, on va voir la production mondiale d'énergie éolienne et le contexte actuel en Algérie sur l'éolien, l'énergie éoliennes en Algérie dans ce titre on va étudier la répartition régionale de la vitesse du vent et la l'atlas de la puissance en Algérie, aspects économiques de l'éolienne et impact environnement des éoliennes.

II-2.Généralités sur l'énergie éolienne

II-2-1.Historique de l'éolien

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme.Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J.-C environ.

La Première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C.

En Europe, ce n'est qu''au VIIème siècle que l'on voit apparaître les premiers moulins à vent utilisés tout d'abord pour moudre les grains, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés.

A l'arrivée de l'électricité donne l'idée au britannique Lord Kelvin en 1802 de songé pour la première fois à transformer l'énergie éolienne en énergie électrique.

En effet il essaya d'associer une génératrice d'électricité à un moteur éolien, mais en fait il faudra attendre 1850 et l'avènement de la dynamo pour qu'on puisse voir ce que l'on appellera les «aérogénérateurs ».

Cette nouvelle application de l'énergie éolienne a connu un certain succès, et l'on comptait en 1920 jusqu'à 300 constructeurs d'aérogénérateurs.

Malheureusement, à cette époque, le faible coût du pétrole avait mis le kilowatt fourni par l'énergie thermique à un niveau de compétitivité inaccessible à l'énergie éolienne.

Dés 1973, le processus inverse a, petit à petit, relancé les programmes d'études et de réalisation d'aérogénérateurs. Mais les budgets de recherche et de développement, ainsi que

les aides gouvernementaux fluctuent avec le prix du baril de pétrole, et les aides accordées aux autres énergies (photovoltaïque en particulier). [1]

Toutefois au court des dernières années se dessine une nette tendance audéveloppement de « fermes éoliennes » ou « parcs éoliens » raccordés aux réseaux de distribution avec les machines de 300KW à 1.5MW.

Ces éoliennes servent aujourd'hui à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur nucléaire, un barrage hydro-électrique ou une centrale thermique au charbon. Cependant, les puissances générées et les impacts sur l'environnement ne sont pas les mêmes.Cette source d'énergie nous sert maintenant à produire de l'électricité. Depuis quelques années, la production électrique éolienne est en plein développement industriel [2]. Elle présente en effet :

-tout d'abord une énergie renouvelable non polluante qui contribue à une meilleure qualité de l'air et à la lutte contre l'effet de serre

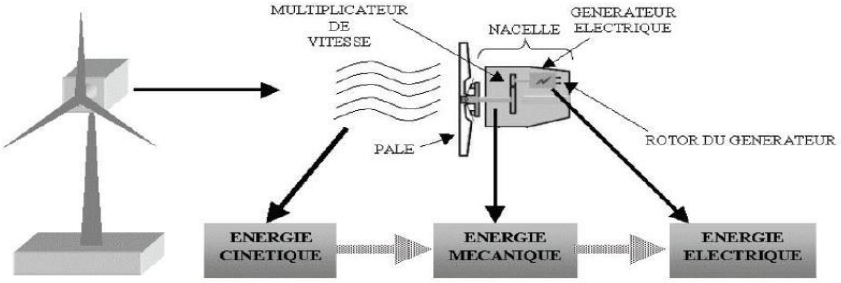
-des difficultés existent malgré tout : la gestion technique de la production sur le réseau électrique, certains impacts environnementaux (avifaune, paysage, bruit) et l'aménagement du territoire. [1]

II-2-2.Définition de l'énergie éolienne

L'énergie en provenance du vent traverse la turbine éolienne qui est un élément d'interface entre le domaine de la mécanique des fluides et de la mécanique traditionnelle. L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présentée dans le vent et la transformée en énergie mécanique de rotation, Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières:

- Soit une conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.
- Soit une transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur

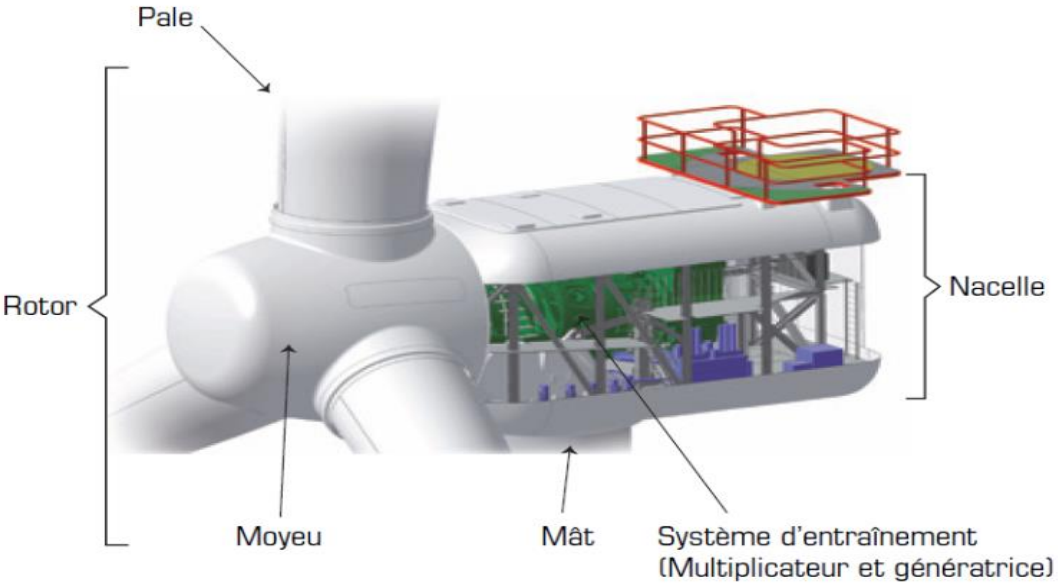
d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.[3]



Figure(II.1): Conversion de l'énergie cinétique du vent [3]

II-2-3.Architecture d'une éolienne

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et le mat, (Voir FigureII.2) :



Figure(II.2): Composants d'une éolienne. [1]

II-2-3-1.Rotor

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué de pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu.

Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant).

Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variables, freinage du rotor…) [3]

II-2-3-2.Nacelle

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine. La figure ci-dessous présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants :

-Multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques.

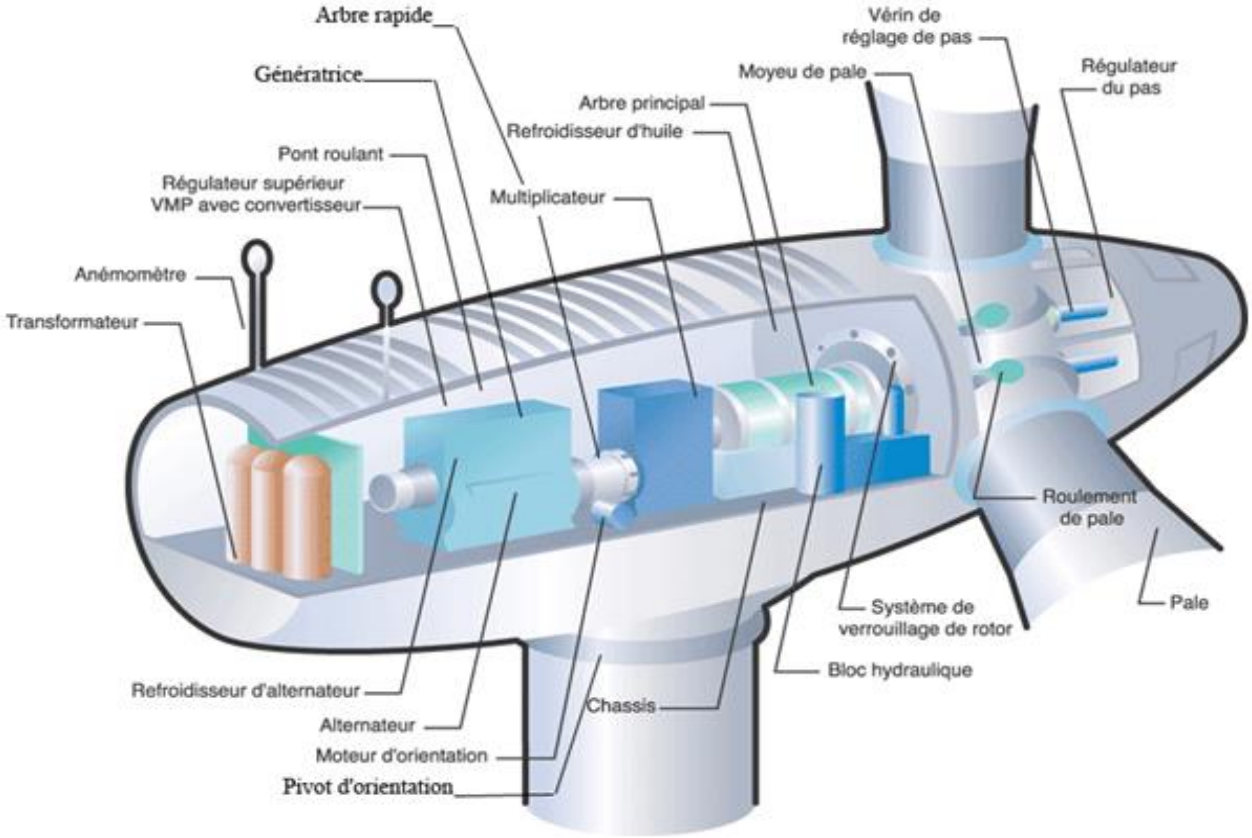
-L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

-Génératrice : Différents types de génératrices peuvent être rencontrés.

- Contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor, nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts instationnaires sur l'installation. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.

- Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau, ou d'huile. [3]

-Dispositif d'orientation de la nacelle : Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée ; cela évite de solliciter constamment les moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance. [3]



Figure(II.3): Eléments d'une nacelle.

II-2-3-3.Mât

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor, nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi le captage de l'énergie.

Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble (rotor, nacelle) de manière à s'adapter au mieux aux différents sites d'implantation.

Figure(II.4) : Composants électroniques dans le mât d'une éolienne. [3]

II-2-4.Principe de fonctionnement d'une éolienne

Le principe de fonctionnement des éoliennes pour particulier repose principalement sur le vent. Au moyen d'outils mécaniques, le but de l'éolienne est de capter l'énergie cinétique du vent pour la transformer en énergie électrique. [5]

II-2-5.Principaux composants d'une éolienne

On présente les différents composants de l'éolienne :

1- Pales en composite fibre de verre. Pas fixe, profil de type stall (décrochage). Freins aérodynamiques d'extrémité pivotants.

2- Moyeu du rotor en fonte.

3- Structure de la turbine en fonte ductile ou en acier soudé galvanisé à chaud.

4- Paliers du rotor à double rangée de billes.

5- Arbre lent du rotor en acier haute résistance.

6- Multiplicateur de vitesse à 3 étages (1 train épicycloïdal et 2 trains parallèles).

7- Frein à disque sur l'arbre rapide avec témoin d'usure.

8- Accouplement avec la génératrice de type flexible.

9- Génératrice (800/200 kW) asynchrone refroidie à l'eau.

10- Radiateur de refroidissement intégré au système multiplicateur - génératrice.

11- Système de mesure du vent (anémomètre et girouette) transmettant les signaux au système de contrôle de la turbine.

12- Système de contrôle surveillant et pilotant la turbine.

13- Système hydraulique pour les freins d'extrémité de pale et le système d'orientation.

14- Entraînement d'orientation de la tourelle à deux trains d'engrenages planétaires entraînés par des moteurs alimentés à fréquence variable.

15- Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque.

16- Capot de la nacelle en structure acier recouverte de composite fibre de verre.

17- Tour en acier tubulaire (plusieurs hauteurs possibles. [5]

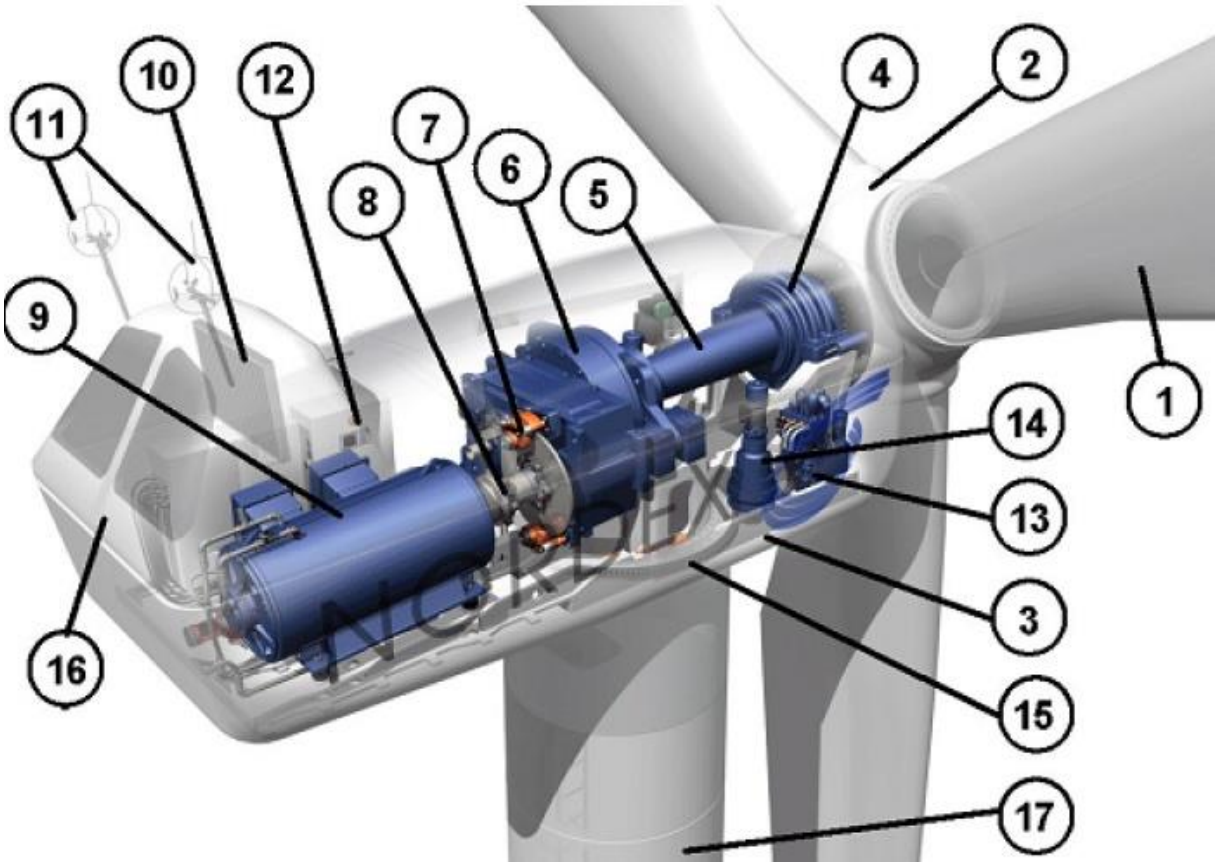


Figure (II.5): Principe de fonctionnement d'une éolienne.

II-2-6.Chaine de conversion de l'énergie éolienne

Pour obtenir de l'électricité à partir du vent, on retrouve dans les différentes configurations les mêmes éléments de base à savoir :

- Une turbine qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique.
- Une transmission mécanique.
- Une génératrice.
- Un système de liaison électrique.

Selon l'utilisation de l'éolienne, certaines de ces parties sont plus ou moins développées, on distingue deux grandes familles d'éoliennes:

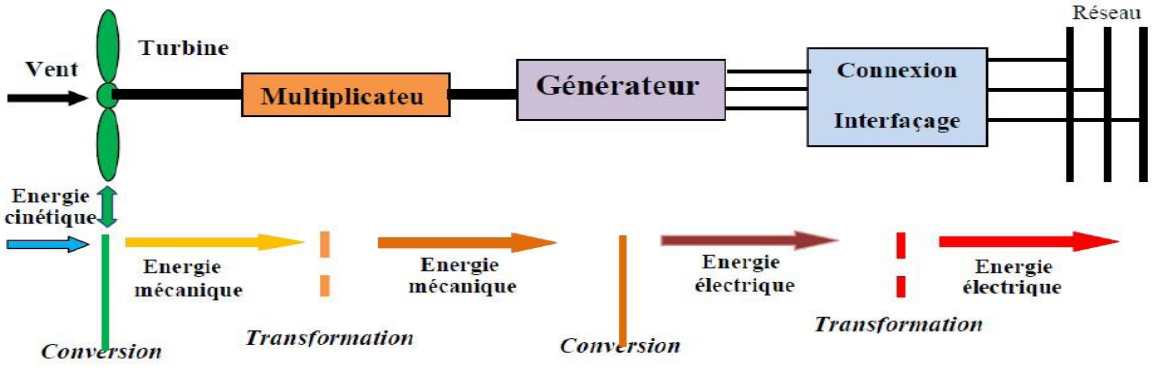
- Les éoliennes raccordées au réseau.
- Les éoliennes autonomes. [5]

II-2-7.Principe de conversion de l'énergie éolienne

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraine un générateur qui produit de l'électricité. La vitesse de rotation du rotor doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tr/mn pour une machine à 2 parties de pôles, vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur. Des convertisseurs électroniques de vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur.

Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée, tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent.

La tension de l'électricité produite par générateur est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mat. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public. [5]



Figure(II.6): principe de la conversion de l'énergie éolienne.

II-2-8.Les différentes formes des éoliennes

En effet, il existe une grande diversité d'éoliennes. Le monde des éoliennes ne se résume pas aux énormes structures à 3 pales que l'on peut apercevoir dans le paysage, elles diffèrent de part leurs formes, leurs tailles ou encore leurs fonctions.

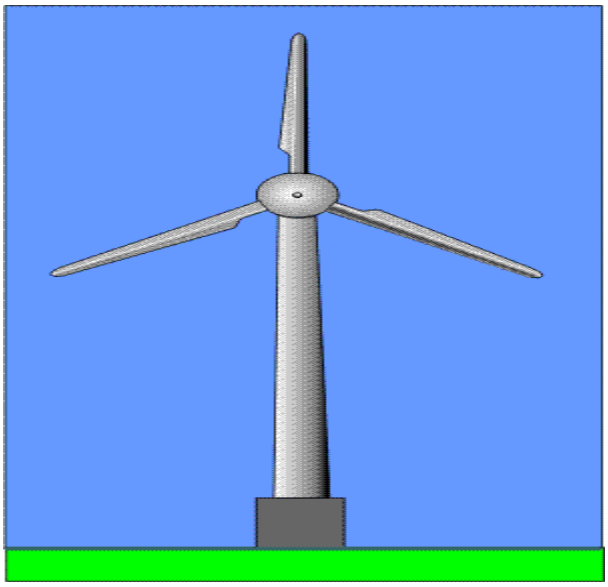
La forme de l'éolienne est tout d'abord conditionné par l'orientation de l'axe de rotation du rotor, la partie de l'éolienne composée des pales qui va donc tourner en présence de vent. L'axe de rotation du rotor peut être soit horizontal, soit vertical. [6]

Ensuite, de nombreuses variantes existent selon la forme des pales. Mais voyons les principales formes utilisées :

II-2-8-1.Eolienne à axe horizontal

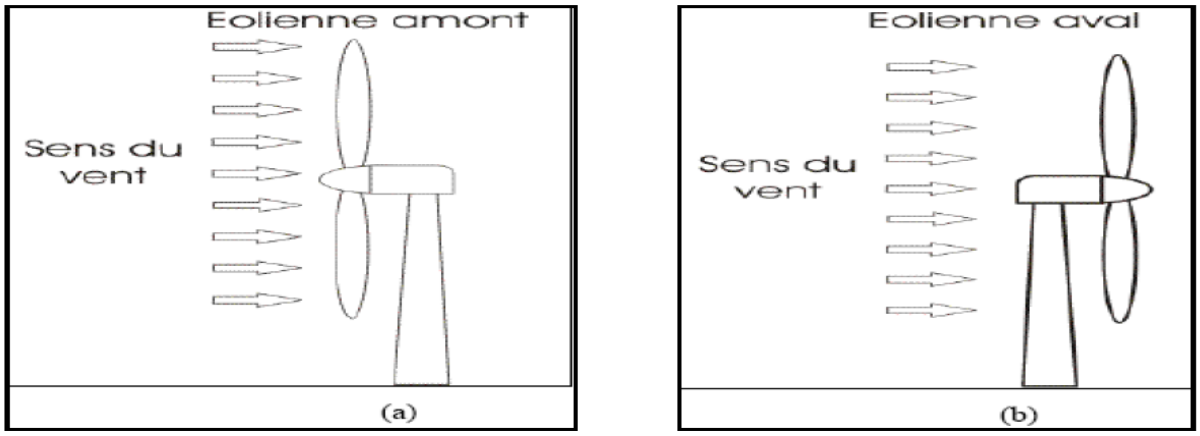
Les éoliennes à axe horizontal doivent s'orienter face au vent pour fonctionner plus efficacement, cela est réalisé soit par un safran (effet girouette), soit à l'aide de capteurs qui identifient le sens du vent et d'un moteur qui orientera l'éolienne. Les anciens moulins à vent sont également des éoliennes à axe horizontal.

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus communes, elles composées de pales dans le nombre peut-être très variable. Pour la fabrication d'électricité on retrouve plus fréquemment des modèles à 3 pales et pour le pompage des modèles à quelque dizaine de pales. [6]



Figure(II.7): Eoliennes à axes horizontal

On peut distinguer des éoliennes dont l'hélice est en amont par rapport au vent, « hélice au vent » et ceux dontl'hélice est en aval par rapport au vent, « hélice sous le vent ».



Figure(II.8): Eolienne à axe horizontal.

II-2-8-1-1.Avantage

Grand choix des modèles, technologie éprouvée, prix.

II-2-8-1-2.Inconvénients

Installation uniquement sur un terrain, bruit, mauvais rendement dans les vents turbulents.

II-2-8-2.Eoliennes à axe vertical

Il existe deux principaux types d'éoliennes à axe vertical : type Savonius et type Darrieus. Leur rendement est moins bon que celui les éoliennes à axe horizontal mais elles d'autres avantages non négligeables : machineries au sol, pas besoin d'orientation en fonction de la direction du vent, construction souvent simple.

Elles tournent à faible vitesse et sont de ce fait peu bruyantes. Elles présentent par contre des difficultés pour leur guidage mécanique, le palier bas devant supporter le poids de l'ensemble de la turbine.

- Eoliennes de type Savonius :

Il existe de très nombreuses variantes des éoliennes de type Savonius, le nombre de pales peut varier et leur forme également, elles peuvent être droites ou hélicoïdales. [6]

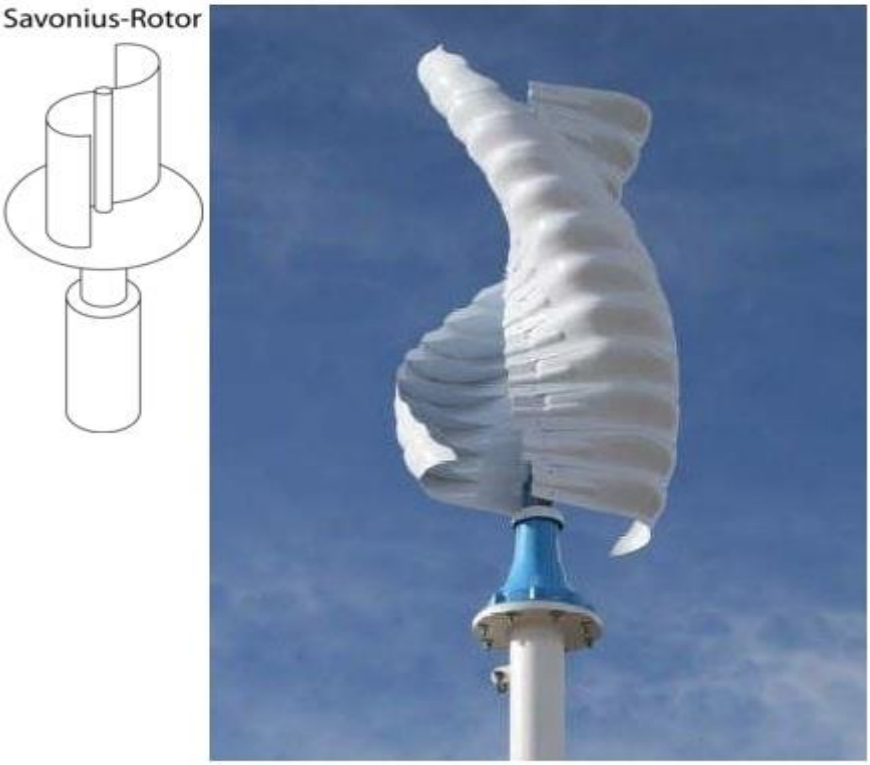


Figure (II.9) : Eoliennes de type Savonius

- Eoliennes de type Darrius :

Là encore différentes variantes existes. Elles ont l'avantage de pouvoir s'intégrer plus facilement au paysage.

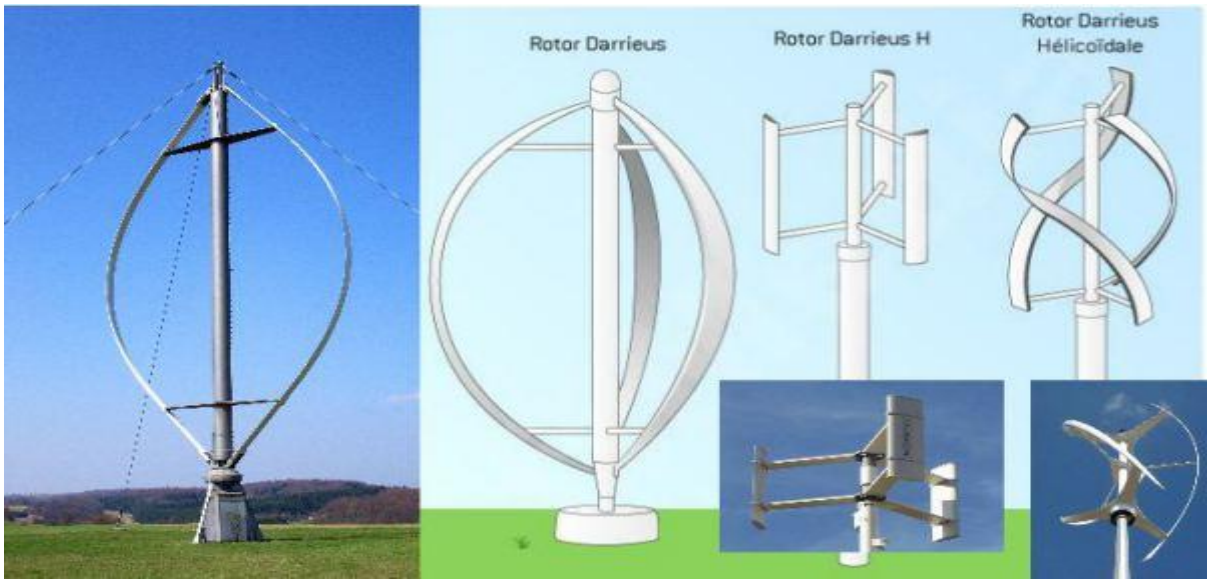


Figure (II.10) : Eoliennes de type Darrius.

II-2-8-2-1.Avantages

-Elle vous permet de placer la génératrice, le multiplicateur, etc. à terre, et vous n'avez pas besoin de munir la machine d'une tour.

-Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans ladirection du vent.

II-2-8-2-2.Inconvénients

- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante.

- L'éolienne ne démarre pas automatiquement. Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne). [7]

II-2-9.Classifications des éoliennes selon la puissance

Tableau (II.1) : Classification des éoliennes selon la puissance : [7]

classification des éoliennes	Diamètre (m)	Puissance (w)
petite éolienne	entre 0,5 m et 20 m	Inferieur à 100 Kw
moyenne éolienne	20m et 50m	100 Kwa 1 Mw
grande éolienne	50 m à 100 m	plus de 1 Mw

II-3-1.Formation du vent

Dans un sens macro-météorologiques, les vents sont les mouvements des masses d'air dans l'atmosphère génère sous l'effet des différences de température. Le gradient de température est dû au chauffage solaire inégal. En fait, la région équatoriale est plus irradiée que ceux polaires. Par conséquent, l'air de la région équatoriale est le plus chaud et plus léger atteint les couches externes de l'atmosphère et se déplace vers les pôles, en étant remplacé au niveau des couches inférieures par un écoulement de retour d'air plus froid provient des régions polaires.

La couche inférieure de l'atmosphère est connu comme couche de surface et se prolonge à une hauteur de 100 m. Dans cette couche, les vents sont retardés par les forces de frottement et obstacles modifiant n'est pas seulement leur vitesse mais aussi leur direction.

Telle est l'origine des écoulements turbulents, qui provoquent des variations de l1a vitesse du vent sur une large gamme d'amplitudes et de fréquences.

En outre, la présence des mers et grande lacs provoque la circulation des masses d'air de nature similaire à des vents géostrophiques. Tous ces mouvements de l'air appelé vents locales. [8]

II-3-1-1.La direction du vent

La direction du vent est celle de sa provenance. On dit un vent du nord, quand le ventprovient du nord et se dirige vers le sud.

II-3-1-2.Forces agissant sur le vent

Pour un observateur à l'arrêt par rapport au sol, il existe quatre forces majeures qui agissent sur une partie élémentaire d'air :

- Force gravitationnelle : Conséquence de l'attraction mutuelle des corps, cette force intervient à cause de la grande masse de la terre. Elle est dirigée vers le centre de la terre.
- Force de pression : Dirigées des hautes pressions vers les basses pressions, ces forces sont deus au gradient de pression résultant de l'échauffement inégal de l'air suivant les altitudes, la nature des sols etla répartition des océans et des continents. Les forces de pressions sont à l'origine dudéplacement des masses d'air.

II-3-1-3.Force de Coriolis

Cette force est le résultat de la rotation de la terre autour de son axe et est perpendiculaire à la vitesse du vent.

II-3-1-4.Forces de frottement

Ces forces traduisent la friction turbulente de l'air avec le sol. Elles interviennent dans la couche limite atmosphérique. La force gravitationnelle et la force du gradient de pression sont les deux forces qui peuvent initier un mouvement de l'air. Leurs actions se font ressentir près du sol dans une zone appelée couche limite atmosphérique. [9]

II-3-2.Caractérisation de la vitesse du vent

La puissance énergétique éolienne moyenne disponible, associée à une circulation d'unemasse d'air à une vitesse V et agissant sur une surface S, de la roue d'une éolienne s'écrit, [8]

$$\boldsymbol{P} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}\rho V S^2 \qquad \textbf{(I.1)}$$

- P : Puissance moyenne (w)
- ρ: Masse volumique en (kg/m³), paramètre variant avec l'altitude et la température. (D'environ 1.25 kg/m³).
- S : la surface balayée par les pales de l'éolienne (en m²).
- V : la vitesse moyenne de vent (m/s).

II-3-3.Classification du vent

En fonction de sa vitesse et de ses effets, on classe le vent d'après l'échelle de Beaufort, créé en 1805 par l'amiral du même nom.[10]

Tableau (II.2) : classification du vent d'après l'échelle de Beaufort : [11]

Dégrée	**Vitesse (m/s)**	**Effet au sol**	**Effet sur l'eau**	**Hauteur des vagues (m)**
0. Calme	<1	Pas de vent, la fumée monte verticalement	Comme un miroir	0
1. Très légère brise	De 0,6 à 1,7	La fumée fléchit	Calme plat	0-0,2
2. Brise légère	De 1,8 à 3,3	Les feuilles bougent	Vaguelettes	0,2-0,6
3. Petite brise	De 3,4 à 5,2	Les feuilles s'agitent	Petites vagues courtes	0,6-1
4. Jolie brise	De 5,3 à 7,4	Les petites branches Bougent	Vagues avec crête	1-2
5. Bonne brise	De 7,5 à 9,8	Les grosses branches	Vagues moyennes, moutons, embruns	2-3

		Bougent	éclaboussures	
6. Vent frais	De 9,9 à 12,4	Les grosses branches s'agit et on le sent dans les maisons	Grosses vagues avec Ecume	3-4
7. Vent fort ou grand frais	De 12,5 à 15,2	Il agite les branches et gène la marche	Très grosses vagues avec écume	4-5,5
8. Bourrasque ou coup de vent	De 15,3 à 18,2	Il casse les branches et agite de gros arbres	Vagues hautes, embruns et visibilité réduite	5,5-7
9. Forte bourrasque ou fort coup de vent	De 18,3 à 21,5	Il arrache les tuiles des Toits	Lames avec écume épaisse, visibilité	7-9
10. Tempête	De 21,6 à 25,1	Il arrache et abat les arbres	Grosses lames, mer blanchâtre, visibilité très réduite	9-11,5
11. Violente Tempête	De 25,2 à 29	Il provoque des dégâts Enormes	Très grosses lames, la mer est couverte d'écume, visibilité proche du zéro	11,5-14
12. Ouragan	Plus de 29	Destruction générale de tout ce qu'il rencontre	Mer totalement blanche, visibilité nulle, lames exceptionnellement	Plus de 14

II-3-4.Instruments pour mesurer le vent

II-3- 4-1.La girouette

La girouette est un instrument qui nous indique l'origine du vent. C'est un pointeur (une flèche, un coq etc.) qui est monté sur un axe rotatif. Le pointeur peut tourner librement autour de son axe et s'aligne donc parallèlement au vent. C'est la partie la plus mince du pointeur (la pointe de la flèche, le bec du coq etc.) qui nous indique la provenance du vent. Il peut y avoirune croix immobile indiquant les points cardinaux fixée sous le pointeur d'une girouette traditionnelle. Puisque l'usage des girouettes s'est répandu en Europe durant le moyen-âge et

qu'il en existait même 4000 ans auparavant, on ne peut pas dire qui en est l'inventeur précisément.

Unités de mesure : Les points cardinaux ou les degrés d'orientation par rapport au nord géographique.[11]

Figure(II.11) : girouette

II-3- 4-2.La manche à air (manche à vent)

La manche à air est un instrument qui nous indique l'origine du vent et nous donne aussi une approximation de la vitesse du vent. C'est un tube de toile souple fermé à l'une des extrémités que l'on appelle manchon et fixé à un mât. Le vent s'engouffre par l'ouverture et soulève le manchon. Il y a toujours au moins trois bandes rouges et deux bandes blanches qui s'alternent.

Ces bandes nous permettent une approximation de la vitesse du vent. Chaque bande correspond à une vitesse de 5 nœuds (environ 9 km/h).

Alors quand il y a cinq bandes du tube de toile complètement à l'horizontal on peut dire qu'il y a un vent d'au moins 25 nœuds (environ 45 km/h).

Le tube de toile peut aussi pivoter sur son axe alors il nous permet de connaître la direction du vent. Le manchon pointe vers où le vent se dirige. [11]

Figure(II.12) : manche à air

II-3-4.3.L'anémomètre

L'anémomètre est un instrument qui nous indique la vitesse du vent. L'anémomètre est composé de coupelles en forme de demi-sphères vides orientées dans le même sens qui tournent librement autour d'un axe. Dans les anémomètres modernes, un système électronique permet alors de calculer le nombre de tours effectués par les coupelles dans un certain temps.

La vitesse du vent apparaît alors sur un petit écran. On peut très bien connaître la vitesse du vent seulement de façon mécanique aussi.

L'anémomètre a été inventé par l'architecte italien LeonBattista Alberti en 1450.

Unités de mesure: En kilomètres par heure (km/h) ou en mètres par seconde (m/s). [11]

Figure(II.13) : Anémomètre

II-4.Choix du site et traitement des données

L'énergie cinétique de vent constitue une ressource énergétique inépuisable mais fluctuante. Pour toute installation d'une éolienne dans un endroit, il faut d'abord une étude des caractéristiques des sites.

Le potentiel éolien d'un site est défini par comme l'énergie extractible durant une période donnée (typiquement une année) de fonctionnement d'une éolienne donnée sur ce site. Pour

l'évaluer, il faut disposer de la distribution des vitesses de vent sur le site. De plus, lors de la définition du site d'implantation d'un parc éolien donné, d'autres paramètres doivent être pris en compte et il est nécessaire d'établir la distinction suivante :

« L'évaluation de la ressource éolienne s'étend de l'estimation générale de l'énergie moyenne contenue dans le vent au-dessus d'une vaste région – évaluation régionale – au calcul de la production d'énergie annuelle moyenne d'un aérogénérateur spécifique pour un site donné appelé choix de site (siting) … ». [8]

II-4-1.Critères de choix des sites éoliens

Avant d'implanter une ou plusieurs éoliennes, l'observation du potentiel éolien,c'est-à dire l'histoire des vents du site, depuis au moins une décennie, estfondamentale. De plus, pour avoir une idée des variations durant l'année, une étude de larépartition du vent est réalisée sur place pendant cette période.

En général, un lieu en hauteur et éloigné des habitations est privilégié pour la mise en place del'éolienne car son efficacité dépend grandement de son emplacement.

En effet, la puissance fournie augmente avec le cube de la vitesse du vent, et les sitesseront d'abord choisis en fonction de la permanence de vents de force suffisante. Un site avecdes vents d'environ 30km/h en moyenne sera toujours bien meilleur (de l'ordre de 8 fois)qu'un autre site avec des vents de 15km/h en moyenne.

Un autre critère important pour le choix du site est la constance de la vitesse et de la direction du vent, autrement dit la turbulence du vent.

En effet, en règle générale, les éoliennes sont utilisables quand la vitesse du vent est supérieure à une valeur comprise entre04 et 20km/h, sans toutefois atteindre des valeurs excessives qui conduiraient soit à la destruction de l'éolienne, soit à des coûts de construction et de maintenance prohibitifs.

La vitesse du vent doit donc être comprise le plus souvent possible entre ces deux valeurs pour un fonctionnement optimal de l'éolienne. De même, l'axe de rotation de l'éolienne doit rester le plus clair du temps parallèle à la direction du vent.

Même avec un système d'orientation de la nacelle performant, il est donc préférable d'avoir un vent le moins fluctuant possible dans sa direction pour obtenir un rendement optimal. [8]

Certains sites sont ainsi à proscrire car le vent est trop turbulent : la proximité d'obstacles (arbres, bâtiments, escarpements...).

On recherche habituellement les sites propices à l'installation d'éoliennes en observant les arbres et la végétation. Le site est intéressant s'ils sont constamment courbés par les vents.

Une autre façon de procéder est d'utiliser une carte de la vitesse des vents, ou des données accumulées par une station météorologique proche.

Certains sites bien spécifiques sont particulièrement propices à un bon rendement :

- L'effet tunnel ou effet Venturi: au niveau des cols entre deux montagnes, ou entre deux grands bâtiments, le vent est souvent plus fort. L'air est compressé entre les montagnes ou les bâtiments, et, pour garder un débit d'air constant, la vitesse augmente donc considérablement. De plus, le vent garde souvent une direction constante. Ces lieux sont donc très appropriés pour les éoliennes. Le problème est qu'ils sont souvent restreints. et qu'il est difficile d'y placer une grande quantité d'éoliennes.

- La mer et les lacs sont aussi des emplacements de choix: il n'y a aucun obstacleau vent, et donc, même à basse altitude, les vents ont une vitesse importante. Laproximité d'une côte escarpée, en revanche, créera également des turbulences à éviter.

L'évaluation régionale s'inscrit dans une phase que nous appellerons de pré-siting. Selon, cette phase fait la synthèse du point de vue environnemental, légal, sociologique et de l'évaluation régionale du potentiel.

Elle permet le choix d'une zone préférentielle d'implantation d'éoliennes. Les données de potentiel éolien issues de l'évaluation régionale proviennent de modèles d'interpolation des données statistiques de vent issues du traitement de plusieurs dizaines d'années de données du réseau météorologique. [8]

Ces modèles permettent, à terre, l'obtention des cartes de potentiel éolien à petite échelle spatiale (haute résolution spatiale).

La phase de siting comprend l'analyse fine de la zone sélectionnée, permettant par exemple l'optimisation du placement des machines.

Cette phase consiste en l'implantation d'un mât de mesure sur le site, de façon à en évaluer les caractéristiques fines à différentes altitudes et de connaître les micro-variations de la ressource éolienne ainsi que le comportement du profil de vitesses de vent. Ceci implique une campagne de mesure de longue durée mais offre la certitude d'une bonne connaissance du site. [10]

II-4-2.Choix d'un site éolien

Des données météorologiques, reproduites de préférence en forme d'une rose des vents sur 30 ans, seront probablement le meilleur guide, mais ces données ne sont que très rarement collectées sur le site exact en question, et de plus, comme nous l'expliquerons un peu plus loin, on doit pour plusieurs raisons toujours se servir de données météorologiques avec beaucoup de prudence.

S'il y a déjà des éoliennes à proximité, leur production d'électricité constitue un indicateur excellent de la ressource éolienne locale. Dans des pays comme le Danemark et l'Allemagne où l'on trouve souvent des éoliennes dispersées un peu partout dans le pays, les constructeurs sont le plus souvent en mesure de fournir des résultats de production à base de calculs éoliens réalisés sur le site en question. [16]

-Recherche d'une vue dégagée

Il faut de préférence avoir une vue aussi dégagée que possible dans la direction desvents dominants. De même, il faut qu'il y ait aussi peu d'obstacles et une rugosité aussi faibleque possible dans cette direction.

Si de plus, vous réussissez à trouver une colline à pentes douces, il est même possibled'obtenir un effet accélérateur. [16] Donc pour choisir un bon site éolien il faut avoir :

-Un raccordement au réseau

Les grandes éoliennes doivent évidemment être raccordées au réseau électrique.

Lorsqu'il s'agit de projets éoliens de moindre envergure, il est donc primordial que l'éolienne soit installée relativement près d'une ligne électrique de 10 à 30 kilovolts (kV) afin d'éviter que les coûts de pose de nouveaux câbles ne soient exorbitants.

Evidemment, la question de savoir qui va payé pour l'extension des lignes électriques n'est pas sans importance dans ce contexte.

Les générateurs des grandes éoliennes modernes produisent normalement de l'électricité à 690V. Un transformateur situé soit à côté de l'éolienne, soit à l'intérieur de sa tour, convertit l'électricité en haute tension.

-Un renforcement du réseau électrique

Le réseau électrique près de l'éolienne installée doit être mis en état de recevoir l'électricité qu'elle produit.

Si beaucoup d'éoliennes ont déjà été raccordées au réseau, il est possible qu'il faille le renforcer en posant un plus grand câble qui sera éventuellement raccordé plus près d'une station de transformation à haute tension.[17]

-Une infrastructure

Lors de l'élaboration d'un projet éolien, il faut toujours tenir compte des coûts liés à l'établissement des fondations des éoliennes et à la construction d'un chemin permettant aux camions lourds de gagner le site.

-Eviter les risques liés à l'usage de données météorologiques

Les météorologues recueillent déjà des données météorologiques pour leurs prévisions du temps et pour l'aviation. Très souvent, ces données sont également utilisées pour évaluer les conditions éoliennes générales dans une région déterminée.

Cependant, des mesures précises de la vitesse du vent - et donc de l'énergie éolienne sont bien plus importantes pour la réalisation d'un projet éolien que c'est le cas lorsqu'il s'agit de faire des prévisions du temps.

Ainsi, la vitesse du vent se trouve très influencée par la rugosité de la zone environnante, par les obstacles avoisinants (arbres, phares, bâtiments,...) et par les contours du terrain local.

A moins que vous ne fassiez des calculs qui compensent les conditions locales prévalant à l'endroit où les mesures météorologiques ont été réalisées, il est très difficile de faire des estimations de la ressource éolienne sur un site donné, même lorsque celui-ci est situé à proximité de la station météo.

Dans la plupart des cas, on risque de sous-estimer le potentiel éolien si l'on se sert de données météorologiques sans les ajuster pour le site en question.[17]

II-4-3.Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

- **Avantages**

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.

- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées.
- L'énergie éolienne est une énergie propre.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace. L'énergie éolienne possède d'autre part des atouts économiques certains.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont minimes.[18]

- **Inconvénients**

- La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour le raccordement au réseau.
- Le cout de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classiques surtout sur les sites moins ventés.
- Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaitre après l'apparition des éoliennes à attaque directe.[19]

II-5.Production mondiale d'énergie éolienne

L'utilisation moderne de l'énergie éolienne est aujourd'hui pratiquement réservée à la production d'électricité.

La découverte capitale de la puissance éolienne se fit avec la crise du pétrole en 1973, quand la montée en flèche des prix du pétrole passait de 12 à 35 US$.

Soudainement, les pays de l'OCDE voulurent devenir plus indépendants des importations de pétrole et se tournèrent vers le développement de l'énergie éolienne, et ce pratiquement exclusivement pour la production d'électricité.

Vingt ans plus tard, la technologie en matière d'éoliennes a mûri et les éoliennes sont passées de 10 kW à plus de 3000 KW.[17]

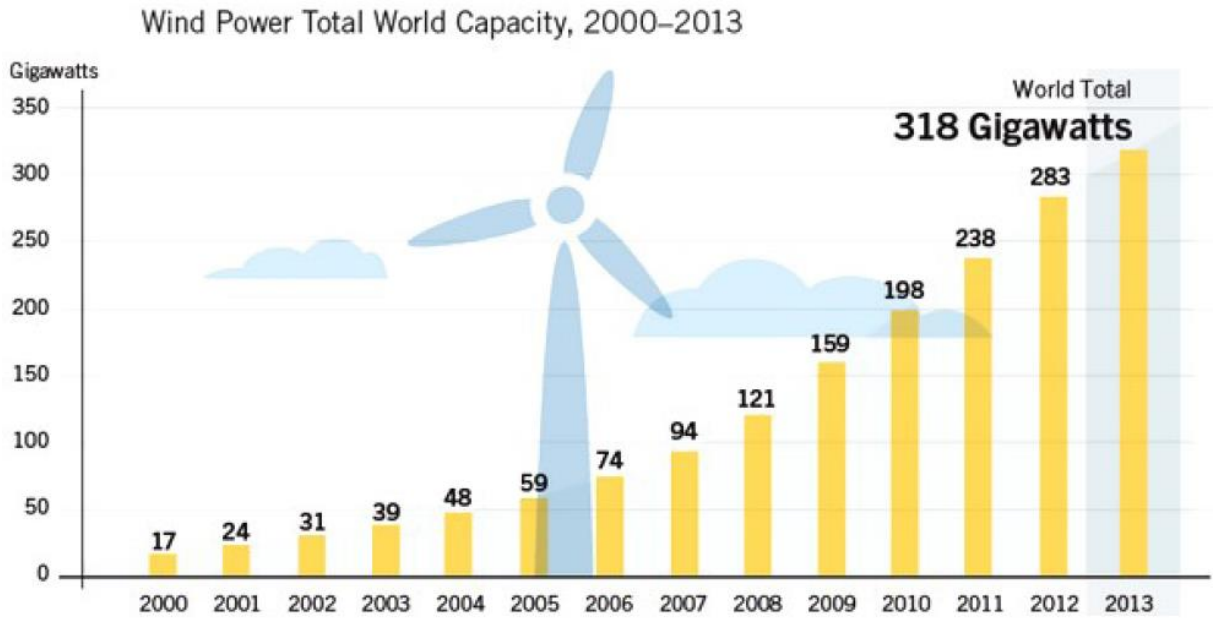


Figure (II.14): l'évolution des capacités éoliennes dans le monde 2000-2013. [20]

II-5-1.Contexte actuel en Algérie

L'Algérie à l'instar des autre pays essaye de percer dans le domaine des énergies renouvelables et l'énergie éolienne en particulier. Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie.

Cette représentation de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. Le second est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers le pays.

La carte représentée ci-dessous montre que le sud est caractérisé par des vitesses plus élevés que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar.

Concernant le nord, la vitesse moyenne est globalement peu élevée. Il est noté cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El kheiter ainsi que dans la région délimitée Bejaia au nord et Biskra au sud.

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. La réalisation d'une carte saisonnière a montré clairement que l'automne et l'hiver sont moins ventée. Néanmoins, il faut remarquer que la région de Tiaret fait l'exception avec une vitesse plus faible en été qu'en hiver.[20]

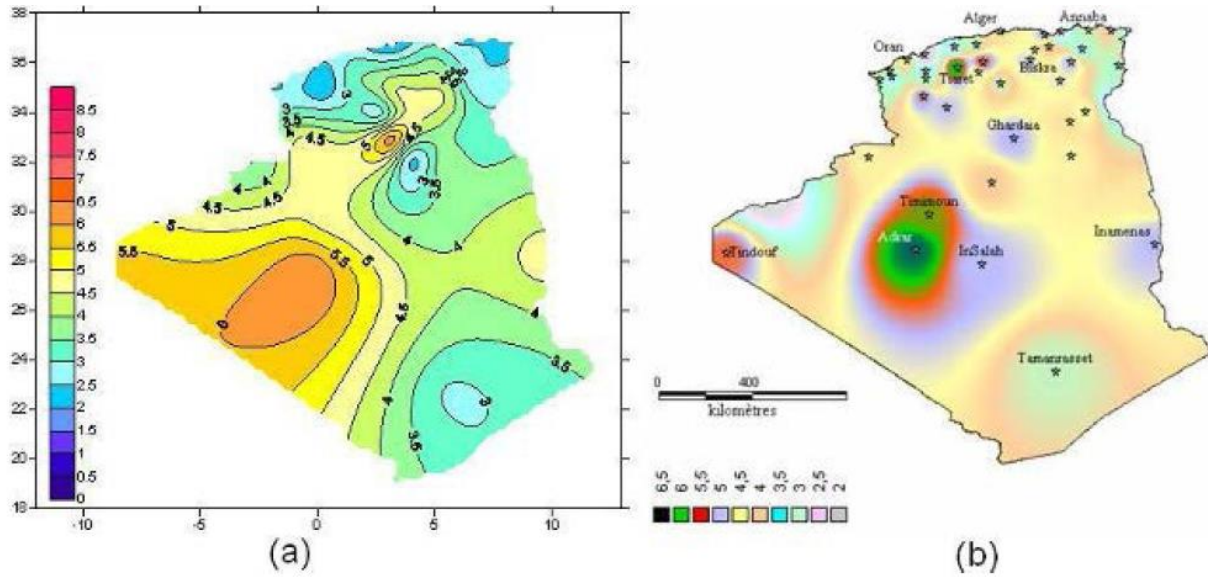


Figure (II.15): carte du potentiel éolien en Algérie.[12]

- (a) Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par Dr. Chellali
- (b) Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par Dr. Kasbadji-Merzouk

Cette carte permet de cibler les zones les mieux ventée pour installer des parcs éoliens en vue d'alimenter des régions isolées pour avoir une autonomie énergétique par rapport au réseau national déjà très chargé. Des projets de ce genre sont en phase d'étude et d'autrescommence à voire le jour tel que la réalisation de la première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10MW.[12]

II-5-2.Sonelgaz inaugure sa première ferme éolienne de 10 MW à Adrar

Figure (II.16) : ferme éolienne à Adrar

Sonelgaz a mis en service sa première ferme éolienne d'Adrar d'une capacité de 10 mégawatts qui servira aussi de projet pilote pour le plan éolien du gouvernement de 420 MW à l'horizon 2024. Constituée de 12 éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85 MW chacune (pour une capacité globale de 10 mégawatts), cette ferme est implantée sur une superficie de 30 hectares dans la zone de Kabertène à 72 km au nord du chef-lieu de la wilaya d'Adrar, a nécessité près de 32 mois travaux pour un coût global de 2,8 milliards de dinars.

Première du genre à l'échelle nationale, cette nouvelle centrale de production d'électricité fait partie d'un vaste plan de projets de génération de 22 GW, d'énergie renouvelable à l'horizon 2030 dont 1,7 GW en éolien.

Une étude du consortium industriel pour l'électricité des déserts, le promoteur du projet Desrtec, estime que l'Algérie dispose d'un potentiel énorme en énergie éolienne.

La société d'électricité et de l'énergie renouvelable, annonce qu'environ 40 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale sera d'origine renouvelable à l'horizon 2030. [21]

II-5-3.Répartition régionale de la vitesse du vent

Pour installer une éolienne il faut choisir un site où la vitesse du vent fournirait l'énergienécessaire; nous devons donc faire des mesures de la vitesse du vent dans plusieurs sites. La figure ci-dessous montre un exemple des régions ventées en Algérie d'après les donnéessatellitaires du Laboratoire d' Energie Eolienne du Centre de Recherche en Energies Renouvelables (CDER, Algérie).

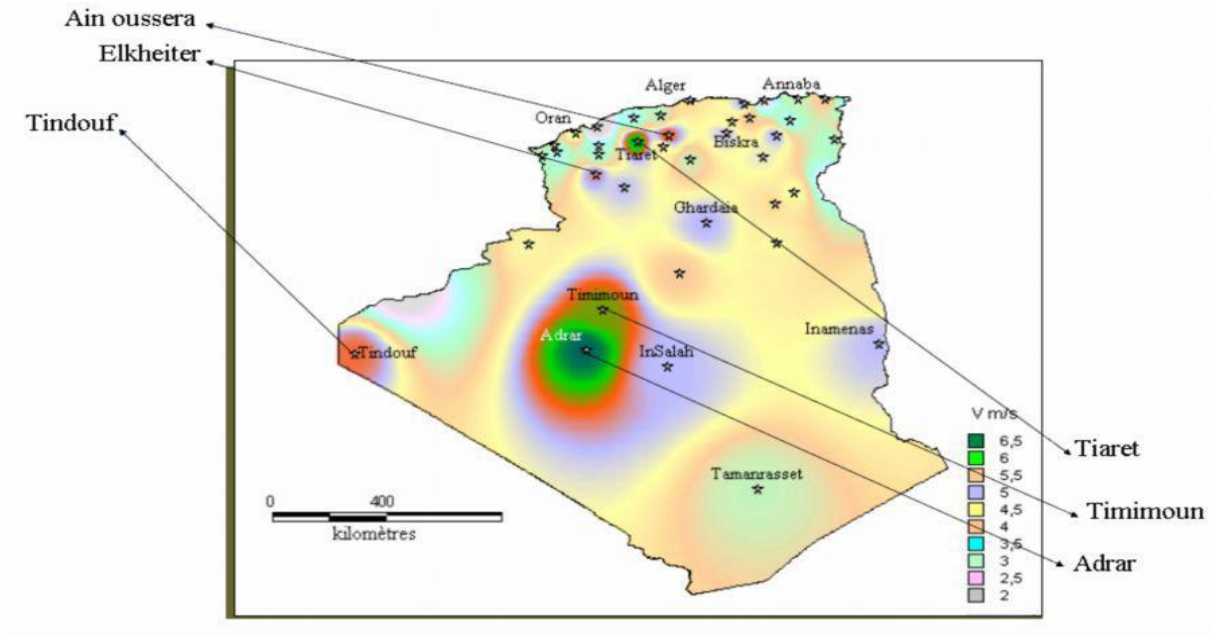
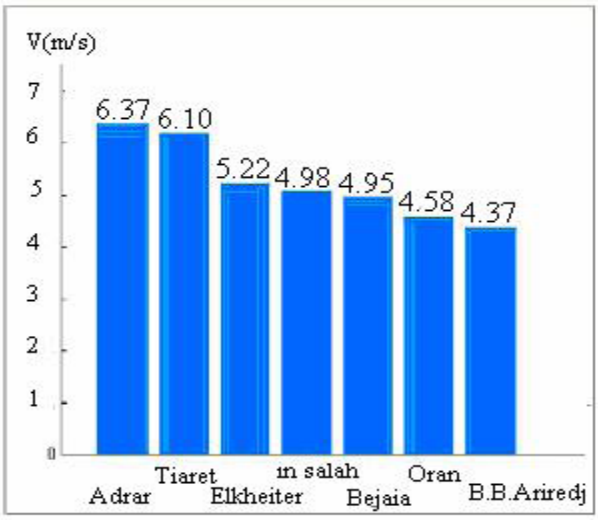


Figure (II.17) : Les régions ventées en Algérie.[26]

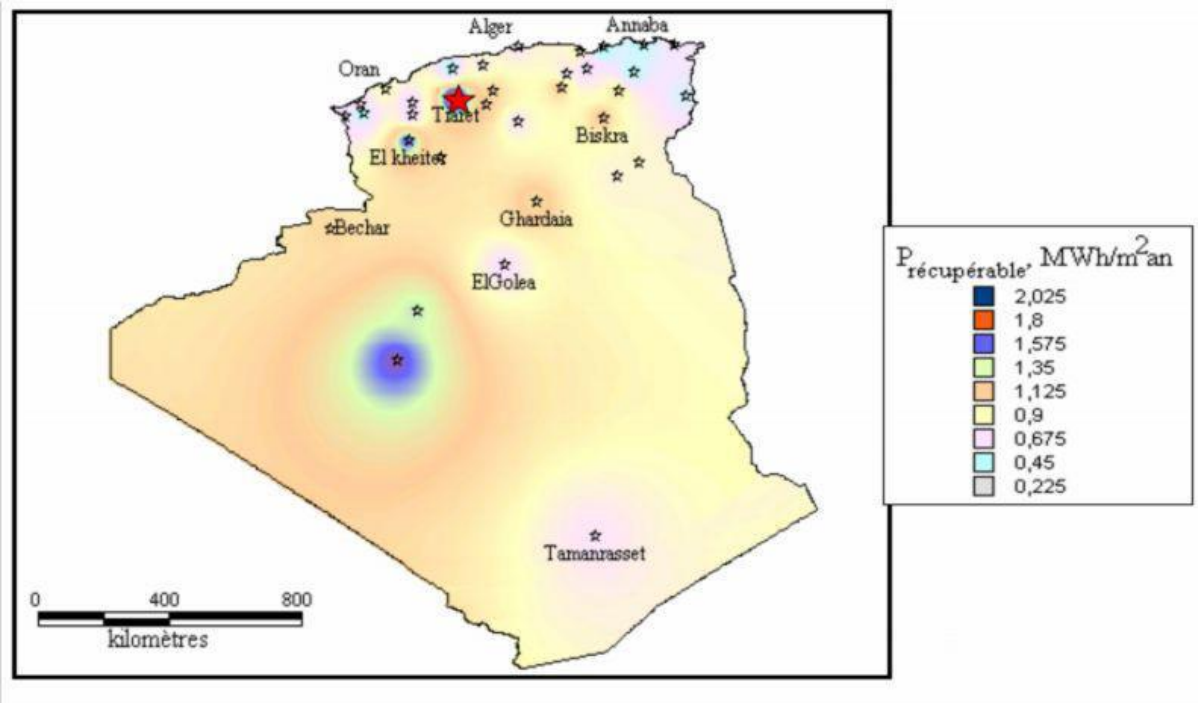
D'après les données du CDER, la figure indique les vitesses des vents pour différents sites situés en Algérie.



Figure(II.18) : Comparaison entre les vitesses moyennes de sites ventés. [22]

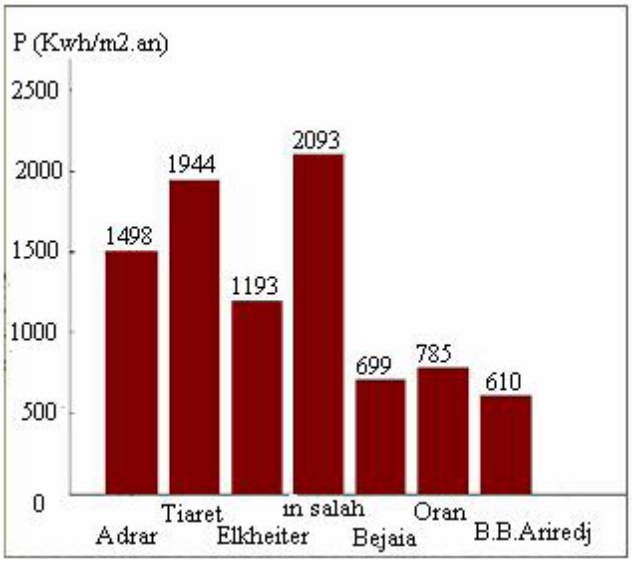
II-5-4.L'Atlas de la puissance en Algérie

La figure ci-dessous représente l'atlas de la puissance énergétiquerécupérable à 50 m d'altitude en Algérie. [26]



Figure(II.19) : Puissance énergétique récupérable à 50 m Algérie.

La figure suivante représente une comparaison entres les sites ventés en Algérie.



Figure(II.20) : Comparaison des puissances récupérables des Sites Ventés.[22]

II-5-5.Aspects économiques de l'éolienne

Vu les effets négatifs des carburants conventionnels sur l'environnement et leur disponibilité limitée ainsi que les questions de sûreté se sont associées à l'utilisation de l'énergie nucléaire, Les énergies renouvelables ne doivent pas être regardées d'un point de vue économique seulement. Cependant, ceci ne signifie nullement l'utilisation des sources d'énergies renouvelables "à tout prix". [23]

En effet, les prix de exorbitants de l'énergie ne sont pas acceptables pour l'industrie ou à l'économie en général. La profitabilité pour l'entreprise industrielle et pour l'économie nationale sont des aspects déterminants dans l'adoption d'une stratégie énergétique.

Concernant l'énergie éolienne, deux aspects sont à prendre en considération. D'une part, il y' a l'application directe (individuelle) de l'énergie éolienne par le consommateur où le prix à la consommation reviens moins chère en comparaison aux autres formes de génération de l'énergie électrique fournies par les distributeurs traditionnels de la puissance.[24]

Ceci est d'autant plus vrai si l'emplacement est approprié pour justifier l'investissement dans l'installation du système éolien. D'autre part, il y'a la génération et la distribution de l'énergie électrique par les grandes compagnies (SONELGAZ par exemple). [25]

Dans ce cas, beaucoup de paramètres et de contraintes économiques influencent les coûts de production de l'électricité. Ce sont ces contraintes économiques 'dures' qui ne permettent pas encore une utilisation profitable de l'énergie éolienne à grande échelle.

Cependant, le potentiel de développement des turbines à vent indique que les chances pour la production d'électricité à partir des ressources éolienne pour devenir concurrentielles avec les centrales conventionnelles sont tout à fait bonnes.[28]

II-5-6.Impacts Environnementaux des éoliennes

Ce paragraphe passera en revue les aspects environnementaux liés au déploiement d'une simple turbine à vent ou d'une ferme éolienne.

En effet, le développement de l'énergie éolienne a des incidences tant positives que négatives sur l'environnement. [24]

Du côté positif, l'énergie éolienne est généralement considérée comme amicale à l'environnement, particulièrement quand les effets sur l'environnement des émissions à grandes échelles des centrales électriques conventionnelles à grande échelle sont considérés.

Par exemple, des évaluations des émissions (des oxydes de soufre et d'azote, des substances particulaires, et anhydride carbonique) des centrales à charbon et des centrales à gaz par rapport à ceux des systèmes éoliens (zéro dans tous les cas) sont montrées dans le tableau ci-dessous :

Tableau(II.3) : Comparaison des émissions des centrales à charbon et à gaz avec les centrales éoliennes :

Polluant	**Charbon conventionnel Kg/MWh**	**Gaz conventionnel Kg/MWh**	**Vent**
Oxydes de soufre	1.2	0.004	0
Oxydes d'azote	2.3	0.002	0
Particules	0.8	0.0	0
Anhydride carbonique	865	650	0

Les émissions produits par les systèmes éoliens sont essentiellement zéro, bien qu'il y ait des émissions indirectes liées à la production réelle des turbines à vent et à la construction des systèmes éoliens en générale.

Sachant qu'il est difficile de mesurer le coût global à la société des divers polluants émis par les centrales conventionnelles, les avantages environnementaux de la puissance éolienne sont, généralement, calculés par les émissions évitées. [25]

Les impacts négatifs potentiels de l'énergie éolienne peuvent être classés dans l'une des catégories suivantes :

- Impact visuel des turbines éoliennes
- Bruit des turbines éoliennes (non-négligeable)
- Effets d'interférences électromagnétiques des turbines
- Impacts d'utilisation du territoire pour l'implantation des systèmes éoliens. [27]

II-6.Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté une définition de l'énergie éolienne de manière générale, la formation du vent et ses différents types, le principe de fonctionnement del'éolienne, ainsi que les différents aérogénérateurs utilisés dans les systèmes éoliens, avec un aperçu est donné sur les instruments de mesure de la vitesse du vent et le choix du site de traitement des données.Enfin, on a vu la production mondiale d'énergie éolienne et le contexte actuel en Algérie sur l'éolien, l'énergie éoliennes en Algérie dans ce titre on a étudié la répartition régionale de la vitesse du vent et l'atlas de puissance en Algérie, aspects économiques de l'éolienne et impact environnement des éoliennes.

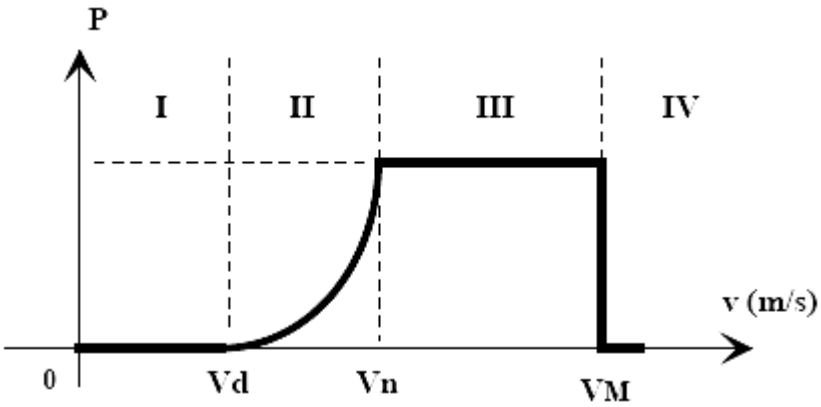
<u>Chapitre III :</u> Etude et analyse thermodynamique d'une machine absorption avec NH_3/H_2O

III-1.Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter une contribution sur la théorie générale du l'éolienne qui a été établie par Betz, la notion du coefficient de puissance coefficient de couple, vitesse spécifique ou normalisée et la distribution de Weibull, donc ce troisième chapitre sera consacré à la modélisation de la turbine éolienne.

III-2.Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

La régulation d'une source éolienne de secours est un facteur primordial pour son bon fonctionnement [1]. Ce système permet d'assurer la sécurité de l'éolienne en cas de trop forte vitesse de l'avion au déploiement, mais aussi, de limiter sa puissance pour éviter une détérioration des composants mis en jeu.



Figure(III.1): Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.

V_d: Vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs,
V_d varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.
V_n: Vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs.
V_M: Vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, V_M vaut 25m/s.

- **Zone I : $V < V_d$:** La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.
- **Zone II : $V_d < V < V_n$:** Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

- **Zone III : $V_n < V < V_M$:** La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine (P_n). Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge. [2]

III-3.Notions théoriques sur l'éolien

III-3-1.Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur ***dx***, de section ***S***, de masse volumique ***ρ***, animée d'une vitesse *v* s'écrit [3] :

$$dEc = \frac{1}{2}\rho S\, dx\, v^{\,2} \qquad (1)$$

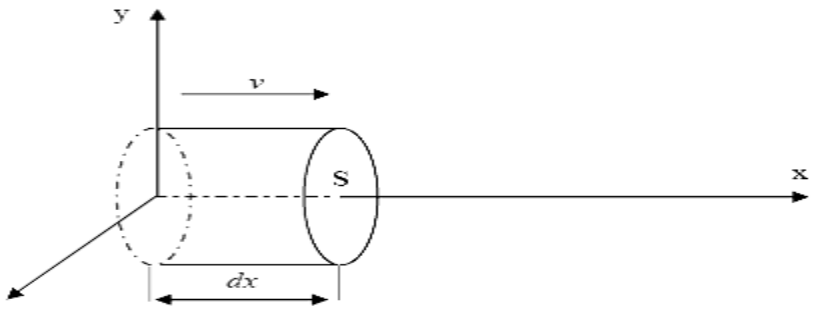


Figure (III.2) : Colonne d'air animée d'une vitesse V.

La puissance Pm extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps.

En supposant $dx=vdt$, on déduit l'expression de Pm [4] :

$$P_m = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2}\rho S_0 v^3 \qquad (2)$$

Avec :

ρ:Densité volumique de l'air (Kg/m3) ;

***v* :** Vitesse instantanée du vent (m/s);

Ec : Energie cinétique du vent (Joules).

III-3-2.Loi de Betz

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Albert BETZ en 1929, qui suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse $\boldsymbol{V_1}$ et à l'infini en aval d'une vitesse $\boldsymbol{V_2}$.

La production d'énergie ne pouvant se faire que par la conversion de l'énergie cinétique du vent, la vitesse $\boldsymbol{V_2}$ est nécessairement inférieure à $\boldsymbol{V_1}$.

Il en résulte que la veine de fluides traverse le générateur éolien en s'élargissant. Soit $\boldsymbol{V'}$ la vitesse au travers de $\boldsymbol{S}$, la section balayée par les pales de l'éolienne, et $\boldsymbol{M}$ la masse d'air qui traverse l'éolienne, la variation de l'énergie cinétique $\boldsymbol{\Delta Ec}$ est [3] :

$$\Delta E_C = \frac{1}{2}.M.(V_1^2 - V_2^2) \tag{3}$$

La puissance aérodynamique de l'éolienne $\boldsymbol{P_{aer}}$ s'écrit alors :

$$P_{aer} = \frac{1}{2}.\rho.S.V'.(V_1^2 - V_2^2) \tag{4}$$

Par ailleurs, la force de l'air **(*F*)** sur l'éolienne est donnée par:

$$F = \rho.S.V'.(V_1 - V_2) \tag{5}$$

D'où :

$$P_{aer} = F.V' = \rho.S.V'^2.(V_1 - V_2) \tag{6}$$

En identifiant les équations précédentes, il vient :

$$V' = \frac{V_1+V_2}{2} \tag{7}$$

Et donc :

$$P_{aer} = \frac{1}{4}.\rho.S.(V_1^2 - V_2^2).(V_1 + V_2) \tag{8}$$

Figure (III.3): Théorie de Betz : Schéma de principe. [5]

La puissance de l'éolienne sera alors maximale quand sa dérivée $\frac{\partial P_{aer}}{\partial V_2}$ est nulle, soit pour $V_2 = \frac{V_1}{3}$, la puissance est maximale et vaut [5] :

$$P_{aer} = P_{aer\,max} = C_{p\,max}.\frac{\rho.S.V_1^3}{2} = \frac{16}{27}.\frac{\rho.SV_1^3}{2} \quad (9)$$

On peut donc en déduire que même si la forme des pales permet d'obtenir $V_2 = \frac{V_1}{3}$

On ne récupère au mieux que 0.593 fois l'énergie cinétique de la masse d'air amont, on écrira alors :

$$P_{aer} = c_p.\frac{\rho.S.V_1^3}{2} \quad (10)$$

Où $\boldsymbol{Cp}$ est le coefficient de puissance de l'éolienne (valeur maximale 0.593). Ce coefficient dépend de la vitesse du vent en amont $\boldsymbol{V_1}$, du nombre de pales, de leur rayon, de leur angle de calage et de leur vitesse de rotation. [6]

III-3-3.Vitesse spécifique ou normalisée

On définit la vitesse spécifique ou normalisée $\boldsymbol{\lambda}$ comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine $\boldsymbol{\Omega R}$ sur la vitesse instantanée de vent $\boldsymbol{V}$ et donné par l'expression suivante [9] :

$$\lambda_n = \frac{\Omega_t.R_t}{V} \quad (11)$$

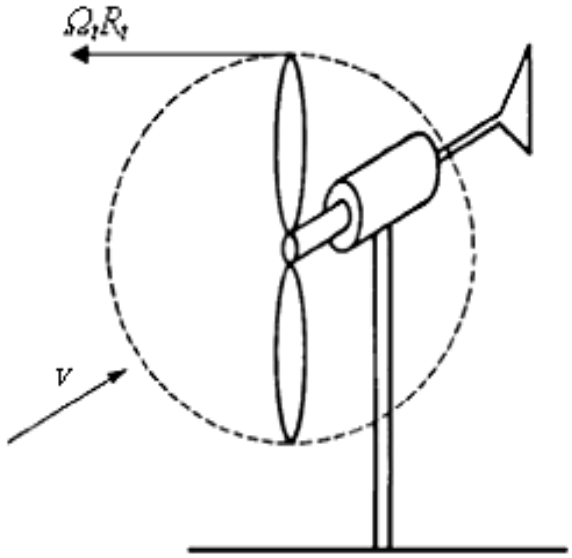


Figure (III.4): Vitesse de vent (V) et vitesse tangentielle de l'aubage $\Omega_t R_t$

$\boldsymbol{R_t}$: Rayon de la surface balayée (m) ;

$\boldsymbol{V}$ **:** Vitesse de vent (m/s) ;

$\boldsymbol{\Omega_t}$ **:** Vitesse de rotation avant multiplicatrice (rad/s).

III-3-4.Coefficient de puissance

On définit le coefficient de puissance, le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible [5] :

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1+\left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right)\left(1-\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \tag{12}$$

Le coefficient $\boldsymbol{Cp}$ est variable, il est en fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine $\boldsymbol{\Omega_t}$, et les paramètres des pales de la turbine comme l'angle d'incidence et l'angle de calage.

Il est souvent représenté en fonction de la vitesse spécifique **λ**. La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de Betz, est de 16/27 soit 0.593. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte, et les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale, se situent à 60-65% de la limite de Betz ; on ne récupère globalement que 40% de l'énergie due au vent. [8] On déduit alors le rendement aérodynamique :

$$\eta = \frac{16}{27} C_{pmax} \tag{12}$$

$\boldsymbol{C_{pmax}}$ Étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance $\boldsymbol{C_p}$. Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale $\boldsymbol{\lambda_{opt}}$ pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale $\boldsymbol{V_n}$ et une vitesse de rotation nominale $\boldsymbol{\Omega_t}$.

III-3-5.Coefficient de couple

Le coefficient de couple $\boldsymbol{C_m}$ est assez proche du coefficient de puissance $\boldsymbol{C_p}$. Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation $\boldsymbol{\Omega_t}$ nulle, ce qui correspond à une valeur de $\boldsymbol{C_p}$ nulle pour une valeur de $\boldsymbol{C_m}$ non nulle**.**

En combinant les équations précédentes la puissance mécanique $\boldsymbol{P_m}$ disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur peut s'exprimer par [6]:

$$P_m = \frac{1}{2} C_P(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^2 \tag{13}$$

Avec :

$$\lambda_n = \frac{\Omega_t R}{V_1} \tag{14}$$

D'où l'expression du couple est la suivante :

$$T_t = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{R_t P_m}{\lambda V} = \frac{C_P}{\lambda} \frac{1}{2} \rho \pi R_t^3 V^2 \tag{15}$$

La valeur du coefficient de couple est déterminée par la formule suivante :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{2T_t}{\rho S_t R_t V^2} \tag{16}$$

$\boldsymbol{T_t}$**:** Couple de la turbine éolienne (N.m). [6]

III-3-6.Distribution de Weibull

Le modèle le plus utilisé pour traduire la variation des vitesses de vent est la loi de distribution de Weibull Sa densité de probabilité se présente sous la forme [5]:

$$f(V) = \left(\frac{K}{C}\right)\left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^{K}\right. \quad (17)$$

En assimilant les fréquences aux probabilités, la densité de probabilité $\boldsymbol{f}$ **(**$\boldsymbol{V}$**)** représente la distribution en fréquences des vitesses mesurées.

$\boldsymbol{K}$ et $\boldsymbol{C}$ sont des paramètres appelés communément les paramètres de Weibull. Le paramètre $\boldsymbol{K}$ (facteur de forme) est sans dimension et caractérise la forme de la distribution de fréquence alors que $\boldsymbol{C}$ détermine la qualité du vent (facteur d'échelle). Ce dernier a la dimension d'une vitesse. [3]

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

La fonction de répartition est donnée par [6]:

$$f(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} f(V)dV = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V_x}{C}\right)^{K}\right. \quad (18)$$

$$f(V \geq V_x) = \int_0^{V_x} f(V)dV = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V_x}{C}\right)^{K}\right. \quad (19)$$

III.4.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une contribution sur la théorie générale du l'éolienne qui a été établie par Betz, la notion du coefficient de puissance coefficient de couple, vitesse spécifique ou normalisée et la distribution de Weibull, donc ce troisième chapitre sera consacré à la modélisation de la turbine éolienne.

Chapitre IV : ***Résultats et discussion***

IV-1.Introduction

L'utilisation du système d'énergie hybride (éolien-diesel) est de plus en plus utilisée dans diverses applications en sites isolés tel l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération ou le pompage. Le principe de fonctionnement de ce système hybride a des avantages techniques, économiques et écologiques on peut se fier à long terme. [1]

Dans ce contexte, l'apport envisagé avec ce travail de recherche est de collaborer à la conception optimale d'un système d'énergie hybride comportant une éolienne, un générateur diesel et un système de stockage d'énergie pour alimenter d'une façon continu un site isolé. Notre travail porte sur un système hybride (éolien-diesel), les principaux composants et les régimes de fonctionnement du SHED à été présentée ainsi que le rôle primordial de l'hybridation entre l'éolien et le diesel pour l'alimentation des sites isolés et éloignés.

IV-2.Systèmes hybrides: définitions et motivations

L'énergie éolienne est intermittente, ce qui veut dire que la puissance disponible dans le vent n'est pas uniforme tout au long de l'année, ni même tout au long d'une journée.

Afin d'assurer la réponse à une demande qui est beaucoup moins fluctuante, la turbine éolienne doit être utilisée en parallèle avec d'autres sources d'énergie. La technique la plus couramment utilisée pour pallier à ce décalage entre la demande et la production, est de relier des parcs éoliens au réseau de distribution haute tension où les autres sources d'énergie sur le réseau (hydrauliques, thermique) ont le rôle d'assurer l'équilibre entre la charge et la production. Le couplage se fait avec une centrale thermique dans les sites isolés et dans ce cas le déploiement de l'énergie éolienne présente un impact significatif, environnemental et économique, en remplaçant une partie de la production électrique par du Diesel.

Le «Jumelage Éolien - Diesel » (JED) ou plus simplement l'Hybridation, représente une technique de génération d'énergie électrique en utilisant en parallèle une ou plusieurs éoliennes avec un ou plusieurs groupes Diesel. [1]

La conception préliminaire du système Hybride Éolien - Diesel prévoit l'utilisation d'une centrale Diesel existante déjà et l'ajout d'un parc éolien comportant un seul modèle de turbine.

À ces deux principaux éléments s'ajoutent le système de contrôle et les composants nécessaires à l'exploitation jumelée du système: charges secondaires de lissage, régulateur et commande automatisée.

Suivant l'intensité du vent, on distingue trois modes de fonctionnement pour les systèmes à haute pénétration:

- Vents faibles : diesels seuls
- Vents moyens: diesels et éoliennes en service
- Vents forts: éoliennes seules. [1]

Le Taux de Pénétration en Puissance (TPP) est défini comme le rapport entre la puissance éolienne installée et la puissance maximum de la charge tandis que le Taux de Pénétration en Énergie (TPE) est définie comme le rapport entre l'énergie éolienne annuelle produite et l'énergie consommée par la charge. Le «Jumelage Éolien - Diesel à Haute Pénétration » (JEDHP), caractérisé par des valeurs TPP> 1, permet l'arrêt complet des groupes diesel pendant que la production éolienne est supérieure à la demande. [2]

Ces systèmes Hybrides permettent la réduction la plus importante de la consommation de diesel et des émissions de gaz à effet de serre ainsi que la réduction du coût de production de l'électricité, notamment dans les sites isolés. En effet, cette façon de concevoir l'intégration éolienne amène des économies de carburant très intéressantes (50 à 80% selon le gisement éolien), et permet en plus de réduire les déficits d'exploitation des réseaux autonomes dont la production principale est obtenue par des groupes diesel en apportant des économies sur l'entretien et sur le coût de remplacement des diesels.

Cependant, ces systèmes Hybrides, sans stockage, sont sujets à des problèmes techniques complexes dont les solutions sont très coûteuses comme nous le détaillerons dans le paragraphe suivant. [2]

IV-3.Problématique des sites isolés

Dans ces secteurs isolés, il est n'est pas rentable de connecter les charges, de relativement petite puissance sur le réseau de distribution central, à cause des longues distances. Cela est dû au coût cher des lignes de transmission et des, pertes liées à la distribution de la puissance aux régions éloignées. L'approvisionnement électrique dans ces secteurs dépend seulement des systèmes de génération diesel autonomes, ce qui est le cas aussi dans la plupart des régions du monde, particulièrement, les pays en voie de développement. Outre les coûts de carburants ne cessant d'augmenter, s'ajoutent les coûts du transport de ce carburant vers ces sites, ce qui rend la production d'électricités économiquement très dispendieuses. [2]

IV-4.Solution apportée par les énergies renouvelables, dont principalement l'énergie éolienne

Par définition, les énergies dites renouvelables sont potentiellement inépuisables. La nature peut les reconstituer assez rapidement, contrairement au gaz, au charbon et au pétrole, dont les réserves, constituées après des millions d'années, sont limitées. Les énergies solaire, éolienne, hydraulique et géothermique en sont les formes les plus courantes.

Afin d'assurer la réponse à une demande qui est beaucoup moins fluctuante, l'installation éolienne doit être utilisée en parallèle avec d'autres sources d'énergie. La technique la plus couramment utilisée pour pallier à ce décalage entre la demande et la production, est de relier des parcs éoliens au réseau de distribution haute tension où les autres sources d'énergie sur le réseau (hydrauliques, thermique) ont le rôle d'assurer l'équilibre entre la charge et la production. Le couplage se fait avec une centrale thermique dans les sites isolés et dans ce cas le déploiement de l'énergie éolienne présente un impact significatif, environnemental et économique, en remplaçant une partie de la production électrique par du Diesel. [2]

IV-5.Description du Système Hybride Eolien-Diesel SHED

En générale, la conception préliminaire du SHED prévoit la génération de l'électricité en utilisant en parallèle une source d'énergie classique (groupe électrogène diesel) déjà existante et une source d'énergie renouvelable (éolienne) comportant un seul modèle de turbines. En plus de ces deux principaux éléments, le SHED peut aussi incorporer des convertisseurs statiques et dynamiques, un système de stockage, des charges principales et de délestages et un système de surveillance, etc [4]. Tous ces composants peuvent être connectés selon différentes architectures, l'architecture de notre étude est présentée dans la figure ci-dessous :

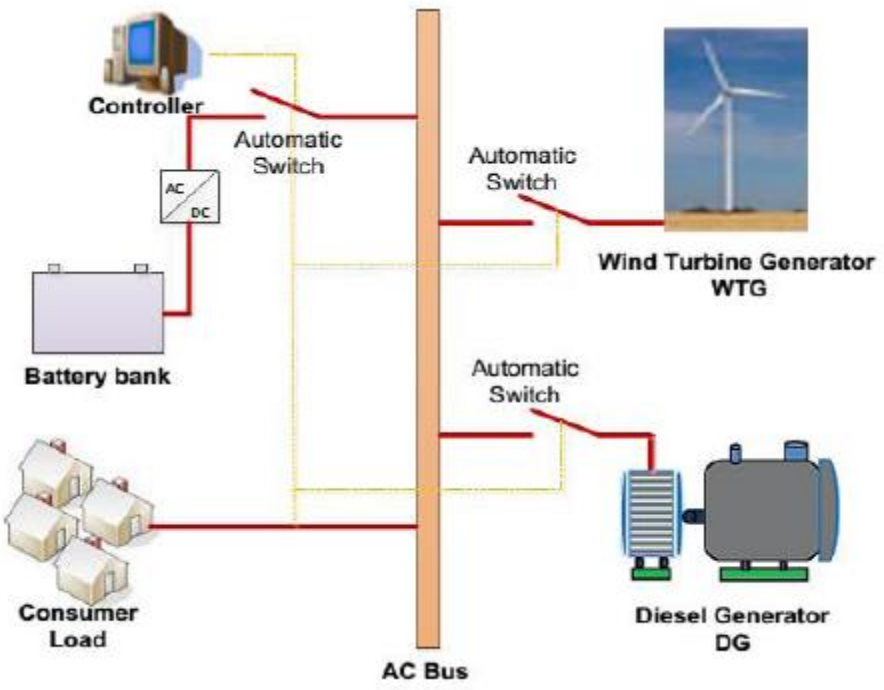


Figure (IV.1) : Schéma du système hybride éolien-diesel [4]

IV-6.Principaux composants d'un SHED

IV-6-1.Eolienne

L'éolienne, able et rentable représente la source d'énergie idéale pour de nombreuses applications. Les éoliennes existent en plusieurs dimensions, la technologie largement dominante aujourd'hui est celle à axe horizontal, à turbine tripale, par fois bipale et à rotor face au vent. Ces éoliennes peuvent fonctionner à vitesse fixe ou variable. Les deux types de machines électriques les plus utilisées sont les machines asynchrones et synchrones sous leurs diverses variantes. [4]

La Figure ci-dessous c'est l'exemple de la ferme éolienne d'Adrar qui dispose désormais d'une capacité de 10 MW.

Figure (IV.2) : La ferme éolienne d'Adrar [3]

IV-6-2.Groupe électrogène diesel

Les groupes électrogènes utilisés actuellement pour assurer les besoins en électricité des communautés vivant dans les régions éloignées sont des moteurs fonctionnant au diesel et couples directement à des générateurs synchrones à rotor bobine. Pour pouvoir assurer en tout temps la qualité de l'électricité fournie (tension et fréquence stables), un régulateur de tension triphasée agit sur l'excitation des alternateurs synchrones pour s'opposer aux variations de tension.

De même, la fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un gouverneur de vitesse sur le moteur diesel. Le gouverneur fonctionne en ajustant la quantité de carburant injectée dans les moteurs diesel, pour s'opposer aux variations de la vitesse du moteur et du générateur afin de les garder constantes.

La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré. [4]

IV-7.Importance de l'hybridation entre l'éolien et le diesel

Le SHED représente une solution intéressante pour l'électrisation des consommateurs dans les sites isolés même s'il est très complexe comparativement aux solutions courantes mono-source. Le SHED présente par contre un intérêt évident considérable par sa flexibilité incomparable, sa souplesse de fonctionnement et son prix de revient vraiment attractif. Ceci

permet d'optimiser au maximum le système de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique et économique. [4]

Cette façon de concevoir l'intégration éolienne :

1-génère des économies de carburant beaucoup plus intéressantes qu'une génératrice diesel fonctionnant seule.

2-permet de réduire les déficits d'exploitation des réseaux autonomes en apportant des économies sur l'entretien et sur le coût de remplacement des groupes diesels.

3-assurant en tout temps l'énergie suffisante demandée par la charge et c'est possible produisant le maximum d'énergie à partir des éoliennes, tout en maintenant une qualité déterminée d'énergie fournie.

4-permet de palier pendant une durée limitée une indisponibilité partielle ou totale de la source d'énergie (vent). [1]

Un système hybride éolien-diesel doit notamment :

- Obtenir à des règles d'exploitation en temps réel basées sur une priorité économique des ressources énergétiques disponibles.
- Compter sur une gestion automatisée des composants du système afin de garantir la stabilité du système en tout temps en incluant les transitions entre les différents modes d'opération du système.

De plus, l'économie de carburant et la baisse de prix obtenus par la génération hybride doivent au moins couvrir l'investissement assure pour les générateurs éoliens et les autres composants auxiliaires du système. Un système de régulation performant qui maintient les groupes diesel au-dessus de leur puissance minimum de bon fonctionnement permettra d'optimiser leur fiabilité et le taux de pénétration de l'énergie éolienne. [4]

IV-8.Régimes de fonctionnement d'un SHED

Suivant l'intensité du vent, trois modes de fonctionnement peuvent être distingués pour les systèmes à haute pénétration :

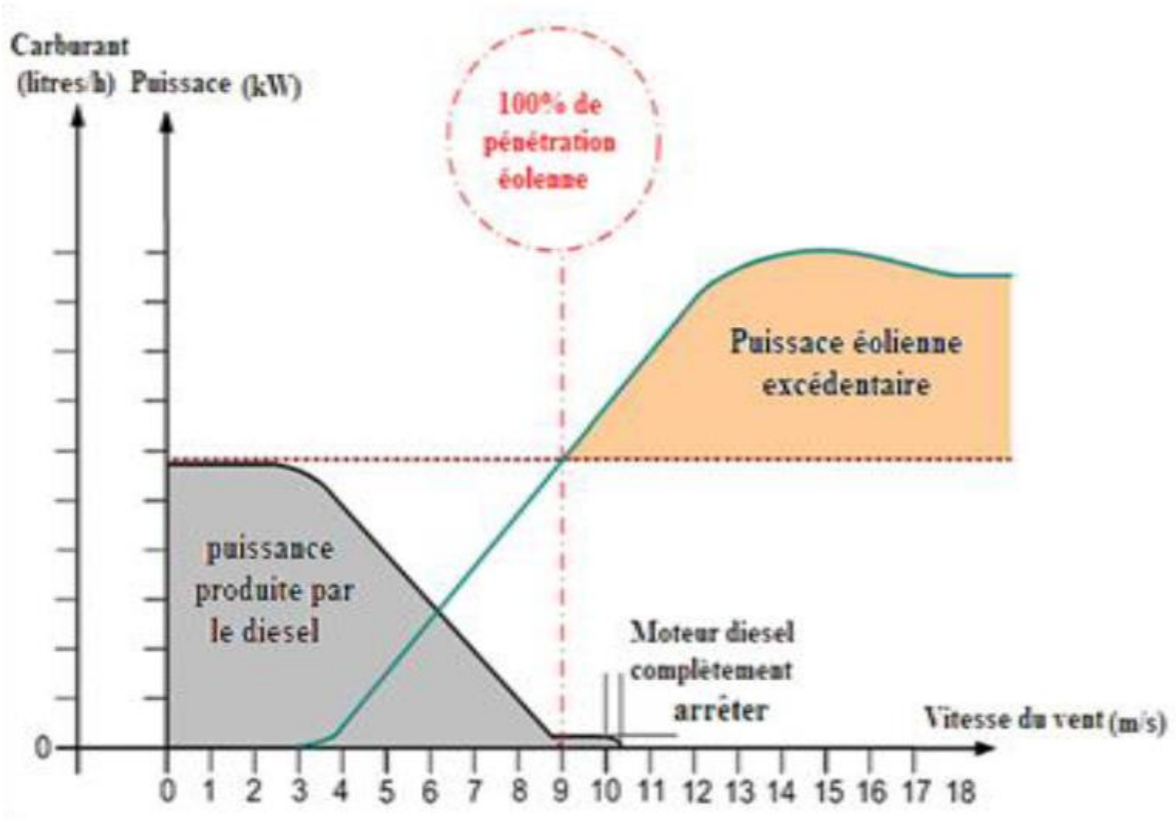


Figure (IV.3) : Variation de la puissance produite par un SHED et la consommation du carburant. [4]

- **Vents faibles ($V_w \leq$ 3m/s) :** diesels seuls (Diesel Only DO) : C'est le groupe électrogène qui assure la production de puissance et les asservissements de tension et de fréquence. Dans ce cas, le système de contrôle des éoliennes est hors circuit.

- **Vents moyens (3m/s < $V_w \leq$ 10m/s) :** diesels et éoliennes en service (Wind-Diesel WD) : Lorsque les vents sont d'intensité moyenne la puissance de l'éolienne n'est généralement pas suffisante pour fournir à elle seule la totalité de la demande. Les éoliennes contribuent à fournir une partie de la puissance demandée par la charge et le groupe électrogène fournit alors la différence. Ceci permet de diminuer l'apport des diesels et par conséquent de réaliser des économies. Dans ce mode de fonctionnement, les régulations de tension et de fréquence sont réalisées par le groupe électrogène.

- **Vents forts (V_w > 10m/s) :** éoliennes seules (Wind Only WO) : Avec des vents suffisamment forts pour que la production éolienne soit supérieure à la demande, il est

alors possible d'arrêter complètement les groupes diesels. Une configuration connue mais non unique consiste à utiliser un embrayage unidirectionnel entre les diesels et les génératrices synchrones afin de découpler ces dispositifs. Les diesels étant arrêtés et découplés des machines synchrones, ces dernières n'entrainent aucune charge. Dans le cas où l'éolienne satisfait la demande de la charge, le surplus de l'énergie doit être stocké dans les batteries pour l'utilisation de secours. [4]

IV-9.Nécessité du stockage d'énergie pour le SHED

La puissance produite au fil du temps par les éoliennes est caractérisée par sa fluctuation due au fait que le vent est une source primaire difficilement prévisible et très fluctuante ; ceci augmente les problèmes induits par l'intégration en grand nombre d'éoliennes dans les réseaux et rend difficile leur participation _a la gestion du système.

La demande d'énergie par les consommateurs n'a pas la même répartition dans le temps et des problèmes de déphasage de l'énergie produite et de l'énergie consommée surgissent. Or, la stabilité du réseau repose sur l'équilibre entre production et consommation ; l'augmentation du taux de pénétration des éoliennes sera donc conditionnée par leur participation à ces différents services ce qui sera favorisé par l'association à ces éoliennes et des systèmes de stockage de l'énergie électrique. [4]

Le stockage représenté alors la clé de la pénétration de l'énergie éolienne sur le réseau électrique. Il fournit non seulement une solution technique au gestionnaire du réseau pour assurer en temps réel l'équilibre production consommation mais il permet également d'utiliser au mieux les ressources renouvelables en évitant un délestage en cas de surproduction. [2]

Associé à une production locale d'origine renouvelable, un stockage décentralisé présenterait également l'avantage d'améliorer la robustesse du réseau électrique en permettant un fonctionnement en îlotage de la zone alimentée par cette ressource. [4]

IV-10.Problématique du jumelage éolien-diesel

IV-10-1.Charge minimale d'un générateur diesel

Des études empiriques montrent que la consommation de carburant d'un générateur diesel (en litres par heure) est une fonction quasi-linéaire de la puissance débitée.

La cogénération permet, par réduction de la charge du générateur diesel, de réduire le débit de carburant consommé. Cependant, on peut se poser une question fondamentale:

Y- a-t-il une limite inférieure à la réduction de la consommation d'un générateur diesel?

La réponse est bien évidemment oui. Même à vide, un générateur diesel absorbe du carburant pour assurer le fonctionnement des parties mécaniques. Ceci ne se fait pas sans douleur pour le générateur. [1]

En effet, comme tout moteur à combustion interne, les performances d'une turbine diesel dépendent de la qualité du mélange air-carburant et de son degré de combustion. Lorsque le moteur diesel fonctionne sous charge quasi nulle, sa température optimale n'est pas atteinte et les gaz d'échappement ne sont pas complètement brulés. La température des gaz rejetés est inférieure à la normale et on dit qu'il y a accumulation d'humidité. [2]

Ceci conduit alors au développement de crasse de carbone (résidus solides de la combustion incomplète) s'accumulant sur les valves d'échappement des chambres de combustion et autres tuyauteries d'échappement. Une accumulation excessive conduit à une baisse de performances de la turbine et augment la fréquence des interventions de maintenance. Ce phénomène a pour effet, non seulement l'augmentation des coûts de maintenance, mais aussi l'ineffectivité de l'économie de carburant préconisée par le jumelage éolien-diésel. [1]

IV-10-2.Le stockage de l'énergie

La puissance produite au fil du temps par les éoliennes, est caractérisée par sa fluctuation due au fait que le vent est une source primaire difficilement prévisible et très fluctuante.

Ceci augmente les problèmes induits par l'intégration en grand nombre d'éoliennes dans les réseaux et rend difficile leur participation aux services systèmes. [2]

IV-10-3.La stabilité du système

Le mode de production diesel seulement est complètement maîtrisé et ne pose pas de problème majeur.

Cependant, lorsque l'éolienne et le diesel fonctionnent ensemble (en mode WD), l'éolienne agit vis-à-vis du groupe diesel comme une charge négative. Ceci aboutit à de très grandes fluctuations dans le profil de production des groupes diesel, entrainant une large excursion du couple électromagnétique dans la génératrice avec un impact direct sur la mécanique de la turbine diesel. La mécanique ainsi fortement sollicitée peut entrer en résonance si le générateur ne possède pas une bonne marge de stabilité.

En mode éolienne seulement (W), l'éolienne est seule responsable de la stabilisation des paramètres de production. Le système doit donc faire face à la variabilité de la charge et à

celle du vent. On a ainsi des perturbations en amont et en aval de la production. L'introduction de charges contrôlables - radiateurs ou simples résistances - permet généralement d'adoucir le profil de consommation et de gérer le surplus d'énergie non emmagasiné. [2]

IV-10-4.Le partage et l'équilibrage des sources de puissance

La mise en parallèle de sources alternatives est loin de se limiter à une simple connexion à un bus commun. En effet, hormis l'impératif de synchronisme, la source la plus puissante a en général tendance à s'imposer aux autres générateurs et, au lieu d'avoir plus de puissance, on assiste à une série de changement de rôle (générateur récepteur) entre les sources. Pour éviter cela, chaque générateur en cogénération doit être caractérisé par sa caractéristique puissance-fréquence à tension constante. [2]

IV-10-5.Gestion de l'énergie réactive

Le développement et la commande de l'énergie réactive sont primordiaux dans un réseau autonome. En effet, la tension de bus est très influencée par la quantité d'énergie réactive produite ou consommée. En ce qui concerne la cogénération éolien-diesel, la commande de l'énergie réactive est incontournable lorsque les convertisseurs électromécaniques des éoliennes sont de type générateur asynchrone.

Le choix des génératrices asynchrones permet de réduire les coûts mais, ces dernières n'ont pas de circuit d'excitation et doivent absorber de la puissance réactive pour pouvoir produire de la puissance active. Pour des systèmes de grande puissance, la traditionnelle solution des capacités d'auto-excitation est trop coûteuse et inefficace.

L'emploi des convertisseurs de puissance en topologie back-to-back permet de gérer le problème de la stabilité. Seuls des compensateurs synchrones permettent de produire de l'énergie réactive de manière assez flexible pour résoudre le problème de l'excitation des génératrices asynchrones lorsqu'elles sont massivement utilisées. On peut alors envisager un double usage de la roue inertielle : stockage et compensation. [2]

IV-11.Avantage du système de jumelage éolien-Diesel

-Réduction de la consommation de diesel (coût de transport et d’entreposage)

-Réduction des émissions de gaz à effet de serre

-Le vent est une ressource illimitée

-Accroissement de la durée de vie des générateurs. [1]

IV-12.Conclusion

Dans ce chapitre, on a vu un rappel sur les SEH en général, nous sommes intéressés au SEH du type éolien-diesel, nous avons présenté les principaux composants et les régimes de fonctionnement du SHED ainsi que le rôle primordial de l'hybridation entre l'éolien et le diesel pour l'alimentation des sites isolés et éloignés.

<u>Chapitre V :</u> Simulation et optimisation sous HOMER

V-1.Introduction

Les systèmes hybrides utilisent différentes sources d'énergies comme l'éolien et le générateur diesel. Ce type de système peut représenter une solution pour les régions éloignées d'un grand réseau interconnecté.

Cependant le dimensionnement et l'architecture de système de génération d'énergie est une étape primordial dans la conception et la réalisation de même système.

Plusieurs études prennent le paramètre variable de la plupart des énergies renouvelables pour la réalisation d'un système de contrôle complexe. Dans la même tache un contrôle de la tension et de la fréquence pour un système éolien-diesel. La modélisation étant aussi un facteur majeur pour des études élaborées afin de simuler un bon fonctionnement de système. Plusieurs sont les logiciels qui nous permettent de la faire. Une modélisation d'un système hybride de génération d'énergie est présentée par le logiciel HOMER.

Pour but d'améliorer la qualité de l'énergie produite par un système de production d'énergie électrique, un système hybride est proposée dans ce chapitre. Une application d'un système hybride est simulée sur le logiciel HOMER afin d'alimenter un site pour une optimisation qui permet de déterminer le type du système hybride réel a installé.

V-2.Analyse du logiciel HOMER

V-2-1.Définition de logiciel HOMER

HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Ressources) est un logiciel de simulation et d'optimisation destiné à l'étude d'installations de production d'énergie multi-sources (PV, éolien, réseau, stockage, diesel…). Il est principalement destiné à la simulation de mini-réseaux connectés ou non-connectés (« off-grid »). Il a été développé en premier lieu par le National Renewable Energy Laboratory (NREL) dépendant lui-même du ministère américain de l'énergie.

L'entreprise Homer Energy a été spécialement crée pour sa commercialisation et la suite de son développement. Il compte près de 100 000 utilisateurs. [1]

V-2-2. Les paramètres

Il convient de fixer les valeurs d'un certains nombre de paramètres pour commencer une simulation. Pour les paramètres tels que le nombre d'appareils et les puissances, il est possible de paramétrer plusieurs valeurs dont la valeur nulle (absence de l'appareil).

Ceci s'applique entre autre pour le nombre de batteries, la puissance des groupes électrogènes, la puissance du l'éolienne. Homer simule le fonctionnement du système pour chacune des valeurs paramétrées. Ces paramètres sont :

- **Paramétrage des sources :**
  -éoliennes
  -Groupes électrogènes

- **Paramétrage de l'unité de stockage**
  -Batteries
- **Convertisseur d'énergie**

- **Paramétrage du gisement et des charges**

  -Charge

  -vitesse de vent

- **Autres paramétrages**
  -Hypothèses financières
  -Stratégie de contrôle du système

V-2-3.Les sorties

A partir de la simulation, Homer permet de visualiser le comportement heure par heure de chaque équipement de l'installation pour toutes les configurations simulées.

A partir de ces résultats, Homer présente une analyse financière sur la durée du projet. Ainsi, pour chaque architecture et configuration il est possible d'observer les sorties suivantes :

- Coût global du kWh actualisé ;
- Répartition des postes de dépenses (investissement, entretien/maintenance, combustible);
- Le détail correspondant à chaque source : flux d'énergies, nombre de remplacements, coût fixe et cout marginal, proportion de la production électrique ;

- Des graphiques journaliers sur toute la durée de vie du système présentant heure par heure les consommations, les puissances délivrées par chaque source, la quantité d'énergie stockée ;
- Des graphiques d'analyse de sensibilité. Il permet d'observer la variation de certaines sorties par rapport à paramètres de sensibilité choisis;
- Une analyse économique par rapport à une installation de référence ;
- Une analyse de sensibilité présentée sous forme graphique. [1]

V-2-4.Le fonctionnement

Pour chaque configuration, c'est-à-dire pour un choix de valeurs parmi toutes celles disponibles pour chaque paramètre, Homer effectue une analyse temporelle de l'installation. A chaque pas de temps le logiciel observe la consommation et la compare à la production éolienne qu'il a calculée en fonction du gisement pris en compte. L'énergie éolienne est prioritaire car il n'est pas possible de reporter son utilisation. Dans le cas d'un manque de cette énergie HOMER doit choisir entre l'usage du GE ou des Batteries. La source la moins coûteuse sera utilisée sauf si certaines contraintes entrent en jeu. Comme il est précisé dans la notice, la simulation effectuée par Homer est idéalisée par rapport aux systèmes de contrôle commande réels. La simulation agit de façon à optimiser le coût total de fonctionnement de la centrale hybride, ce qui n'est pas forcément le cas des ces derniers. Les différences seront explicitées dans la partie « Les résultats »

Pour comparer les coûts du kWh produit par les différentes sources, le logiciel utilise des règles et des modèles qui peuvent être influencés par les paramètres choisis par l'utilisateur. Ainsi Homer considère que les sources auxiliaires ont un coût fixe et un coût marginal. [1]

V-2-5.Les résultats à interpréter avec précautions

1-La préparation de la simulation

2-Les résultats :

-Aide au choix de l'architecture et de la configuration

-Des graphiques horaires détaillés pour chaque architecture

-Des données économiques

-Des données techniques

-Analyse de sensibilité

V-2-6.Le bilan

Simuler une installation hybride avec HOMER permet d'obtenir de nombreuses informations. En particulier :

- Pour chaque composant : la production utile, le taux d'utilisation, les horaires d'utilisation, la durée de vie moyenne ;
- Les coûts associés à l'utilisation de chaque composant du système ;
- Les coûts de remplacement de chaque matériel en prenant en compte leur durée de vie, elle-même dépendante de leur sollicitation. [1]

V-3.Caractéristiques du site étudié

V-3-1.Situation géographique

La wilaya d'Adrar s'étend sur une superficie considérable de 427.968 km^2, soit prés d'un cinquième (1/5) du territoire national. L'espace utile demeurant toutefois réduit, la wilaya d'Adrar située à l'extrême Sud-ouest du pays, compte onze daïras et vingt huit communes. Sa population est estimée à 336 046 habitants dont 76% de population rurale.

La majorité des sites situés à la wilaya d'Adrar pourraient être considérés comme des sites isolés vu que leur superficie est immense et leur éloignement par rapport à la ville et les uns par rapport aux autres. Le Tableau suivant représente les informations relatives du site choisi. [2]

Tableau (IV.1) : Coordonnés géographiques du site choisi

Site	Latitude	Longitude	Altitude
Adrar	27,88°N	-0,28°E	263m

V-3-2.Données météorologiques de la région d'Adrar

La région d'Adrar a un climat caractérisant un type continental désertique, une pluviométrique très faible avec des précipitations rares et irrégulières d'une année à une autre et par un régime thermique qui présente lui aussi de grandes variations avec des hivers rigoureusement froids et des étés très chaud. La fréquence des vents est très grande durant toute l'année [2]. Les vitesses sont très élevées puisque la fréquence des vents de vitesses supérieure à 5 m/s est de l'ordre de 20 à 40 % (voir tableau et figure IV.2 ci-dessous) :

Tableau (V.2) : Données climatiques du site étudié. [3]

Mois	**Jan**	**Fév**	**Mar**	**Avr**	**Mai**	**Jui**	**Juil**	**Aoû**	**Sept**	**Oct**	**Nov**	**Déc**
T_{max} (C°)	32.2	22.4	29.2	34.3	37	42.1	46.3	45	43.5	31.6	27.1	21.3
T_{max} (C°)	7.6	6	12.8	18.5	20.8	25.4	28.7	29.1	26.7	17.3	11.4	6.2
Humidité (%)	39.5	22.9	20.3	19.8	17.5	13.4	9	12	13.1	34.2	25.3	37
V (m/s)	5.2	6.2	6.8	6.2	6.4	7.4	5.1	5.6	4.3	4.7	5	5.9

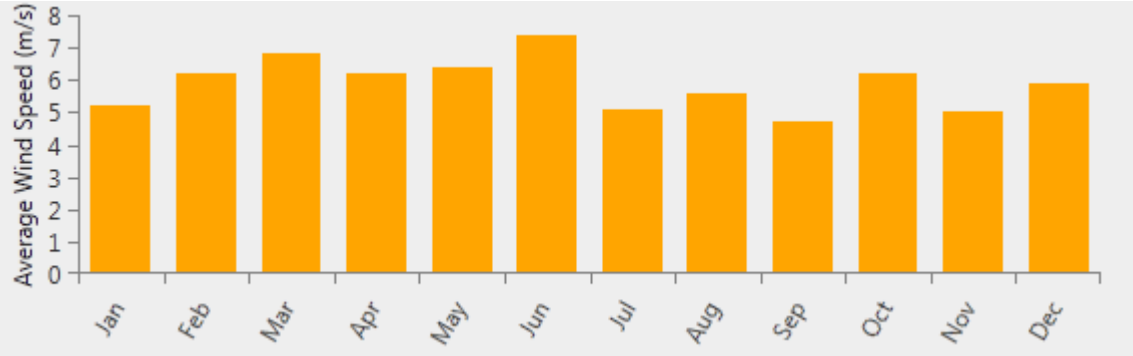


Figure (V.1) : vitesse annuelle du vent de l'année 2011 du site étudié

Notre étude dépend essentiellement sur la vitesse du vent. Le Tableau **(**V.3) illustre les vitesses moyennes journalières du vent de chaque mois de l'année 2011, qui ont été mesurées à la station météorologique de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER.MS) à Adrar [3] :

Tableau (V.3) : Relevés de la variation de la vitesse du vent pendant l'année 2011. [3]

Jours	**Janv**	**Fév**	**Mar**	**Avr**	**Mai**	**Jui**	**Juil**	**Aoû**	**Sept**	**Oct**	**Nov**	**Déc**
1	3.75	7.97	6.16	7.83	7.86	5.80	7.41	5.19	2.88	4.16	3.91	6.47
2	3.97	6.16	7.72	7.00	7.66	9.11	5.97	3.80	3.44	4.77	2.58	5.75
3	3.91	6.38	9.52	4.69	6.08	6.94	4.16	4.36	3.63	7.36	6.44	5.75
4	4.63	6.44	6.08	8.44	4.69	8.33	3.86	6.27	5.02	6.83	7.66	8.52
5	4.00	7.13	5.55	8.86	4.72	9.22	2.83	5.38	6.75	8.27	5.19	7.30
6	4.47	6.69	5.38	5.55	5.08	8.50	3.55	5.13	5.19	8.44	4.22	6.77

7	4.11	6.52	3.75	5.86	5.25	4.94	6.08	4.22	6.08	7.00	3.61	6.58
8	4.16	5.55	7.00	7.36	3.25	3.08	6.88	2.47	6.44	5.91	5.02	6.58
9	3.97	5.38	2.97	6.11	5.13	2.94	7.36	4.22	6.02	7.00	5.50	6.08
10	4.05	7.41	3.33	3.33	11.72	3.44	8.08	6.52	4.58	8.02	6.58	4.94
11	5.86	8.22	6.83	1.22	10.61	7.50	6.77	7.11	4.27	6.69	6.77	4.36
12	4.63	7.91	7.77	3.80	9.00	10.69	6.88	7.00	4.58	7.47	6.08	5.02
13	5.50	6.94	3.08	8.80	5.00	8.02	7.11	6 .08	4.05	7.11	4.11	6.94
14	7.19	3.80	6.58	3.55	4.83	5.02	6.44	6.69	5.72	6.52	2.88	6.11
15	5.13	7.30	6.77	4.88	3.30	5.25	5.02	6.22	3.33	4.11	3.44	6.77
16	5.08	7.36	3.25	4.77	5.80	8.33	4.22	4.69	3.50	4.33	7.19	6.52
17	5.19	5.38	3.02	4.69	8.08	8.52	3.91	6.83	6.38	8.22	6.69	3.63
18	5.02	6.94	6.83	6.02	6.33	6.63	3.91	7.66	5.19	8.75	5.13	2.88
19	5.72	5.66	7.71	4.22	5 .08	7.83	4.22	6.22	4.22	8.50	4.58	6.83
20	4.94	3.63	6 .88	6.16	7.25	7.91	3.08	6.44	2.72	8.33	8.44	5.97
21	3.44	5.80	7.13	10.63	6.63	7.77	5.36	6.33	3.50	7.36	3.75	5.00
22	2.83	3.38	7.13	5.00	7.19	5.44	3.61	5.97	2.52	4.94	3 .19	3.86
23	6.83	3.44	6.88	5.44	7.36	8.44	2.41	5.80	3.25	5.36	5.72	4.52
24	4.36	6.47	9.36	8.33	7.36	9.91	2.97	6.02	3.30	4.77	5.13	5.66
25	5.02	6.77	8.27	4.52	7.36	8.52	3.55	5.61	5.30	6.02	4.41	7.47
26	8.16	7.13	7.77	6 .47	7 .19	7.86	3.38	4.36	4.16	4.16	6.27	7.11
27	8.69	4.69	6.08	4.52	7.41	9.00	5.97	7.77	5.97	4.58	3.63	6.22
28	6.44	6.16	6.75	7.50	6.16	10.80	4.63	6 .77	5.91	5.38	1.69	5.72
29	6.27	-	5.38	12.38	4.72	8.50	4.94	4.84	4.83	4.83	3.63	6.33
30	8.38	-	6 .11	7.30	5 .08	8.27	7.19	3.86	7.13	3.55	5.75	5.44
31	4.16	-	6.25	-	4.33	-	5.00	2.58	-	3.13	-	5.61

V-3-3.Courbe de charge d’un site étudié

Le dimensionnent d'un tel système de production de l'énergie dépend essentiellement du profil de la consommation à satisfaire. La figure ci-dessous représente un profil de l'évolution journalière de la charge. Ce profil est considère le même durant tous les jours de l'année.

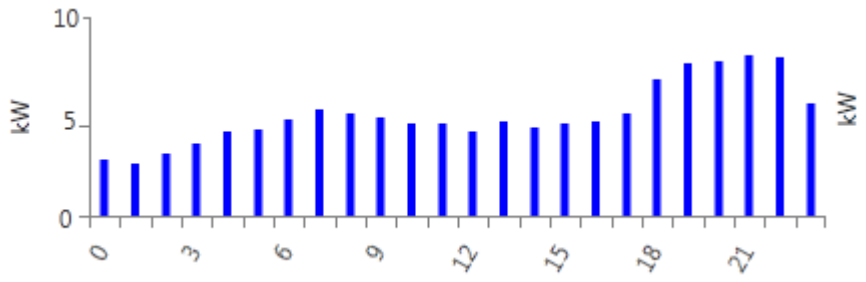


Figure (V.2) : Profil journalier de la courbe de charge

On remarque que le profil de consommation a généralement la même tendance d'évolution journalière. Il y a un creux de consommation la nuit entre 00h et 05h et un pic de consommation, le soir entre 19h et 23h. Ces informations restent très difficiles à exploiter car le profil de consommation est aussi variable selon les saisons.

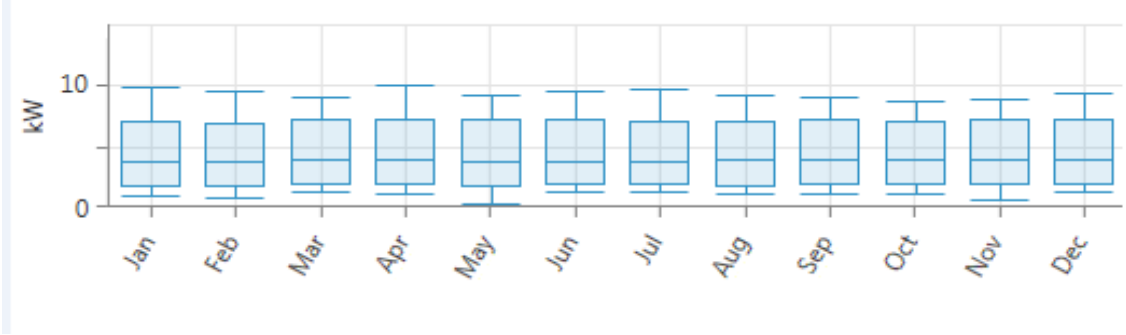


Figure (V.3): Le profil de charge dans une année

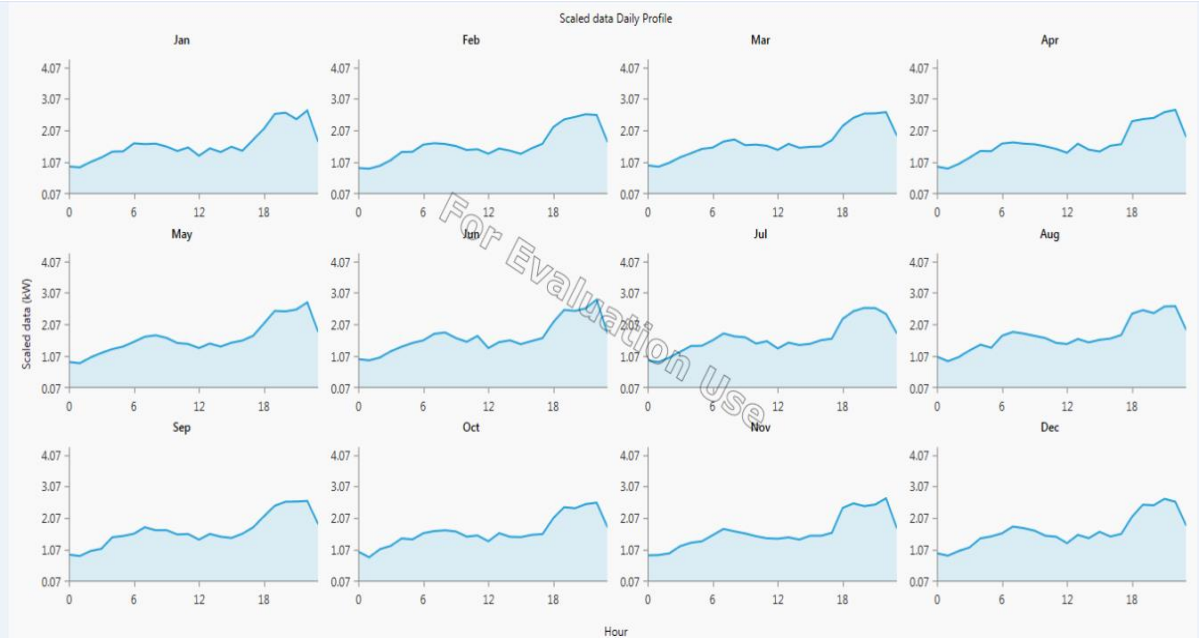


Figure (V.4): Le profil de charge journalière suivant les saisons.

V-4-1.Présentation de l'installation hybride étudiée

Le choix de la taille (puissance) et le type des éléments est une étape très importante dans le but de garantir l'énergie nécessaire au site, tout en assurant une autonomie énergétique et selon les énergies renouvelables disponibles. L'électricité provenant de ces sources est intermittente, dépendante des conditions climatiques.

Aspects techniques des technologies :

- Le niveau de commercialisation
- La précision
- La flexibilité et la disponibilité
- La durée de vie
- L'efficacité
- L'exigence pour opération d'entretien et de remise en place
- La disponibilité des ressources correspondantes.

Notre système de production appelé système hybride, Il présente en somme le double avantage de minimiser les perturbations de l'environnement grâce à une consommation sur le lieu de production de ressources naturelles renouvelables et d'une sécurité d'approvisionnement maximale. Les éléments sélectionnés pour notre installation sont :

- Un générateur éolien (WTG)
- Un générateur diesel (DG)
- Un système de stockage d'énergie par batterie(BESS)
-Un convertisseur
-Une charge de 220KWh/j

V-4-1-1.La turbine éolienne

La turbine éolienne ayant une caractéristique qui dépend des paramètres de construction définissant son potentiel à prélever l'énergie de la masse d'air en mouvement. La turbine choisie est de marque Bergey Excel 10-R, c'est une turbine à axe horizontal de puissance nominale 10 kW, à trois pales, le rotor fonctionne dans la direction du vent. [4]

Figure (V.5): Eolienne type Bergey Excel 10-R

L'éolienne Bergey Excel 10-R considérée est caractérisée par les données présentées dans le tableau suivant :

Tableau (V.4) : Caractéristiques techniques de Bergey Excel 10-R

Spécification	Bergey Excel 10-R	Unité
Puissance nominale	10	KW
Diamètre de l'hélice :	6.7	M
Vitesse d'amorçage :	3,4	m/s
Pâles	fibres de verres renforcées au carbone	/
Produit	30	KWh
Garantie	5	Ans
Hauteur de tour	18 à 37	M
Vitesse du vent	4	m/s
Nombre de pale	3	
Fréquence nominale	50	Hz
Durée de vie	50	Ans

Une éolienne est caractérisée par sa courbe de puissance qui donne la variation de puissance disponible en fonction de la vitesse du vent. La puissance nominale est la puissance donnée pour un vent déterminé, appelé vent nominal. Selon sa courbe de puissance (donnée ci-dessous), Bergey Excel 10-R peut développer de l'énergie même à très bas régime du vent (4 m/s).

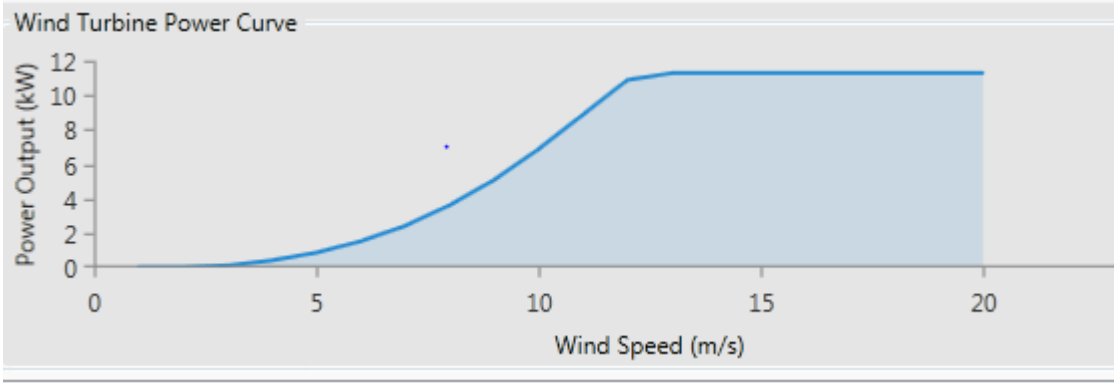


Figure (V.6) : Courbe de puissance relative de l'éolienne

V-4-1-2.Le générateur diesel

En vue du caractère non régulier des ressources renouvelables, un générateur diesel est nécessaire comme un système d'appoint. Le générateur choisi est de type Generic 10kW Fixed Capacity Genset, il développe une puissance maximale de 10 kW.

Tableau (V.5) : caractéristiques du générateur diesel Generic 10kW Fixed Capacity Genset

Nom : Generic 10kW Fixed Capacity Genset	
Capacité	10KW
Carburant	Diesel
Interception de la courbe de carburant	0.480L / h
Pente de la courbe de carburant	0.286L / h / KW
Émissions	CO (g / L de carburant): 19,76
	HC non brûlé (g / L): 0,72
	Particules (g / L de carburant): 1.198
	Carburant soufre à PM (%): 2.2
	NOx (g / L de carburant): 22,46
Propriétés du carburant	Valeur calorifique inférieure: (MJ / kg): 43,2
	Densité (Kg / m3): 820
	Teneur en carbone (%): 88
	Teneur en soufre (%): 0.4

V-4-1-3.Le système de stockage (Batterie)

Il est possible d'assurer la fourniture de toute l'énergie nécessaire au site directement par les deux générateurs, cependant, dans le but de minimiser le fonctionnement du générateur diesel et par suite les émissions des gaz, il est judicieux de rajouter un système de stockage d'énergie. Cela nous permet d'exploiter au maximum les ressources renouvelables disponibles en rechargeant les batteries par ces dernières (éolienne). Enfin, dans le cas d'une brusque demande d'électricité, le stockage remplit la fonction de source de secours, en attendant que le groupe démarre et prenne le relais de la fourniture. Les caractéristiques de la batterie sont données dans le Tableau suivant :

Tableau(V.6) : Caractéristiques de la batterie Ni-MH

Iron Edison Nickel Iron 400Ah	
Système chimique	Nickel Fer (NiFe)
Type de batterie	Cycle profond rechargeable, inondé d'électrolyte alcalin.
Chimie des électrolytes	Hydroxyde de potassium (KOH) et hydroxyde de lithium (LiOH).
Taux de rafraichissement de l'électrolyte	Suggéré tous les 7-10 ans pour maintenir une performance maximale.
Tension nominale	1.2 volts
Tension de charge	1.65 volts
Efficacité	80%
Cycle de vie	11000 cycles à une profondeur de décharge de 80%
Durée de vie	30ans/80ans
Garantie	10ans
Taux d'autodécharge	1% par jour

V-4-1-4.Le convertisseur

Ce convertisseur vous permet de dimensionner le système de batterie sans avoir à dimensionner le convertisseur. Il tient compte des pertes d'efficacité liées à la conversion de l'alimentation en courant alternatif en courant continu et des pertes du bus continu en courant alternatif.

V-4-1-5.Bilan énergétique du système éolien-diesel

Afin de construire ce système d'énergie, on doit disposer tous les informations pour l'emplacement sélectionné. Les informations typiques sont : le profil de charge qui devrait être pris en charge par le système la vitesse du vent pour la production d'énergie éolienne, le coût initial de chaque composant (diesel, éolienne, batteries, convertisseurs), le coût du carburant et la durée de vie du projet.

Ensuite, on utilisant ces données, on peut effectuer la simulation pour obtenir la meilleure configuration du système d'alimentation hybride pour cet endroit précis.

V-4-2.Optimisation et Simulation du système hybride éolien/diesel

La figure ci-dessus montre le système global qui sera étudié en utilisant le logiciel Homer, comprendra une turbine éolienne, un groupe électrogène, un convertisseur et un système de stockage avec batteries :

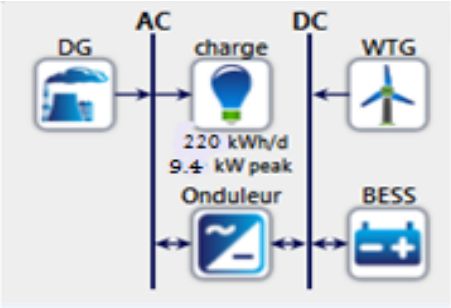


Figure (V.7): Configuration de l'installation hybride étudiée

HOMER simule les configurations du système avec toutes les combinaisons des composants spécifiés en entrée. Il élimine des résultats de toutes les configurations de systèmes infaisables, qui ne sont pas en adéquation avec la demande en électricité ni ne sont compatible avec les ressources et les contraintes spécifiées. Une fois la simulation terminée et sans message d'erreurs,

Homer classe les résultats obtenus en fonction du coût de la durée de vie. Le logiciel Homer simulera toutes les combinaisons possibles et faisables tout en respectant les caractéristiques de village à alimenter, les contraintes techniques et économiques. Une fois la simulation terminée, il affiche la meilleure combinaison de chaque système trouvé. Il est à noter que pour notre cas, nous pouvons avoir quatre configurations possibles :

1-turbine éolienne, groupe électrogène.

2-turbine éolienne, groupe électrogène, convertisseur et batteries.

3-groupe électrogène.

4-groupe électrogène, convertisseur et batteries

Dans ce qui suit nous allons montrer les résultats d'optimisation et le classement des systèmes obtenus.

Optimization Results

Left Double Click on a particular system to see its detailed Simulation Results.

Architecture								Cost				System	
				WTG	DG (kW)	BESS	convertisseur (kW)	Dispatch	NPC ($)	COE ($)	Operating cost ($/yr)	Initial capital ($)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)
				4	1	4	2.00	LF	$161.982	$0.982	$15,656	$88,880	63.5	2,546
					1	4	2.00	CC	$192,667	$1.22	$ 7,195	$58,880	0	6,129
				4	1		2.00	CC	$254,391	$1.61	$12,366	$85,000	0	8,750

Figure (V.8) : Résultats d'optimisation et classement des systèmes

Notons que Homer affiche l'ensemble des combinaisons possibles en fonction du coût de la durée de vie. La durée de vie. Ensuite il choisit la meilleure de chaque système.

Dans la fenêtre des résultats de simulation, nous pouvons voir plusieurs détails techniques et économiques à propos de chaque configuration de système que HOMER simule. La figure ci-dessus montre que la meilleure configuration trouvée est de : (4) turbine éolienne de 10 KW, 1 groupe électrogène de 10 KW, (2) convertisseur de 10 KW, et (4) batteries.

V-4-2-1.Interprétation et discussion des résultats

HOMER fournit tous les paramètres de fonctionnement des composants et de l'ensemble de l'installation (la fraction de l'énergie renouvelable, les émissions de gaz, le coût spécifique de l'énergie, l'énergie totale produite, consommée et l'excès de l'énergie…).

Afin de pouvoir montrer l'importance du résultat d'optimisation du Logiciel Homer, nous allons interpréter toutes les caractéristiques de la configuration choisie, Nous commencerons par les détails techniques de notre système.

- Détails techniques: nous allons commencer par la production électrique par chaque composant, la figure ci-après montre l'énergie produite et la consommation de notre système.

Tableau (V.7): Energie électrique produite par le système

Production	**KWh/yr**	**%**
Generic 10KW Fixed Capacity Genset	10.192	7.3
Bergey Excel 10-R	190.802	92.7
Total	200,994	100

Tableau (V.8): Energie annuelle consommée

Consumption	**KWh/yr**	**%**
AC Primary Load	200,994	100
DC Primary Load	0	0
Deferrable Load	0	0
Total	200,994	100
Excess Electricity	19.006	41.2
Unmet Electric Load	0	0
Capacity Shortage	0	0

Quantity	**Value**
Renewable Fraction	165.8
Max. Renew. Penetration	6.8

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que le système produit 41.2% d'énergie électrique de plus par rapport à la demande du site choisi, nous remarquons aussi que le système ne présente aucune coupure de courant (l'une des contraintes déjà vérifiée) et que toute la charge a été alimentée en énergie électrique.

La production éolienne représente 92.7% de la production totale du système. Elle est variable sur toute l'année, et est directement liée à la vitesse du vent. Pour pallier au phénomène aléatoire de la vitesse du vent, le groupe électrogène nous aide à assurer la disponibilité de l'énergie électrique. La figure ci-dessus illustre la production électrique totale mensuelle moyenne sur toute l'année :

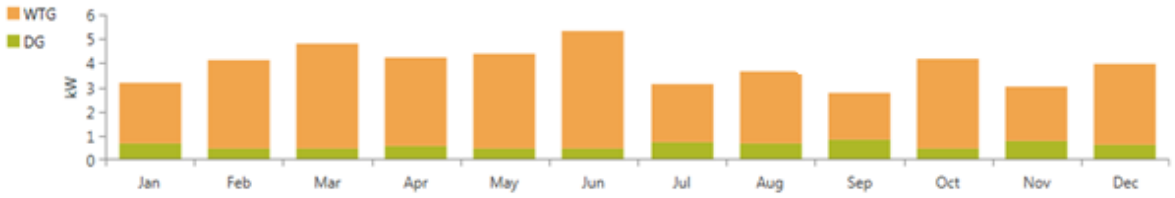


Figure (V.9): La production électrique mensuelle moyenne

Nous remarquons qu'il y a une différence dans la production de l'énergie électrique entre certain mois de l'année, et que la puissance éolienne mensuelle moyenne produite est importante dans les trois mois les plus ventés (Mars, Avril, Mai, juin). On note aussi que la production éolienne est petite aux mois (janvier, novembre, décembre). La turbine éolienne seule développe une puissance supérieure à celle du diesel, ce qui traduit les fortes performances de la turbine utilisée.

V-4-2-2.Détails des composants du système étudié

V-4-2-2-1.Détails de la turbine éolienne

Le tableau ci-dessus résume les détails de fonctionnement de la turbine pendant une année dans notre système hybride.

La puissance nominale de la turbine éolienne est 10KW, le coefficient de capacité qui représente la puissance moyenne produite divisée par la capacité totale de la turbine éolienne est de 32.9%. La production totale d'énergie électrique est 28802 KWh/an avec 8231heures de fonctionnement par an.

Tableau (V.9) : Détails de la turbine éolienne dans le système hybride

Quantity	**Value**	**Units**
Total Rated Capacity	10	KW
Mean Output	84	KW
Capacity Factor	5.44	%
Minimum Output	0	KW
Maximum Output	2.710	KW
Hours of Operation	5.329	hrs/yr
Levelized Cost	0.247	$/KWh

V-4-2-2-2.Détails du Groupe électrogène

Nous rappelons que le générateur qui a été choisi est de 10KW, ci-après les détails de fonctionnement du groupe électrogène dans notre système hybride :

Tableau (V.10): Détails du groupe électrogène dans le système hybride

Quantity	**Value**	**Units**
Hours of Operation	1,521	hrs/yr
Number of Starts	0,159	starts/yr
Operational Life	7,04	Yr
Capacity Factor	6,08	%
Fixed Generation Cost	0,56	$/hr
Marginal Generation Cost	0,196	$/kwh
Electrical Production	7,3	kwh/yr
Mean Electrical Output	1,80	Kw
Minimum Electrical Ouptut	1,55	Kw
Minimum Electrical Ouptut	1,55	Kw
Fuel Consumption	3,546	L
Specific Fuel Consumption	0,478	L/kwh
Fuel Energy Input	16,056	Kwh/yr
Mean Electrical Efficiency	19,3	%

V-4-2-2-3.Détails du système de stockage

Nous avons choisi comme système de stockage pour notre village les batteries, ci-après les détails de fonctionnement de ces dernières dans le système. Nous avons utilisé 10 batteries, d'après Homer l'autonomie de notre système de stockage pour l'alimentation du village est 2.59 h, la durée de vie pour ces batterie est de 10ans.

Tableau (V.11): Détails du système de stockage dans le système hybride

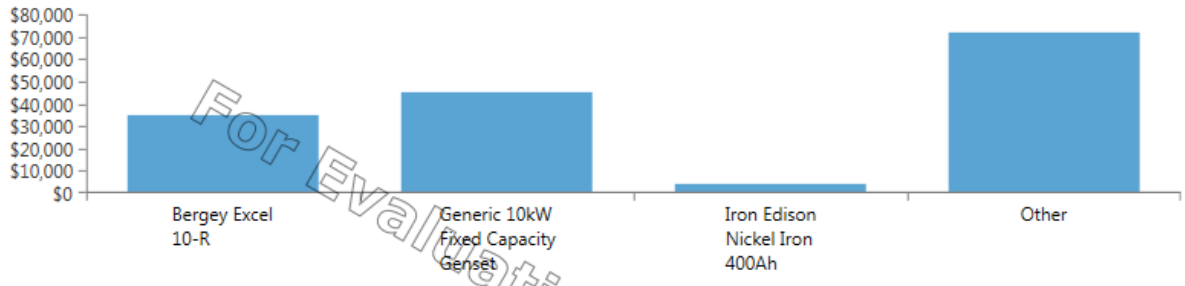
Quantity	**Value**	**Units**
Battries	4.0	Qty
String Size	2,00	Batteries
Strings in Parallel	4,0	Strings

Bus Voltage	1,20	V
Autonomy	2,59	Hr
Storage Wear Cost	19,002	$/kwh
Nominal Capacity	4,80	Kwh
Usable Nomuinal Capacity	4,32	Kwh
Lifetime Throughtput	110,000	Kwh
Expected life	51,8	Yr
Average Energy Cost	0	$/kwh
Energy In	2,300	kwh/yr
Energy out	1,956	kwh/yr
Storage Depletion	1,27	kwh/yr
Losses	345	kwh/yr
Annual Throughput	2,122	kwh/yr

V-4-2-3.Détails économiques

Nous trouvons le coût annuel ou coût de la durée de vie (NPC : Net Present Cost) en $, catégorisé par type de composants ou par type de coûts. La figure ci-dessus montre NPC détaillé de chaque composant du système optimal et la figure V.31 montre le coût annuel détaillé de chaque composant du système.

Nous remarquons que le coût total de la durée de vie du groupe électrogène est supérieur celui de la turbine éolienne, cela revient à la consommation importante du Fuel (diesel) pour répondre aux besoins de la charge.



For Evaluation Use

Component	Capital ($)	Replacement ($)	O&M ($)	Fuel ($)	Salvage ($)	Total ($)
Bergey Excel 10-R	$30,000.00	$6,626.30	$1,622.91	$0.00	($3,406.98)	$34,842.22
Generic 10kW Fixed Capacity Genset	$5,000.00	$5,678.46	$6,913.58	$27,549.76	($340.70)	$44,801.11
Iron Edison Nickel Iron 400Ah	$3,880.00	$0.00	$335.90	$0.00	($301.04)	$3,914.86
Other	$50,000.00	$0.00	$21,638.76	$0.00	$0.00	$71,638.76
System	$88,880.00	$12,304.76	$30,511.15	$27,549.76	($4,048.72)	$155,196.95

Figure (V.10): NPC détaillé de chaque composant du système.

- La valeur « Other » représente les salaires des deux techniciens de maintenance. Le coût total de la durée de vie est la somme de tous les coûts de chaque composant.
- La valeur négative « salvage » qui peut être la vente d'électricité ou la revente des composants au démontage du système à la fin de la vie du projet. Le tableau ci-dessous résume tous les coûts de notre système sur toute la durée de vie du projet.

Tableau (V.12): Résumé détaillé des coûts en $ du système sur toute la durée de vie du projet

Component	**Capital ($)**	**Remplacement ($)**	**O&M ($)**	**Fuel ($)**	**Salvage ($)**	**Total ($)**
Energey Excel 10-R	3,661 ,80	812,26	201,00	0,00	(441,2)	4 ,719,18
Generic 10kw Fixed Capacity Genset	356,25	268,32	524,00	396,325	(41,26)	5,153,08
Iron Edision Nickel Iron 400Ah	235,2	0,00	2,196	0,00	19,54	6,502
Other	1, 352,21	0,00	150,201	0,00	0,00	2,854,22
System	1, 004,157	108,058	153,122	396,325	10,492	1,672,15

Le tableau résume la comparaison économique des deux configurations. On remarque que le DG présente le coût le plus élevé.

Tableau (V.13) : Comparaison économique entre les deux configurations.

Coût net actuel (NPC) $	
WTG	**DG**
201,253	287,521

V-4-2-4.Détails écologiques

Nous allons maintenant nous intéresser à l'écologie, notre village se situe dans une région sous-peuplée, mais nous devons protéger l'environnement, dans ce qui suit nous allons comparer les quatre systèmes optimaux qui ont été choisis par le logiciel Homer à base du NPC. Le tableau ci-dessus résume les émissions engendrées par le système :

Tableau (V.14) : les émissions engendrées par le système

Quantity	**Value (**Kg/yr)
Carbon Dioxide	7,214
Carbon Monoxide	40,2
Unburned Hydrocarbons	0,85
Particulate Matter	2,09
Salfur Dioxide	19,2
Nitrogen Oxides	81,3

V-4-4.Conclusion

Dans ce chapitre une brève description d'un système hybride de génération de l'énergie électrique est réalisée, les principales notions liées au type d'architecture de système ont et aussi présentés. Une application d'un système hybride ont été élaborés sur l'environnement HOMER pour une optimisation d'un système hybride à un site, où les données métrologiques comme la vitesse du vent sont disponibles, on a obtenu des résultats, sur la combinaison des sources d'énergie renouvelables, en plus la diversité des ressources énergétiques que présente un système hybride, la continuité et la disponibilité de la production d'énergie électrique est assurée.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail effectué dans ce mémoiretraite l'investigation de l'intégration d'un jumelage éolien-diesel pour alimenter un site isolésitué à l'extrême sud-ouest de L'Algérie. Sachantque l'alimentation de ces sites isolés est assurée par des générateurs diesel, ces derniersposent toujours des problèmes d'ordre (technique, économique et écologique). Le jumelagede cesgénérateurs diesels déjà sur place avec uneéoliennedimensionnéepar rapport aux besoins de consommation. En couplant ces deux sources avec des batteries et un convertisseur, nous a permet de minimiser la consommation de carburant diesel et de réduire les émissions de CO2 qui entrainera une réduction des coûts de fonctionnement du système

Comparativementau système d'alimentation diesel conventionnel, le système d'énergie hybride éolien-diesel est une des meilleures solutions alternatives présentant de nombreux avantages tels que : plus d'efficacité, un coût d'entretien relativement faible, rentable, en plus le coût du kWh fournit par l'éolien pendant l'année est moins cher que le diesel.

Nous avons démontré que la production de l'électricité à l'aide de générateur diesel est inefficace, onéreuse et responsable de l'émission de gaz à effet de serre. Les sites isolés dans le Sud Algérien ont un potentiel de l'énergieéolienne significative ; par conséquent,le système d'énergieéolien-diesel est largement recommandé dans ces sites.

On a montré le rôle primordial de l'hybridation entre l'éolien et le diesel pourl'alimentation des sites isolés et éloignés.

La Simulation sous HOMER donne une combinaison optimale.Les résultats obtenus confirment la fiabilité et la performance du système hybride proposé, sachant que la simulation est basée sur des données météorologiques réelles.

Donc notre étude nous a permis de voir l'effet sur l'impact économique et écologique, bien que cette énergieéolienne soit plus chère actuellement mais les efforts du gouvernement Algérien nous encourage à utiliser les énergies renouvelables dont les indices économiques sont réduits avec le développement technologique.

Perspectives

En ce qui concerne la poursuite de ce travail. On va traiter des améliorations qui peuvent être apportées dans le futur. Il s’agit en fait des recommandations suivantes :

-Réaliser un algorithme pour l'optimisation énergétique et économique du système multi-sources de production électrique, pour la gestion du système et de garantir une disponibilité énergétique

-La modélisation d'un modèle global d'un système d'énergie hybride composé : d'un générateuréolien, d'un générateur diesel et un système de stockage avec convertisseur sous Matlab/Simulink.

-Etude des commandes avancées pour l'implantation des systèmes hybrides afin d'améliorer la qualité d'énergie.

-Développement et mise en œuvre d'un banc d'essai d'un système hybrid éolien-diesel.

BIBLIOGRAPHIE

Chapitre I

[1] Gaetan LAFRANCE, « Vivre après le pétrole : mission impossible ? », Editions Multi Mondes, Québec, 2007, p. 72.

[2] **www.explorateurs-energie.ch**

[3] Sources d'énergie renouvelable .pdf-page1, 2, 3

[4] Tommy Andy Theubou Tameghe, « modélisation et simulation d'un système de jumelage éolien-diesel alimentant une charge locale», mémoire présenté à l'Université du Québec en Abitibi-Temiscaming comme exigence partielle de la maitrise en ingénierie, page 31.

Chapitre II

[1] G.CUNTY, « Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne », Edissud ,Aixen-provence,2001,www.edisud.com

[2] S.JEAN, « Electronique et machine électrique », Editions Eyrolles 61, boulevard Saint-Germain, Paris, 1977.1976.

[**3]** P.LECONTE, M.RAPIN, E.SZECHNYI, « Eoliennes, Technique de l'Ingénieur», BM4 640-2005.

[4] CHERFIA NAIM, « conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens », Mémoire de ingénieur de Université Mentouri Constantine, Algérie dans 07/06/2010.

[5] Khelfat Lotfi, « étude et simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée», Mémoire De Master Université Badji Mokhtar-Annaba, page 16, juin 2017.

[6] F. FAURE, « Suspension magnétique pour volant d'inertie », Thèse de Doctorat, INPG, France, 2003.

[7] S. EL AIMANI, « modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans réseaux de moyenne tension », Thèse de Doctorat, Université Lille, France, 2004

[8] LATRECHE Mohammed, «Tahar Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanant (MSAP) utilisée dans un système éolien», Mémoire de Magister Université Ferhat Abbas de Setif, 2012

[9] « Wind Turbine Control Système » Supringer,imprimé en allemand,2007.

[10] http://meteo.org/phenomene/ vent date d'accès 26/04/2015

[11] Nachida Kasbadji Merzouk « éolienne, PPT», 2006

[12] http://meteo45.com/formation du vent le 30-04-2015

[13] Nachida Kasbadji Merzouk « éolienne, PPT », 2006

[14] S.Lazaar,mémoire de Magister « Contribution à l'étude d'une station éolienne pour la production de l'électricité. Application aux sites de Tlemcen, Djelfa et Ghardaïa », Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen 2009.

[15] S. Krohn .Manuel de référence sur l'énergie éolienne 2éme partie : Définitions de l'énergie et de la puissance, 2003

[16] http:// www.ademe.fr/Bretagne/actions phares/énergies renouvelables, « Les actions phares de la délégation en Bretagne de I'A.D.E.M.E ».

[17] O.Langlois, « Raccordement d'éoliennes de petite puissance intégrées au batiment » .Contrat avec EDF R&D.DEA Génie Electrique de l'INPT, Septembre 2002

[18] http:/ /www.windturbin.com

[19] H.Garrad & partner,Tractebel Energy Engineering,Riso National Laboratory, Kvarner Oil & Gas,Energi & Miljoe Undersoegelse,'Offshore Wind energy.Ready to power a sustainable Europe,Final Report,Concerted Action on Offshore Wind Energy in Europe,''Delft University Wind Energy Research Institute (DUWIND),Delft,Pays-Bas,Réf :DUWIND 2001.006 ,2001.

[20] I.Troen and E.L. Petersen, European Wind Atlas Laursen Toender ed, Danemark, 1989, ISBN 87-550-1482-8, pp. 656.

[21] M.Ben medjahed, « Gisement éolien de la région côtière de Béni Saf Et son impacte sur l'environnement », mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Unité de recherche Matériaux et Energies Renouvelables URMER Tlemcen.2008.

[22] https://www.evwind.es/tags/world-wind-energy-association

[23] V.Courtesuisse, « supervision d'une centrale multi sources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique »Thèse de doctorat en génie électrique, École nationale d'arts en métiers, 2008.

[24] www.maghrebemergent.com/energie/renouvlable/.../38807-1-Algérie-ina... « L'Algérie inaugure sa première ferme éolienne de 10 ».

[25] Nachida KASBADJI MERZOUK, « Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie », Thèse de doctorat, L'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2006.

[27] Khaled FERKOUS, « Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne ».Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, 2009.

[28] J.F.Manwell,j.G.McGowan and A.L. Rogers, « Wind energy Explaind: Theory,Designe and Application »,University of Massachusetts,Amherst,USA 2002.

Chapitre III

[1] B. MULTON, « Etat de l'art des aérogénérateurs électriques », Rapport ECRIN, Mai 2002.

[2] P. ENRICI, « Introduction à la conversion d'énergie éolienne », Cours de DEA Décembre 2003.

[3] G.CUNTY**,** « Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne », Edissud, Aixen-Provence, 2001, www.edisud.com.

[4] A. I. BRATCU, « Modélisation À Evènements Discrets D'Un Système Éolien À Vitesse Variable En Vue De La Commande Supervisée » 6ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, MOSIM'06, 3 au 5 Avril 2006, Rabat, Maroc, 2006.

[5] T.BURTON, "Wind energy handbook», Copyright 2001 by John Wiley & Sons, Ltd Baffins Lane, Chichester West Sussex, PO19 1UD, England.

[6] J .L. Gary, « Wind Energy Systems », Chapter 4-Wind Turbine Power, Nov. 2001.

[7] P**.** LECONTE, M. RAPIN, E. SZECHENYI, « Éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, BM 4 640-2005.

[8] L.LECLERCO, « Apport de stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de Doctorat, Université de Lille, n° d'ordre : 3563, UFRR IEEEA, Décembre 2004.

[9] N. KASBADJI MERZOUK, « Evaluation Du Gisement Energétique Eolien Contribution à La Détermination Du Profil Vertical De La Vitesse Du Vent En Algérie », Thèse de Doctorat en Physique Energétique et Matériaux, Université de Tlemcen, 2006.

[10] H. CAMBLONG, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Arts et Métiers de Bordeaux, Décembre 2003.

Chapitre IV

[1] Tammam Basbous « Comme exigence partielle du programme de maitrise en ingénierie Pour l'obtention du grade de (maitre en sciences appliquées), Université Du Québec à Rimouski, Fevrier 2009.

[2] Hussein Ibrahim, « Étude et conception d'un générateur hybride d'électricité de type éolien-diesel avec élément de stockage d'air comprime», Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, juin 2010.

[3] «La ferme éolienne d'Adrar mise en service», Extrait du portail Algérien des énergies renouvelables disponible en ligne sur : http : //portail.cder.dz/spip.php, article 4098.

[4] H. Ibrahim, R. Younes, T. Basbous, A. Ilinca, M. Dimitrova, «Optimization of diesel engine performances for a hybrid wind-diesel system with compressed air energy storage», Energy, 36 (2011) pp. 3079-91.

Chapitre V

[1] SYTHELIA-Thibaud SIMON « analyse du logiciel HOMER ENERGY », 23/07/14

[2] L. Hamane, «Les ressources éoliennes de l'Algérie», Bulletin des Energies Renouvelables, No.3 Juin 2003.

[3] Station météorologique de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER.MS) _a Adrar, Algeria. http : //www.urerms.dz/.

[4] BAGHDADI Fazia, «Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables», Thèse de magistère, Université de Tizi-ouzou, le 26 septembre 2011.