

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER EN PHYSIQUE ENERGETIQUE ET ENERGIE RENOUVELABLE

Thème

ETUDE D'IMPACT DES FLUCTUATIONS DE LA PRODUCTION DE LA
CENTRALE EOLIENNE KABERTENE SUR LE RESEAU ELECTRIQUE
D'ADRAR

Soutenu le : 25/05/2017

Présenté par :

HADJ BELKACEM Mohammed

HINOUNI Houcine

Encadré par : Dr. BENTOUBA Said

Maitre de conférences à l'université d'Adrar

Co encadreur : Mr. AOUFI Med Mehdi

Cadre à Sonelgaz d'Adrar

Président : Pr. BENATILLAH Ali

Professeur à l'université d'Adrar

Examineur : Mr. GUENFOUD Mohammed

Maitre assistant à l'université d'Adrar

2016-2017

Remerciements

* Nous remercions tout d'abord **ALLAH** de nous donner la santé et la patience pour réaliser le travail imposé et pour avoir terminé ce mémoire.

* Nous avons tout à exprimer nos profondes reconnaissances à **Dr. S.BENTOUBA** et monsieur **M. Aoufi**, qui ont assuré la direction de ce travail afin de finaliser ce mémoire

* Nous remercions ainsi le **Pr. A. BENATIALLAH**, professeur à l'université d'Adrar, d'avoir accepté de présider le jury. Nos vifs remerciements à **Mr. Guenfoud**, maître assistant à l'université d'Adrar d'avoir accepté d'examiner ce travail.

* A tous les profs qui ont encadré et tous ceux qu'ont les connaissent au niveau d'université d'Adrar.

* Un très grand merci spécial à nos parents, et à nos familles.

* Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail spécialement notre collègue **AKABLIYAMINA**.

MOHAMED

HOUCINE



Dédicace

-
-
-
- *A la mémoire de mon cher père décédé le 11 Avril 1990.*
- *A ma chère mère (la voix de la sagesse et de l'amour), qui n'a jamais cessé de prier pour moi, que dieu la protège,*
- *A mes chères filles CHIMA et KHADIDJA*
- *A ma chère femme*
- *A mon cher petit fils*
- *A mes chers frères et sœurs*
- *A tous mes collègues de la promo physique En et En renouvelable*
- *A tous mes collègues de SONEGAS GRTE,*
- *A tous mes amis*





Dédicace

Au nom d'Allah le tout miséricordieux, le très miséricordieux

Pour tous débuts y a une fin, et pour chaque fin un résultat. Un résultat d'une conséquence des efforts qui sont fondu pour ce modeste travail de recherche, dont, ou, je dédie ce dernier a mon père qui était l'âme de ma vie et il restera toujours; qu'Allah lui offert son paradis.

A ma belle vue, a celle que j'aime et que je l'aimerai pour toute ma vie, ma mère la plus chère, merci pour tous ce que tu m'as donné, d'amour et de tendresse. A mes frères et mes sœurs.

Je le dédie aussi a mon brave ami et mon collègue de travail YUCEFI LARBI. A mes oncles et mes tantes et a mes deux grand-mères qu'Allah les garde pour nous tous. Sans oublier la gentille docteur BOUHADDA, a toute la famille HINOUNI et FONDOU.

A tous ce que j'ai oublié par une erreur et non pas dans mon cœur. Je le dédie a tous ce que je connaisse de près ou de loin.

HOUCINE



Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Liste des Tableaux	
Liste des figures	
Nomenclature	
Résumé	
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Production éolienne

I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique.....	3
I.3 L'énergie éolienne.....	4
I.3.1 Qu'est-ce que l'énergie éolienne.....	5
I.3.2 Production éolienne.....	5
I.4 Les différentes type d'éoliennes.....	6
I.4.1 Les éoliennes à axe vertical.....	6
I.4.1.1 Aérogénérateurs à rotor de Savonius.....	6
I.4.1.2 Aérogénérateurs à rotor de Darrieus.....	7
I.4.1.3 Avantages et inconvénients des aérogénérateurs à axe vertical.....	8
I.4.1.3.a Les avantages théoriques d'une éolienne à axe vertical sont les suivants....	8
I.4.1.3.b Les principaux inconvénients sont les suivants.....	8
I.4.2 Les éoliennes à axe horizontal.....	8
I.4.2.1 Les éoliennes à marche lente.....	9
I.4.2.2 Les éoliennes à marche rapide.....	9
I.4.2.2.a Amont.....	10
I.4.2.2.b Aval.....	10
I.5 Comparaison des différents types de turbines.....	11
I.6 Le principe de fonctionnement d'une éolienne.....	12
I.7 Les éléments constituant une éolienne.....	13

I.7.1	Moyeu et cône.....	13
I.7.2	Chassies.....	14
I.7.3	Arbre principal.....	15
I.7.3.1	Accouplement de l'arbre rapide.....	16
I.7.4	Tour.....	17
I.7.4.1	Absorbeur d'oscillation.....	17
I.7.4.2	Principaux éléments de la tour.....	17
I.7.5	Le multiplicateur.....	18
I.7.5.1	Rôle et fonctionnement.....	18
I.7.6	Les pales.....	19
I.7.6.1	Limite de BETZ	19
I.7.7	Génératrice.....	20
I.7.7.1	Les defferents types des generatrices.....	20
I.7.7.1.a	Les machine synchron.....	20
I.7.7.1.b	Les machine asynchrones.....	21
I.8	Classification d'éolienne.....	21
I.9	Applications des éoliennes.....	23
I.10	Avantages et inconvénients de l'éolien a axe horizontale.....	23
I.10.1	Avantages.....	23
I.10.2	Inconvénients.....	23
I.11	Conclusion.....	24

Chapitre II : Gésement éolienne

II.1	Introduction.....	25
II.2	Situation actuelle de L'énergie éolienne dans le monde	25
II.3	Le vent.....	26
II.4	Origine du vent.....	26
II.5	Vitesse du vent	27
II.6	Les ressources éoliennes de l'Algérie.....	28
II.7	Comment tirer profit de l'énergie éolienne	29
II.7.1	Choix de site.....	29
II.7.2	Recherche d'une vue dégagée.....	30
II.7.3	Raccordement au réseau.....	30
II.7.4	Renforcement du réseau électrique	31

II.7.5	Infrastructure.....	31
II.7.6	Risques liés à l'usage de données météorologiques.....	31
II.8	Caractéristiques physiques des éoliennes.....	32
II.8.1	La limite de Betz.....	32
II.9	Gisement éolien en Algérie.....	32
II.10	La rose des vents.....	33
II.11	Objectifs de base de mesures de vent.....	34
II.12	Etapes de la mesure des ressources éoliennes.....	34
II.13	Conclusion.....	35

Chapitre III : Intégration des éoliens dans le réseau électrique

III.1	Introduction.....	36
III.2	Généralités.....	37
III.3	L'évolution du réseau électrique.....	37
III.4	Comportement du réseau électrique.....	39
III.4.1	La transformation:.....	39
III.4.2	L'aiguillage.....	39
III.4.3	La protection des installations :.....	39
III.5	Poste électrique.....	40
III.5.1	Fonctions Aiguiller l'électricité :.....	41
III.5.2	Différents types de postes électriques.....	43
III.6	Le besoin de l'intégration de l'énergie éolienne dans le Réseau électrique.....	43
III.7	Problèmes induites par l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux.....	44
III.8	Contraintes de raccordement des installations de production aux réseaux électriques.....	44
III.8.1	Contraintes de raccordement sur le réseau public de distribution HTA.....	44
III.8.2	Contraintes de raccordement sur le réseau public de transport.....	45
III.9	Eolienne connectée au réseau.....	46
III.9.1	Capacités de réglages des différentes technologies d'éoliennes.....	46
III.9.2	Gestion du réseau électrique :.....	47
III.9.3	Capacité de réglage de la tension et de la puissance réactive.....	48
III.9.4	Capacité de réglage de la fréquence.....	49
III.9.5	Capacité de fonctionnement en site isolé.....	49
III.10	Conclusion :.....	50

Chapitre IV: Application centrale éolienne de Kabertene

IV.1 introduction.....	51
IV.2Potentiel Eolien D'ADRAR.....	52
IV.3Choix du site de Kabertene :	53
IV.3.1 Fiche Technique De La Centrale Eolienne De Kabertene :	54
IV.3.2 Installation Du Mat De Mesure.....	54
IV.3.3 Installation Du Matériel De Mesure	55
IV.3.3.1 Post-traitement des mesures anémométriques.....	56
IV.3.3.2 Résultats obtenus.....	57
IV.3.3.2.a Les roses des vents et des énergies.....	57
IV.3.4 Les variations de température	58
IV.3.4.1 Cas d'étude	59
IV.4La constituants de la station de Kabertene.....	60
IV.4.1 Kiosque.....	61
IV.4.2 Le Transformateur.....	62
IV.4.3 Sous station 30 KV.....	64
IV.4.3.1Pose cellules MT.....	65
IV.4.3.1.aPoste 220/30kv Kabertene.....	65
IV.4.3.1.a.1Cellules d'extension du tableau 30 KV.....	65
IV.5Etude d'impact de la variation de la centrale sur le système électrique.....	66
IV.6 conclusion.....	69
conclusion générale	70
Bibliographique	

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II.1 : Effets du vent en fonction de sa vitesse (Echelle de beaufort)	28
---	----

Chapitre IV

Tableau IV.1: Les renseignements relatifs au site de Kabertene	54
Tableau IV.2: Vitesses moyennes journalières (m/s) du vent en décembre 2012, janvier et février 2013.....	56
Tableau IV.3: les maxima ont été enregistrés par des vents de direction ouest : le 19 janvier 2013 à 23h 30	57
Tableau IV.4: Les températures moyennes mensuelles.....	58
Tableau IV.5 : Puissance (KW) G52 850 KW 50-60 HZ calculée en fonction de la vitesse du vent (m /s) pour différentes densités de l'air (kg /m ³).....	60
Tableau IV.6: Les caractéristiques techniques du TR 0.69/30KV.....	63
Tableau IV.7: Transformateur des auxiliaires du kiosque d'éolienne TACS.....	63

Liste des figures :

Chapitre I

Figure I.1 : Moulins à vent dans la région de La Mancha, Espagne	4
Figure I.2 : chaîne de conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique.....	5
Figure I.3 : Aérogénérateur à axe vertical (structure de savonius).....	7
Figure I.4 : Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus).....	7
Figure I.5 : Eolienne à axe horizontal.....	9
Figure I.6 : Aérogénérateur à axe horizontal à marche lente.....	9
Figure I.7 : Aérogénérateur à axe horizontal à marche rapide.....	10
Figure I.8 : Schéma d'une éolienne à axe horizontal amont et en aval	11
Figure I.9 : Coefficients de puissance en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types de turbines.....	11
Figure I.10 : les composants protégés dans la nacelle.....	13
Figure I.11 : Moyeu et cône	14
Figure I.12 Châssis d'un éolien	14
Figure I.13 : Photo d'un arbre lente ou principale au niveau d'usine	15
Figure I.14 : Système de blocage rotor de la machine G5X.....	16
Figure I.15 : Accouplement de l'arbre rapide	16
Figure I.16 : Système de levage des charges.....	17
Figure I.17 : Mat d'une éolien.....	17
Figure I.18 : Assemblage d'engrenages.....	19
Figure I.19 : Partie d'une pale G5X	20
Figure I.20 : Différent type des pales a la zone de stockage	20
Figure I.21 : Fonctionnement synchrone de la machine.....	21
Figure I.22 : fonctionnement asynchrone de la machine.....	21

Chapitre II

Figure II.1 : puissance d'éolienne installée annuelle mondiale.....	26
Figure II.2 : Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol. (Hiver et automne, Été et Printemps).	33
Figure II.3: rose de vent pour le site d'Adrar	34
Figure II.4 : anémomètre à hélice.....	35

Figure II.5 : anémomètre à coupes	35
---	----

Chapitre III

Figure III.1 : usage des postes électriques hautes tension	40
Figure III.2 : Poste électrique haute tension isolé au SF6 et Poste électrique haute tension isolé à l'air.....	42
Figure III.3 : architecture verticale du réseau.....	43
Figure III.4 : Architecture horizontale du réseau.	49

Chapitre IV

Figure IV.1 : La vitesse moyenne du vent au niveau l'Algérie.....	52
figure IV.2 : potentiel éolienne d'Adrar.....	52
figure IV.3:Localisation du site.....	53
figure IV.4: mat de mesure et les capteurs.....	55
Figure IV.5: la rose des directions et énergies en décembre 2012.	57
figure IV.6: la rose des directions et énergies en janvier 2013.	58
figure IV.7: valeurs moyenne mensuelle de la température	59
figure IV.8 : Courbe annuel de température de Kabertene.....	59
Figure IV.9: courbe de puissance de l'aérogénérateur aeg g52 850 kw 50_60 hz pour une densité de l'air égale a $1,225 [Kg/ m^3]$	60
Figure IV.10 : Plan d'implantation de la ferme éolienne de Kabertene.....	61
figure IV.11:cellules mt Schneider 30 KV au niveau des kiosques	62
Figure IV.12: schéma simplifié éolienne + kiosque.....	62
Figure IV.13 : Transformateur élévateur.....	63
Figure IV.14Schéma unifilaire de raccordement des transformateurs auxiliaires et groupe secourant.....	64
figure IV.15 : cellule (efacec) mt sous-station 30kv éolienne.....	64
Figure IV.16 : cellules efacec mt 30 KV au niveau poste 220/30kv du Kabertene	65
Figure IV.17 : Schéma unifilaire de liaisonne la ferme éolienne avec le poste 220kV/30kVKabertene.....	65
Figure IV.18 : la production éolienne et la vitesse de vent du 13 04 2017 de la ferme de KAB.....	66
Figure IV.19 : la production éolienne et la vitesse de vent du /2104/2017 de la ferme de KAB.....	67

Figure IV.20 : l'influence de la puissance injectée par la centrale la éolienne sur la puissance demandée (charge) j 21/04/2017.....	68
Figure IV.21 : l'influence de la puissance injectée par la centrale l'éolienne sur la puissance demandée (charge) j 13/04/2017.....	68

Nomenclature

1. Glossaire

λ	La vitesse réduite
Cp	Coefficient de puissance
Cc	Coefficient de couple
Vmoy	vitesse moyenne

2. Abréviation

HTB	haut tension gamme B ($U_n > 50$ kV)
HTA	haut tension gamme A ($1\text{kV} < U_n < 50$ kV)
BT	basse tension ($U_n < 1$ kV)
MADA	Machine asynchrone double alimentation
MSAP	Machine synchrone a aimant permanent
ONE	l'office national de l'électricité marocain
VAWT	Vertical axis wind turbine
HAWT	Horizontal axis wind turbine
MADA	Machine asynchrone double alimentation
GVC	Génération à Vitesse Constante
GVV	la Génération à Vitesse Variable
Gamesa	Société Espagnol
Ecotecnia	Société Espagnol
. Wind liber de grande puissance	grand projet de fabrication de nouvelles machines
EDF	électricité de France
KAB	kabertene

Introduction Générale

Introduction Général

On estime que chaque année, une énergie très importante est portée par le vent mais difficilement récupérable. Ce potentiel énorme que représente l'énergie éolienne qui a poussé les hommes à trouver un moyen toujours plus perfectionné pour sa transformation en énergie mécanique ou électrique.

Ainsi, dès le Vème siècle avant notre ère, on voyait déjà des éoliennes à axe vertical également appelées anémones dans les îles grecques. Le premier moulin à vent a été fabriqué en Perse en 134 avant. Elle fonctionnait grâce à un mur protégeant les pales du vent au cours de leur retour. Puis on a beaucoup utilisé l'énergie éolienne pour le pompage et l'irrigation décastrés. L'éolienne a poursuivi sa lente évolution au cours des siècles, et les éoliennes à axe horizontal n'ont fait leur apparition qu'au XIIIe siècle. Les constructeurs et les utilisateurs se préoccupent plus des effets aérodynamiques liés à la forme des pales et à leur nombre pour ne citer que ces deux facteurs.

Les premiers aérogénérateurs ont vu le jour en 1850, mais l'idée de l'aérogénérateur date de 1802 où Lord Kelvin, un physicien anglais, associa une génératrice d'électricité à un moteur éolien. Cette nouvelle application de l'énergie éolienne a connu un certain succès et l'on comptait en 1920 jusqu'à 300 constructeurs d'aérogénérateurs. Parallèlement, les recherches dans le domaine de l'aérodynamique faites par l'aéronautique ont permis une évolution des moteurs éoliens.

Cependant, dans les années "60", le faible coût des autres sources d'énergie (notamment le pétrole) a dissuadé l'expansion de l'exploitation de l'énergie éolienne. En effet, pour que cette source d'énergie écologique non-polluante soit attractive, autonome et commercialisée, il est nécessaire qu'elle soit rentable par rapport aux autres sources d'énergie. Ainsi, dans quels cas est-il préférable d'opter pour l'énergie éolienne?

Principalement lorsqu'on se situe dans une région éloignée, à l'écart du réseau électrique national, ou bien encore lorsque l'on n'a besoin que d'une relativement faible quantité d'énergie et d'une puissance fournie non régulière pour alimenter une pompe à eau par exemple (Le problème de la non-régularité de la puissance fournie par l'aérogénérateur

Tout ceci était encore vrai au début des années "80" mais les progrès technologiques ont fait que depuis le début des années "90", les perspectives d'exploitation de l'énergie éolienne sont complètement différentes. En effet, même si le coût actuel de l'électricité éolienne dépasse

encore d'au moins 20% celui de l'énergie conventionnelle, en comptant avec une érosion continue du prix des machines (moins 20% dans les trois dernières années), de celui de l'installation, de la puissance et de l'efficacité sans cesse croissante des machines éolienne, on peut envisager un coût du kilowattheure compétitif dans peu de temps.

Pour donner une idée des énormes progrès réalisés, pour des vents moyens de 23 km/h, le prix du kWh a chuté de 50 à 29 centimes au Danemark depuis 1990 et la puissance moyenne des machines est passée de 30 kW en 1983 à 600 kW en 1997. Tous ces bouleversements techniques font que ce secteur est actuellement en pleine expansion et que s'ouvre à lui une multitude de marchés mondiaux. En effet, en cinq ans, le marché annuel mondial a plus que quadruplé pour atteindre 1566 mégawatts en 1997 (l'Europe représente 84% du marché),

Ainsi, l'énergie éolienne est vouée à un bel avenir puisque certains spécialistes du secteur estiment que techniquement, le réseau électrique national peut s'équiper jusqu'à 20% en énergie éolienne.

Cependant, toutes les éoliennes ne ressemblent pas à celles de plusieurs centaines de kilowatts qui servent à produire de l'énergie électrique. Il existe une multitude d'éoliennes dont beaucoup ont été mises de côté du fait qu'elles ne satisfaisaient pas aux besoins demandés, et leur usage est aussi varié que leur forme.

Nous allons donc voir quels sont les différents types d'éoliennes, quel est leur fonctionnement, comment tirer profit de l'énergie éolienne et quelles peuvent être les différentes applications de cette énergie tout en gardant en tête le facteur économique du système.

Ce mémoire est articulée sur quatre chapitres dispatchés comme suite :

Premier chapitre : la production éolienne

Deuxième chapitre : les gisements éoliens

Troisième chapitre : intégrations éoliennes dans le réseau électrique

Quatrième chapitre : application centrale éolienne de Kabertene.

Une conclusion générale clôtura ce mémoire.

Chapitre I

Production éolienne

I.1 Introduction

La production d'énergie électrique utilise principalement des combustibles fossiles et fissiles (nucléaire). Un recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon ou le gaz naturel, permet d'avoir de faibles coûts de production mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant et de gaz à effet de serre. Selon, la production électrique à partir de combustibles fossiles est à l'origine de 40% des émissions mondiales de CO₂, [1].

La dernière crise nucléaire japonaise a prouvé qu'aujourd'hui et plus que jamais, la solution énergétique doit passer obligatoirement par le développement de nouvelles sources d'énergie propres et non polluantes qui garantissent nécessairement la sécurité de l'être humain, son environnement et la durabilité de ces sources.

On parle alors des énergies renouvelables parmi ces énergies renouvelables, l'énergie du vent ou l'énergie éolienne présente une place de choix pour diverses raisons, avant d'entamer l'étude d'impact des fluctuations de la production de la centrale Eolienne Kabertene sur le réseau électrique d'Adrar, il est impératif d'avoir une idée sur l'historique et le principe de fonctionnement de ce système ainsi que ses différents composants, sans oublier son évolution à travers le monde ; c'est ce qu'on va discuter dans ce premier chapitre.[2]

I.2 Historique

L'idée d'exploiter l'énergie du vent date depuis l'antiquité, en effet des anciennes civilisations ont connu l'exploitation de l'énergie du vent (les perses, les égyptiens et les chinois).

A partir du 12^{ème} siècle, les moulins à vent firent leur première apparition en Europe et au cours des siècles qui suivirent, cette « technologie » se répandit à travers le monde. Ces moulins à vent (aéromoteurs) étaient économiquement rentables et ils ont contribué la production de l'énergie mécanique (pompage d'eau le meulage des grains ainsi que le sciage du bois etc....)

A partir du 19^{ème} siècle ces applications commencent à perdre leur intérêt, cela est dû à l'évolution technologique qu'a connue l'Europe pendant la révolution industrielle. Devant la montée de la combustion du charbon, l'éolien a en pratique disparu de la carte. Après le premier choc pétrolier, des efforts pour développer à nouveau l'énergie éolienne ont été consentis, et le monde occidental se mit une fois de plus à investir dans la ressource éolienne, cette fois-ci dans le but de produire de l'électricité.

Vers le début des années 1980, les budgets de recherche et développement accordés à cette énergie « redécouverte » ont littéralement explosé dans certains pays comme l'Allemagne, les États-Unis, le Danemark et l'Espagne.

Après une période de tâtonnement, il s'est révélé que la bonne stratégie consiste à augmenter progressivement la puissance des aérogénérateurs, en s'appuyant sur la création de marchés subventionnés donnant une base industrielle suffisante pour le développement de ce domaine.

En plus des investissements dans le domaine éolien, certains pays ont adopté une législation incitative visant à promouvoir ce secteur. Dans certains pays, ces mesures étaient assez efficaces pour faire naître une véritable industrie éolienne.

Grâce aux améliorations technologiques qui ont permis des réductions de coûts, cette filière est aujourd'hui compétitive avec d'autres filières traditionnelles et occupe une part de plus en plus importante dans le bilan énergétique de nombreux pays [5]



Figure.1 : Moulins à vent dans la région de La Mancha, Espagne [5].

I.3 L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie du vent. C'est une énergie plus respectueuse de l'environnement que les énergies classiques telles que les combustibles fossiles ou l'énergie nucléaire, car elle cause moins de pollution. Quoique le vent soit une source d'énergie gratuite, sa puissance varie considérablement en fonction du lieu et du moment, selon le climat et les saisons. Le vent ne peut assurer un apport énergétique régulier et il est difficile à contrôler. Toutefois, il est possible de prévoir la vitesse moyenne du vent, sa direction et son intensité dans certains lieux, [10].

I.3.1 Qu'est-ce que l'énergie éolienne

Une éolienne est un convertisseur d'énergie cinétique (vent) en énergie mécanique, puis éventuellement en énergie électrique (via une génératrice).

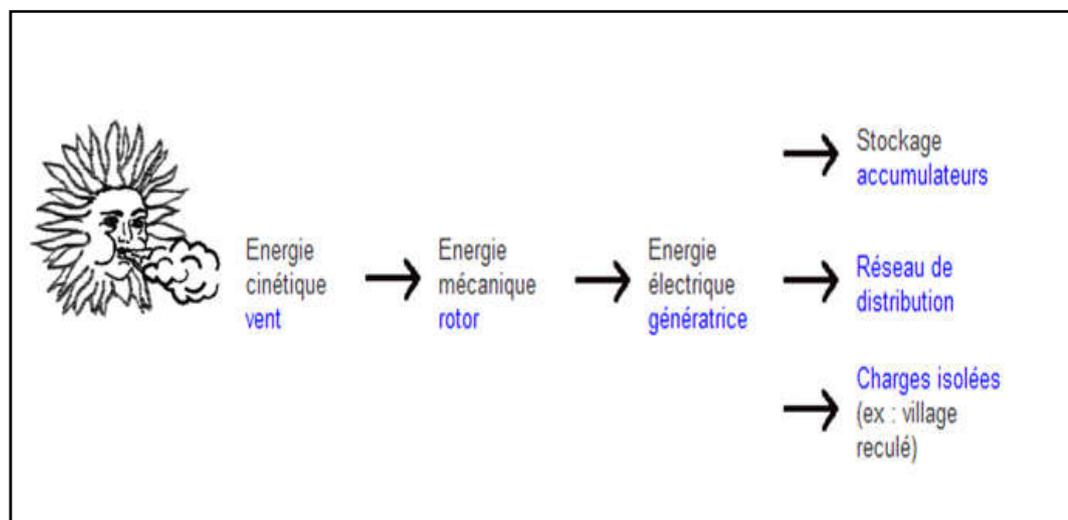


Figure.2 : chaîne de conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique [10].

L'énergie éolienne est produite par la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. Il est possible ainsi de produire deux sortes d'énergies. Premièrement, l'hélice peut se relier à des systèmes mécaniques servant à moudre le grain ou à pomper l'eau (il s'agit du principe des moulins à vent). Il est aussi possible de rattacher l'hélice à un générateur transformant l'énergie mécanique en une énergie électrique. La quantité d'énergie produite dépend en premier lieu de la vitesse du vent élevé au carré, puis de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air. Il faut pour produire de l'électricité un apport minimal du vent d'environ 12-14 km/h et des vents de 50-60 km/h pour produire à pleine puissance. Afin d'éviter d'abîmer l'équipement, la production doit être interrompue si les vents dépassent les 90 km/h. Éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en:

Énergie électrique, dans le cas d'un aérogénérateur. Énergie mécanique, dans le cas d'une éolienne de pompage, [5].

I.3.2 Production éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est d'indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis

l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers, [6].

I.4 Les différents types d'éoliennes

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

I.4.1 Les éoliennes à axe vertical

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

Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour. Par ailleurs, une éolienne à axe vertical fonctionne quelle que soit la direction d'où souffle le vent, permettant donc de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine.

En revanche, le fait qu'une telle éolienne soit érigée près du sol signifie que le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable (gradient de vent, turbulence due aux accidents du terrain en amont de la machine). Ce qui rduit significativement l'efficacité de la machine. Par ailleurs, le principe même de fonctionnement, basé sur des variations incessantes de charge aérodynamique sur les pales, fait que ces éoliennes sont très sujettes aux problèmes d'aéroélasticité.

Enfin, pour des éoliennes de grande puissance, la surface occupée au sol par le Haubanage est très conséquente [7].

Les deux plus importantes conceptions d'éoliennes à axe vertical sont : Darrieus et Savonius.

I.4.1.1 Aérogénérateurs à rotor de Savonius

Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variable selon

L'orientation de ce profil La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.



Figure I.3 : Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius) [9].

I.4.1.2 Aérogénérateurs à rotor de Darrieus

Ils sont basés sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure.



Figure I.4 : Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus) [9].

I.4.1.3 Avantages et inconvénients des aérogénérateurs à axe vertical

I.4.1.3.a Les avantages théoriques d'une éolienne à axe vertical sont les suivants

- Permet de placer la génératrice, le multiplicateur, à terre (il n'y pas besoin de munir la machine d'une tour).
- Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

I.4.1.3.b Les principaux inconvénients sont les suivants

- Les vents sont plus faibles à proximité de la surface du sol.
- Un inconvénient, pour certaines VAWT, est de nécessiter un dispositif auxiliaire de démarrage.
- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas satisfaisante.
- D'autres VAWT utilisent la poussée plutôt que la portance aérodynamique (lift, effet qui permet à un avion de voler), ce qui se traduit par une réduction du coefficient de puissance et un moindre rendement.

I.4.2 Les éoliennes à axe horizontal

Ces éoliennes ont leur axe de rotation à l'horizontale du terrain mais aussi presque parallèle à la direction du vent. La majorité des éoliennes présentes dans le marché appartiennent à cette catégorie. Même si elles nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, elles présentent néanmoins un rendement aérodynamique plus élevé.

De plus, elles démarrent de façon autonome et présentent un faible en cabrement au niveau du sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Par contre, elle rend sa conception plus complexe mais aussi plus coûteuse, [7].



Figure I.5 : Eolienne à axe horizontal [9].

I.4.2.1 Les éoliennes à marche lente

Les éoliennes à marche lente sont constituées d'un grand nombre de pales (entre 10 et 40). Ce type d'éolienne est défini par leur inertie importante et ont un couple de démarrage proportionnel au nombre de pales et au diamètre (maximum de 10 m) ; leur rendement par rapport à la limite de Betz est faible car leur vitesse en bout de pale est limitée.

Dans cette structure le coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur optimale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite.

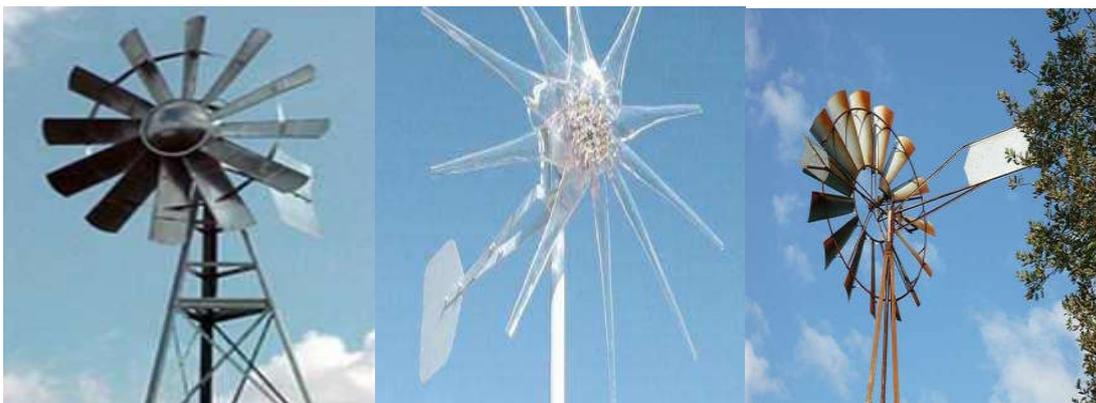


Figure I.6 : Aérogénérateur à axe horizontal à marche lente [3].

I.4.2.2 Les éoliennes à marche rapide

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus utilisées et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement trois pales fixes ou orientables

pour extraire le maximum de puissance cinétique de vent et pour contrôler la vitesse de rotation à chaque instant [8]. Le rayon de ces turbines peut atteindre des longueurs de plus de 120 m pour des éoliennes de plusieurs MW. La roue bipale est la plus économique et la plus simple mais elle est génératrice de vibrations qui peuvent être importantes. La roue tripale présente moins de risques de vibrations, d'où fatigue et bruit plus faibles, mais elle est plus compliquée et plus lourde. Leur atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente contrairement aux éoliennes à marche lente. Les éoliennes à marche rapide fonctionnent rarement en dessous d'une vitesse de vent de 3.5 m/sec.

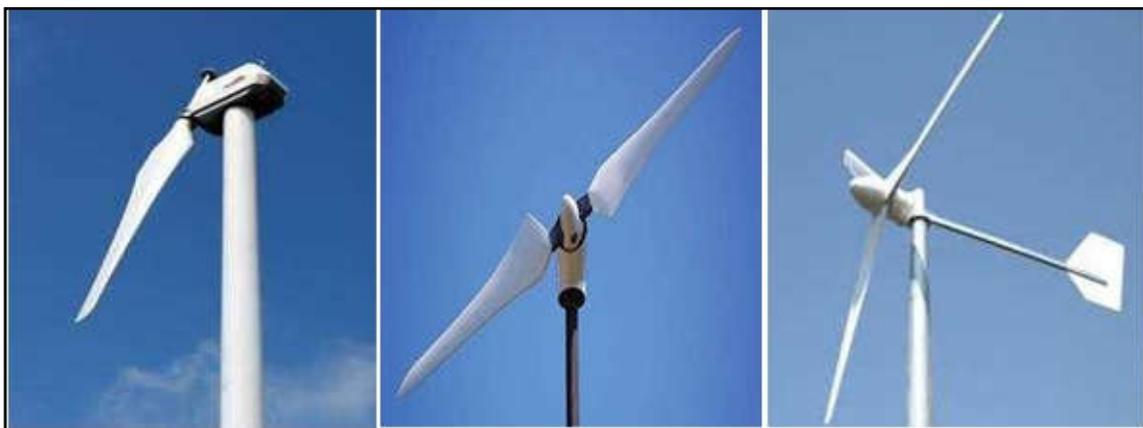


Figure I.7 : Aérogénérateur à axe horizontal à marche rapide [3].

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal à marche rapide:

I.4.2.2.a Amont

le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif d'orientation.

I.4.2.2.b Aval

le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable. La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction.

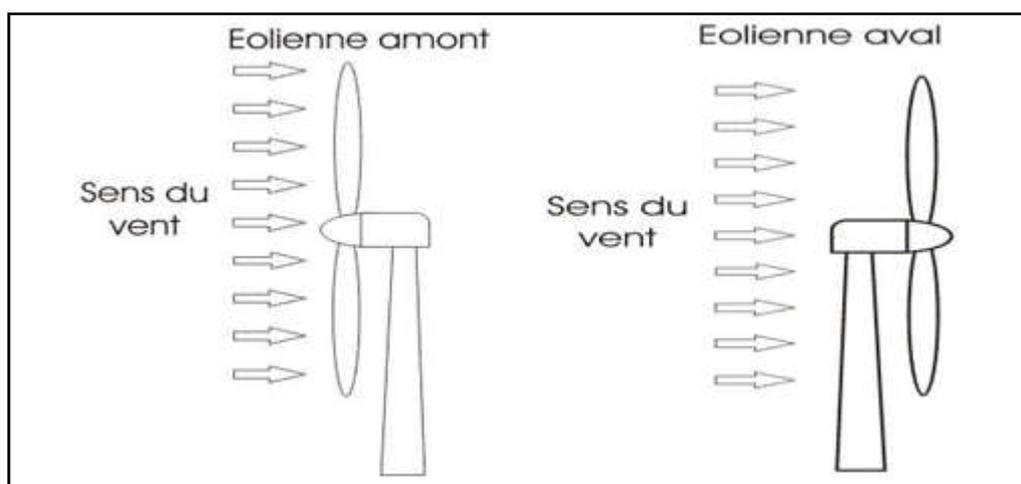


Figure I.8 : Schéma d'une éolienne à axe horizontal amont et en aval [5].

I.5 Comparaison des différents types de turbines

La valeur du coefficient de puissance C_p dépend aussi de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse réduite λ .

$$C_p = C_p(\lambda)$$

Ainsi, et sur le plan aérodynamique, nous pouvons comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients de puissance en fonction de la vitesse réduite λ comme donné dans la Figure I.9.

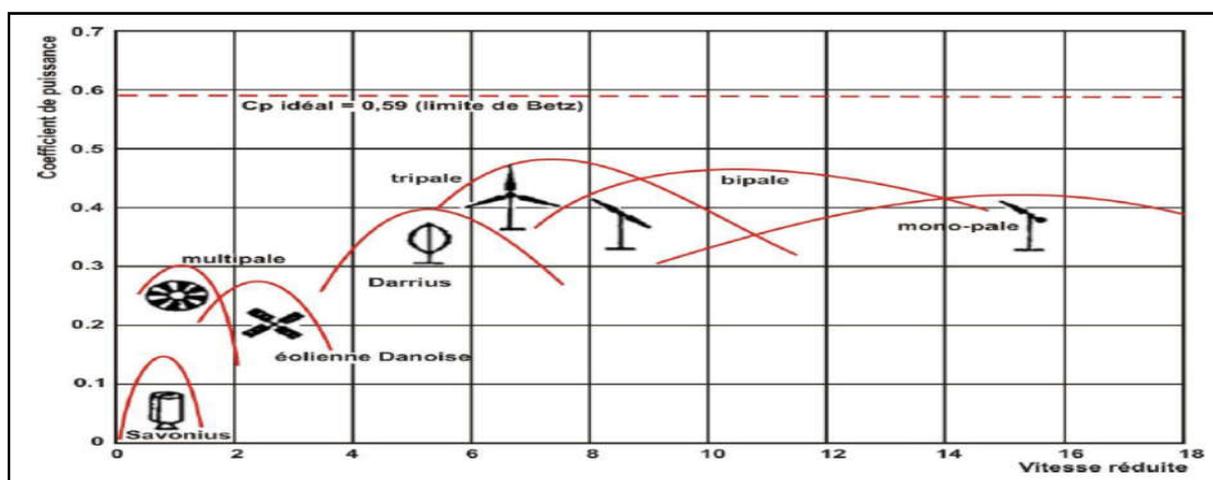


Figure I.9 : Coefficients de puissance en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types de turbines [9].

On remarque en tout premier lieu que les éoliennes à axe horizontal, dites à vitesse rapide, possèdent potentiellement un rendement plus important que les autres formules. Ceci explique leur domination dans le marché des machines actuelles, où la courbe du coefficient de puissance atteint son maximum pour une gamme de λ comprise entre 5 et 15.

Dans un premier temps, le coefficient de puissance augmente avec la vitesse réduite. Il atteint un maximum pour une certaine valeur de λ puis diminue même avec une augmentation de la vitesse réduite. Ces variations de $C_p(\lambda)$, restent bien en dessous de la limite de Betz.

Elles dépendent de plusieurs propriétés aérodynamiques, mais essentiellement de plusieurs éléments dans la conception du rotor, notamment, dans le nombre de pales utilisées. On remarque aussi que pour une éolienne tripale, le coefficient de puissance est maximal pour $\lambda = 7$, c'est-à-dire une vitesse périphérique en bout de pale égale à 7 fois la vitesse du vent. C'est pour une telle vitesse réduite que l'on maximise le rendement aérodynamique. Il est à noter aussi, qu'à diamètre et vitesse de vent donnés, une bipale devra avoir une vitesse de rotation bien plus élevée qu'une tripale. Par contre, en utilisant le coefficient de couple C_c , défini par la relation :

$$C_p = \lambda C_c$$

On comprend tout l'intérêt des petites machines. Ainsi, et pour des λ très faibles, elles possèdent intrinsèquement un couple très important. Dans ce cas, la présence d'un nombre important de pale contribue à la création du couple de démarrage et ce, avec très peu de vent. Par contre, dès que le vent se renforce, leurs caractéristiques de couple et de puissance s'effondrent rapidement [9].

I.6 Le principe de fonctionnement d'une éolienne

La fabrication d'électricité par une éolienne est réalisée par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, selon plusieurs étapes :

- transformation de l'énergie par les pales : les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion. La différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.
- accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur : les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse (de 1 000 à 2 000 tours par minute) pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur.

- production d'électricité par le générateur : l'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur. En tournant à grande vitesse, le générateur produit de l'électricité à une tension d'environ 690 volts
- traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur : l'électricité produite ne peut pas être utilisée directement. Elle est traitée grâce à un convertisseur, puis sa tension est élevée à 20 000 volts par un transformateur. L'électricité est alors acheminée à travers un câble enterré jusqu'à un poste de transformation pour être injectée sur le réseau électrique, [10].

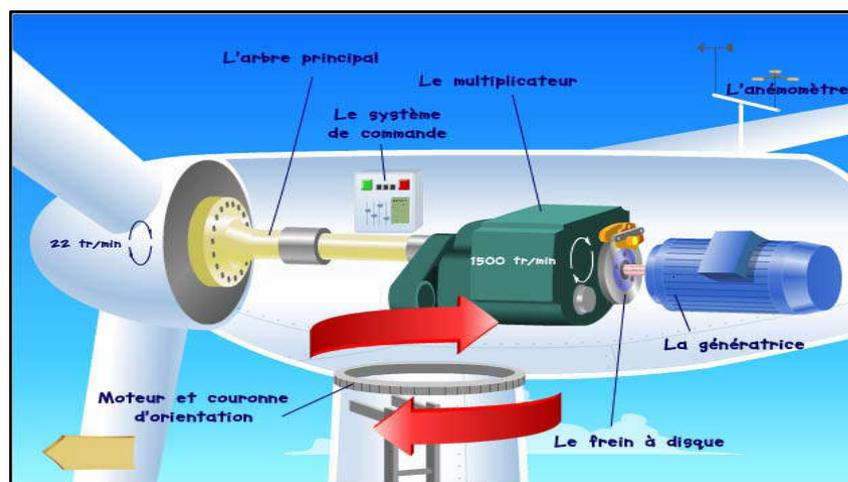


Figure I.10 : les composants protégés dans la nacelle [5].

I.7 Les éléments constituant une éolienne

I.7.1 Moyeu et cône

La fonction principale du cône du nez est de protéger le moyeu, les roulements de pale et les éléments internes du rotor des éléments atmosphériques externes.

Le Moyeu; Porte les pales et transmet le mouvement de la pale vers l'axe, abrite les composants du système hydraulique, et également utilisé comme support pour la structure métallique du nez du cône.

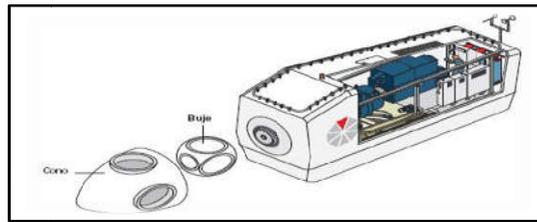


Figure I.11 : Moyeu et cône [10].

Cône

Le carénage du moyeu est constitué de quatre panneaux en fibre de verre et en résine de polyester, supportés par une structure métallique qui les maintient attachés au moyeu. L'un des ces panneaux dispose d'une fenêtre utilisée au cours des travaux d'assemblage, retrait pour le hissage du rotor.

Le panneau avant abrite l'armoire électrique (MOYEU). Cette structure maintient fixés les panneaux en fibre de verre au moyeu. Un joint entoure chaque pale, afin d'éviter l'eau ou la poussière de le pénétrer

Moyeu

Le moyeu se compose d'un élément en fonte, relié aux pales par les roulements de pales, le circuit hydraulique du système de pitch se trouve à l'intérieur du moyeu, l'ouverture frontale permet d'accéder à l'intérieur pour des tâches d'inspection et de maintenance sur le système de pitch et les roulements des pales.

I.7.2 Chassies

Sa principale fonction est de servir de base au train de puissance, Il transmet les charges de la nacelle vers la tour. Les panneaux de plancher reposent sur le châssis principal et offrent un accès pour la maintenance

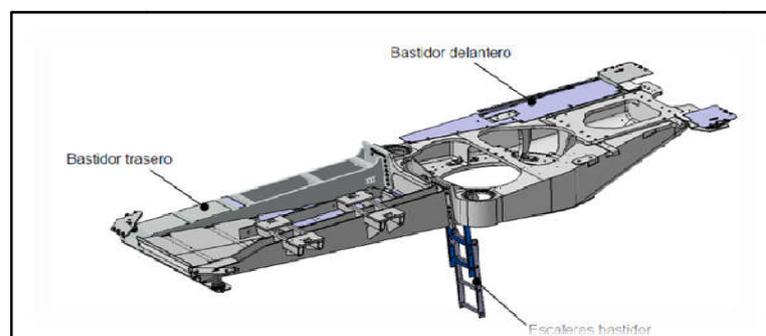


Figure I.12 Châssis d'un éolien [10].

I.7.3 Arbre principal

L'arbre principal transmet l'énergie mécanique générée par le vent sur le rotor au multiplicateur. Cet arbre est en acier forgé, la partie avant de l'arbre principal à une bride de fixation sur le moyeu du rotor la bague de blocage est fixée sur cette dernière, la connexion avec l'entrée faible vitesse sur le multiplicateur est réalisée au moyen d'un disque de serrage conique qui transmet le couple par friction (bride hydraulique).

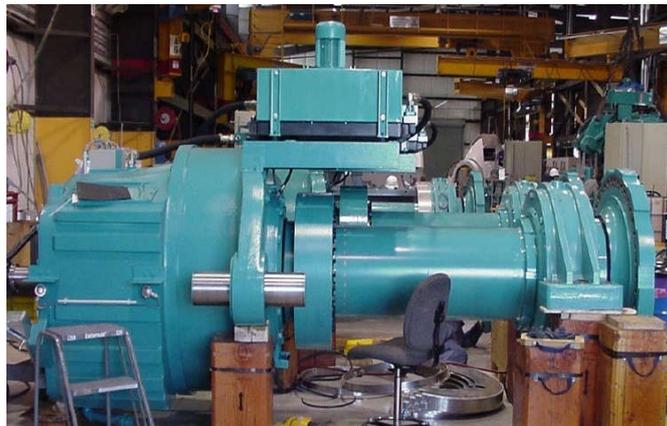


Figure I.13 : Photo d'un arbre lente ou principale au niveau d'usine [10].

Principaux éléments du système de l'arbre

- a) Arbre principal
- b) Attaches
- c) Roulements avant et arrière
- d) Bride hydraulique
- e) Bague de blocage
- f) Bacs collecteurs d'huile
- g) Système de blocage pour le rotor

g : Système de blocage pour le rotor type G5X :

Le rotor est bloqué par une pompe hydraulique manuelle qui pousse les deux boulons de blocage dans les orifices de la bague de blocage. La pompe à 3 positions:

Rotor bloqué (« + », avec le levier vertical par rapport à l'arbre principal, les boulons se déplacent en avant pour bloquer le rotor.

Rotor débloqué (« - »), avec levier parallèle par rapport à l'arbre principal, les boulons se déplacent en arrière pour débloquer le rotor.

Boulons bloqués (« blocage »), après avoir utilisé la pompe pour déplacer le boulons vers l'avant ou l'arrière, le levier doit être placé dans cette position.

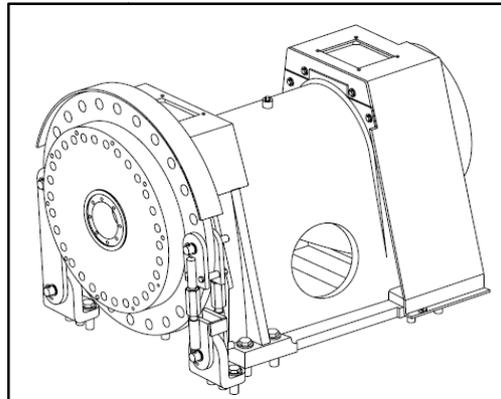


Figure I.14 : Système de blocage rotor de la machine G5X [10].

I.7.3.1 Accouplement de l'arbre rapide

Il transmet la rotation du multiplicateur au générateur, relié au multiplicateur par le disque de frein et au générateur par une bride, pour l'accouplement, un matériau flexible est utilisé, afin d'éviter le désalignement pendant le fonctionnement de l'aérogénérateur, l'accouplement dispose d'un limiteur de couple, ainsi lorsqu'une limite de couple fixée est dépassée, l'accouplement glisse.

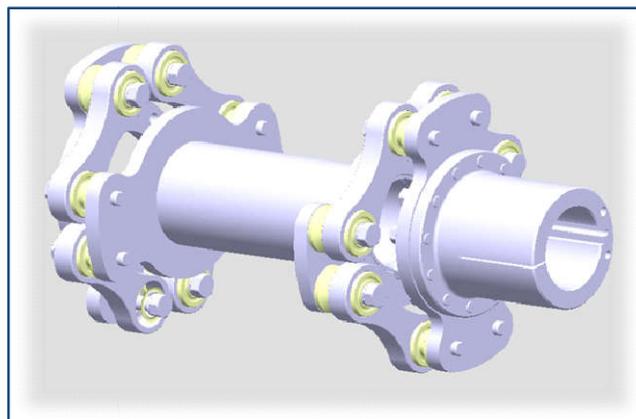


Figure I.15 : Accouplement de l'arbre rapide [10].

System de levage de charges

Ce système consiste en une grue de service, dont le rôle est de permettre le hissage et le transport interne des outils et des composants, structure interne conçue pour résister aux forces exercées par la grue et à renforcer l'enveloppe.

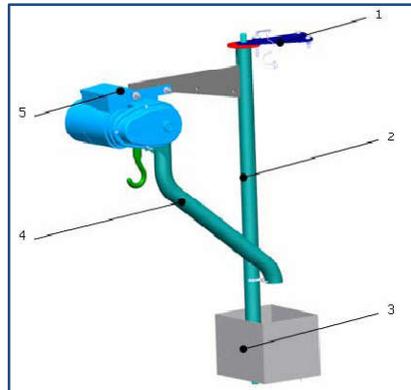


Figure I.16 : Système de levage des charges [10].

I.7.4 Tour

Le mat ou la tour a un rôle important ; déplacer les charges depuis la nacelle, Permet au personnel de service, d'accéder à la nacelle, acheminement du câblage électrique, et électronique entre les armoires électriques de la nacelle, connexion de mise à la terre.

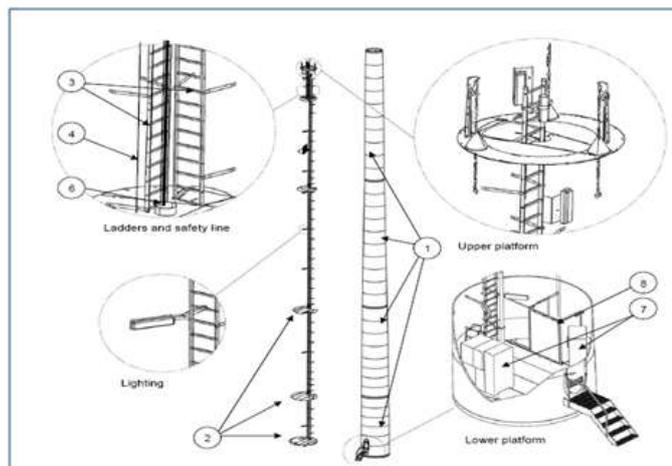


Figure I.17 : Mat d'une éolien [10].

I.7.4.1 Absorbeur d'oscillation

L'absorbeur d'oscillation sert à contrôler la fréquence naturelle de la tour en réduisant l'amplitude des vibrations, il est nécessaire pour diminuer la fatigue des dimensions de la structure.

I.7.4.2 Principaux éléments de la tour

Structure - parties de la tour

Plate-forme

Escaliers

Ligne de vie

Pendule d'amortissement

Câblage

Éclairage

Élévateur (en option)

Éléments de la plate-forme inférieure

I.7.5 Le multiplicateur

L'arbre lent, appelé aussi « arbre primaire » est une pièce en acier sur lequel est placé à une extrémité le moyeu (qui supporte les pales) et est connecté à son autre extrémité au multiplicateur. Même avec un vent très fort, la vitesse de rotation des pales est trop faible pour produire de l'électricité, c'est pourquoi on place entre la génératrice et le moyeu un multiplicateur.

Le multiplicateur est un convertisseur de puissance : il multiplie la vitesse d'entrée (rotor de l'éolienne) pour atteindre la vitesse de sortie exigée par la génératrice électrique, en multipliant parfois par 70 la vitesse de rotation initiale. Il est constitué d'un assemblage d'engrenages

De manière générale, on trouve le multiplicateur ou boîte de vitesse intercalée entre l'arbre et la génératrice. En effet, la majorité des génératrices imposent une vitesse de leur rotor significativement supérieure à la vitesse du rotor de l'éolienne. Par conséquent, il est nécessaire de placer une boîte de vitesse pour multiplier la vitesse de rotation et assurer le couplage entre ces deux entités.

I.7.5.1 Rôle et fonctionnement :

Le fonctionnement du multiplicateur consiste à modifier le rapport de rotation/couple provenant de l'arbre lent en ajustant ces valeurs exigence de fonctionnement du générateur

1. Bras de couple: transmettent et amortir le mouvement de rotation de la multiplicateur dans le cadre

2. Le système du refroidissement: maintient la température de l'huile dans les limites.
3. Système de filtration de particules
4. Système de lubrification
5. Corps principal du multiplicateur



Figure I.18 : Assemblage d'engrenages [10].

I.7.6 Les pales

Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion la différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

I.7.6.1 Limite de BETZ :

BETZ a démontré que la limite du rendement d'une éolienne était de $16/27$, soit environ 59%

Les pales sont raccordées au roulement via une série de boulons vissés sur des parties métalliques insérées dans le laminé de la pale, le roulement permet la modification de l'angle d'incidence par rapport au vent et ainsi de contrôler la vitesse et la production de l'aérogénérateur.



Figure I.19 : Partie d'une pale G5X [10].

Les pales fabriqués par fibre de verre et ou de carbone imprégnée de résine époxyde et moulée dans la forme. Ou les fibres imprégnées avec de l'époxy sont ensuite durcies.



Figure I.20 : Différent type des pales a la zone de stockage [10].

I.7.7 Génératrice

La génératrice est l'élément d'une éolienne qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Les pales transforment l'énergie cinétique en énergie mécanique, celle-ci étant transmise à la génératrice via le système de transmission. Une fois le courant produit, celui-ci est généralement injecté sur le réseau électrique.

I.7.7.1 Les différents types des génératrices

I.7.7.1.a Les machines synchrones

Dans le cas des machines synchrones, son rotor doit tourner à une vitesse constante dépendant de cette fréquence (à la vitesse dite de synchronisme). Si le stator est directement connecté au réseau électrique, la fréquence du stator, f , est la fréquence du réseau (50 Hz). Par conséquent, le rotor de la génératrice tourne à une vitesse fixe imposée par le réseau que l'on ne peut changer, [11].

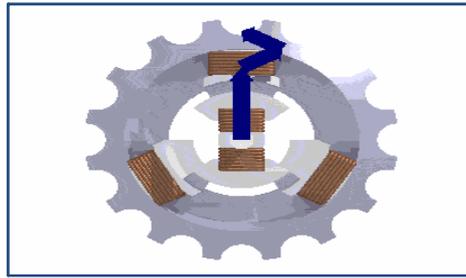


Figure I.21 : Fonctionnement synchrone de la machine [10].

- Générateur Synchrone à Rotor Bobiné
- Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP)

I.7.7.1.b Les machine asynchrones

Dans le cas des machines asynchrones, son rotor tourne à une vitesse différente de la vitesse de synchronisme. Cette différence de vitesse de rotation dépend à la fois des propriétés de la machine et du couple moteur exercé sur le rotor de la génératrice. En conclusion, même si la machine est directement connectée au réseau électrique, il reste une certaine latitude sur la vitesse de rotor, [11].

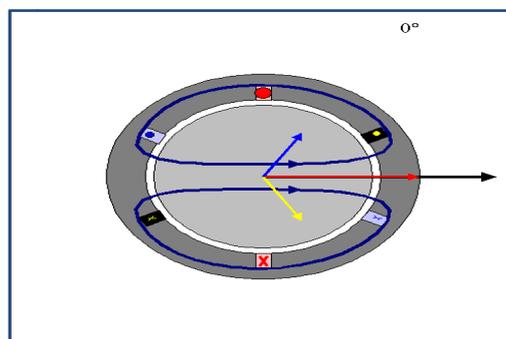


Figure I.22 : fonctionnement asynchrone de la machine [10].

- Machine asynchrone à cage d'écureuil
- Machine asynchrone à double stator
- Machine asynchrone à Double Alimentation type "rotor bobiné"
- Machine asynchrone à Double Alimentation Type "Brushless"

I.8 Classification d'éolienne

Face au problème de la source d'énergie aléatoire, deux approches sont possibles la Génération à Vitesse Constante (GVC), et la Génération à Vitesse Variable (GVV). Dans le premier cas (GVC) une machine génératrice classique est directement connectée au réseau, et

donc la plage de vitesse possible reste limitée aux alentours de la vitesse synchrone, qui est constante et imposée par le réseau.

Pour pouvoir profiter de toute la source d'énergie variable dans le cas de la GVC on doit utiliser un compensateur mécanique qui adapte le rapport de vitesse entre le système physique et l'axe du générateur en fonction de la disponibilité énergétique du moment. Cette compensation ou adaptation est faite « à la base », en éliminant une partie de l'énergie disponible au prix de la diminution du rendement global du système, [12].

On peut citer deux types de compensation

A-Compensation active : dans le cas des générateurs éoliens, par exemple, la relation de transformation [vitesse rotor, vitesse des pales] \rightarrow [couple axe des pales] dépend de l'angle de confrontation des pales avec le vent, en pouvant obtenir une relation optimale en contrôlant le dit angle.

B-Compensation passive : dans le cas de la génération éolienne, grâce à une conception aérodynamique spécifique des profils des pales on peut changer la partie effective de la pale qui travaille en fonction de la vitesse du vent. La zone utile transmet énergie dans un régime proche de l'optimal.

Mis à part le rendement énergétique, un système de GVC lié à une source d'énergie variable présente d'autres problèmes importants:

C-Dégradation de la qualité d'énergie électrique : la réponse temporelle du compensateur mécanique n'est pas assez rapide face aux variations brusques de la source de l'énergie (rafales de vent par exemple), ce qui éloigne momentanément le système de la vitesse du rotor optimale. Ces variations de vitesse non souhaitées induisent des perturbations dans la tension générée, en affectant la qualité de l'énergie électrique du nœud de connexion du parc générateur, [12].

D-Stress mécanique : à cause de la lenteur de la réponse du compensateur mécanique, le système générateur peut arriver à supporter des efforts mécaniques au-dessus de ses valeurs maximales, avec un risque de dommage du générateur plus grand.

Le développement de l'électronique de puissance (moins coûteuse et plus performante) a permis l'implantation de systèmes de GVV en proposant des solutions qui éliminent ou réduisent les problèmes de la GVC. Le surcoût électronique des systèmes de GVV n'est pas rédhibitoire par rapport à ses avantages au niveau du système mécanique, en termes de maintenance, et de durée de vie. Mieux encore, grâce à l'électronique de puissance, la qualité de l'énergie électrique générée est nettement supérieure et les normes de connexion sont aisément respectées, [12].

I.9 Applications des éoliennes

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation tout en tenant compte du rendement de la machine. Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- Soit directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau.
- Soit pour entraîner une génératrice électrique.

Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration:

- L'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure.
- L'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne. D'une part, la complémentarité avec les moyens traditionnels de production, comme les centrales thermiques classiques ou nucléaires et les barrages pour des régions disposant d'une infrastructure existante.

D'autre part, la possibilité de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel. Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne en ce qui concerne le désenclavement de régions peu urbanisées et ses applications dans les pays en voie de développement. Comme pour l'alimentation d'unités de dessalination, la cogénération avec des groupes diesels et des panneaux photovoltaïques, [7].

I.10 Avantages et inconvénients de l'éolien à axe horizontale

I.10.1 Avantages

L'énergie éolienne constitue un enjeu important pour le territoire.

- Contribution à l'aménagement du territoire et l'amélioration du cadre de vie
- Création d'emplois
- Soutien pour le monde agricole
- Investissement local et société d'économie Mixte
- Vitrine pour la commune

I.10.2 Inconvénients

- Éoliennes et acoustique
- Respect de la faune et de la flore

- Perturbations hertziennes et radars, [13].

I.11 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu des possibilités des différentes éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types des éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits.

Chapitre II

Gisement éoliens

II.1 Introduction

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, [14].

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 [15]. 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 ... »

II.2 Situation actuelle de L'énergie éolienne dans le monde

La situation de l'énergie éolienne dans les différentes régions du monde peut être récapitulée comme suit :

La situation de l'énergie éolienne dans les différentes régions du monde peut être récapitulée comme Ce sont la Chine et les États-Unis qui disposent des plus grands parcs éoliens dans le monde, avec respectivement 145,1 GW et 74,5 GW installés à fin 2015. Suit ensuite l'Allemagne, leader européen de l'éolien (et mondial jusqu'en 2009) avec 44,9 GW installés. Si on rapporte les capacités éoliennes à la superficie et la population des principaux pays développant cette filière, le Danemark figure en revanche à la première place.

L'Europe a longtemps dominé le marché mondial de l'énergie éolienne mais dispose désormais d'un parc éolien équivalent à celui de la Chine en matière de puissance installée.

En France, environ 1 GW éolien est raccordé chaque année au réseau électrique (10,3 GW de puissance installée à fin 2015).

Les entreprises du secteur éolien :

Les 5 principales entreprises fabricants d'éoliennes sont :

- Siemens (Allemagne) avec 10,8% de parts de marché mondial ;
- GE Wind (États-Unis) avec 10,2% ;
- Vestas (Danemark) avec 10,1% ;
- Goldwind (Chine) avec 9,2% ;

Enercon (Allemagne) avec 7,8%

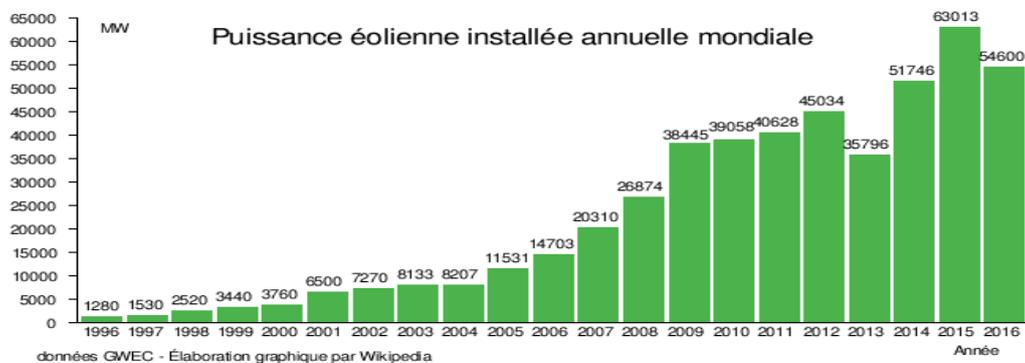


Figure II.1 : puissance d'éolienne installée annuelle mondiale [4].

II.3 Le vent

La fréquence des vents est très grande durant toute l'année, notamment le sirocco dont la vitesse peut atteindre les 100KM/H. Généralement, la saison du printemps (mars- avril), connaît une fréquence plus grande de vents de sable. La wilaya d'Adrar se compose de régions suivantes :

- GOURARA: région de Timimoune A = 65.203 Km² (NORD)
- TOUAT : région d'Adrar A = 205.650 Km² (Centre)
- TIDIKELT : région d'Aoulef A = 24.536 Km² (Sud-Est)
- TANEZROUFT : région de Bordj Badji- Mokhtar A =132.579 Km² (Sud-ouest)

II.4 Origine du vent

Le vent est défini comme étant de l'air en mouvement, dû aux variations de pression et de température de l'atmosphère en divers points de la surface du globe. Le rayonnement solaire est uniforme, mais près du pôle, il se répartit sur une plus grande surface qu'à l'équateur, la composition des couches d'air et le degré d'absorption et de réémission des sols et des mers sont différents, il en résulte des zones de basses pressions (ou dépression), où l'air plus chaud, est

moins dense, et des zones de hautes pressions (où anticyclones), où l'air est plus froid, donc plus dense. Pour revenir à une position d'équilibre, un déplacement d'air doit s'opérer des régions de hautes pressions vers les régions de basses pressions, plus ces différences de pressions sont importantes, plus le courant d'air compensateur (le vent) est fort. Du fait de la rotation de la Terre sur elle-même, la direction du vent est alors modifiée, elle devient parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire. Dans l'hémisphère Nord, le vent tourne dans le sens trigonométrique autour des aires cycloniques et dans le sens des aiguilles d'une montre autour des aires anti cycloniques. L'existence de cette force déviante a été mise en évidence par le mathématicien français Gaspard Gustave CORIOLIS (1792 –1843).

Dans l'hémisphère Sud, les sens sont inversés par rapport au Nord. Cependant, les différents phénomènes agissant sur le globe terrestre engendrent des zones à hautes pressions permanentes d'où l'air arrive (les zones polaires et péri-tropicales Nord et Sud) et de zones à basse pressions permanentes (zones équatoriale et zones arctique et antarctique) où règne un calme relatif vers lesquelles se dirigent les vents, [5].

La Terre est en tournée d'anneaux de sur pressions et de dépressions (sept en tout): Aux deux pôles règne un régime de vents dirigés de l'intérieur vers la côte. Au-delà des cercles polaires les vents dominants sont de l'Est. Dans les zones tempérées entre 30° et 60° de latitude soufflent les grandes brises d'Ouest (Sud Ouest dans l'hémisphère Nord et Nord-Ouest dans l'hémisphère Sud). Enfin la région tropicale de part et d'autre de l'équateur est divisée par la zone des calmes et des basses pressions équatoriales.

Ces mouvements circulaires autour des dépressions et des anticyclones ne sont réellement observés qu'en altitude. Au niveau du sol, les forces de frottement, le relief et les obstacles éventuels (immeubles, arbres, etc.) perturbent les trajectoires du vent, ils se forment en spirales qui ont tendance à faire dévier l'air de anticyclones vers l'extérieur et à le faire rentrer dans les dépressions, [5].

II.5 Vitesse du vent

La vitesse du vent peut s'exprimer en mètres par seconde, en kilomètres par heure, en miles¹ par heure, en noeuds² (miles marins par heure) ou en degrés Beaufort qui est une échelle établie en fonction des influences physiques que le vent peut en générer sur l'entourage. On remarque que la vitesse du vent peut avoir des valeurs importantes et des conséquences néfastes sur les

habitations et l'entourage. Les vitesses maximales les plus élevées se rencontrent dans les cyclones tropicaux (des vitesses de 150 à 200 km/h ne sont pas exceptionnelles), [5].

II.6 Les ressources éoliennes de l'Algérie

L'Algérie est l'un des pays qui se distingue par les importantes sources d'énergie fossile dont il dispose, permettant la production de l'électricité à des coûts très compétitifs. Dans de telle condition il semble que l'énergie éolienne ne pourrait pas présenter une option compétitives à court terme pour la production commerciale de l'électricité à grande échelle à moins de considérer les coûts environnementaux [20]. Par ailleurs, l'étude de la rentabilité des systèmes éoliens est étroitement liée à la source elle-même, à savoir, le vent. En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un droit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas Tellienne l'Atlas Saharien. En treilles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

Degrés Beaufort	Vitesse (km/h)	Nature du vent	Effet en mer	Effet à terre
0 – 1	0 à 5	Calme	Calme	La fumée s'élève verticalement
2	6 à 11	Légère brise	Vaguelette ne déferlant pas	Perception du souffle du vent sur le visage
3	12 à 19	Petite brise	Les moutons apparaissent	Feuilles agitées
4	20 à 28	Jolie brise	Petites vagues, nombreux moutons	Poussières et papiers soulevés
5	29 à 38	Bonne brise	Vagues modérées, moutons, embruns	Arbustes se balances
6	39 à 49	Vent frais	Grandes vagues, crêtes d'écumes, embruns	Fils électriques qui bougent, usage des parapluies difficile
7 – 8	50 à 74	Grand frais	Lames déferlantes, traînées d'écume	Arbres agités, peine à marcher contre le vent, branches brisées
9	75 à 88	Fort coup de vent	Lame déferlantes, grosse à énorme, les embruns réduisent la visibilité	Légers dégâts aux constructions
10	89 à 102	Tempête	Très hautes vagues déferlantes surface de l'eau toute blanche visibilité très faible	Les arbres sont déracinés, graves dégâts aux constructions
11	103 à 117	Violente tempête		Ravages étendus
12	118 à 133	Ouragan		
13 - 17	134 et plus	Cyclone		

Tableau II.1 : Effets du vent en fonction de sa vitesse (Echelle de beau fort) [5].

II.7 Comment tirer profit de l'énergie éolienne

II.7.1 Choix du site

Par suite de l'irrégularité des vents, la rentabilité d'une machine éolienne dépendra beaucoup du site sur lequel elle est installée et sera liée aussi à son utilisation.

Les sites les plus intéressants sont situés au bord de la mer ou aux sommets de collines et de montagnes bien dégagées. Toutefois dans ces premiers lieux se posent des problèmes de corrosion et dans les seconds des risques de givrage.

L'énergie éolienne est très utilisée pour alimenter en énergie électrique des sites très isolés dont les besoins énergétiques sont réduits, ou pour pomper de l'eau à peu de frais et de façon plus silencieuse qu'avec un moteur thermique. Elle peut être une solution dans les pays où les lignes d'interconnexion ne parviendront pas du fait de la faible densité de population.

Dans le cas où toute autre source d'énergie peut être en visage, l'hydroélectricité par torrent ou rivière dans le domaine privé, ligne de distribution EDF... une petite étude économique est nécessaire.

La prospection des sites possibles constitue donc le premier travail à effectuer pour juger de la possibilité d'utiliser le vent. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année. Non seulement, il faut connaître la vitesse moyenne mais aussi la quantité d'énergie annuelle. Pour cela, des anémomètres spéciaux totalisateurs de l'énergie par mètre carré ont été mis au point.

Les vents les plus intéressants, qui donnent le maximum d'énergie annuelle, sont les vents réguliers, comme les alizés, ayant une vitesse moyenne de 6 à 8 m/s, voire jusqu'à 10 m/s.

Outre ceux ayant une quantité d'énergie annuelle insuffisante, il faut éliminer les sites soumis à des variations très brutales de la vitesse du vent (type mistral par exemple).

Le relief local joue un rôle très important. Aussi, y a-t-il lieu d'en tenir compte dans l'interprétation des mesures effectuées souvent à la hauteur standard de 10 m au-dessus du sol (hauteur adoptée par la Météorologie nationale).

Les constructeurs, en vue de la conquête des mers, planchent sur des machines de plusieurs mégawatts. En effet, installer des fermes de grande puissance à quelques kilomètres des côtes, où

les ressources en vent sont bien plus élevées qu'à terre, permettrait de réduire encore le coût de l'électricité. De plus, l'impact visuel sera atténué.

Une haie joue le rôle de brise-vent; il en est de même des rideaux d'arbres ;ces obstacles s'avèrent défavorables à l'implantation des éoliennes de faible hauteur.

Des phénomènes cycliques apparaissent avec des périodes qui peuvent être de l'ordre de la dizaine de minutes, de quelques heures, des plusieurs jours sou de la durée des saisons. La connaissance de la fréquence de ces manifestations s'avère utile pour la sécurité des machines. Certaines régions ont la réputation de voir naître ou de voir passer un ou plusieurs cyclones par an, ou encore des tempêtes ou des tornades. De ce fait, les pays à riche implantation de stations météorologiques édictent des règles destinées à mieux cerner les hypothèses de calcul pour donner aux constructions un degré de sécurité accrue.

Des données météorologiques, [21]. 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.

II.7.2 Recherche d'une vue dégagée

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

Si de plus, vous réussissez à trouver une colline à pentes douces, il est même possible d'obtenir un effet accélérateur.

II.7.3 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 soit 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 690 V. Un transformateur situé soit à côté de l'éolienne, soit à l'intérieur de sa tour, convertit l'électricité en haute tension.

II.7.4 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.

II.7.5 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.

II.7.6 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.

II.8 Caractéristiques physiques des éoliennes

II.8.1 La limite de Betz

L'énergie récupérable est celle qu'il est possible de prélever de l'énergie cinétique du vent. Betz a montré que, pour une machine à axe horizontal, cette quantité avait une limite.

Après démonstration, en prenant pour la masse volumique de l'air une valeur moyenne de $1,25 \text{ Kg/m}^3$, la puissance maximum pratiquement récupérable par un dispositif de surface S est égale à :

C'est la limite de Betz avec V la vitesse instantanée du vent. Toutes les grandeurs sont exprimées en unité SI.

Cette puissance récupérable est celle que recueillerait une machine idéale. Bien qu'établie pour une éolienne à axe horizontal, il est admis que cette valeur limite s'applique à la plupart des machines. Le rendement maximal théorique d'une éolienne est de 59 %. Grâce à l'amélioration du profil et du revêtement des pales, les machines actuelles peuvent approcher les 50 %. Mais l'utilisation de systèmes de carénage permet d'élargir la surface balayée et donc de dépasser les fameux 59%

II.9 Gisement éolien en Algérie

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et climat très diversifié. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200km et un relief montagneux, représenté par deux chaînes de l'atlas tellien et l'atlas saharien, entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien. Le sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au sud. Toutefois, la vitesse du vent subit des variations 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. En utilisant la même gamme de couleurs, les atlas vents saisonniers de l'Algérie sont représentés en figures II-2 (Eté et Printemps, Hiver et Automne). On

Remarque qu'en général, les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le Reste de l'année. [22]

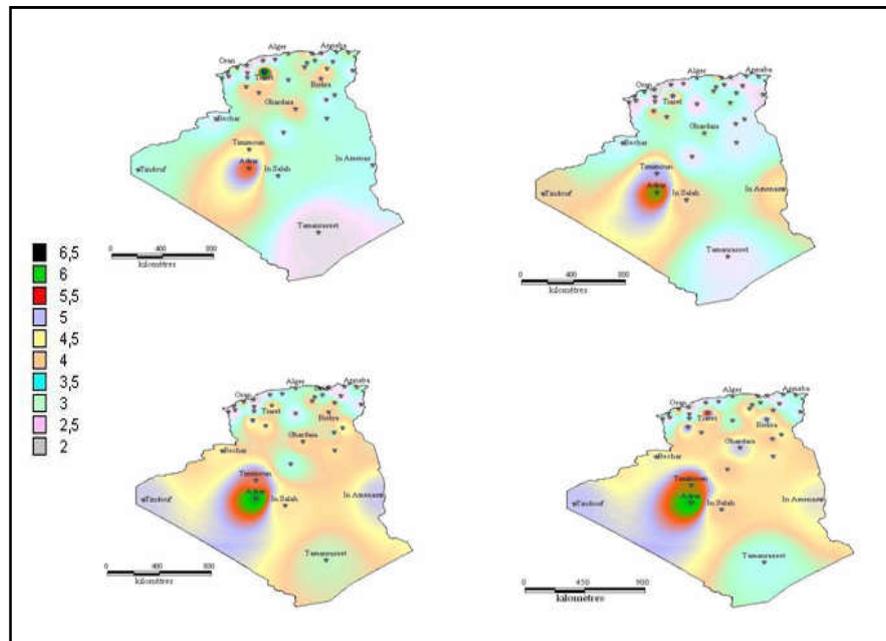


Figure II.2: Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol.
(Hiver et automne, Été et Printemps) [5].

II.10 La rose des vents

Une rose des vents est un peu comme un compas de navigation qui divise l'horizon en secteurs angulaires. Pour chaque secteur, sont présentés [23]

- La fréquence du vent, c'est à dire le pourcentage du temps durant lequel le vent souffle dans ce dernier
- La vitesse moyenne du vent multiplié par sa fréquence.
- La puissance disponible dans le vent. La rose des vents joue un rôle très important dans la localisation de sites appropriés à l'installation d'éoliennes. Si une grande partie de l'énergie contenue dans le vent provient d'une direction particulière, il faut chercher à avoir aussi peu d'obstacles et un terrain aussi peu perturbé que possible dans cette direction. Les secteurs prédominants sont

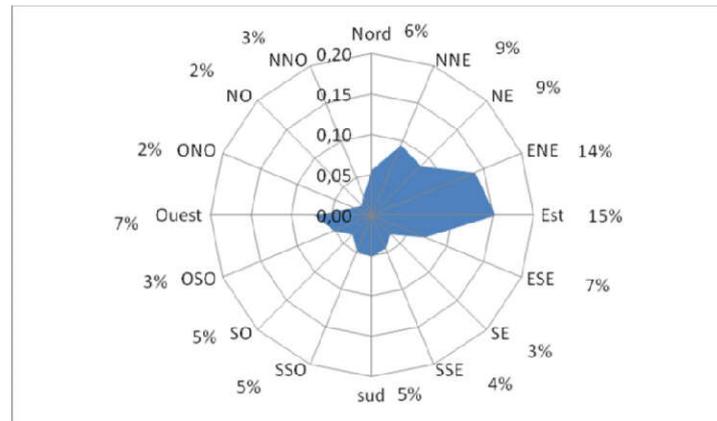


Figure II.3: rose de vent pour le site d'Adrar [23].

- Les secteurs Nord Nord Est (NNE) et Nord Est avec un pourcentage de 9% pour chaque direction.
- Le secteur Ouest et Est Sud Est (ESE) compte 7% pour chaque secteur et 6% pour le secteur Nord.
- Le secteur Sud, Sud Ouest et Sud Sud Ouest (SSO) avec 5% des observations.

Le secteur dominant est :

- Le secteur Est qui représente et secteur Est Nord Est (ENE) compte respectivement 15% et 14%.
- Les faibles secteurs sont : - le Sud Sud Est (SSE) reposant 4% de vent et Sud Est, Ouest Sud Ouest (OSO) et Nord Nord Ouest (NNO) avec un pourcentage de 3% pour chaque direction.
- Enfin on a 2% pour les directions Nord Ouest et Ouest Nord Ouest (ONO).

II.11 Objectifs de base de mesures de vent

- Identifier et vérifier l'existence de l'énergie éolienne suffisante dans une région fixée pour soutenir enquêtes plus approfondies du site spécifique.
- Préciser la situation de l'énergie éolienne de la région.
- Obtenir les informations représentatives des conditions de l'énergie éolienne pour choisir les éoliennes convient à la région.

II.12 Etapes de la mesure des ressources éoliennes

1. Choisir sites potentiels de station éolienne, décider préliminairement le rayon de station éolienne.
2. Choisir un bon représentant de l'emplacement de tours de vent

3. Déterminer les éléments clés de mesure de vent
 - a) Hauteur de mesures ;
 - b) Forme de tours (cylindrique ou treillis) :
 - c) Les éléments de vent (vitesse moyenne du vent, l'écart, la vitesse maximum et la vitesse minimum du vent)
 - d) D'autres facteurs environnementaux (température, pression atmosphérique ou pression de vapeur).

- Exemple des instruments des mesures de vent

1. anémomètre à hélice



Figure II.4 : anémomètre à hélice [4].

2. anémomètre à coupes



Figure II.5: anémomètre à coupes [4].

II.13 Conclusion

Dans ce chapitre on a parlé sur les gisements éoliennes, paramètre d'identification : Pour un site jugé exploitable avec une éolienne, il est nécessaire de procéder à des études plus détaillées, telles que la détermination des évolutions journalières, mensuelles et saisonnières.

Chapitre III

Intégration des éoliens dans le réseau électrique

III.1 Introduction

Le réseau électrique est un système très complexe. Il comprend des milliers de composants (générateurs, transformateurs, lignes, contrôleurs, systèmes de protection, entre autres). La construction, la maintenance et l'exploitation du réseau représentent des milliards d'euros. La construction de nouveaux ouvrages prend souvent beaucoup de temps et nécessite la mise en place de stratégies spécifiques et des choix technologiques adaptés ; la durée de vie des éléments est d'environ quarante ans, voire plus. De plus, les divers composants insérés au sein de ce système sont interdépendants dès lors que l'état d'un élément influence les autres. Les conditions d'exploitation du réseau dépendent aussi de la demande, des prix du marché et des modifications de la législation relative au secteur électrique. En outre, les conditions météorologiques (température, vitesse du vent, ensoleillement, etc.) influencent les courbes de consommation et de production. La conduite et l'exploitation, voire la planification du réseau, requièrent une bonne connaissance (ou estimation) de ces conditions qui ne peuvent malheureusement pas être prédites avec grande précision. La planification du réseau électrique consiste à prévoir les différentes extensions du réseau. Ainsi, le dimensionnement des ouvrages, tels que les lignes, transformateurs et postes, est réalisé en considérant les politiques énergétiques, la dérégulation du marché, le grand choix des technologiques de composants, les contraintes électriques du réseau, les grands choix technologiques des gestionnaires (les niveaux de tension, la mise à la terre, les schémas de reprise, la prise en compte des pertes, entre autres) et le niveau d'automatisation des composants. La planification du réseau électrique essaie de prendre en compte un certain nombre d'objectifs qui doivent être optimisés simultanément et qui sont souvent contradictoires. Ces objectifs comprennent la minimisation des coûts d'exploitation (i.e. les pertes, entre autres), des coûts d'investissement (i.e. dimensionnement d'ouvrages), l'amélioration de la fiabilité, la sécurité des personnes et des biens, la qualité continuité de fourniture et la considération de multiples facteurs environnementaux. Le planificateur doit donc faire face à un problème d'optimisation multi-objectif. Les coûts élevés d'investissements pour se prémunir d'interruptions de l'approvisionnement ont encouragé le développement de méthodes robustes et flexibles pour la planification des réseaux électriques. La forte interdépendance des éléments impose de considérer le réseau dans son ensemble. La séparation des réseaux de transport et de distribution permet de traiter le problème de planification indépendamment. Les décisions de chaque sous-problème doivent être cohérentes. Des erreurs dans les études de planification peuvent conduire à des décisions erronées et à des pertes financières considérables. Les contraintes dimensionnant es principales du réseau de distribution sont réglementaires, après les pertes du réseau, car la

longueur totale déployée des réseaux de distribution est très largement supérieure à celle du réseau de transport.

Le changement du paradigme énergétique, avec l'ouverture des marchés de l'énergie, l'arrivée massive de la production décentralisée et les contraintes environnementales de plus en plus fortes, pousse à l'évolution des critères et des outils de planification couramment utilisés dans les réseaux électriques. Ce changement, couplé aux nouvelles technologies d'information et de communication et autres nouveaux matériels de réseau, a en effet induit une augmentation des incertitudes dans ce système qu'il convient de bien modéliser. Par exemple, le raccordement de la production décentralisée dans le réseau de distribution bouleverse les flux de puissances, change les conditions d'exploitation et augmente l'incertitude de la puissance produite dans le cas de l'intégration des énergies renouvelables. En conséquence, il est nécessaire de tenir compte des incertitudes et des facteurs aléatoires dans les calculs d'évaluation du réseau actuel et à long terme. Ainsi, il est nécessaire de développer des outils nouveaux pour la planification du réseau avec des méthodes mathématiques qui tiennent compte des incertitudes des variables électriques et leurs conséquences sur le réseau, [24].

III.2 Généralités

Un réseau électrique est tout d'abord défini par le type de courant électrique qu'il utilise. Une fois fixé, ce choix engage l'avenir et est lourd de conséquences car les modifications sont a posteriori très délicates. Ensuite, lors de l'exploitation des réseaux, certaines grandeurs électriques doivent être surveillées régulièrement pour s'assurer que les conditions d'exploitation sont bien respectées, [25].

III.3 L'évolution du réseau électrique

Le réseau électrique a évolué de façon désorganisée à partir de petits réseaux formés dans la première moitié du XXème siècle jusqu'aux grands réseaux continentaux d'aujourd'hui. Afin de réaliser des économies d'échelle, il a évolué vers une structure « verticalement intégrée », c'est-à-dire que la puissance est produite par de grandes centrales électriques potentiellement très éloignées des centres de consommation. Le réseau a ainsi été conçu pour fonctionner avec des réserves suffisantes afin de fournir l'énergie électrique à la demande d'une manière économique et fiable. La production d'énergie est principalement basée sur des sources primaires contrôlables telles que : les centrales thermiques utilisant les combustibles fossiles, les centrales thermonucléaires, les centrales hydro-électriques, etc. Les machines utilisées dans ces centrales sont de grande taille et développées à grande échelle. Ces sources permettent de contrôler la

production d'énergie en fonction des critères de sécurité et d'économie. Le réseau est exploité de sorte que des événements sévères ne provoquent pas la perte totale du système ou la propagation des défaillances sur les réseaux voisins. Il doit aussi permettre la reprise rapide de la portion du réseau électrique affectée par des événements majeurs, [24].

Dans les structures traditionnelles, l'énergie électrique est transportée des centrales électriques vers les consommateurs à travers une structure du réseau hiérarchique, de la très haute tension HTB ($U_n > 50 \text{ kV}$), à la moyenne tension HTA ($1 \text{ kV} < U_n < 50 \text{ kV}$) puis à la basse tension BT ($U_n < 1 \text{ kV}$). Les réseaux de transport HTB sont maillés pour assurer la fiabilité et la disponibilité de l'énergie, en cas de défauts sur des ouvrages. Par contre, les réseaux de distribution HTA et BT sont majoritairement passifs avec une configuration exploitée en structure radiale (un seul chemin vers le réseau amont) qui permet l'utilisation de plans de protection simples et robustes. La topologie du système fait que le flux d'énergie électrique est unidirectionnelle, de la production vers la consommation. Le réseau doit fonctionner sous la contrainte que la puissance électrique produite doit être, à chaque instant, égale à la puissance consommée. Par conséquent, le fonctionnement du réseau repose sur un contrôle temps réel de la production d'énergie et son adaptation aux fluctuations de la charge, selon les restrictions imposées par le gestionnaire du réseau de transport d'électricité. Une telle structure « verticalement intégrée » du système d'alimentation apporte des avantages, tels que la réduction du coût d'exploitation, la mutualisation des marges de réserve des générateurs, une meilleure efficacité énergétique de grands générateurs, une réduction du risque de défaillances. Les nouvelles politiques énergétiques et environnementales, qui ont prévalu au cours des dernières années, ont encouragé l'interconnexion de nouvelles sources de production d'énergie électrique non conventionnelles et distribuées dans le réseau ainsi que une séparation administrative stricte sur les activités d'exploitation, de fourniture et de commercialisation. Cette redistribution des rôles doit permettre de créer des conditions d'accès non discriminatoires et d'augmenter le nombre d'acteurs ainsi que la liquidité (et donc la concurrence) sur les marchés de l'énergie.

L'insertion de la production décentralisée conduit à une transition vers une nouvelle structure plus « éclatée ». Dans cette structure, les petites et moyennes unités de production sont souvent reliées au réseau de distribution. La connexion de ces unités sur les réseaux HTA et BT, conduit à un fort bouleversement de l'ancienne structure « verticale » du système électrique. Le flux de puissance n'est plus distribué « verticalement » de la haute tension à la basse tension, mais aussi « horizontalement », avec même la capacité d'inverser ces flux de

puissance entre les réseaux HTA et BT, ou même avec les niveaux de tensions supérieurs. Les systèmes de distribution deviennent ainsi des réseaux actifs, [24].

III.4 Comportement du réseau électrique

A partir de ses sources de production, l'électricité transite sur le réseau de transport à haute et très haute tension. Et elle passe aussi par des postes électriques de transformation. A quoi servent donc ces postes ?

L'électricité, acheminée sur le réseau de transport, transite par ces postes électriques. Ceux-ci assurent notamment trois fonctions stratégiques :

Transformer, aiguiller l'électricité et protéger les installations, [26].

III.4.1 La transformation:

Un poste de transformation abrite un ou plusieurs transformateurs, qui modifient la tension de l'électricité transportée sur le réseau.

En effet, transporter l'électricité sur un réseau à très haute tension (400 000 volts) engendre beaucoup moins de pertes. C'est un peu comme sur le réseau routier : pour un trajet donné, un véhicule qui emprunte l'autoroute consomme moins de carburant qu'un autre, utilisant le réseau des routes communales.

Puis, la tension est successivement abaissée d'un niveau de tension à un autre (220 000, 90 000, 60 000 volts), jusqu'à la tension d'utilisation du réseau de distribution.

III.4.2 L'aiguillage :

A l'instar d'un carrefour routier, un poste de transformation électrique permet de répartir l'électricité sur les chemins menant aux différents points du réseau. Véritable point de convergences des lignes, il permet d'orienter l'électricité selon les besoins des consommateurs et les capacités de transit des lignes électriques.

III.4.3 La protection des installations :

Imaginez : un aléa environnemental (éclair, arbre, engin agricole... etc.) place une ligne en court-circuit. Le tronçon qui dysfonctionne doit alors être séparé du réseau sain. Et ce, suffisamment rapidement pour ne pas impacter les utilisateurs raccordés.

Et bien, pour cela, les postes électriques hébergent un système de surveillance, qui optimise la conduite du réseau.

Le réseau de transport transporte de l'électricité mais aussi des informations. Via son réseau de fibre optique notamment, des données sur l'état du réseau peuvent être transmises. Celles-ci sont envoyées aux équipes de surveillance a fin d'évaluer la conduite du réseau, et celles-ci opèrent si nécessaire certaines modifications dans l'aiguillage de l'électricité.

L'objectif est d'assurer à chaque instant la sécurité électrique du réseau, les postes électriques de transformation y contribuent grâce à leurs trois fonctions : transformation, aiguillage et protection.

III.5 Poste électrique

Un poste électrique est la « partie d'un réseau électrique, comprenant principalement les extrémités des lignes de transport ou de distribution, de l'appareillage électrique, des bâtiments, et, éventuellement, des transformateurs »

Un poste électrique est donc un élément du réseau électrique servant à la fois à la transmission et à la distribution d'électricité. Il permet d'élever la tension électrique pour sa transmission, puis de la redescendre en vue de sa consommation par les utilisateurs (particuliers ou industriels). Les postes électriques se trouvent donc aux extrémités des lignes de transmission ou de distribution, [26].



Figure III.1 : usage des postes électriques hautes tension [26].

Les postes électriques ont 3 fonctions principales :

- le raccordement d'un tiers au réseau d'électricité (aussi bien consommateur que producteur type centrale électrique).

- l'interconnexion entre les différentes lignes électriques (assurer la répartition de l'électricité entre les différentes lignes issues du poste).
- la transformation de l'énergie en différents niveaux de tension.

Pour la transmission de l'énergie électrique, il est économiquement intéressant d'augmenter la tension, car cela limite les déperditions d'énergie par effet Joule. En effet, à puissance délivrée constante, plus la tension est élevée et plus l'intensité passant dans les câbles est faible, donc moins d'échauffement, ce qui permet entre autres de réduire la section des câbles, d'où une économie considérable. Les niveaux utilisés pour les transmissions à grande distance sont généralement entre 220 kV et 400 kV, qualifiés de très haute tension). La tension est ensuite réduite pour une consommation à un niveau de tension usuel, en Algérie 220 V, en Amérique 110 V.

Prenons l'exemple typique d'une centrale électrique. L'électricité va être produite par la centrale, puis va transiter par :

- le poste d'évacuation de la centrale, la tension va être injectée sur le réseau de transport d'électricité,
- plusieurs postes d'interconnexion 400 kV (trajet de plusieurs centaines de km)
- un poste de transformation 400 / 220 kV.
- un poste de transformation 220 / 60 KV.
- plusieurs postes d'interconnexion 60 kV.
- le poste final d'une grosse usine raccordée en 220 kV ou 60 kV.

Dans le cas d'un particulier, l'électricité devra transiter par un poste source, qui est un poste de transformation 60 / 30 kV, pour être alors injectée sur le réseau de distribution, [26]. Certains postes sources sont équipés de transformateurs 220 / 30 KV ou 10 et même 400/30 kV.

Ensuite la tension est une nouvelle fois modifiée par un transformateur 30 KV ou 220 / 380 V avant d'arriver chez un particulier.

III.5.1 Fonctions Aiguiller l'électricité :

Le poste de transformation électrique permet d'orienter l'électricité selon les besoins des consommateurs et les capacités de transit des lignes électriques.

Élévation ou diminution de la tension : La tension de l'électricité apportée par le réseau est modifiée par un ou plusieurs transformateurs qui sont abrités dans un poste de transformation. La tension à la sortie de la source de production est de 400 kV puis, à partir du poste électrique elle

est successivement abaissée d'un niveau de tension à un autre, jusqu'à la tension d'utilisation du réseau de distribution.

Il existe deux technologies principales pour les postes électriques haute tension :

-La technologie isolée dans l'air, dite aussi conventionnelle. Dans ce cas, les conductrices électriques hautes tensions sont séparées par une distance d'air qui en assure l'isolation. Ces postes peuvent être réalisés en extérieur, ou bien en bâtiment. Cette variante permet de réduire les dimensions du poste, les équipements haute-tension, notamment les isolateurs, étant à l'abri des intempéries et de la pollution.

-La technologie à isolation gazeuse, dite aussi blindée. Dans ce cas, les conducteurs électriques sont encapsulés dans une enveloppe métallique remplie d'un gaz, l'hexafluorure de soufre (SF6), dont les propriétés diélectriques très supérieures à celles de l'air permettent de réduire les distances d'isolation.

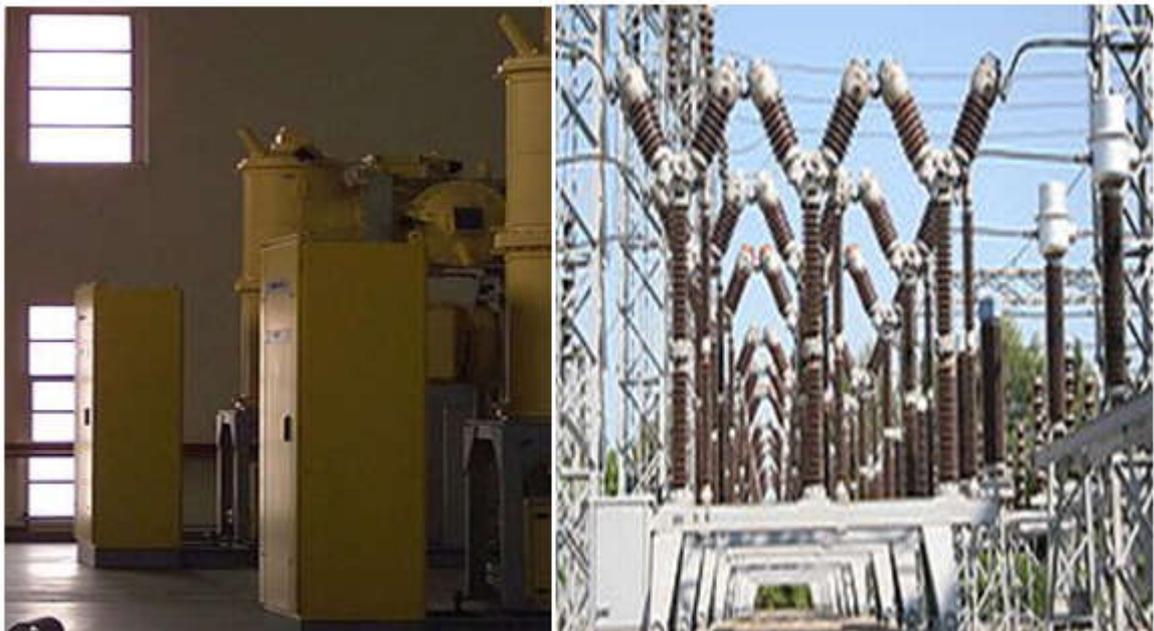


Figure III.2 : Poste électrique haute tension isolé au SF6 et Poste électrique haute tension isolé à l'air [25].

La technologie dite blindée possède des avantages techniques par rapport à la technologie dite conventionnelle : compacité, fiabilité, maintenance réduite. Cependant son coût de fabrication représente un investissement supérieur à celui de la technologie conventionnelle.

Une analyse du coût du cycle de vie, en intégrant les aspects de coût du terrain, investissement, fiabilité, maintenance (détection de fuite) et finalement recyclage du gaz SF6 et démantèlement peut montrer qu'elle est finalement au global moins chère.

Mais les conclusions de ce genre d'analyse sont fortement dépendantes du coût du terrain à l'endroit où le poste est implanté.

III.5.2 Différents types de postes électriques

Il existe plusieurs types de postes électriques :

- Postes de sortie de centrale : le but de ces postes est de raccorder une centrale de production de l'énergie au réseau ;
- Postes d'interconnexion : le but est d'interconnecter plusieurs lignes électriques ;
- Postes éleveurs : le but est de monter le niveau de tension, à l'aide d'un transformateur ;
- Postes de distribution : le but est d'abaisser le niveau de tension pour distribuer l'énergie électrique aux clients résidentiels ou industriels.

L'aspect des postes électriques varie fortement suivant leurs fonctions. Les postes peuvent être en surface à l'intérieur d'une enceinte, souterrains, dans des bâtiments qu'ils desservent, [26].

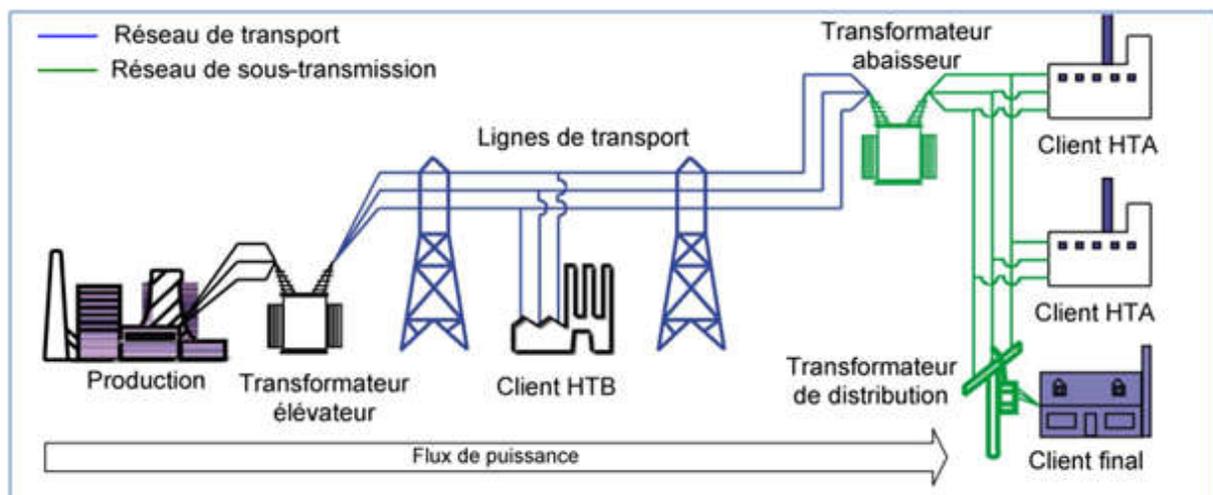


Figure III.3 : architecture verticale du réseau [24].

III.6 Le besoin de l'intégration de l'énergie éolienne dans le Réseau électrique :

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

L'intégration dans les réseaux électriques des sources à énergie renouvelables, et plus particulièrement celles soumises aux aléas du climat telles que les énergies éolienne et

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

En théorie, l'énergie d'origine éolienne pourrait satisfaire la demande mondiale d'électricité. Les partisans de l'énergie éolienne ne prétendent pas de se contenter de cette énergie toute seule mais bien au contraire une intégration avec le réseau conventionnel sous divers niveaux de tensions est souhaitable voire même impérative, [27].

III.7 Problèmes induites par l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux

L'insertion des générateurs éoliens dans les réseaux pose plusieurs problèmes. Dans cette section, les divers effets de leur intégration dans les réseaux seront introduits.

- a) effets sur les flux de puissance
- b) effets sur la tension
- c) effets sur le plan de protection
- d) effets sur les puissances de court-circuit
- e) capacité d'accueil du réseau public de transport
- f) Prévision de la production
- g) déconnexions intempestives
- h) effets sur la fréquence du réseau

III.8 Contraintes de raccordement des installations de production aux réseaux électriques

Les modalités de raccordement au réseau électrique des installations de production, et notamment les contraintes techniques, sont définies par des textes réglementaires tels que décrets et arrêtés. Les contraintes techniques dépendent principalement de la puissance à raccorder qui définit le réseau de connexion, [28].

III.8.1 Contraintes de raccordement sur le réseau public de distribution HTA

Pour raccorder une installation de production sur le réseau électrique de distribution français, relié à un grand réseau interconnecté, différentes dispositions sont à prendre en compte. Ces dispositions sont précisées par des arrêtés et des décrets qui évoluent au fil du temps suite au retour d'expérience induit par l'intégration de production dans un réseau conçu pour distribuer l'électricité, et donc prévu à l'origine pour n'accueillir que des consommateurs

Voici une synthèse des contraintes de raccordement d'une installation de production au réseau HTA. Si la production décentralisée doit être raccordée à un réseau non relié à un réseau interconnecté, des contraintes supplémentaires doivent être respectées, [28].

1. La puissance de court-circuit
2. Réglage de tension
3. Production ou absorption d'énergie réactive
4. Signaux tarifaires
5. Qualité de l'onde électrique
6. Couplage des installations de production au réseau
7. Mise à la terre des installations de production
8. Protection du système électrique
9. Participation à la reconstitution du réseau
10. Le programme de fonctionnement de l'installation de production

III.8.2 Contraintes de raccordement sur le réseau public de transport

Les prescriptions techniques relatives au raccordement au réseau de transport d'une installation de production d'énergie électrique sont précisées dans l'arrêté et le décret. Le présent expose quelques considérations générales sur ces contraintes de raccordement :

- En fonction de leur type, de leur puissance et de leur tension de raccordement, les installations de production doivent être conçues pour pouvoir contribuer, pour des durées limitées, au soutien du système électrique lorsqu'il est en régime exceptionnel ou en situation de défaut d'isolement ;
- En fonction de leur type, de leur puissance et de leur tension de raccordement, les installations de production doivent avoir des capacités constructives de fourniture de services auxiliaires nécessaires pour que le fonctionnement du système électrique soit sûr. Ces services comprennent :
 - Les réglages primaire et secondaire de la tension ;
 - Les réglages primaire et secondaire de la fréquence ;
 - Le renvoi de tension et la participation à la reconstitution du réseau.
- Les installations de production doivent être équipées d'un dispositif qui permet de les coupler au réseau public de transport. Les installations doivent en outre être conçues pour que la stabilité de leur fonctionnement soit assurée compte tenu des caractéristiques de leur raccordement au réseau et doivent être équipées des régulations de tension et de

fréquence (c'est -à-dire de la vitesse pour les groupes tournants) qui sont nécessaires pour atteindre cet objectif. Des pertes de stabilité ne doivent pas être à l'origine d'une dégradation de la qualité de l'électricité sur le réseau public de transport ou de la perturbation des conditions de son exploitation.

- Les installations de production doivent être capables de recevoir et d'exécuter, dans les délais appropriés précisés dans la convention d'exploitation, les ordres de conduite et de sauvegarde en provenance du gestionnaire du réseau de transport. L'arrêté précise ces contraintes de raccordement en fonction du type d'installation.

Sans prétendre être exhaustifs, nous allons évoquer quelques unes de ces contraintes dans la suite de cette section et dans la section suivante, [28].

1. Réglage de la tension
2. Réglage de la fréquence
3. Couplage et perturbations

III.9 Eolienne connectée au réseau

Les éoliennes connectées au réseau de distribution sont souvent en fonctionnement pour tester le potentiel éolien du site considéré appartenant à des industriels ou des privés qui produisent leur propre électricité et revendent l'excédent au distributeur local. Ce type de production décentralisée est rencontré de plus en plus avec le développement des primes et autres aides à a production d'énergie électrique propre. Les puissances de ces éoliennes peuvent varier, selon qu'il s'agit d'un exploitant privé ou industriel, de 50kW à 7.5MW pour les plus récentes éoliennes du marché, [29].

On estime que cette puissance augmentera à l'avenir, particulièrement dans des applications offshores (en mer), vu que ce milieu est caractérisé par une vitesse de vent très importante. Ces éoliennes fonctionnent en permanence et ont, le plus souvent, besoin d'être raccordées à un réseau puissant afin de minimiser l'impact des fluctuations de la puissance générée par ces dernières.

III.9.1 Capacités de réglages des différentes technologies d'éoliennes

La nature imprévisible et très fluctuante du vent limite la participation des éoliennes aux services système (réglages des puissances active et réactive, fréquence, tension, possibilité de fonctionner en îlotage, ...etc.). Le non participation aux services système, amène les éoliennes à se comporter comme des générateurs passifs du point de vue électrique. Le réglage de la tension et de la fréquence est dès lors reporté sur les alternateurs classiques (Turbines à gaz, groupes

diesels), ce qui va à l'encontre des motivations écologiques visant au développement de la production éolienne. Par conséquent, le taux de pénétration de l'éolien, c'est-à-dire la puissance que génèrent les éoliennes par rapport à la puissance totale consommée, doit alors être limité afin de pouvoir garantir la stabilité du réseau dans des conditions acceptables. Ceci est particulièrement vrai pour les sources à énergie renouvelable dont la source primaire est difficilement prévisible et très fluctuante, comme c'est le cas de l'éolien pour lequel certains retours d'expérience indiquent que lors de taux de pénétration supérieur à 20 ou 30% des problèmes de stabilité peuvent apparaître, telles que les creux de tension ou les variations de fréquence. Ces perturbations entraînent souvent une déconnexion de la production lors d'incidents sur le réseau. Cette déconnexion peut graver un déséquilibre production - consommation et par effet domino accélérer l'avènement d'un incident majeur dans le réseau. Pour cette raison, des réglementations spécifiques sont prises au sérieux par de nombreux pays, fixant les règles nécessaires pour l'insertion des fermes éoliennes dans les réseaux électriques. En plus, une supervision des puissances de ces fermes semble nécessaire afin de les connecter au réseau électrique sans affecter à la qualité d'énergie électrique produite.

Dans le futur, l'ancienne technologie éolienne à vitesse fixe sera remplacée au fur et à mesure par celles à vitesse variable (à base de machine asynchrone à double alimentation ou de machine synchrone), qui semblent mieux adaptées au système électrique. En effet, les éoliennes à vitesse variable permettent d'optimiser au mieux la production d'énergie grâce à une meilleure efficacité aérodynamique sur toute la plage de fonctionnement. De surcroît, contrairement aux éoliennes à vitesse fixe qui permettent peu de réglage et fonctionnent comme des générateurs passifs, les éoliennes à vitesse variable sont capables de participer au réglage de la tension et de la fréquence grâce à la présence des convertisseurs électroniques de puissance. Ceci offre ainsi à ce type d'éoliennes une plus grande souplesse d'adaptation aux conditions techniques de raccordement qui tendent actuellement à se rapprocher des conditions actuelles des groupes conventionnels.

III.9.2 Gestion du réseau électrique :

Pour pouvoir fonctionner correctement et produire de l'énergie électrique, la majorité des éoliennes ont besoin d'un réseau puissant qui impose la fréquence et la tension. De plus, ce dernier doit aussi pouvoir fournir la puissance réactive nécessaire aux génératrices asynchrones par exemple et pouvoir absorber en permanence toute la puissance produite par l'éolienne. Tout ceci est très complexe à gérer car la puissance produite par les éoliennes est très fluctuante à cause des aléas du vent. Une éolienne de 1MW ne peut pas produire en permanence cette puissance nominale ; on ne peut compter que sur 20 à 30% de cette puissance en moyenne. C'est

pour cela qu'il est intéressant d'interconnecter un grand nombre d'éoliennes sur plusieurs sites entre elles afin d'avoir une production qui puisse se stabiliser. Par contre, de par leur électronique et le réglage possible de l'angle de calage des pales, les éoliennes peuvent fournir des services système. En effet, il est possible de régler la puissance produite en modifiant le pas des pales de l'hélice. Si pendant une période de fort vent il y a un excédent d'énergie électrique au niveau du réseau, pouvant conduire à une déstabilisation de la fréquence, il est possible de limiter la puissance produite par les éoliennes. Ceci est effectué par l'action sur la commande de la partie électronique et sur l'angle de calage des pales afin de diminuer le rendement de l'hélice. Cet axe de recherche est actuellement bien étudié et de nombreux laboratoires apportent leurs contributions pour des solutions innovantes et performantes. De plus, en intervenant sur la commande des onduleurs associés à la génératrice, on peut faire varier la valeur de la puissance réactive produite par un parc éolien.

Ainsi, en fonction de la chaîne de conversion choisie, il est possible d'absorber ou fournir une puissance réactive donnée et de contrôler le plan de tension du réseau. Le gestionnaire de réseau peut alors compter sur l'éolienne pour aider à la correction du facteur de puissance du réseau. Cette option est désormais incorporée à la plupart des éoliennes utilisant des machines asynchrones à double alimentation. Cependant, s'il y a une période sans vent, où on ne peut rien faire et l'exploitant du réseau électrique ne peut donc pas compter sur les éoliennes comme source de production fiable. On peut cependant prédire les conditions du vent et donc de production d'énergie électrique avec quelques jours d'avance. Ceci reste de la prédiction météo et ne change rien lorsque le vent tombe. Pour avoir une plus grande souplesse d'utilisation et une meilleure efficacité du système, il faudrait pouvoir stocker l'énergie durant les périodes de fort vent pour pouvoir restituer quand il n'y a plus de vent. Il faut alors associer les éoliennes avec d'autres sources de production comme des groupes diesel dans le cas de production sur réseau autonome, [29].

III.9.3 Capacité de réglage de la tension et de la puissance réactive

Les capacités de réglage de la tension des générateurs éoliens vont dépendre principalement de leur technologie. Les technologies, se basant sur les générateurs asynchrones à cage, sont uniquement consommatrices de puissance réactive. Elles n'ont donc pas la capacité de régler la tension. Afin de compenser l'énergie réactive consommée, on l'associe avec des batteries de condensateur. Le réglage de réactif reste cependant approximatif, sa précision dépendra de la taille des gradins de condensateurs. Les générateurs asynchrones doublement alimentés et les génératrices synchrones ont la capacité de régler la puissance réactive à leurs bornes grâce à

l'interface d'électronique de puissance. Il est donc possible, dans les limites du dimensionnement des convertisseurs, de régler la tension, plusieurs travaux se sont intéressés à ce type de réglage.

III.9.4 Capacité de réglage de la fréquence

Le problème majeur actuel associé à la production éolienne est qu'elle ne participe en général pas au réglage de la fréquence-puissance du réseau. Ceci est d'autant plus grave que l'intégration de l'éolien sollicite davantage le réglage de fréquence des groupes conventionnels à cause de l'intermittence de la production. Certains gestionnaires du réseau de transport ne demandent une contribution qu'en cas de sur-fréquence en dégradant la puissance active produite. La tendance actuelle est de durcir les règles de connexion, en demandant une capacité de participation aux réglages fréquence-puissance semblable à celui des moyens décentralisés classiques, [29].

Des travaux ont étudiés les capacités des éoliennes à participer aux réglages de la fréquence. propose d'utiliser l'énergie cinétique stockée dans les pales et proposent à l'aide d'une technologie basée sur une MADA d'agir sur l'angle de calage des pales afin de constituer une réserve de puissance mobilisable lors de variation de fréquence. La technologie basée sur les MADA ne permet pas une participation aux réglages puissance fréquence sur toute la plage de fonctionnement de l'éolienne (limitation sur la vitesse de rotation minimale de fonctionnement atteignable). Les gestionnaires du réseau disposent de trois niveaux d'action: le réglage primaire de la fréquence, secondaire et tertiaire. Pour assurer un réglage primaire quelle que soit la vitesse du vent, un superviseur multi variable basé sur la logique floue en utilisant une MSAP.

III.9.5 Capacité de fonctionnement en site isolé

Le découplage, créé par les convertisseurs d'électronique de puissance entre le réseau et le stator de la MSAP, permet un fonctionnement de ce type de technologie en site isolé [29].

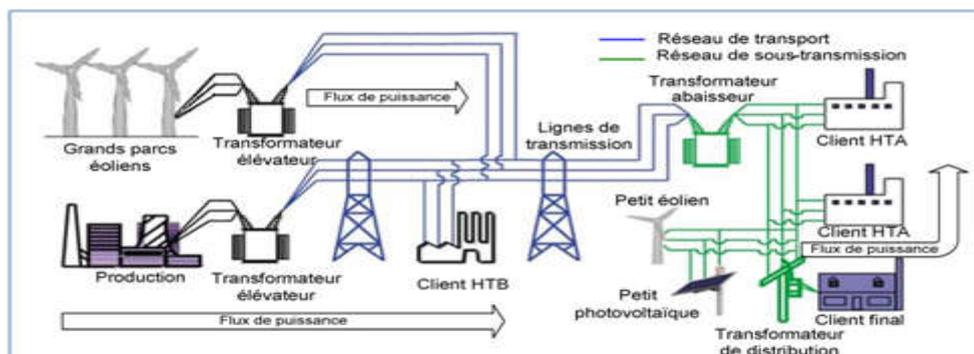


Figure III.4 : Architecture horizontale du réseau [24].

III.10 Conclusion :

Les générateurs éoliens sont principalement une source de perturbations pour le réseau électrique et notamment pour les gestionnaires des réseaux

-Le gestionnaire de réseau attendent d'une installation de production qu'elle ne perturbe pas le réseau électrique alors des problèmes de gestion du réseau .il est alors nécessaire de prendre en compte le comportement des générateurs éoliens dans le réglage des réseaux et d'évaluer la capacité de ceux –ci a participer directement aux service système ; participation qui peut être rémunérée dans un marché libre (ou contrat de participation aux service système).

a cette raison Pour minimiser leur impact passera par :

- une meilleure prévision du vent qui pourra permettre une estimation de la puissance qui sera produite.
- une évolution des stratégies de commande des éoliennes qui les fera approcher des performances, en matière de réglage du réseau, des centrales classiques.
- une prise en compte de leur possibilité dans la gestion du réseau et en fin un échange d'informations en temps réel entre les gestionnaires des réseaux et les fermes d'éoliennes.
- La puissance installée en énergie éolienne raccordée au réseau électrique croit de puis quelques années. Jusqu'ici, cette génération a été généralement considérée en tant que « Générateurs passifs » parce qu'elle ne participait pas directement aux services système (Réglage de tension et de la fréquence, ...).

Chapitre IV

Application centrale éolienne de Kabertene

IV.1 Introduction

Des études ont été entreprises pour l'évaluation de cette ressource à travers l'Algérie. Les résultats ont montré une variabilité de la vitesse du vent en fonction des saisons et de l'altitude, (Référence de l'étude).

Les résultats sont présentés sous forme de cartes afin de faciliter la lecture et de permettre d'avoir une idée générale sur la répartition géographique du gisement éolien tout au long de l'année.

La carte des vents de l'Algérie, estimée à 10 m du sol est présentée en Fig.1. Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. On remarque qu'à l'exception de la région côtière (moins Béjaïa et Oran), du Tassili et de Beni Abbés, la vitesse de vent moyenne est supérieure à 3 m/s.

En fait, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 3 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.5 m/s. Cependant, nous pouvons observer l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tiaret, Tindouf et Oran.

L'Algérie possède un potentiel immense en énergie renouvelable qui lui permet de diversifier ses sources énergétiques.

L'introduction des énergies renouvelables en Algérie à l'exemple de la ferme éolienne de 10 MW à Kabertene (wilaya d'Adrar) ou centrales photovoltaïques est devenue une recommandation des pouvoirs publics et une donnée incontournable.

L'Algérie est confrontée actuellement à une obligation stratégique de la diversification de ses sources d'énergie, non seulement en termes de moyens financiers dont l'objectif n'est pas uniquement d'économiser ses réserves énergétiques, mais aussi de bénéficier le plus rapidement du transfert technologique.

Le but de ce chapitre est l'évaluation et la quantification de la capacité énergétique du site de Kabertene, ainsi que une application sur l choix rigoureux de différents emplacements des aérogénérateurs et ceci afin d'éviter d'interférence entre les turbines éoliennes et par conséquent maximiser le rendement énergétique de la ferme, une étude pratique de la centrale éolienne de Kabertene a fais l'objet de ce chapitre aussi l'impacte de la centrale éolienne sur le fonctionnement du système électrique d'Adrar / In-Saleh,[30]

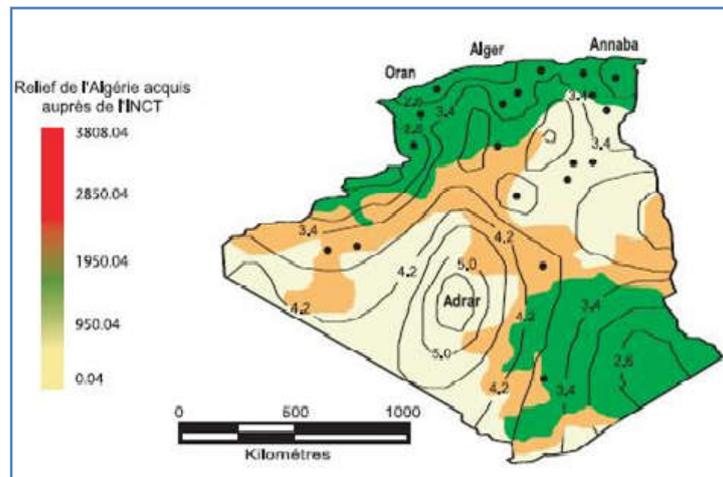


Figure IV 1: La vitesse moyenne du vent au niveau l'Algérie [32].

IV.2 Potentiel Eolien D'ADRAR

Le vent est inégalement réparti sur la surface du globe. La géographie même d'un site peut faire varier de manière importante les vitesses de vent à seulement quelques kilomètres de distance. Toutefois, il est fondamental de connaître précisément le site éolien, puisque c'est de lui que dépend la viabilité économique d'un projet éolien. Il est donc nécessaire de mettre en place préalablement un mât de mesure qui enregistrera le comportement du vent pendant plusieurs mois, voire même plusieurs années. La puissance éolienne disponible est principalement fonction du cube de la vitesse du vent.

Ce qui signifie, par exemple, qu'une augmentation de 10 % de la vitesse du vent augmente de 30 % l'énergie éolienne disponible, [31].

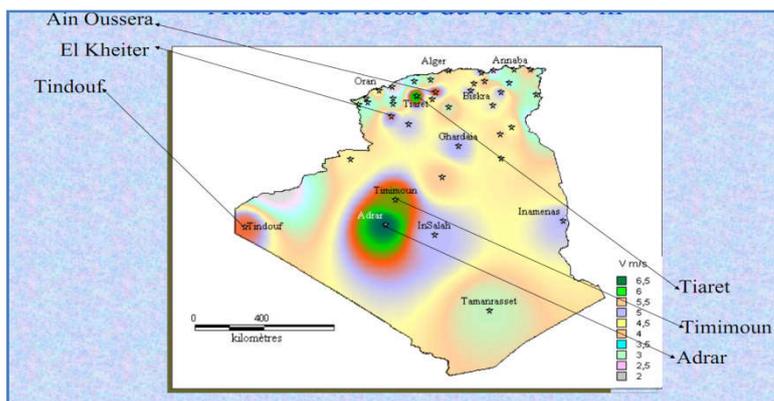


Figure IV.2 : potentiel éolienne d'Adrar [32].

IV.3 Choix du site de Kabertene :

• Ce site se trouve à environ 73 km au Nord de la ville d'Adrar à proximité d'un poste électrique de Sonelgaz (nœud) il se trouve à une altitude d'environ 260 m et ses coordonnées géographiques sont 28°27' 7.44 N 0°02' 59.08 W. Les éléments décisifs ayant conduit au choix du site pouvant contenir la ferme éolienne sont:

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

• Ces différents points ont été analysés dans le choix du site. L'optimisation se fait en comparant à la fois le potentiel éolien du site choisi avec les coûts impliqués dans la construction du parc sur ce même endroit, [32]



Figure IV.3 : Localisation du site [32].

Nom du site		Kabertene/Province d'Adrar	
Coordonnées	Géographiques	Latitude	Longitude
	UTMWGS 84	• Y = 3 152 755.2 X = m787 103.7m	
Elévation		260 mètres	
Direction des vents dominants		Nord-est	
Description du site		Terrain plat, très dégagé et couvert de sable	

Tableau IV.1: Les renseignements relatifs au site de Kabertene [35].

IV.3.1 Fiche Technique De La Centrale Eolienne De Kabertene :

- La première ferme éolienne du genre à l'échelle nationale, d'une capacité de 10,2 mégawatts, est implantée sur une superficie de 33 hectares, dans la localité de Kabertene, à 72 km au nord de la wilaya d'Adrar.
- Etude de gisement éolien de Kabertene : société CREDEG.(Spa) filiale sonelgaz.
- Travaux de Génie Civil : société INERGA. (Spa) filiale Sonelgaz.
- Sous-traitant du constructeur (Spa) filiale Sonelgaz.
 - Travaux de montage : ETTERKKIB (Spa) filiale Sonelgaz.
 - Transport terrestre des équipements : TRANSMEX. (Spa) filiale Sonelgaz.
- Ce projet a été attribué, le 13 décembre 2010, au groupe algéro-français CEGELEC
- Le montant de l'investissement proposé par le consortium mixte est de 2,21 mds DZD
- Mise en marche de six (06) le 08 juin 2014. Une puissance maximale de trois (03) MW a été injectée sur le réseau Moyen Tension (MT) de distribution Spa filiale Sonelgaz.
- Inauguration le 03/07/2014 de ferme éolienne de Kabertene par le ministre de l'Energie, Youcef Yousfi.
 - Signature du contrat : Mai 2011, [34]
 - Nombre d'éoliennes : 12 éolines de type Gamésa(G52)
 - Nombre des pales : 03 pales par éolienne d'une longueur de 26 m
 - Hauteur de mât 55 m
 - Puissance unitaire : 850 kW
 - Evacuation de l'énergie : vers le poste 220\ 30 kV existant de Kabertene
 - Energie produite : environ 27 GWh (Vmoy : 8,5m/s, d'air : 1,225kg/m³)

IV.3.2 Installation Du Mat De Mesure

Les points importants à respecter lors de l'installation du mât de mesure entre illishaubané de 55m

Un mat météo a été installé au niveau du site de Kabertene, pour servir de référence pour le futur parc éolien, [33].



Figure IV.4: mat de mesure et les capteurs [37].

IV.3.3 Installation Du Matériel De Mesure

- Le matériel installé est : Cinq anémomètres ;
- Deux girouettes et Deux capteurs de température ; [33]

- Un enregistreur et Un système d'alimentation (batterie / chargeur / panneau solaire)

le premier rapport trimestriel enregistres les résultats des mesures de vent obtenus sur le site de Kabertene dans la Wilaya d'Adrar.

Présente les résultats des caractéristiques du vent de la période du 1^{er} décembre 2012 au 28 février 2013.

Jour	V1	V3*	Jour	V1	V3*	Jour	V 54 m
01/12/2012	9,35	9,27	01/01/2013	6,72	6,82	01/02/2013	6,09
02/12/2012	9,08	8,94	02/01/2013	6,09	6,20	02/02/2013	3,38
03/12/2012	8,68	8,77	03/01/2013	6,02	6,14	03/02/2013	9,96
04/12/2012	6,24	6,33	04/01/2013	10,25	10,14	04/02/2013	9,47
05/12/2012	4,00	4,11	05/01/2013	8,01	7,90	05/02/2013	4,44
06/12/2012	6,23	6,26	06/01/2013	4,71	4,73	06/02/2013	4,59
07/12/2012	3,21	3,45	07/01/2013	4,55	4,58	07/02/2013	6,68
08/12/2012	3,60	3,75	08/01/2013	6,90	6,85	08/02/2013	6,44
09/12/2012	8,03	7,84	09/01/2013	7,80	7,67	09/02/2013	5,02
10/12/2012	8,37	8,20	10/01/2013	5,99	6,00	10/02/2013	7,32
11/12/2012	6,57	6,60	11/01/2013	5,69	5,76	11/02/2013	3,97
12/12/2012	7,50	7,38	12/01/2013	5,79	5,86	12/02/2013	5,70
13/12/2012	9,78	9,72	13/01/2013	4,80	4,89	13/02/2013	8,58
14/12/2012	8,09	8,17	14/01/2013	7,84	7,80	14/02/2013	6,48
15/12/2012	6,64	6,72	15/01/2013	4,69	4,73	15/02/2013	8,33
16/12/2012	8,12	8,07	16/01/2013	4,96	5,18	16/02/2013	8,28
17/12/2012	8,10	8,07	17/01/2013	5,51	5,64	17/02/2013	5,67
18/12/2012	7,13	7,09	18/01/2013	2,33	2,50	18/02/2013	3,45
19/12/2012	6,51	6,55	19/01/2013	10,35	10,30	19/02/2013	4,18
20/12/2012	6,31	6,39	20/01/2013	8,46	8,75	20/02/2013	5,16
21/12/2012	5,85	5,91	21/01/2013	3,70	4,02	21/02/2013	5,62
22/12/2012	6,30	6,30	22/01/2013	5,13	5,53	22/02/2013	4,99
23/12/2012	7,78	7,58	23/01/2013	8,18	8,16	23/02/2013	9,28
24/12/2012	7,13	7,01	24/01/2013	4,54	4,54	24/02/2013	8,33
25/12/2012	3,13	3,43	25/01/2013	5,71	5,86	25/02/2013	3,81
26/12/2012	8,49	8,43	26/01/2013	3,74	3,80	26/02/2013	3,09
27/12/2012	9,93	9,87	27/01/2013	6,35	6,31	27/02/2013	7,76
28/12/2012	11,22	11,08	28/01/2013	5,47	5,57	28/02/2013	8,45
29/12/2012	10,62	10,52	29/01/2013	9,30	9,13		
30/12/2012	7,18	7,21	30/01/2013	7,37	7,27		
31/12/2012	7,00	7,05	31/01/2013	6,08	6,09		
Moyenne	7,30	7,29		6,23	6,28		6,23
max	11,22	11,08		10,35	10,30		9,96
min	3,13	3,43		2,33	2,50		3,09
V1=54 m Ouest - V3* = 54 m Est							

Tableau IV.2: Vitesses moyennes journalières (m/s) du vent en décembre 12, janvier et février 13 [32].

IV.3.3.1 Post-traitement des mesures anémométriques

Le traitement des données sera basé sur une couverture de 99.60% en décembre et 98.54% en janvier. A noter un double enregistrement le 06 janvier à 8h. Ayant malencontreusement eu un défaut d'enregistrement au mois de février 2013, nous allons procéder à la méthode de corrélation extrapolation pour reconstituer les données manquantes.

Les valeurs de calibration n'étant pas insérées dans l'enregistreur, les mesures anémomètre que sont été post-traitées pour tenir compte de la pente et du biais obtenus par calibration.

Par ailleurs, l'examen des données de l'anémomètre 2 montrant qu'il présente un défaut, pour utiliser un second anémomètre au sommet du mat nous avons pris l'anémomètre 3 et avons extrapolé verticalement ses mesures et l'avons nomme A3*.

IV.3.3.2 Résultats obtenus

Quel que synthèse des résultats des anémomètres supérieurs est présentée dans le tableau suivant, [36] :

	54 m Ouest (A1)			54 m Est (A3*)		
	V moy	V max 10 min	V max 3s (rafale)	V moy	V max 10 min	V max 3s (rafale)
Décembre 12	7.30	15.31	17.64	7.29	14.65	/
Janvier 13	6.23	17.65	21.31	6.38	17.33	/
Février 13	6,23	9,96	/	/	/	/
Moy ou max	6.59	17.65	21.31	6.84	17.33	/

Tableau IV.3: les maxima ont été enregistrés par des vents de direction ouest : le 19 janvier 2013 à 23h 30 [32].

IV.3.3.2.a Les roses des vents et des énergies

La rose des fréquences des vents est la fréquence directionnelle du vent et le pourcentage du temps pendant lequel le vent souffle en provenance d'une direction particulière. Suivant la manière de représenter, nous pouvons distinguer : la rose des fréquences et la rose des énergies.



Figure IV.5: la rose des directions et énergies en décembre 2012 [32].

- En décembre 2012, les vents dominants sont de Nord- Nord Est avec une fréquence de 40 % et 50 % de l'énergie sur la même direction

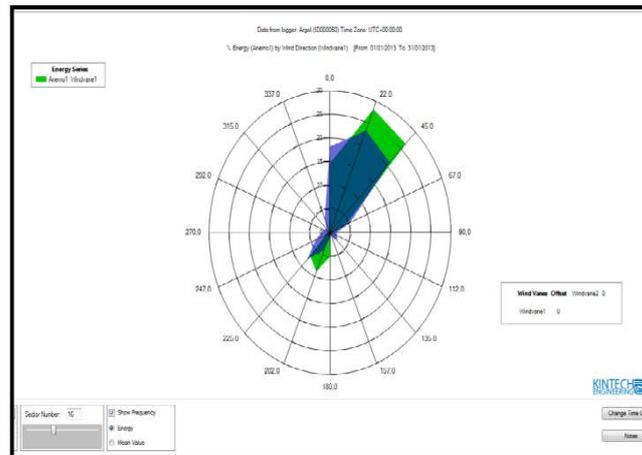


Figure IV.6: la rose des directions et énergies en janvier 2013 [32].

En janvier 2013, les fréquences de vent sont plus étalées entre le Nord et le Nord Est avec une fréquence cumulée d'environ 60% du temps. Cependant les directions NNE et NE sont plus énergétiques. A noter des vents Sud-ouest à plus de 5%

IV.3.4 Les variations de température :

Sur cette période, les températures moyennes mensuelles varient entre 12 et 16°. Ces températures sont à 53 m en moyenne plus élevées, mais avec moins d'amplitude au cours de la journée, que les températures à 10 m.

	Décembre 2012		Janvier 2013		Février 2013	
	CT1 (53 m)	CT 2 (10m)	CT1 (53 m)	CT 2 (10m)	53 m	10 m
Moyenne	13,91	12,25	14,26	12,65	16,19	14,39
Moy jour Max	18,87	17,38	18,06	15,86	22,71	20,39
Moy jour Min	9,56	8,91	9,66	8,26	10,79	9,42

Tableau IV.4: Les températures moyennes mensuelles [32].

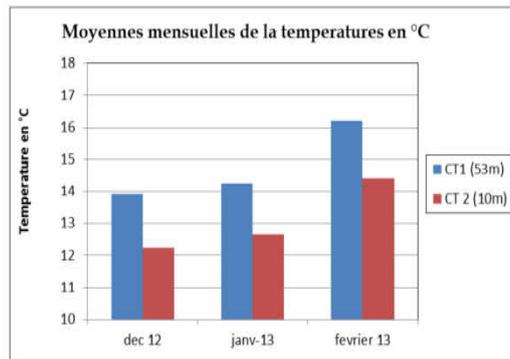


Figure IV.7: valeurs moyenne mensuelle de la température [32].

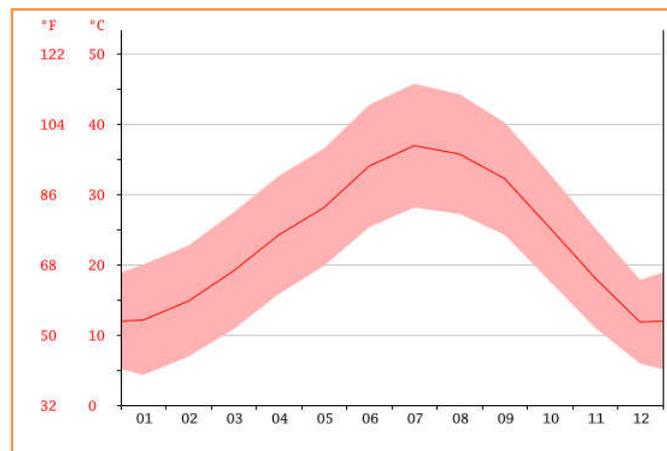


Figure IV.8: Courbe annuel de température de Kabertene [35].

IV.3.4.1 Cas d'étude :

-Le Tableau (IV-5) indique la puissance électrique [kW] en fonction de la vitesse horizontale du vent [m/s] à hauteur du moyeu, dont la moyenne est faite toutes les dix minutes, pour différentes densités de l'air [kg/m^3].

-La courbe de puissance n'inclut pas les pertes dans le transformateur ni dans les câbles haute tension.

P [Mill]	Densité de l'air kg/m^3													
	Vit. du vent	0,940	0,970	1,000	1,030	1,060	1,090	1,120	1,150	1,180	1,210	1,225	1,240	1,270
4	Pie	18,4	19,4	20,4	21,4	22,4	23,4	24,4	25,4	26,4	27,4	27,9	28,4	29,4
5		49,7	51,3	52,9	54,5	56,1	57,7	59,4	61,0	62,7	64,4	65,2	66,0	67,7
6		92,6	95,8	99,0	102,2	105,4	108,6	111,8	115,1	118,3	121,5	123,1	124,7	127,9
7		156,2	161,1	166,0	170,9	175,8	180,7	185,7	190,6	195,6	200,5	203,0	205,5	210,4
8		238,9	246,1	253,3	260,5	267,7	274,9	282,0	289,2	296,3	303,4	307,0	310,6	317,7
9		337,5	347,8	358,1	368,4	378,7	389,0	399,3	409,6	419,9	430,2	435,3	440,4	450,7
10		432,3	446,2	460,1	474,0	487,9	501,8	515,7	529,7	543,6	557,5	564,5	571,5	585,4
11		536,6	552,2	567,8	583,4	599,0	614,6	630,2	645,7	661,3	676,8	684,6	692,4	707,9
12		663,7	675,9	688,1	700,3	712,5	724,7	737,0	749,3	761,5	773,8	779,9	786,0	798,3
13		782,0	788,2	794,4	800,6	806,8	813,0	819,1	825,3	831,4	837,5	840,6	843,7	848,6
14		822,3	825,0	827,7	830,4	833,1	835,8	838,5	841,2	843,9	846,6	848,0	849,4	850,0
15		839,5	840,5	841,5	842,5	843,5	844,5	845,5	846,5	847,5	848,5	849,0	849,5	850,0
16		846,8	847,1	847,4	847,7	848,0	848,3	848,7	849,1	849,4	849,8	850,0	850,0	850,0
17 → 25		850,0	850,0	850,0	850,0	850,0	850,0	850,0	850,0	850,0	850,0	850,0	850,0	850,0
26		821,6	821,6	821,6	821,6	821,6	821,6	821,6	821,6	821,6	821,6	821,6	821,6	821,6
27		793,2	793,2	793,2	793,2	793,2	793,2	793,2	793,2	793,2	793,2	793,2	793,2	793,2
28		764,8	764,8	764,8	764,8	764,8	764,8	764,8	764,8	764,8	764,8	764,8	764,8	764,8

Tableau IV.5 : Puissance (KW) G52 850 KW 50-60 HZ calculée en fonction de la vitesse du vent (m/s) pour différentes densités de l'air (kg/m^3) [37].

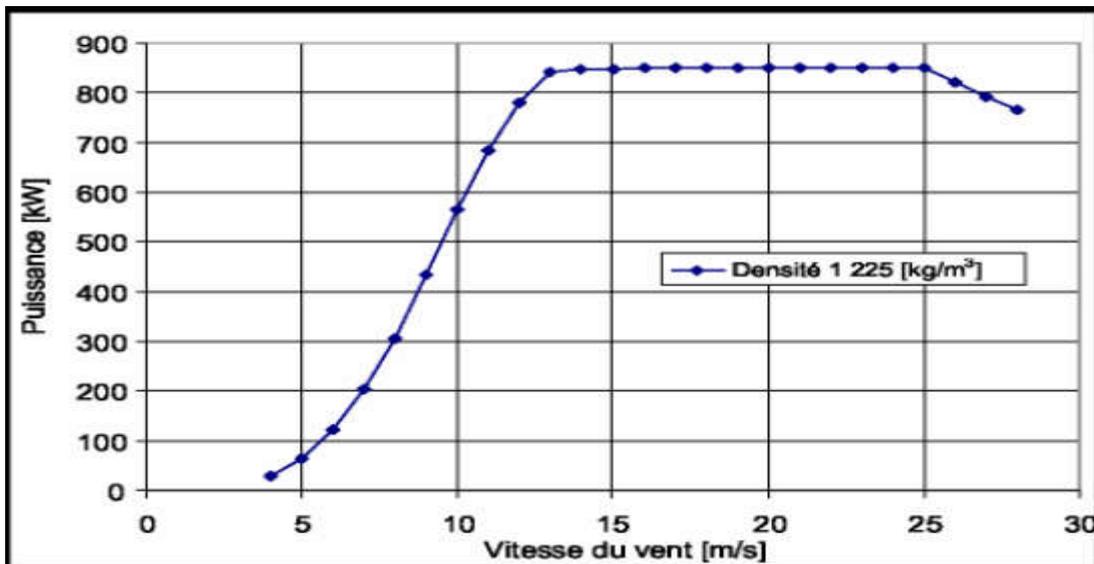


Figure IV.9: courbe de puissance de l'aérogénérateur aeg g52 850 kw 50_60 hz pour une densité de l'air égale a 1,225 [Kg/m^3] [32].

IV.4 La constituants de la station de Kabertene

La ferme éolienne de KABERTENE est située sur la wilaya d'ADRAR (Algérie). Il s'agit d'un projet d'installation de 12 éoliennes pour une puissance totale d'environ 10 MW.

-Les blocks constituants la ferme éolienne sont les suivants

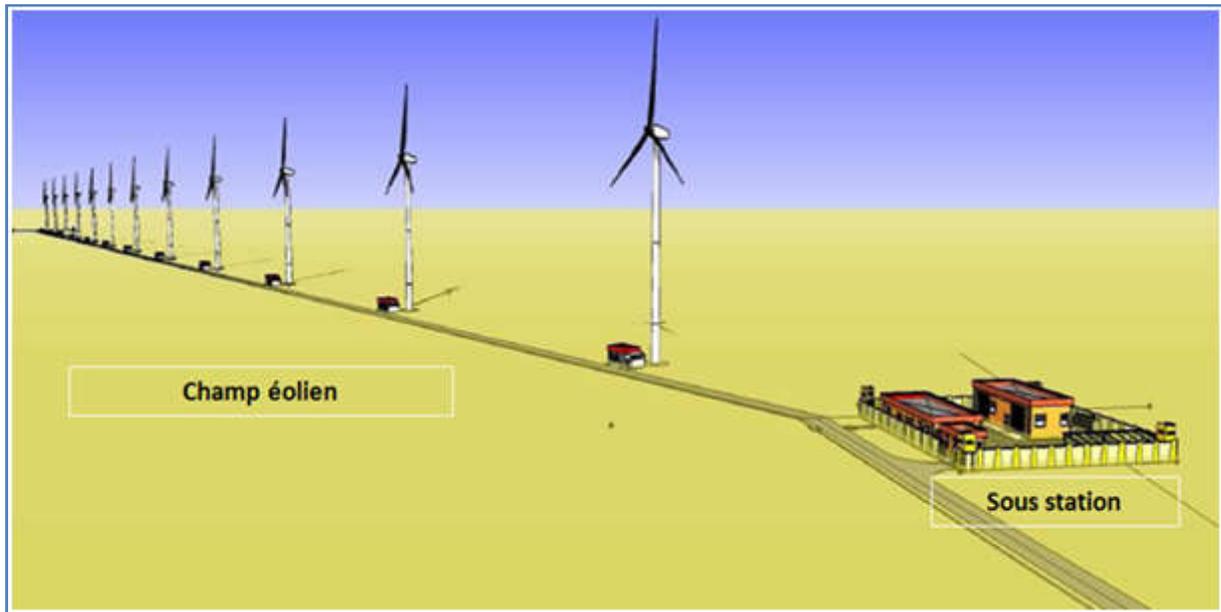


Figure IV.10: Plan d'implantation de la ferme éolienne de Kabertene [35].

- ✓ 12 Kiosques situés au pied de chaque éolienne
- ✓ 01 Bâtiment électrique. Contient :
 - 1- Sous station moyenne tension 30KV
 - 2- Salle de commande et contrôle ou se trouve le SCADA (system of control and data acquisition) et le système de détection d'incendie
- ✓ Les éoliennes
- ✓ 01 Bâtiment de maintenance : se compose par :
 - Atelier
 - Magasin
- ✓ 01 Poste de garde. Doté par un système de télésurveillance, [35].

IV.4.1 Kiosque :

Les Equipements principaux d'un kiosque d'éolienne sont :

- Cellules 30 kV kiosque éolienne
- Coffret fusible
- Transformateur d'éolienne 30 / 0,69 kV
- Ground Controller
- Pour les cellules des éoliennes 30 kV est composé de 03 disjoncteurs :
- Un disjoncteur arrivée TP 0.69/30KV
- Deuxième disjoncteur départ vers kiosque éolien précédent

- Troisième disjoncteur départ vers kiosque éolien suivant
 - Pour éoliennes 1 et 12 sont raccordée avec sous station 30 KV

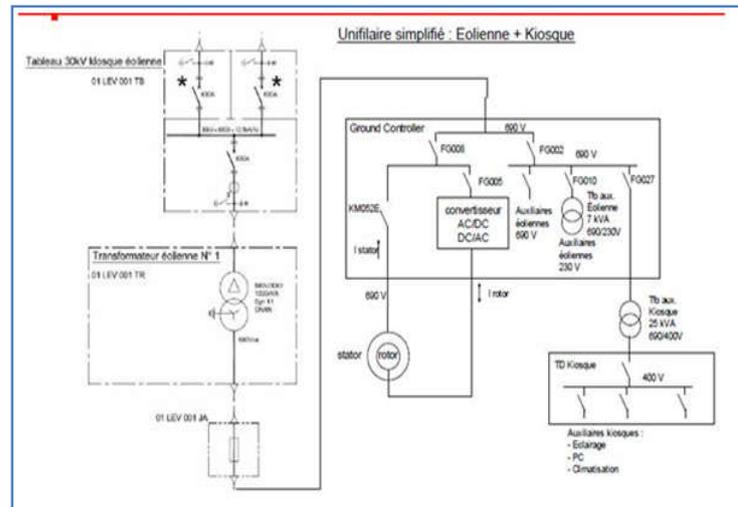


Figure IV.11: cellules mt Schneider 30 KV au niveau des kiosques [37].



Figure IV.12: schéma simplifié éolienne + kiosque [32].

IV.4.2 Le Transformateur

Dans le cadre du projet de la ferme éolienne de Kabertene, CEGELEC fournira douze transformateurs 1000 kVA 0,69 / 30 kV ONAN (1 transformateur par kiosque d'éolienne)

Pour élever la tension en sortie des génératrices des éoliennes (690 V entre phases) à la tension de raccordement au poste de Kabertene (30 kV entre phases).

Fournisseur	Transfo Mary
Type	sec (refroidissement air naturel)
Norme	CEI 60076
Rapport de transformation	690 / 400 V
Puissance	25 KVA
Plage de réglage	690 V \pm 5 % (régleur hors tension)
Longueur	590 mm
Largeur	340 mm
Hauteur	615 mm
Poids	144 kg

Tableau IV.6: Les caractéristiques techniques du TR 0.69/30KV [32].



Figure IV.13: Transformateur élévateur [37].

Niveau de tension	400 V
Régime de neutre	TNS
Tenue au court-circuit	1 kA / 1s
Fonction	alimentation des auxiliaires du kiosque d'éolienne
Source d'	Transformateur auxiliaires kiosque éolienne
Auxiliaires alimentés	Eclairage, Auxiliaires tableau 30 kV kiosque éolienne Climatisation
Implantation	salle BT du kiosque d'éolienne

Tableau IV.7: Transformateur des auxiliaires du kiosque d'éolienne TACS [32].

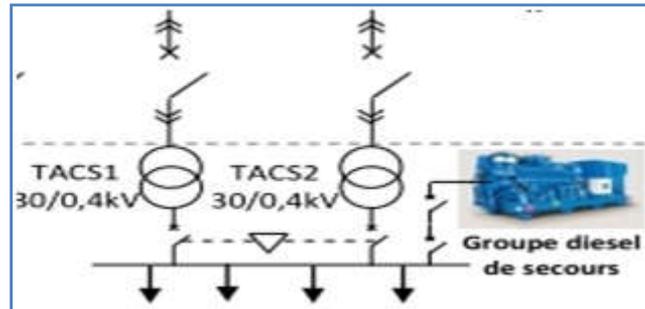


Figure IV.14 Schéma unifilaire de raccordement des transformateurs auxiliaires et groupe secourant [32].

IV.4.3 Sous station 30 KV

Pour la station MT 30 kV contiennent des cellules des disjoncteurs suivants :

- disjoncteurs P1 .P2 arrivée des éoliennes 1 et 12
- disjoncteur de couplage de deux demi jeux de barre 30 kV 1 et 2
- disjoncteur réserve éolienne (future)
- disjoncteur départ des transformateurs auxiliaires TACS1 et TACS2 (30/0.4KV) disjoncteurs liaisons A1 et A2 pour poste 30/220KV de SDO Kabertene, [36].



Figure IV.15: cellule (efacec) mt sous-station 30kv éolienne [32].

IV.4.3.1 Pose cellules MT :

IV.4.3.1.a Poste 220/30kv Kabertene

IV.4.3.1.a.1 Cellules d'extension du tableau 30 KV

Les 2 cellules prévues sont du même type que celles déjà installées.

Les spécifications techniques des 2 cellules de marque EFACEC de type QBN7 .

L'alimentation des auxiliaires de commande et de signalisation des 2 cellules 30 kV se fera depuis des d parts en r serve de l'armoire existante de distribution 48 Vcc N°2, [36].



Figure IV.16: cellules (efacec) à mt 30 KV au niveau poste 220/30kv du Kabertene [37].

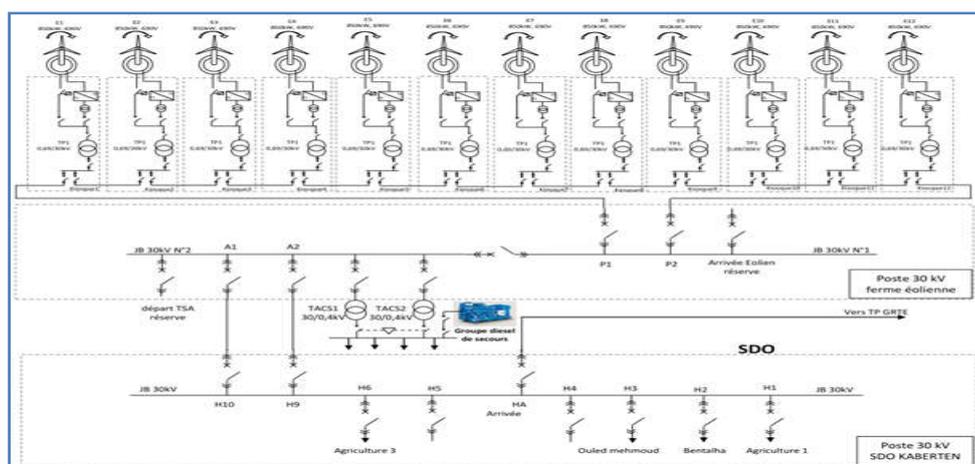


Figure IV.17: Schéma unifilaire de liaison la ferme éolienne avec le poste 220kV/30kV Kabertene [35].

IV-5 Etude d'impact de la variation de la centrale sur le système électrique

a) Jour perturbé

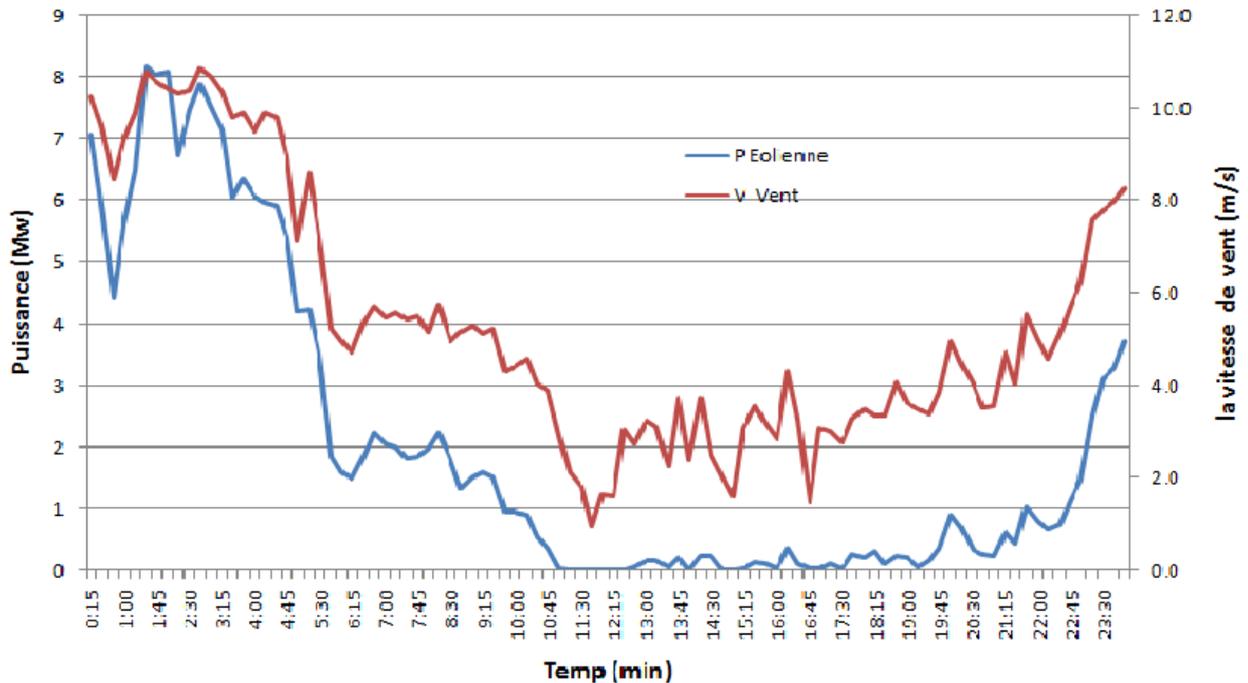


Figure IV.18 : la production éolienne et la vitesse de vent du 13 04 2017 de la ferme de KAB.

Une chute brusque de la vitesse du vent constaté durant la période du 03h00 à 06h00 de 10.7m/s à 4.7m/s a engendré une diminution sur la puissance injectée par la centrale éolienne de 7.5Mw à 1.5Mw.

La période du 02h00 à 19h00 enregistrée une perturbation légère sur la vitesse du vent n'a pas influencé le mouvement de l'éolienne (P presque nulle).

La période du 19h00 à 00h00 la puissance injectée existe malgré que la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de synchronisme ceci est due l'effet de l'inertie.

b) jour typique

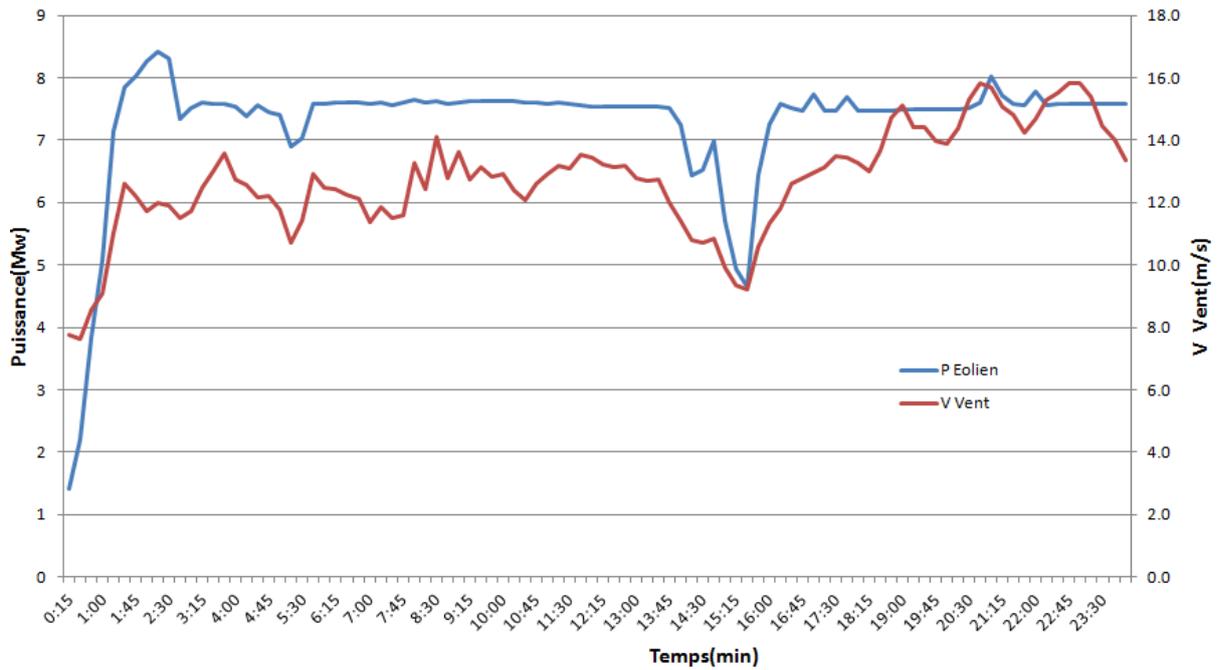


Figure IV.19 : la production éolienne et la vitesse de vent du /2104/2017 de la ferme de KAB

La valeur de vitesse ($v=4\text{m/s}$) c'est le point d'accrochement (synchronisation) c'est le début de l'injection par la centrale éolienne sur le réseau électrique

Pour le jour du 21/04/2017 les périodes de perturbation sont presque identique au cas précédent, je préfère discuter de cas a la stabilité allant de 5 :30 à 14 :30 la variation légère de la vitesse du vent n'a pas influe sur la production de la puissance injectée par la centrale éolienne (effet inertie).

Si on prend deux points P1 (00h30, 2.2MW) et P2 (02h15, 8.4MW) cette augmentation de la puissance injectée par le centrale Eolienne est proportionnelle a l'augmentation de la vitesse du vent entre les deux points de la vitesses V1 (00h30, 7.6m/s) et V2 (02h15, 12.0m/s), soit un P MW correspond à un V m/s pour le même intervalle temporelle.

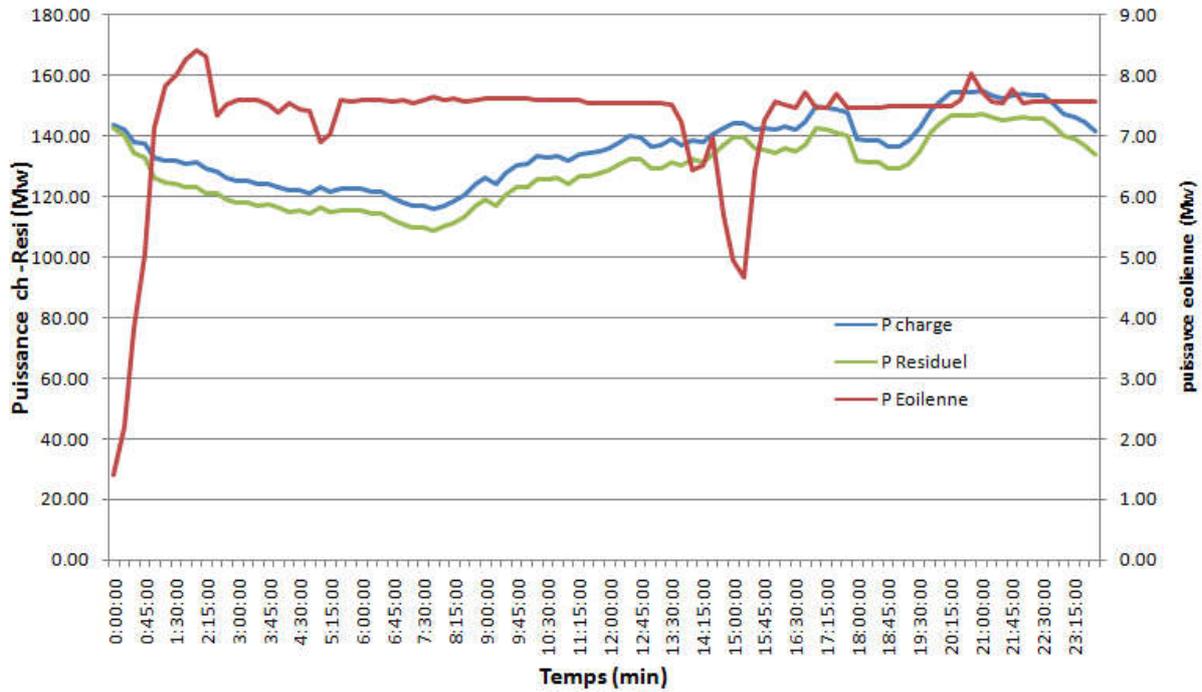


Figure IV.20: l'influence de la puissance injectée par la centrale la éolienne sur la puissance demandée (charge) J 21/04/2017

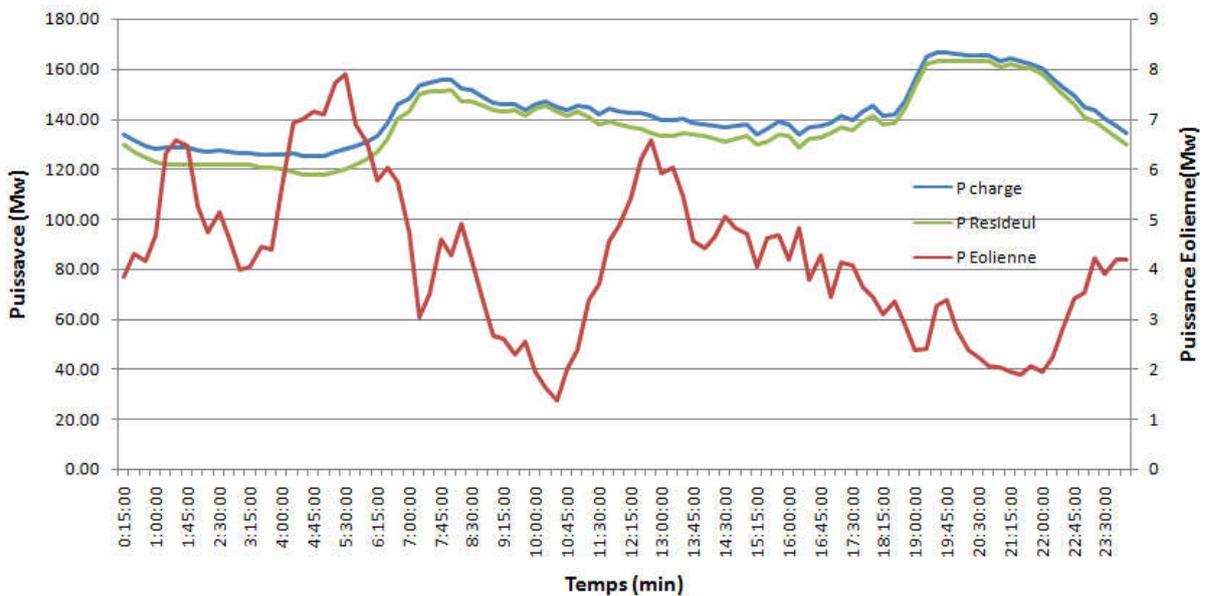


Figure IV.21 : l'influence de la puissance injectée par la centrale l'éolienne sur la puissance demandée (charge) J 13/04/2017

la courbe résiduel : est la différence entre la demande (charge) et la production de l'installation étudiée (éolien, PV) avant le début d'injection de la puissance éolienne en a c constaté que la puissance demandé est identique a la puissance résiduel une fois la centrale contribué pour la couverture de la demande (P charge) est malgré la fluctuation de sa puissance l'écart entre la

puissance demandé et la puissance résiduelle reste constant car il est compensé par les turbogénérateurs.

IV.6 Conclusion :

La variation de la source primaire (vent) provoque une variation sur la puissance injectée par la centrale éolienne de KAB sur le réseau interconnecté n'influe pas sur la stabilité de la puissance globale du réseau car il est compense par la régulation auto des turbogénérateurs pour la sauvegardé de la fréquence a la valeur de 50Hz

Quelque soit la variation de la centrale éolienne la continuité d'alimentation de la demande est assurer en permanent et en bon qualité (fréquence stable).

Conclusion Générale

Conclusion générale

De nos jours, il existe donc une forte contradiction entre le fonctionnement des générateurs éoliens et le fonctionnement des réseaux électriques :

- Les générateurs éoliens sont commandés de telle sorte qu'ils extraient le maximum de puissance du vent à fine de les rentabiliser sans vraiment considérer les problèmes de réglage et de stabilité du réseau.
- Les gestionnaires de réseau attendent d'une installation de production qu'elle ne perturbe pas le réseau et qu'elle participe à la gestion de celui – ci, c'est-à-dire qu'elle apporte des services système.

La puissance installée en énergie éolienne raccordée au réseau électrique croit de puis quelques années. Jusqu'ici, cette génération a été généralement considérée en tant que

« Générateurs passifs » parce qu'elle ne participait pas directement aux services système

(Réglage de tension et de la fréquence, ...). Mais cette approche ne sera plus acceptable dans le future quand le niveau de pénétration de la génération dispersée sera supérieure à 20 %.

Ce qui est déjà le cas pour le moment dans certains pays comme le Danemark par exemple.

Ceci pose alors des problèmes de gestion du réseau .il est alors nécessaire de prendre en compte le comportement des générateurs éoliens dans le réglage des réseaux et d'évaluer la capacité de ceux –ci a participer directement aux services système ; participation qui peut être rémunérée dans un marché libre (ou contrat de participation aux service système).

Dan notre cas, en constaté que la variation de la source primaire (vent) provoque une variation sur la puissance injectée par la centrale éolienne de KAB sur le réseau interconnecté n'influe pas sur la stabilité de la puissance globale du réseau car il est compensé par la auto régulation des turbogénérateurs pour sauvegarder la fréquence à la valeur de 50Hz.

En fin cette puissance injectée par ENR représente un gain en gaz et elle a un impact positif sur l'environnement.

Bibliographique :

- [1] F. Omar, «Contribution à l'étude des systèmes hybrides de génération : application aux énergies renouvelables », Mémoire de Magister université Souk-Ahras 2013.
- [2] Ghamri imane, « Analyse et amélioration de la stabilité transitoire du réseau conventionnel après intégration d'une éolienne », Mémoire de Master université Mohamed khider Biskra, 2013.
- [3] Meghni Billel, « contribution à l'amélioration des performances d'une chaîne énergétique éolienne », These Doctorat, université Badji Mokhtar Annaba 2015.
- [4] Wikipedia
- [5] Samir bencharif, « Variation des paramètres mécaniques pour l'optimisation du rendement d'une éolienne », Mémoire de Master Université Biskra, 2013.
- [6] Etat de l'art et situation de l'éolien dans le contexte des énergies renouvelables
- [7] M. Boudia Sidi Mohammed, « Optimisation de l'évaluation Temporelle du Gisement énergétique éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie », Thèse de Doctorat de Université de Tlemcen Abou-Bakr Blekaïd, 2011.
- [8] <https://www.google.dz/search?q=%C3%A9olienne+image&biw=1366&bih=606&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=dUoWVZqkGIXxUpfSgIgF&sqi=2&ved=0CBsQsAQ>
- [9] Kairouani Riad et DariMedEl-hadi, « intégration d'une éolienne sur un réseau électrique isolé », Mémoire de Master université Ouargla, 2014.
- [10] Constructeur Gamesa Espagne
- [11] Ramdani oum elhana et Ramdani khadidja, « Etude des différents types de convertisseurs utilisés dans la production des énergies renouvelables. Application dans l'éolienne à base de GSAP », Mémoire de Master université Ouargla, 2015.
- [12] Tir Zouheir, «Contribution à l'étude d'un aérogénérateur asynchrone en cascade», Mémoire de Magister université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [13] Brihmat Fouzia, « Etude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolien », Thèse déc. Magister, université Tizi-Ouzou, 2011.

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

[15] S. Krohn (2003). Manuel de référence sur l'énergie éolienne 2ème partie : Définitions de l'énergie et de la puissance. [En ligne] <http://www.windpower.org/fr/stat/unitsene.htm#anchor691302>

[16] E. Hau, Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd ed. Springer, 2005

[17] B. Taya, L. Chaguer « énergie éolienne au Maroc » FIER'2002 Tétouan – Maroc

[18] Site Internet : <http://resosol.org/Developpement/actualite2006.html>

[19] La Presse (Tunis), 14 décembre 2006.

[20] Nachida kasbadji Merzouk, "évaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie", Mémoire de l'université Aboubekr-belkaid de Tlemcen, 2006.

[21] M. Ben medjahed, « Gisement éolien de la région côtière de Béni Saf Et son impact

Sur l'environnement » mémoire de Magister, Université AbouBekr Belkaïd Tlemcen,

Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelable URMER Tlemcen. 2008.

[22] L. Aiche Hamae A. Khellaf. « Evolution mensuelle de la ressource éolienne à travers l'Algérie », congrès sur le photovoltaïque et l'énergie éolienne (IPCWE) Tlemcen, Algérie (Novembre 2003).

[23] Site Internet : [dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/387/11/chapitre iii.pdf](dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/387/11/chapitre%20iii.pdf)

[24] Wendy Carolina Briceñovicente, « Modélisation des réseaux de distribution sous incertitudes », thèse doctora Université Grenoble 2012.

[25] Présentation caractéristiques réseau électrique école technique sonelgaz Spa le 5-01-2014

[26] Présentation identification architecture postes et lignes école technique sonelgaz Spa le 5-01-2014

- [27]Ghamri iman, « Analyse et amélioration de la stabilité transitoire du réseau conventionnel après intégration d'une éolienne », Mémoire de Master université Biskra
- [28] Kheirallah Mohamed, « Etude d'un system éolien injecte sur le réseau de transport de l'électricité », Mémoire de Master Université d'Adrar dans 26/11/2014.
- [29] Djeriri Yousef, « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle », thèse de doctora Université de Sidi-bel-abbes 2015.
- [30] J. Mglachant et C. Hiroux, « L'énergie Eolienne : Comment Insérer une Production Inflexible dans une Chaîne Désintégrée de Juste à Temps », Institut Universitaire Européen (Florence) et ADIS-GRJM Université Paris-Sud11, Refgov-IFM-61, Juin 2009.
- [31]J. F. Manwell, J. G. McGowanand et A. L. Rogers, “Wind Energy Explained–Theory, Designand Application”, John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [32] Info fournir par SKTM (Spa) filiale sonelgaz.
- [33]cegelec ADR-CTR-00-RS-001-1
- [34] era.dz/2014/wp-content/uploads/2014/11/CEEG.pdf
- [35] Lahbib et Billah, « Etude de performance d'une éolienne dans un milieu saharien en particulier station éolienne de Kabertene »,mémoire de master Université Ahmed Drarya Adrar 2016.
- [36]Cegelec ADR-CTR-00-RS-002-1
- [37] Ben Khelifa Med, « Etude et conception du montage d'une ferme éolienne dans un milieu saharien (centrale KABERTENE-ADRAR) », mémoire de master Université Ahmed Drarya Adrar 2015.

Résumé

Le vent est une source d'énergie renouvelable très répandu sur notre planète et joue un rôle important pour satisfaire une partie des besoins énergétiques de l'humanité.

la production de l'électricité en base des centrales à vent à grande échelle est prometteuse mais l'intermittence de la source primaire peut causer des fluctuations majeures dans la production. Ces fluctuations sont compensé par d'autres producteur d'énergie et cela pour maintenir la fréquence stable à 50Hz

Dans ce travail nous avons fait l'étude de l'impact de l'injection de la production de la centrale de KABERTEN Sur le réseau électrique.

المخلص

الرياح من مصادر الطاقة المتجددة الأكثر انتشارا على المعمورة والتي تلعب دورا هاما في تغطية احتياجات الطاقة.

ان انتاج الكهرباء بواسطة محطات الرياح الكبيرة يدعو لتفائل ، لكن عدم استقرار الرياح يؤدي الى تذبذبات كبيرة في الطاقة المنتجة ، هذه التذبذبات تعوض بواسطة محطات الطاقة الاخرى وهذا من اجل المحافظة على استقرار التردد (50Hz)

في هذا العمل قمنا بدراسة فعالية ادخال الطاقة المنتجة من طرف محطة الرياح المتواجدة بكابرتن في الشبكة الكهربائية