

17/621.758

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

Université 8Mai 1945 – Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrotechnique et Automatique



Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux électriques

**Mémoire de fin d'études
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

***ETUDE ET SIMULATION DE L'INTEGRATION D'UNE FERME
EOLIENNE DANS UN RESEAU ELECTRIQUE
DE DISTRIBUTION***

Présenté par : **FETISSI Selwa**
ZEDOURI Ilham

Sous la direction de : Dr. **BOULOUH.M.**



JUIN 2012

12/28/17



Remerciements

Nos remerciements à tous, premièrement à dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces années d'études.

Au Docteur Boulouh Messaoud, notre directeur de projet de fin d'étude, pour la confiance qu'il nous a accordé en nous offrant ce sujet.

A Mrs. Gouaidia Saïd, et Moussaoui Abdelkrim, des enseignants à l'université de Guelma, pour leurs aides, leurs conseils précieux, et de leurs encouragements durant la réalisation de ce travail.

Nous tenons aussi à remercier les Professeurs Bouzit Ali, Babouri Abdelslem et Lemzadmi Hasen, d'avoir accepté d'être membres du jury.

Sans oublier nos parents qui, sans eux, nous ne pouvons traverser ces longues années d'études et de travail, ainsi que toute la famille pour leurs encouragements et surtout pour leurs soutiens moraux.

Dédicaces

Avec l'aide de Dieu tout puissant, j'ai pu achever

ce travail que je dédie :

*A mes très chers parents en reconnaissance de
leurs divers sacrifices, de leurs précieux conseils, de leur
soutien moral et de leurs encouragements.*

A mes chers frères et sœurs

A toute la famille paternelle et maternelle

A tous (tes) mes amis (es)

*A ceux qui ont contribué de près ou de loin à
l'élaboration de ce modeste travail.*

Ilham



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à toutes les personnes que je connais :

A ma mère et à mon père,

A mon frère «Fateh Eddin », au beau frère « Haffa »

A mes sœurs « Samia »et « Salima »,

A ma nièce l'ange « Malek » et mon amie « coco »,

A ma tante « Arifa » et mes oncles « Bachir & Hamid »

A mes camarades associés « Ilham » et « Abdelmoumen »

A ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration

de ce modeste travail

Sans oublier le personnel d'usine d'El-Hadjar

Annaba., d'être disponible pour me remettre toutes les

données dont j'ai besoin. En particulier Mme.Boutaleb Asia,

M.Belghiche Faycel et M.Delhoum Skander.

Selwa 

Sommaire

Introduction général.....	1
---------------------------	---

Chapitre 1 : Généralité sur les réseaux électrique

I.1.Introduction	3
I.2.Le réseau électrique et son rôle	3
I.3.Les niveaux de tension	5
I.3.1.Transport et lignes d'interconnexion.....	7
I.3.2.Répartition.....	8
I.3.3.Distribution.....	8
I.4.Architecture des réseaux.....	8
I.4.1.Réseau radial	8
I.4.2.Réseau bouclé.....	9
I.4.3.Réseau mixte.....	9
I.5.Modalisation des éléments du réseau électrique.....	10
I.5.1.Générateur de puissance.....	10
I.5.2.Lignes électriques.....	10
I.5.2.1.Ligne courte.....	12
I.5.2.2.Ligne moyenne.....	13
I.5.2.3.Ligne longue.....	14
I.5.3.Transformateurs.....	15
I.5.4.Charge électrique.....	16
I.6.La Production décentralisée.....	17
I.6.1.Les différents types de production décentralisée.....	17
I.6.1.1.Les énergies non renouvelables	17
I.6.1.2.Les énergies renouvelable.....	18

Chapitre II : Etat de l'art: Etude de l'integration d'une eolienne dans un reseau electrique .

II.1.Introduction.....21

II.2.Historique.....21

II.3.Définition de l'énergie éolienne.....24

II.4.La nature de l'énergie éolienne.....24

II.5.Constitution d'une centrale éolienne.....25

II.6.Déférents composants d'une éolienne.....27

 II.6.1.Les pales.....27

 II.6.2.Le moyeu.....27

 II.6.3.L'arbre primaire.....27

 II.6.4.Le multiplicateur.....27

 II.6.5.L'arbre secondaire.....27

 II.6.6.Le générateur électrique.....28

 II.6.7.La tour.....28

 II.6.8.Le système d'orientation de la nacelle.....28

 II.6.9.Le système de refroidissement.....28

 II.6.10.Les outils de mesure du vent.....28

 II.6.11.Le système de contrôle électronique.....29

 II.6.12.Un transformateur.....29

II.7.Fonctionnement d'une centrale éolienne.....29

 II.7.1.Principe.....29

 II.7.2.L'énergie du vent.....29

 II.7.3.La vitesse du vent.....30

II.7.4.Choix d'un site éolienne.....	31
II.7.4.1.En recherche une vue dégagée.....	31
II.7.4.2.Raccordement au réseau.....	31
II.7.4.2.1.Parc éolienne.....	31
II.7.4.3.Renforcement au réseau électrique.....	31
II.7.4.4.Infrastructure.....	32
II.7.4.5.Risque liés à l'usage des données météorologique.....	32
II.8.Différents types d'éolienne.....	32
II.8.1.Turbine à axe horizontale.....	32
II.8.1.1.A rotation lente.....	33
II.8.1.2.A rotation rapide.....	33
II.8.2.Eolienne à axe verticale.....	35
II.8.3.Les avantages d'une éolienne à axe verticale.....	35
II.8.4.Les inconvénients d'une éolienne à axe verticale.....	36
II.9.Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.....	36
II.10.Contrôle de la puissance de l'éolienne.....	37
II.10.1.Contrôle à cage variable des pales.....	37
II.10.2.Régulation passive par décrochage aérodynamique.....	38
II.10.3.Régulation active par décrochage aérodynamique.....	38
II.11.Système de conversion électromécanique à base d'éolienne.....	39
II.11.1.Système à vitesse constante.....	39
II.11.2.Système à vitesse variable.....	40
II.12.Avantages et inconvénients de L'énergie éolienne.....	42
II.13.Les dispositifs de stockage de l'énergie éolienne.....	43
II.14.Application des éoliennes.....	45
II.14.1.Systèmes isolés.....	45
II.14.2.Systèmes hybrides.....	46

II.14.3.Systèmes liés au réseau.....	46
II.15.La puissance éolienne dans le monde.....	46
II.16.La puissance éolienne en Algérie.....	47
II.17.Impacte de l'intégration des générateurs éolien dans le réseau électrique.....	49
II.17.1.Impacte sur le sens du transite de puissance.....	49
II.17.2.Impacte sur la tension au point de raccordement	49
II.17.3.Impacte sur la qualité de la tension	50
II.17.4.Impact sur le plan de protection.....	50
II.17.5.Impact sur la fréquence du réseau.....	50
II.17.6.Capacité d'accueil du réseau.....	51
II.17.7.Déconnexion intempestives.....	51
II.18.Conclusion	51

Chapitre III : Simulation et résultats

III.1.Introduction.....	52
III.2.Modèle de simulation.....	52
III.3.Description de modèle.....	54
III.3.1.L'éolienne et le générateur à induction.....	55
III.3.2.Le compensateur synchrone statique.....	56
III.4.Simulation et résultat.....	57
III.4.1.Simulation à vitesse fixe.....	58
III.4.2.Simulation à vitesse variable.....	59
III.5.Conclusion	64
Conclusion générale.....	63

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

Les énergies renouvelables (énergie éolienne, énergie solaire, biomasse...) représentent la solution la plus intéressante, pour relever les défis énergétiques mondiaux. Elles sont propres et n'ont pas besoin d'aucun combustible. En outre, l'éolien et le solaire constituent une ressource indigène dont les potentiels sont suffisants pour faire face à la demande d'énergie qui est en augmentation incessante.

Par ailleurs, la production de l'énergie éolienne devient de plus en plus compétitive par rapport à l'énergie solaire, et aux combustibles fossiles traditionnels et se situe déjà aujourd'hui à égalité avec les nouvelles centrales à charbon ou à gaz.

Dans de nombreuses régions du monde, comme les Etats Unis et le Canada, l'énergie éolienne, maintenant, tend à devenir une source d'énergie de premier plan. Pendant longtemps, des préoccupations liées aux changements climatiques étaient la cause principale de la naissance du développement du domaine des énergies renouvelables, surtout dans le monde développé et tout particulièrement en Amérique du nord et en Europe. Le développement est bien vu dans les progrès technologiques et l'amélioration apportée aux capteurs des énergies est particulièrement ceux de l'énergie éolienne.

L'objet de ce travail, consiste à mener une étude générale de l'énergie éolienne et son intégration à un réseau de distribution.

Pour se faire, le présent mémoire a été réparti en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux réseaux électriques, à la modélisation de ses éléments et les différents types de la production décentralisée.

Le deuxième chapitre est dédié à l'énergie éolienne et l'étude de son intégration dans un réseau électrique.

Enfin dans le troisième chapitre, nous avons fait une simulation sous MATLAB, d'une ferme éolienne intégrée dans un réseau de distribution électrique, dans le but de déterminer la variation de la tension liée à la variation de vitesse du vent.

Le travail est achevé par une conclusion générale reflétant l'importance du développement de cette source énergétique, pour la production de l'énergie électrique.

CHAPITRE I

Généralités sur les réseaux électriques

I.1.Introduction :

Le système électrique a évolué de façon permanente depuis son apparition à la fin du XIXème siècle. A cette époque, des mini réseaux à courant continu se multipliaient, pour alimenter les charges, près des centres de consommation, selon le système Edison. Ces systèmes ont, progressivement, passé le relais aux systèmes à courant alternatif avec des transformateurs, c'est le système Tesla-Westinghouse. Puis, d'autres innovations ont vu le jour de manières chronologiques:

- l'interconnexion des systèmes à courant alternatif pour favoriser la solidarité entre systèmes nationaux et internationaux,
- l'uniformisation des vitesses des machines pour établir une fréquence commune de fonctionnement,
- le développement des grandes centrales hydrauliques,
- les améliorations technologiques des centrales thermiques et enfin
- l'apparition des grandes centrales nucléaires ont marqués les jalons les plus importants.

Dans les dernières années, les principaux changements observés sur les réseaux électriques sont liés aux nouvelles lois mondiales et aux préoccupations environnementales pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, d'après le protocole de Kyoto, et favoriser les énergies dites renouvelables, vertes ou moins polluantes, [1].

I.2.le réseau électrique et son rôle :

Un réseau d'énergie électrique est un système d'éléments interconnectés qui est conçu:

- pour convertir d'une façon continue de l'énergie qui n'est pas sous forme électrique en énergie électrique.
- pour transporter l'énergie électrique sur de longues distances.

- Pour transformer l'énergie électrique sous des formes spécifiques soumises à des contraintes bien déterminées.

Pour un consommateur, le réseau devrait idéalement vu, de l'endroit où il prend son énergie électrique, comme une source de tension alternative parfaite: c'est-à-dire une source dont l'amplitude et la fréquence sont constantes quelle que soit la charge qu'il connecte. Pour satisfaire leur clientèle, les compagnies d'électricité doivent donc s'efforcer de maintenir l'amplitude et la fréquence de la tension le plus près possible de leur valeur nominale sur tout le réseau d'énergie électrique.

Il est important de maintenir le niveau de tension près de la valeur nominale aux différents nœuds du réseau. Dans les réseaux triphasés on parle souvent de barres plutôt que de nœuds. Une barre est l'équivalent d'un nœud sur les trois phases du système. Des niveaux de tension largement inférieurs à la tension nominale provoquent une dégradation considérable de la performance des charges et provoquent aussi des surintensités de courant dans les moteurs à « induction » utilisés dans de nombreuses usines; alors que des surtensions occasionnent des bris d'équipements et des surintensités de courant dans les dispositifs constitués de matériaux ferromagnétiques saturables, en particuliers les transformateurs, et provoquent aussi une dégradation de la performance des charges.

Pour la majorité des réseaux électriques et pour le réseau Algérien en particulier, la génération de l'énergie électrique est assurée par plusieurs alternateurs synchrones situés dans différentes centrales de production. En régime permanent, ces machines tournent à vitesse constante définie comme la vitesse synchrone. Cette vitesse impose la fréquence de la tension sur le réseau.

Pour maintenir constante en régime permanent la fréquence de la tension, il

est donc essentiel que les alternateurs tournent tous à cette même vitesse. Le synchronisme des alternateurs est associé au concept de la stabilité du réseau.

I.3. Les niveaux de tension :

L'analyse des réseaux électriques a permis de distinguer la diversité des niveaux de tension au sein d'un même réseau quelque soit sa fonction, qui est le résultat du développement historique des réseaux et d'exceptionnelle longévité des équipements (certains ont une durée de vie supérieurs à 40 ans) qui fait qu'avec l'augmentation continue au cours du temps de la quantité de puissance à transporter, les exploitants des réseaux ont été contraint à augmenter le niveau de tension au fur et à mesure de l'installation de nouveaux équipements qui venaient renforcés les anciens,[2].

Les niveaux de tension sont classés dans le tableau I.1 comme suit :

Tableau 1.1 : Domaine de la tension selon la norme CEI
(Commission Electrotechnique Internationale), [2]

Domaine de tension		Valeur de la tension en Volts
Très Basse Tension	TBT	$Un \leq 50$
Basse Tension	BTA	$50 < Un \leq 500$
	BTB	$500 < Un \leq 1000$
Haute Tension	HTA	$1000 < Un \leq 50000$
	HTB	$Un > 50000$

Et selon leurs valeurs utilisées systématiquement dans les différents réseaux, on rencontre :

- Dans les réseaux de distribution on retrouve les niveaux :

BTA: 220V, 380V;

HTA: 10kV, 20kV;

- Au sein des réseaux de répartition on rencontre essentiellement de la haute tension sous la forme :

HTA: 45 kV;

HTB: 63 kV, 90kV;

- Enfin dans les réseaux de transports on rencontre uniquement de la très haute tension sous la forme :

HTB : 150kV, 220kV, 400 kV.

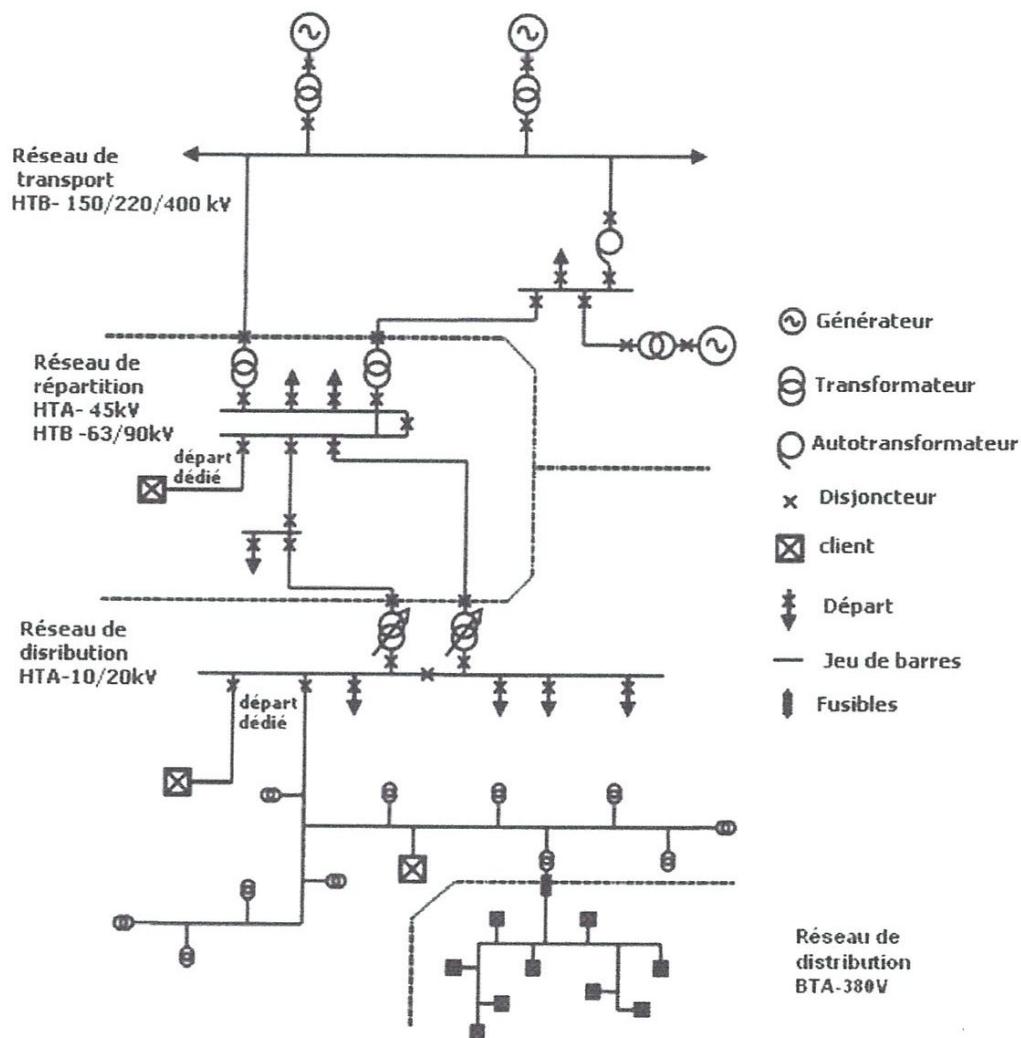


Fig.1.1 : Organisation des différents niveaux de tension du système électrique, [3].

Traditionnellement, les réseaux électriques sont décomposés en trois sous-systèmes : le transport, la répartition et la distribution. Chaque sous-système est relié par des postes sources chargés de l'adéquation des niveaux de tension.

La distinction des différents sous-systèmes se base, non seulement dans une différence de niveau de tension mais aussi dans les fonctions que chacun doit assumer :

I.3.1. Transport et lignes d'interconnexion:

Ces réseaux lient les principaux centres de production avec les zones de consommation. La tension dépend du pays, mais usuellement, le niveau de tension pour le transport est établi entre 220kV et 800 kV. Les distances géographiques entre les centres de consommation, la variabilité ou la versatilité de la charge et l'impossibilité de stocker l'énergie en grande quantité ont créé le besoin d'un système électrique capable de transmettre l'énergie électrique sur de longues distances. Ces lignes de transport et d'interconnexion peuvent avoir des milliers de kilomètres. Le réseau algérien de transport est de 18000Km et celui de distribution est de 237000Km.

Les missions des réseaux de transport sont : le transport de l'énergie, l'interconnexion nationale et l'interconnexion internationale pour échanger des puissances et favoriser la solidarité des systèmes en cas d'urgence. Le niveau de la tension doit être élevé car les pertes Joules sont inversement proportionnelles au carré de la tension ($p = k/U^2$) avec U la tension du réseau et k une constante qui dépend des lignes.

Le transport d'énergie électrique est réalisé avec des liaisons à courant continu (DC) ou à courant alternatif (AC). Les lignes AC pour les longues distances ont des inconvénients liés aux problèmes de stabilité et de compensation de l'énergie réactive pour conserver un bon niveau de tension. Les liaisons à courant continu n'ont pas ces problèmes et ont même un coût plus bas sur des distances suffisamment longues. Par contre, ils nécessitent l'utilisation de convertisseurs AC/DC et DC/AC. Enfin, les réseaux de transport sont plus ou moins maillés, avec les sections des lignes variant de 570 à 1200 mm².

I.3. 2. Répartition:

Le but de ces réseaux est d'amener l'énergie du réseau de transport aux centres de consommation d'énergie les plus importants. Ces centres de consommation sont publics ou privés (plus de 10 MVA), essentiellement des grandes agglomérations ou des concentrations d'installations industrielles qui du fait de leur importance économique doivent être alimentées en permanence. Leur niveau de tension, est souvent compris entre 45kV et 160 kV.

Le réseau est organisé normalement sous forme de boucle et avec un transit de l'énergie souvent bidirectionnel, ce qui permet d'assurer l'acheminement de l'énergie dans des conditions de sécurité raisonnablement garanties

La structure de ces réseaux est essentiellement aérienne. Par contre, lorsqu'ils sont proches des villes, les lignes deviennent des câbles enterrés.

I.3.3. Distribution:

Les réseaux de distribution acheminent l'énergie électrique du réseau de répartition (ou de transport) aux clients résidentiels et aux petits clients industriels. Les tensions des réseaux de distribution sont comprises entre 230V à 400V pour la basse tension et 4kV à 45 kV pour la moyenne tension. La structure des réseaux de distribution est bouclable et exploitée en radial. Néanmoins, certains pays disposent de réseaux maillés et avec la possibilité d'une exploitation en boucle fermée.

Le gestionnaire du réseau de transport doit planifier non seulement les générations d'énergie pour couvrir la demande prévue mais aussi les réserves pour fournir l'énergie des aléas et incidences possibles, [1].

I.4. Architecture des réseaux :

I.4.1. Réseau radial :

Le réseau radial est la forme de réseau la plus simple. Les lignes se développent en antenne en partant de la station de transformation. Tous les accès

ne sont alimentés que par une seule ligne. Ainsi, le flux de puissance n'a qu'un trajet possible. Les dépenses pour la protection de ce type de réseau sont minimales, grâce à sa structure simple. La sécurité par contre est rudimentaire, puisque une avarie sur une ligne et l'ouverture du disjoncteur concerné entraîne une interruption de service pour tous les usagers en aval. Un exemple d'un réseau radial est illustré sur la figure 1.2.

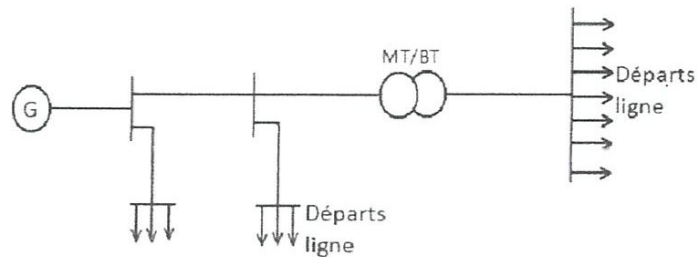


Fig.1.2.Réseau radial

1.4.2. Réseau bouclé :

C'est un réseau MT (parfois BT) dont les lignes forment une boucle. Ce type de réseau peut être alimenté par une ou plusieurs sources, ce qui augmente fortement la sécurité du service,

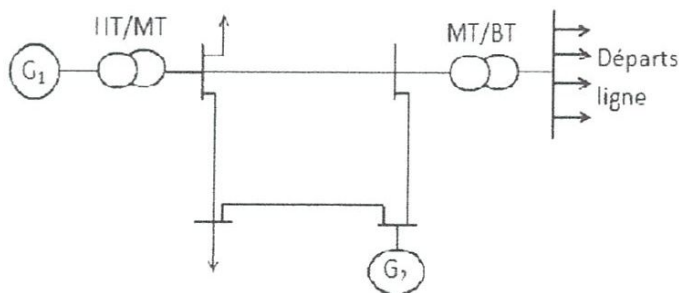


Fig.1.3.Réseau bouclé

1.4.3. Réseaux mixtes :

Un réseau mixte est un réseau beaucoup plus compliqué, on peut trouver dans ce type de réseau de différents niveaux de tensions. Des lignes de transport, d'interconnexion de distribution en boucle et en radial, un grand nombre de centrales et de postes de transformation, [2].

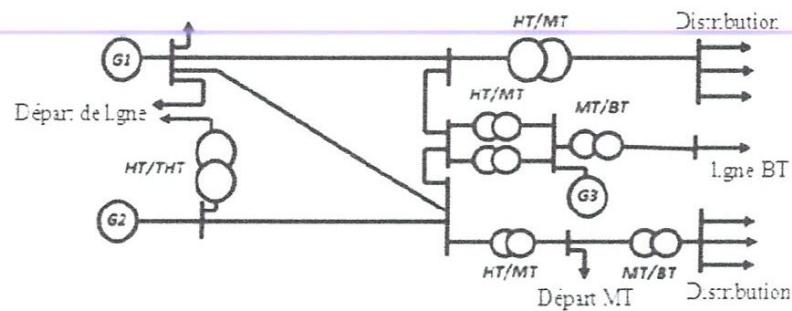


Fig.1.4. Structure d'un réseau mixte

I.5. Modélisation des éléments du réseau électrique :

Un réseau de distribution électrique contient un ensemble de composants qu'il faut modéliser pour pouvoir établir les équations qui régissent le comportement du système.

Les éléments qui interviennent dans le problème de répartition de charge sont ceux qui sont exposés à des hautes tensions et à des forts courants, à savoir : générateurs de puissance (machine synchrone), charges électriques, lignes de transports, transformateurs de puissances et compensateurs statiques.

I.5.1. Générateur de puissance :

Dans l'analyse de l'écoulement de puissance, les générateurs sont modélisés comme des injecteurs de courants. Dans l'état stationnaire, un générateur est généralement contrôlé de sorte que la puissance active (P_i) injectée au jeu de barre et la tension aux bornes du générateur soient maintenues constantes.

La puissance active du générateur est déterminée par le contrôle de la turbine, qui doit être dans la capacité du système turbine - générateur. La tension (V_i) est principalement déterminée par l'injection de la puissance réactive au jeu de barre de production, [4].

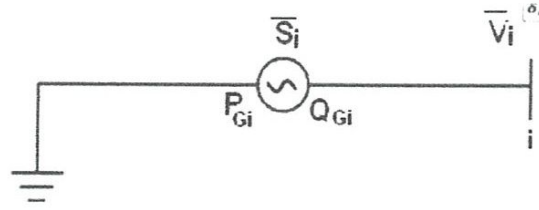


Fig.1.5.Modèles d'un générateur

Tel que :

P_{Gi} : puissance active délivrée par le générateur au jeu de barres i

Q_{Gi} : puissance réactive délivrée par le générateur au jeu de barres i

V_i : tension au jeu de barres i

δ_i : déphasage de la tension au jeu de barres i

I.5.2.Lignes électrique:

Les lignes aériennes constituent des circuits de transmission des réseaux triphasés, où les paramètres de la source (V_S, I_S) sont reliés aux paramètres de la réception (V_R, I_R) par les coefficients A, B, C et D sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Les coefficients A, B, C et D dépendent des constantes de lignes R, L, C et G

Tel que :

R : résistance qui représente les pertes par effet joule dans la ligne.

L : l'inductance dans le sens longitudinal.

C : la capacité dans le sens transversal.

G : la conductance de la ligne.

Ces coefficients sont en général des complexes, les éléments de la diagonale n'ont pas de dimension, B exprimé en ohms et C en siemens.

Ces derniers vérifient l'égalité suivante :

$$AD-BC=1 \quad (1.2)$$

Pour lever la confusion entre l'impédance (admittance) par unité de longueur et l'impédance (admittance) totale de la ligne, les notations suivantes sont utilisées :

$$z=\gamma+j\omega L \quad \Omega /m, \text{ impédance par unité de longueur.}$$

$$y=G+j\omega C \quad S/m, \text{ admittance par unité de longueur.}$$

$$Z=zl \quad \Omega, \text{ impédance totale.}$$

$$Y=yl \quad S, \text{ admittance total.}$$

La constante Γ est généralement négligeable dans le cas des lignes sans perte. On classe les lignes de transmission d'énergie en fonction de leur longueur en trois catégories : les lignes courtes, les lignes moyennes et les lignes longues.

1.5.2.1 Ligne courte :

La capacité de la ligne peut être ignorée quand celle-ci ne dépasse pas 80km, ainsi les courants de dérivation peuvent être négligés. Il s'ensuit que l'intensité du courant peut être considérée comme constante tout au long de la ligne et en particulier identique aux générateur et au récepteur. Le modèle de la ligne courte est représenté sur (fig1.6).

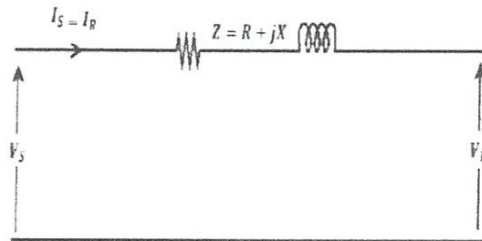


Fig.1.6. Représentation d'une ligne courte par un dipôle

Dans ce cas le système matriciel de l'équation (1.2) peut s'écrire :

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Le diagramme vectoriel correspondant est celui de la figure (1.7).

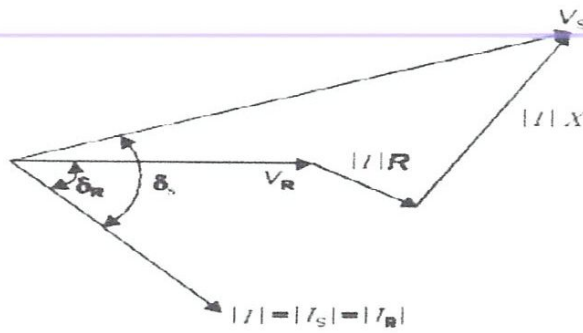


Fig.1.7. Diagramme vectoriel d'une ligne courte

Tel que :

δ_R : phase de la tension V_R .

δ_S : phase de la tension V_S .

A partir de la figure (1.7), on peut écrire :

$$|V_S| \cos(\delta_S - \delta_R) = |I| R \cos(\delta_R) + |I| X \sin(\delta_R) + |V_R| \quad (1.4)$$

$$(\delta_S - \delta_R) \ll \cos(\delta_S - \delta_R) \approx 1 \quad (1.5)$$

$$V_S = |I| (R \cos(\delta_R) + X \sin(\delta_R)) + |V_R| \quad (1.6)$$

I.5.2.2 Ligne moyenne:

Les lignes de longueur comprise entre 80km et 250km, sont considérées comme des lignes de longueur moyenne. Ce modèle doit être utilisé dès que le courant capacitif total dépasse les 3% du courant total mais ne dépasse pas les 10%. Son schéma équivalent en Π est représenté sur la figure (1.8).

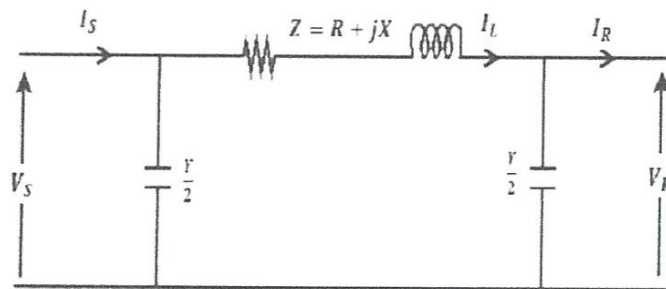


Fig.1.8.Représentation d'une ligne moyenne par un quadripôle

A partir de la figure (1.8), on écrit :

Le courant dans l'impédance série est désigné par :

$$I_L = I_R + Y/2 \cdot V_R \quad (1.7)$$

La tension à la réception est :

$$V_S = V_R + Z I_L \quad (1.8)$$

A partir des équations (1.7) et (1.8) on obtient :

$$V_S = (1 + Z Y/2) V_R + Z I_R \quad (1.9)$$

Le courant de source est :

$$I_S = I_L + (Y/2) V_S \quad (1.10)$$

Les équations (1.7), (1.9) et (1.10) nous donnent :

$$I_S = Y (1 + Z Y/4) V_R + (1 + Z Y/2) I_R \quad (1.11)$$

Les équations (1.9) et (1.11) peuvent être écrites sous forme :

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + ZY/2) & Z \\ Y(1 + ZY/4) & (1 + ZY/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

Avec :

$$A = (1 + Z Y/2) [\text{pu}] \quad , \quad B = Z [\Omega] \quad , \quad C = (1 + Z Y/4) [\text{S}] \quad , \quad D = (1 + Z Y/2) [\text{pu}]$$

1.5.2.3. Ligne longue :

Pour des longueurs de lignes courtes et moyennes, les modèles ont été obtenus en supposant que les paramètres de la ligne sont des valeurs exactes. Dans le cas où la longueur de la ligne est supérieure à 250km pour des solutions plus précises les paramètres doivent être donnés comme une distribution Uniformément répartie le long de la longueur, dans ce cas les tensions et les courants vont variés d'un point à l'autre le long de la ligne. La figure (1.9) montre un schéma bifilaire d'une ligne par unité de longueur, [5].

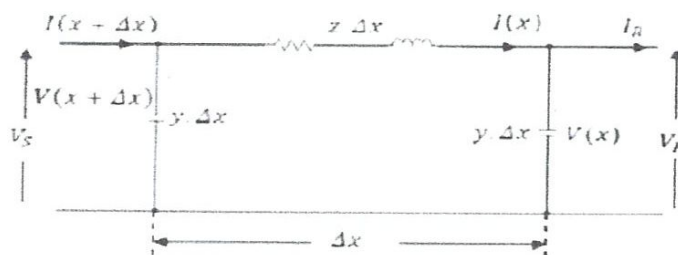


Fig.1.9. Schéma bifilaire d'une longue ligne avec les paramètres par unité de longueur

A partir de la figure (1.9) nous avons obtenue les équations suivantes :

$$V(x+\Delta x) = V(x) + (Z\Delta x) I(x) \quad (1.13)$$

$$I(x+\Delta x) = I(x) + (Y\Delta x) V(x+\Delta x) \quad (1.14)$$

$$V(x) = \cosh(\gamma x) V_R + Z_C \sinh(\gamma x) I_R \quad (1.15)$$

$$I(x) = 1/Z_C \sinh(\gamma x) V_R + \cosh(\gamma x) I_R \quad (1.16)$$

Avec:

La constant de propagation : $\gamma = \sqrt{ZY} \text{ m}^{-1}$

Impédance caractéristique de l'onde : $Z_C = \sqrt{Z/\gamma} \ \Omega$

Les équations (1.15) et (1.16) peuvent être écrites sous forme :

$$\begin{bmatrix} V(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(x) & B(x) \\ C(x) & D(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

D'ou :

$$A(x) = D(x) = \cosh(\gamma x) \text{ pu}$$

$$B(x) = Z_C \sinh(\gamma x) \ \Omega$$

$$C(x) = 1/Z_C \sinh(\gamma x) \text{ S}$$

I.5.3. Transformateurs:

Les transformateurs sont des équipements entièrement statiques, utilisés pour modifier la présentation de l'énergie électrique alternative (courant, tension) afin de la rendre aussi commode que possible aux différents stades de la production, transport, de distribution et de consommation.

Un transformateur inséré dans une branche peut être représenté par un autotransformateur idéal et une admittance série comme le montre la figure (1.10) en schéma monophasé équivalent:

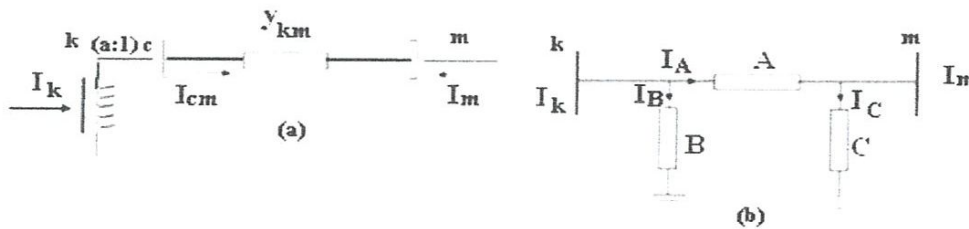


Fig.1.10.Schéma monophasé d'un transformateur de puissance

Tel que :

$$I_k = (V_k - aV_m) Y_{km}/a^2$$

$$I_m = (-V_k + aV_m) Y_{km}/a$$

A la base de ces courants, on peut déterminer les paramètres complexe A, B, C tels que :

$$A = Y_{km}/a \quad B = Y_{km} (1 - 1/a) (1/a) \quad C = Y_{km} (1 - 1/a) \quad (1.13)$$

Dans le cas particulier où $a=1$:

On obtient :

$$A=1 \quad C=0 \quad B=0$$

La présence du transformateur dans la branche modifiée les paramètres complexes du schéma PI équivalent à la branche et devient dissymétrique, [6].

1.5.4.Charge électrique :

La charge électrique est souvent modélisée sous forme d'une impédance constante. La plupart des charges représentent une sous-station (système de distribution). Ces charges sont connectées au réseau électrique à travers un transformateur à prises de charges variables, où le niveau de tension de la charge est maintenu pratiquement constant. Dans ce cas, les puissances actives et réactives de la charge peuvent être représentées par des valeurs constantes, [4].

les turbines à gaz, peuvent aussi être utilisés pour générer à la fois de l'électricité et de la chaleur. On parle alors de cogénération. Ces systèmes permettent d'avoir un rendement global très proche de l'unité. Il est cependant nécessaire d'utiliser la chaleur produite dans un lieu proche de la centrale (chauffage urbain par exemple).

b).L'hydrogène :

Le gaz dihydrogène, vecteur énergétique produit par électrolyse de l'eau ou par réaction chimique, peut être utilisé pour générer de l'électricité dans des piles à combustible par réaction avec le dioxygène.

1.6.1.2. Les énergies renouvelables :

Les sources d'énergies renouvelables se prêtent bien à la construction de production décentralisée. Mis à part pour les grands barrages et les champs d'éoliennes de grande superficie, les sources d'énergie renouvelables sont souvent dispersées géographiquement et ne permettent une production électrique que de faible puissance. Les principales sources sont :

a).Energie solaire :

On décompose les procédés utilisant l'énergie solaire en :

• Solaire photovoltaïque :

Les générateurs photovoltaïques sont des systèmes qui transforment directement l'énergie solaire en énergie électrique, Les photons présents dans le rayonnement solaire transportent l'énergie de celui-ci. Le principe d'une cellule photovoltaïque est donc de convertir cette énergie à travers un matériau semi-conducteur en énergie électrique.

• Solaire thermique:

Les capteurs solaires bas températures fournissent l'eau chaude sanitaires et plus généralement le chauffage des habitations.

b).Energie hydraulique :

Les centrales hydrauliques fonctionnent grâce à l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau des rivières, des lacs ou des fleuves. Celle-ci est transformée

en énergie électrique par un alternateur entraîné par une turbine mue par la force de l'eau qui est due soit à la hauteur de chute dans le cas de centrales alimentées par une conduite forcée, soit au débit dans le cas de centrales au fil de l'eau.

c).Biomasse :

Les déchets agricoles, urbains renouvelables, biogaz et déchets issus de l'exploitation forestière peuvent être utilisés dans des centrales thermiques pour générer de la chaleur, puis de l'énergie électrique. L'intérêt majeur est que le dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère est compensé par celui absorbé par la repousse de la biomasse. Le bilan carbone est donc proche de zéro. Cette technologie est de plus en plus utilisée dans les zones rurales.

d).Géothermie :

Le principe consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol. Classiquement, trois types de géothermie sont distingués selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

- la géothermie à haute énergie qui exploite des sources hydrothermales très chaudes. Cette géothermie est surtout utilisée pour produire de l'électricité.
- la géothermie de basse énergie : géothermie des nappes profondes (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures situées entre 30 et 100°C. La principale utilisation est appliquée pour les réseaux de chauffage urbain.
- la géothermie de très basse énergie : géothermie des faibles profondeurs aux niveaux de température compris entre 10 et 30°C. Sa principale utilisation est le chauffage et la climatisation individuelle.

e).Les éoliennes :

Une éolienne convertit l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Pour se faire, l'énergie du vent est captée par les pales qui transforment l'énergie cinétique en couple mécanique que la génératrice convertit ensuite en électricité. Ce type de production est intermittent et ne permet pas de fournir une puissance constante et garantie mais dépendante des ressources captables. La

puissance délivrée par une éolienne est de l'ordre du mégawatt et il est d'usage d'exploiter cette énergie en mutualisant les puissances fournies par plusieurs éoliennes voisines, on parle alors de « ferme » éolienne ou de « parc » éolien, [1].

I.7. Conclusion:

Ce premier chapitre permet d'avoir une idée générale sur les réseaux électriques. En premier lieu, on y fait connaissance des systèmes de transport, de répartition et de distribution d'énergie électrique. Une description de la structure du réseau actuel permet de comprendre les mécanismes d'acheminement de l'électricité aux consommateurs et les contraintes associées.

En deuxième lieu, on a étudié la modélisation des différents composants du réseau électrique (générateurs, lignes, transformateurs et charges électriques), pour pouvoir donner les équations qui régissent l'effet du système.

Enfin, nous avons traité les différents types de la production décentralisée qui est la nouvelle technologie examinée dans les dernières années sur les réseaux de la distribution électrique.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude de l'énergie éolienne et son intégration dans un réseau électrique.

CHAPITRE III
Etat de l'art:
Etude de l'intégration
d'une éolienne
dans un réseau électrique

II.1.Introduction :

Les besoins énergétiques de la planète s'amplifient à une vitesse croissante dans toutes les régions du monde. La dépendance excessive vis-à-vis des importations d'énergie par des pays, pour la plupart instables politiquement, en provenance des pays producteurs et la volatilité des prix du pétrole et du gaz se traduisent par une situation chancelante de l'approvisionnement énergétique qui représente déjà un lourd fardeau pour l'économie mondiale. D'autre part les effets néfastes des combustibles fossiles sur l'environnement ajoutent une autre dimension de ce problème. Les usines d'énergie chargent l'atmosphère en gaz qui génèrent les effets de serre et des particules créant ainsi des îlots de chaleur, cause principale des changements climatiques. La génération et la consommation d'énergie sont responsables de 50 à 60 pour cent des gaz à effets de serre émis dans l'atmosphère.

L'utilisation intense d'énergie augmente la pollution atmosphérique ce qui laisse penser la croissance supplémentaire dans le proche avenir. Delà vient l'importance de soutenir des sources d'énergie comme celle du vent.

L'historique de la conversion de l'énergie du vent et son présent statut ainsi que ses perspectives futures seront discutés dans les sections qui suivent.

II.2.Historique :

Le mot "Éolienne" tire son origine du mot grec "Éole", qui représente, dans la Grèce antique, le nom du dieu des vents.

Les premières utilisations de l'énergie éolienne connues remontent vers les années 2000 avant J. C. On note les premières traces de ces machines au Moyen Orient au temps de *Hammourabi* empire d'Egypte, et en Chine ainsi qu'elles apparaissent aussi en Inde vers les années 400 avant J. C. Le moulin à vent est l'ancêtre de l'éolienne (Fig.2.1.). Il est apparu au Moyen- Orient et en Europe. Il est du type à axe vertical dans les premiers temps, puis, il est muni de voiles qui s'orientent vers le sens du vent pour mieux capter l'énergie. (Fig.2.2.).



Fig. 2.1. Photographie de deux moulins à vent

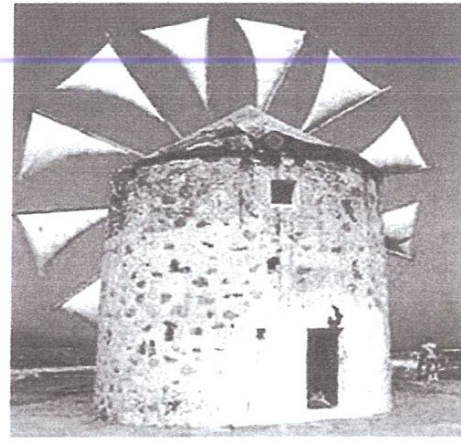


Fig.2.2. Photographie d'un moulin à voile

Au douzième siècle, le premier moulin à pales profilées est apparu. Bien que très simple, il s'agit de la première tentative de recherche aérodynamique des pales. Il est utilisé principalement pour le pompage de l'eau ou pour moudre les grains.

À la renaissance, les chercheurs célèbres tels que *Léonard de Vinci* s'intéressent au moulin à vent, ce qui conduit à de nombreuses innovations qui se succèdent sur cette machine. Dès lors, les moulins se multiplient de plus en plus en Europe puis après ils se répandent un peu partout dans le monde.

La révolution industrielle offre un Nouveau départ aux moulins par l'apparition de nouveaux matériaux. En effet, l'utilisation du métal permet de modifier les formes des tours et d'augmenter considérablement le rendement des machines que l'on nomme désormais « éoliennes » (Fig.2.3.)



Fig. 2.3. Moulin à vent

L'avènement de l'électricité au XX^{ème} siècle fait place aux premiers modèles d'éoliennes modernes (Fig.2.4.). Le progrès technologique dans le domaine aéronautique a poussé à l'apparition de nouvelles générations d'éoliennes utilisant des caractéristiques inspirées de la théorie de profil des ailes d'avion.

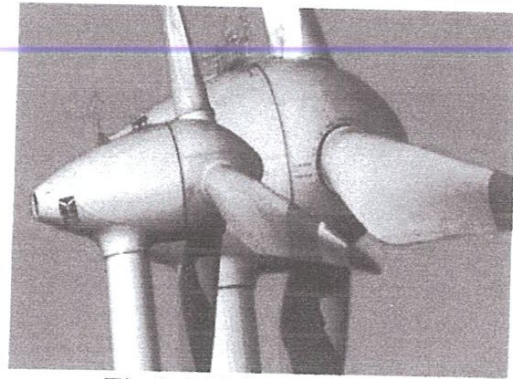


Fig.2.4. Eolienne moderne

Puis on a assisté à une longue éclipse dans ce domaine. Le regain d'intérêt, notamment pour les aérogénérateurs et le retour à ce domaine d'énergie, coïncide avec la crise du pétrole qui est survenue vers les années 70. Deux facteurs permettent de mettre fin à cette éclipse:

- La crise énergétique, qui a débuté en cette période, est engendrée par l'embargo pétrolier de l'année 1973.
- La connaissance des gisements éoliens: on s'est aperçu que le potentiel éolien était considérable.

D'après *R. Geothals* on sait que, l'extraction de seulement 10% de ce potentiel correspondrait à environ en moyenne vingt fois la consommation énergétique mondiale.

Depuis les années 1990 le progrès de la technologie des éoliennes a permis de construire des aérogénérateurs de plus de 1 MW. En effet on en retrouve aujourd'hui dans plusieurs pays. Ces éoliennes servent aujourd'hui à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur nucléaire, un barrage hydro-électrique ou une centrale thermique au charbon. Cependant, les puissances générées et les impacts sur l'environnement ne sont pas les mêmes.

L'énergie éolienne peut être utilisée de deux manières :

- Conservation de *l'énergie mécanique*: le vent est utilisé soit pour faire avancer un véhicule (Navire à voile ou char à voile) soit pour pomper de l'eau (moulins de

Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.

- Transformation en *énergie électrique* : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour générer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie, [7].

II.3. Définition de l'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur (Fig.2.5), [8].

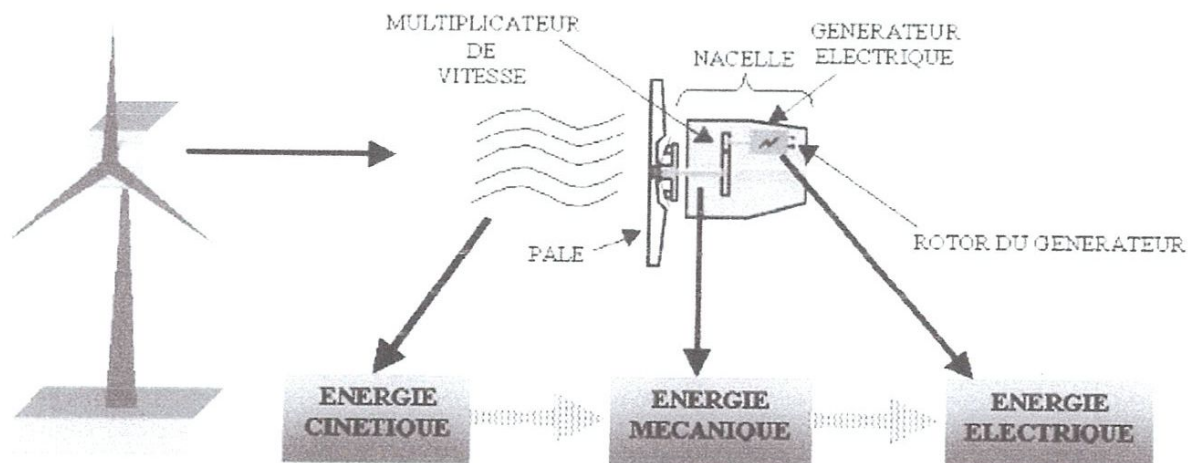


Fig. 2.5. Conversion de l'énergie cinétique du vent, [8].

II.4. La nature de l'énergie éolienne :

Tout comme l'énergie qui se trouve dans les combustibles fossiles, les énergies renouvelables (sauf les énergies marémotrice et géothermique) sont dérivées de l'énergie solaire. En effet, le soleil émet chaque heure quelque 174.423.000.000.000 kilowattheures d'énergie à notre planète. La terre reçoit, en d'autres termes, une puissance équivalente à $1,74 \times 10^{17}$ W. Environ un à deux pour cent de l'énergie émise

par le soleil est convertie en énergie éolienne. C'est entre 50 et 100 fois plus que l'énergie transformée en biomasse par l'ensemble des végétaux de la terre.



Fig.2.6 : a) le réchauffement de la terre

b) les forces de Coriolis

Le soleil réchauffe les régions situées autour de l'équateur bien plus qu'il ne réchauffe les autres parties du globe. Sur la figure (2.6-a-) les régions chaudes sont marquées en rouge, orange et jaune ayant un air à une densité plus faible que l'air des régions froides, alors l'air chaud s'élève jusqu'à une altitude de 10 Km ensuite, il s'étend vers le nord et le sud dans la haute atmosphère. Dans les deux hémisphères, à approximativement 30 degrés de latitude. La force de Coriolis empêche les courants d'aller beaucoup plus loin. L'air recommençant de redescendre à cette altitude, crée ici une zone de haute pression (appelée aussi un anticyclone). Lorsque l'air s'élève à l'équateur, il se crée au niveau du sol une zone de basse pression attirant des masses d'airs du Nord et du Sud. Le mouvement de ses masses d'air entre les deux zones constitue le phénomène général des vents à la surface de la planète.

- **la force de Coriolis** : A cause de la rotation de la terre, tout mouvement dans l'hémisphère Nord semblera se dévier vers la droite si nous l'observons depuis la terre (dans l'hémisphère Sud, les mouvements sont déviés vers la gauche). En appelle cette force de déviation la Force de Coriolis (d'après le mathématicien Français Gustave Gaspard Coriolis 1792-1843). Figure (2.6-b-), [9].

II.5.Constitution d'une centrale éolienne :

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux :

- **La tour:** elle doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Étant donné que la vitesse du vent augmente lorsque l'on s'éloigne du sol, une tour peut mesurer entre 50 et 80 m de haut. La tour à la forme d'un tronc en cône ou, à l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle.
- **La nacelle :** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le générateur qui est généralement une machine synchrone (MS) ou asynchrone (MAS) et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales. A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.
- **Le rotor :** formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

Les dimensions d'une éolienne sont beaucoup plus grandes qu'on l'imagine. La tour peut atteindre jusqu'à 80mètre avec une nacelle qui peut avoir des longueurs énormes selon la quantité d'énergie que l'éolienne est susceptible de récolter en une année. La figure 2.7 nous montre la puissance suivant le diamètre de l'éolienne, [10].

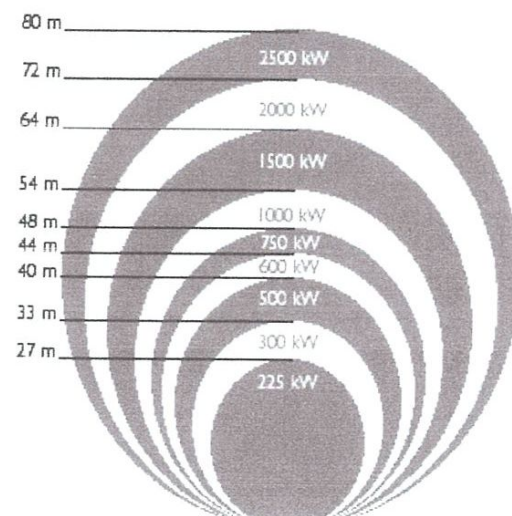


Fig.2.7. Puissance suivant le diamètre de l'éolienne.

II.6. Différents composants d'une éolienne :

1. Les pales
- 2- Le moyeu
3. L'arbre primaire
4. Le multiplicateur
5. L'arbre secondaire
6. Le générateur électrique
7. Le mat
8. Le système d'orientation de la nacelle
9. Le système de refroidissement
10. Les outils de mesure du vent (girouette et anémomètre)
11. Le système de contrôle électronique
12. Un transformateur

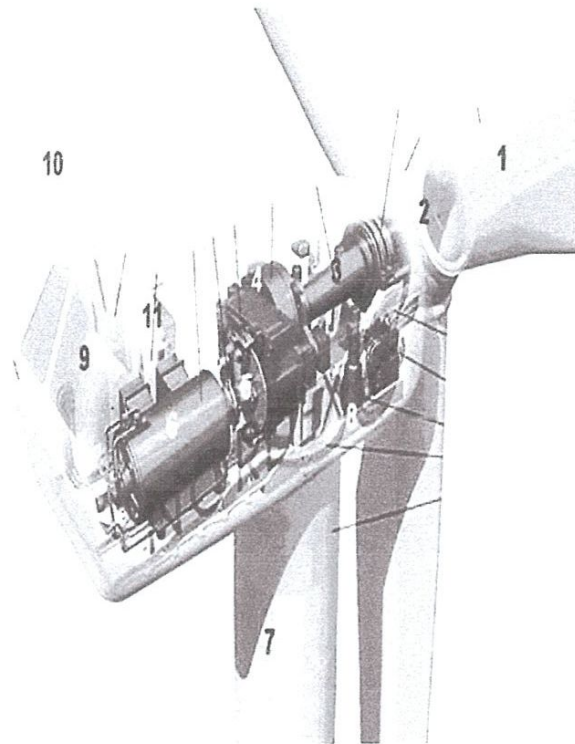


Fig.2.8. Les composantes de l'aérogénérateur

II.6.1. Les pales : Elles captent le vent et transfèrent sa puissance au moyeu du rotor. Chaque pale d'une éolienne de 1.000KW mesure environ 27m de long et sa conception ressemble beaucoup à celle des ailes d'un avion.

II.6.2. Le moyeu : C'est celui du rotor et il est fixé à l'arbre lent de l'éolienne qui le lie au multiplicateur. Le rotor de l'éolienne moderne de 1.000KW tourne assez lentement environ 20 tours/min. l'arbre lent contient des tuyaux pour le système hydraulique permettant l'opération des freins aérodynamiques.

II.6.3. L'arbre primaire : (ou arbre lent) : relie les pales au multiplicateur.

II.6.4. Le multiplicateur : Il est situé à droite de l'arbre lent. Il fait tourner l'arbre rapide à une vitesse 75 fois supérieure à celle de l'arbre lent.

II.6.5. L'arbre secondaire : (l'arbre rapide): Il tourne à environ 1.500 tour/min et entraîne la génératrice électrique. Il est muni d'un frein mécanique à disque actionné

en cas d'urgence- lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

II.6.6. Le générateur électrique : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.

II.6.7. La tour : Elle supporte la nacelle et le rotor de la turbine. Elle est assez élevée (50m à 80m), pour exploiter les vents les plus fortes en altitude. Il existe plusieurs types de tour : en autoporteur, en tubulaire d'acier, en treillis ou bien une Tour massive en béton. A l'intérieur de la tour se trouve une échelle qui permet d'accéder à la nacelle pour l'entretien.

II.6.8. Le système d'orientation de la nacelle : Il utilise des moteurs électriques pour pivoter la nacelle et le rotor de sorte que celui-ci soit toujours orienter face au vent. Le dispositif d'orientation est contrôlé par le système contrôle - commande qui enregistre la direction du vent grâce aux signaux émis par la girouette.

II.6.9. Le système de refroidissement : il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice. Il contient un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice. En plus, le système comporte un refroidisseur d'huile destinée à refroidir l'huile de la génératrice.

II.6.10. Les outils de mesure du vent (girouette et anémomètres) : Ils sont utilisés pour mesurer la vitesse et la direction du vent respectivement. Les signaux électroniques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système contrôle – commande de l'éolienne pour la démarrer lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5m/s. le système de commande arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieur à 25m/s. le système contrôle - commande utilise les signaux de la girouette pour orienter l'éolienne dans la direction du vent à l'aide du dispositif d'orientation

II.6.11. Le système de contrôle électronique : Il comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation. En cas de défaillance (exemple surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice) le système arrête automatiquement l'éolienne et il le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique.

II.6.12. Un transformateur : il se trouve au pied de la tour, [9]

II.7. Fonctionnement d'une centrale éolienne :

II.7.1. principe :

Le principe de base de l'éolienne est de capter l'énergie mécanique du vent en vue de la transformer en énergie électrique et pour cela il faut lever bien haut l'éolienne pour qu'elle puisse profiter au maximum du vent. Ceci nécessite une tour toujours élevée par rapport à la taille de l'éolienne

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne. Ce couplage mécanique peut être soit direct si turbine et génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire.

II.7.2. L'énergie du Vent :

La quantité d'énergie susceptible d'être convertie en électricité par une éolienne dépend avant tout de la vitesse du vent.

L'énergie transportée par le vent varie avec le cube de la vitesse moyenne du vent. Ainsi, le doublement de la vitesse du vent correspond à une augmentation de sa capacité énergétique de 2^3 , $2*2*2=8$ fois, mais comment cela se fait-il ?

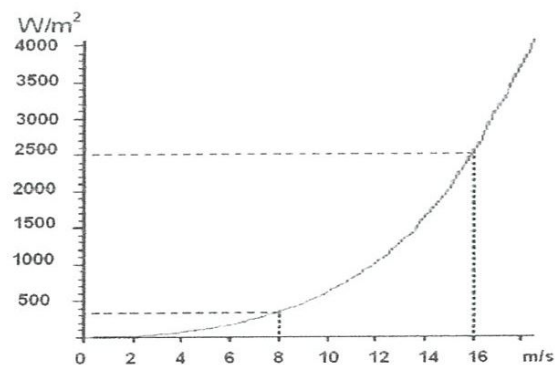


Fig.2.9. La vitesse du vent par rapport à l'énergie récoltée.

En effet, une éolienne capte l'énergie en freinant le vent. Un doublement de la vitesse du vent entraînera donc le passage du vent deux fois plus de disque d'air à travers le rotor par seconde, chaque disque transportant quatre fois plus d'énergie.

La courbe nous montre qu'à une vitesse de 8 m/s, la puissance sera de 314 Watt/m² si le vent souffle d'une direction perpendiculaire à la surface balayée par le rotor. A 16 m/s, la puissance augmente de 8 fois soit 2.509 Watt/m².

II.7.3. La vitesse du vent :

Elle se fait le plus souvent par l'emploi d'un anémomètre à coupelles comme celui de la figure dessous. Un tel anémomètre est muni d'un rotor, de trois coupelles qui sous l'effet du vent se met à tourner autour d'un axe vertical. En général, l'anémomètre est doté d'une Girouette indiquant la direction du vent. Au lieu des coupelles, il peut être muni d'une hélice une solution qui est cependant assez rare.



Tant que la vitesse du vent est en dessous de la vitesse seuil ou de démarrage (4m/s), les pâles sont en drapeau (la surface de ces derniers est perpendiculaire à la direction du vent) et le système est à l'arrêt. A la vitesse 4m/s détectée par l'anémomètre, le système contrôle- commande donne un signal au dispositif d'orientation pour tourner la nacelle dans la direction face au vent.

La puissance cinétique totale à travers un disque éolien de rayon R (en m) fait appelle à la relation suivante :

$$P_{\text{vent}} = 1/2 \rho \cdot A \cdot V_{\text{vent}}^3$$

ρ : densité de l'air. Celle-ci est de 1.225 kg/m³.

V_{vent} : la vitesse du vent (m/s).

A : surface rotorique (m²).

Cette puissance ne peut être totalement captée.

La loi de betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de $16/27$ ou 59% de l'énergie cinétique continue dans le vent, [9].

II.7.4. Choix d'un site éolien:

Le seul fait d'observer la nature constitue une aide excellente lors de l'indentification d'un bon site éolienne. Ainsi, les arbres et les buissons peuvent servir d'un bon indicateur de la direction des vents dominants. Dans la zone en question de plus. Les données météorologiques seront probablement le meilleur guide. S'il y'a déjà des éoliennes dans le coin, leur production d'électricité constitue un indicateur excellent de la source éolienne locale. Pour choisir un site, on doit respecter plusieurs facteurs qui sont :

II.7.4.1. En recherche 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'obstacle et une rugosité aussi faible que possible dans cette direction.

II.7.4.2. Raccordement au réseau :

Un parc éolien doit évidemment être raccorder au réseau électrique. Lorsqu'il s'agit de projet éolienne de moindre envergure, il faut que l'éolienne soit installé relativement près d'une ligne électrique de 10 à 30 kV afin d'éviter que les coûts de pose de nouveaux câbles ne soient exorbitants. Les génératrices des grandes éoliennes modernes produisent l'électricité à 690V. Un transformateur situé à l'intérieur de sa tour, convertit l'électricité en haute tension.

II.7.4.2.1. Parc éolien : site équipé de plusieurs aérogénérateurs reliés au réseau électrique. On parle aussi de *ferme éolienne*. Les parcs éoliens peuvent être installés sur la terre ferme ou dans la mer (parcs *offshore*).

II.7.4.3. 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 raccordés au réseau, il est possible de le renforcer en posant un câble qui sera raccordé plus près d'une station de transformation à haute tension.

II.7.4.4. Infrastructure :

Lors de l'élaboration d'un projet d'éoliennes, 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.7.4.5. Risque liés à l'usage des données météorologiques :

Les météorologues recueillent des données météorologiques pour leurs prévisions du temps et pour l'aviation, et très souvent, ces données sont également utilisées pour évaluer les conditions éoliennes dans une région déterminée. Les mesures de la vitesse du vent sont importantes pour calculer l'énergie éolienne. Il est très difficile de faire deux estimations de la ressource éolienne sur un site donné même lorsque celui-ci est situé à proximité d'une station météo. En risque dans la plus part des cas de sous estimer le potentiel éolien si l'on se sert des données météorologiques sans les ajuster pour le site en question, [9].

II.8. Différents types d'éolienne (classification):

La classification se fait selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe deux types :

II.8.1. Turbine à axe horizontal :

La plus grande partie de la technologie éolienne se réfère aux éoliennes à axe horizontal. La raison est bien simple: aujourd'hui les éoliennes commerciales raccordées au réseau sont construites avec un rotor de type hélice monté sur un axe horizontal (c'est-à-dire arbre principal horizontal). La finalité du rotor est évidemment de convertir le mouvement linéaire du vent en énergie rotative susceptible d'entraîner une génératrice. Les éoliennes à axe horizontales sont de conceptions simples et ont un meilleur rendement par rapport à l'énergie maximum récupérable sur un arbre, appelé

limite de Betz. Le tableau suivant propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice.

Tableau 2.1. Classification des turbines éoliennes

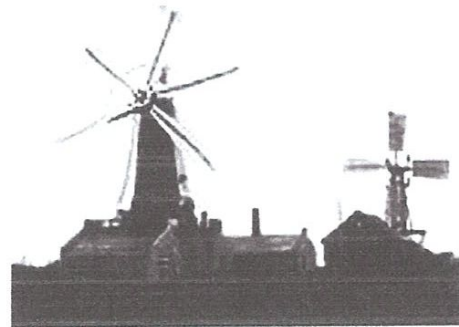
Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12m	Moins de 40kw
Moyenne	De 12m à 45m	De 40kw à 1mw
Grande	46m et plus	1mw et plus

Sur la base du nombre de pâles que compte l'hélice, on peut distinguer deux groupes d'éoliennes à axe horizontal:

II.8.1.1. A rotation lente:

Les éoliennes à rotations lentes qui, depuis longtemps, sont relativement répandues dans les campagnes. Elles sont constituées par un ou plusieurs anneaux concentriques (roues multiples à jantes) sur lesquelles sont disposées des ailettes.

Le nombre de celles-ci varie entre 20 et 40. Par suite de leur inertie importante, leur comportement lors de la rafale de vent fait que leur diamètre reste limité, au maximum à 8 mètres.



II.8.1.2. A Rotation Rapide:

Selon le nombre des pâles, on distingue trois conceptions :

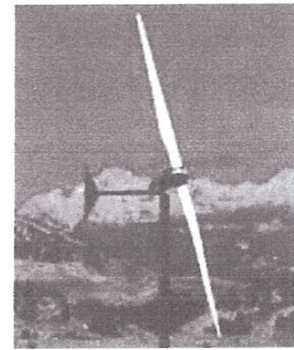
a)- Conception tripales:

La plupart des éoliennes modernes sont tripales. Le rotor maintenu dans une position face au vent par un mécanisme d'orientation actionné par des moteurs électriques. La plus grande majorité des éoliennes vendues sur le marché mondial sont de cette conception. Une caractéristique de cette conception est l'emploi d'une génératrice asynchrone (GAS).

**b)- Conception bipale (avec un rotor basculant):**

L'avantage des éoliennes bipales par rapport à leurs cousines tripales est le fait qu'elles permettent d'économiser le coût d'une pale ainsi que le poids de celle-ci. Les éoliennes bipales ont cependant certaines difficultés à pénétrer le marché, entre autre

parce qu'il faudra une vitesse de rotation bien plus élevée pour produire la même quantité d'énergie qu'une éolienne tripale. Ce qui constitue un inconvénient tant à l'égard de bruit que l'impact visuel. Ces derniers temps, plusieurs fabricants d'éoliennes bipales ont choisi de passer à la production de celles tripales.

**c)- Conception monopale:**

Il existe également des éoliennes monopales et elles permettent effectivement d'économiser le coût d'une pale de plus. Une chose est sûr: s'il est possible de construire quelque chose, les éoliennes monopales sont assez rares pour les mêmes raisons que celles citées pour les bipales. Les problèmes étant cependant encore plus prononcés que dans le cas des éoliennes bipales.



II.8.2. Eolienne à axe verticale:

Les éoliennes à axe vertical ressemblent un peu aux roues hydrauliques. En fait, certaines pourraient également fonctionner à axe horizontal mais il est probable qu'elles soient aussi efficaces qu'une éolienne munie d'un rotor du type hélice. Il y'a deux types d'éolienne à axe vertical: celle de Darrieus et de Savanius

a)-L'éolienne de Darrieux:

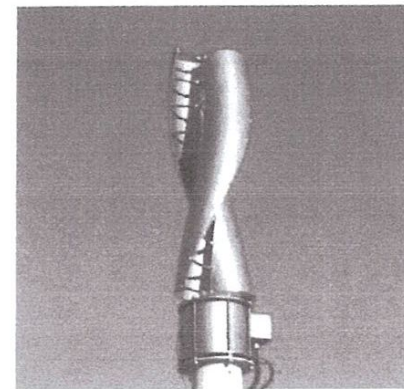
La seule éolienne à axe vertical qui n'ait jamais fabriqué commercialement est l'éolienne de Darrieus nommée d'après l'ingénieur Français George Darrieus qui breveta la conception en 1931.

Cette éolienne est caractérisée par ses pales de rotor en forme C qui la font ressembler un peu à un fouet à œufs.



b)- L'éolienne de Savanius:

Ne permettent pas de développer de grandes puissances et n'ont qu'un faible rendement, ne dépassant pas 50% de la limite de Betz. De ce fait, elles ne connaissent pas un grand Développement



II.8.3. Les avantages d'une éolienne à axe verticale:

1. La possibilité de placer la génératrice et le multiplicateur à la terre et inutile de munir la machine d'une tour.
2. Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction de vent.

II.8.4. Les inconvénients d'une éolienne à axe verticale:

1. Les vents sont assez faibles à proximité de la surface du sol.
2. L'efficacité globale des éoliennes à axe verticale n'est pas impressionnante, [9].

II.9. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne :

Les objectifs de la régulation sont d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts et de limiter la puissance. Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance dénommée puissance nominale P_n . la puissance P_n est obtenue à partir d'une vitesse du vent V_n , dénommée vitesse nominale. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à V_n la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante. Accoté de la vitesse nominale V_n , on spécifié aussi :

- La vitesse de démarrage, V_d (estimée à 4 m/s) à partir de la quelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie.
- La vitesse maximale du vent, V_m , pour la quelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour les raisons de sûreté de fonctionnement.

Les vitesses V_n , V_d et V_m définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent.

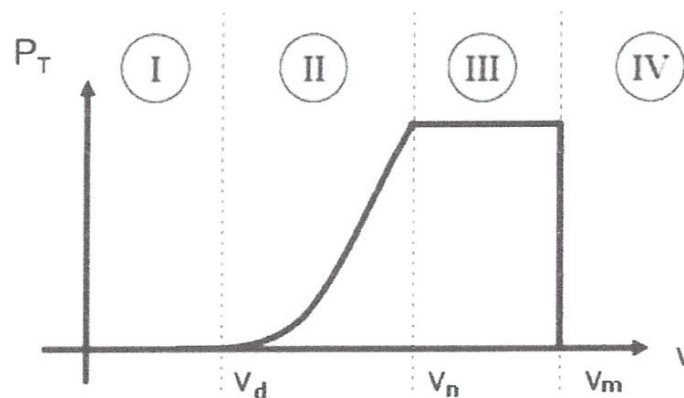


Figure 2.10. Zones de fonctionnement d'une éolienne

- La zone I : vitesse de vent inférieur à 4 m/s, où $P=0$: attente (la turbine ne fonctionne pas)

- La zone **II** : vitesse de vent de 4 m/s à 14 m/s, dans la quelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent : production nominale jusqu'à atteindre la puissance nominale.
- La zone **III** : vitesse de vent de 14m/s à 25 m/s, ou la vitesse de rotation est maintenue constante, la régulation limitant la puissance à la puissance nominale.
- La zone **IV** : vitesse de vent supérieur à 25 m/s, le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie (arrête de l'éolienne).

II.10.contrôle de la puissance de l'éolienne :

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible. Par conséquent, les éoliennes sont en générale construites de manière à atteindre leurs performances maximales à une vitesse de vent environ 15m/s. il est en effet inutile de concevoir des éoliennes qui maximalisent leur rendement à des vitesses du vent encore plus élevées. Celles-ci étant peu fréquentées.

En cas de vent supérieur à 15m/s, il est nécessaire de perdre une partie d'énergie supplémentaire contenue dans le vent afin d'éviter tout endommagement de l'éolienne. Toutes les éoliennes sont donc conçues avec un système de régulation de la puissance. Il y'a trois manières différentes de contrôler en toute sécurité la puissance d'une éolienne moderne :

II.10.1.contrôle passive à calage variable des pales :

Sur une éolienne contrôlée à calage variable (appelée aussi une éolienne à pas variable) le contrôleur électronique vérifie plusieurs fois par seconde la puissance de sortie de l'éolienne. En cas d'une puissance de sortie plus élevée, il envoi une commande au dispositif de calage qui pivote immédiatement les pâles légèrement sur le côté hors du vent. Inversement, les pâles seront pivotées de manière à pouvoir mieux capter de nouveau l'énergie du vent dès qu'il aura baissé d'intensité. Concevons une éolienne à pas variable suppose sur une ingénierie très avancé afin d'assurer le positionnement exacte des pâles. En général, le système de régulation pivote les pâles de quelque degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour que les

pâles soient toujours positionner à un angle optimal par rapport au vent, de façon à mesurer le meilleur rendement possible à tout moment. Le mécanisme de calage est opéré par un système hydraulique.

II.10.2.régulation passive par décrochage aérodynamique :

Sur une éolienne a régulation (passive) par décrochage aérodynamique (appelée aussi une éolienne a pas fixe) les pâles sont fixées au moyeu de façon rigide. Cependant, la géométrie de la pôle a été conçu de façon à mettre à profit, en cas de vitesse de vent assez élevé, le décrochage aérodynamique en provoquant de la turbulence sur la partie de la pôle qui n'est pas face au vent. Ce décrochage empêche la portance d'agir sur le rotor. Cette régulation a avant tout l'avantage d'éviter l'installation des pièces mobiles dans le rotor même, ainsi qu'un système de contrôle très complexe. L'inconvénient est qu'une telle régulation ne pose seulement pas de grands défis à la conception aérodynamique des pâles mais également à la conception de l'éolienne entière afin d'éviter l'apparition de vibration par le décrochage. Environ deux tiers des éoliennes qui sont installées actuellement dans le monde sont à pas fixe.

II.10.3.régulation active par décrochage aérodynamique :

Un nombre croissant des grandes éoliennes (1 MW et plus) sont conçues avec un mécanisme dit à régulation active par décrochage aérodynamique. De point de vue technique ayant des pâles mobiles, ces machines ressemblent à celles contrôlées à calage variable afin d'avoir un couple relativement élevé à des vitesses de vent faibles. Elles sont programmées à pivoter leur pâles à la même façon de les éoliennes a pas variable.

Cependant, lorsque l'éolienne atteint sa puissance nominale, une grande différence par rapport au éolienne a pas variable est notée : si la génératrice est sur le point d'être surchargée, l'éolienne pivotera ses pâles dans une direction opposée à celle dans laquelle une éolienne a pas variable aura fait. C'est-à-dire, au lieu de la réduire, elle augmentera l'angle d'attaque des pâles du rotor pour les faire décrocher encore plus, perdant ainsi l'axés d'énergie des vents.

Autrement dit, il est possible de contrôler la puissance de sortie de façon plus précise que par la régulation passive par décrochage aérodynamique, ce qui permet d'éviter une sur évaluation de la puissance nominale de l'éolienne au début d'une rafale. Un autre avantage est le fait que l'éolienne peut fonctionner presque à sa puissance nominale à toutes les vitesses du vent. Une éolienne à pas fixe normale, par contre, enregistre une chute de la production de puissance électrique à des vitesses de vent élevées au fur et à mesure que les pâles décrochent de plus en plus, [9].

II.11. Système de conversion électromécanique à base d'éolienne :

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants :

- Fonctionnement à vitesse fixe :
 - Système électrique plus simple.
 - Plus grande fiabilité.
 - Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
 - Pas besoin de système électronique de commande.
 - Moins cher.
- Fonctionnement à vitesse variable :
 - Augmentation du rendement énergétique.
 - Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
 - Réduction des efforts subis par le train de puissance.
 - Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité : Types de machine électrique les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les MS et les MAS sous leurs diverses variantes.

II.11.1. Système à vitesse constante :

La GAS à cage, (fig.2.11), est actuellement la machine électrique dont l'usage est le plus répandu dans la production d'énergie éolienne à vitesse fixe. Son principal intérêt réside dans l'absence de contacts électriques par balais-collecteurs, ce qui conduit à

une structure simple, robuste et facile à construire. Puisque la fréquence du réseau est fixe, la vitesse du rotor est déterminée par le rapport du multiplicateur et du nombre de pôle de la génératrice. Ici la connexion est raccordée directement au réseau. Elle l'est effectivement en fonctionnement normal. Pour limiter le fort appel de courant dû à la magnétisation brutale au moment du couplage, un convertisseur statique de type gradateur est mis en œuvre pour permettre un établissement progressif de la tension aux bornes de la machine. Il est ensuite court-circuité.

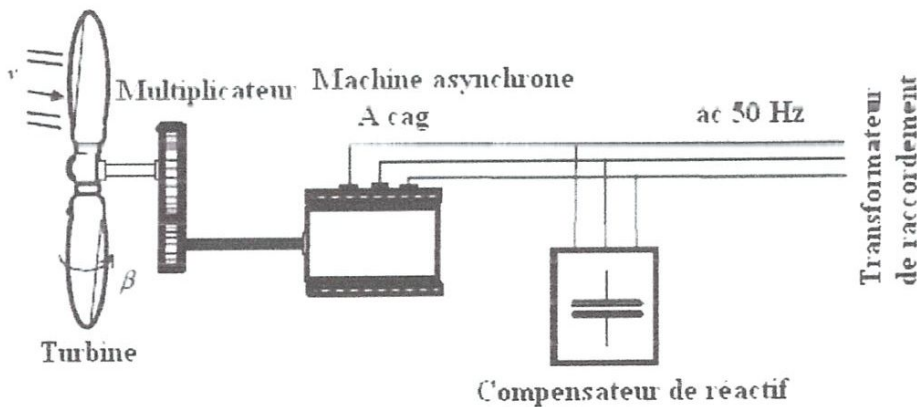


Fig.2.11. Éolienne à vitesse fixe.

II.11.2. Système à vitesse variable :

Les systèmes à vitesse variable se sont récemment développés grâce à l'évolution de l'électronique de puissance. L'obtention de la vitesse variable est souvent réalisée en utilisant trois solutions technologiques :

- **Eolienne à vitesse variable basée sur une MAS à cage d'écureuil :**

La GAS à cage, (fig.2.12), peut fonctionner à vitesse variable grâce à l'emploi des convertisseurs de puissance, et peut générer une production de puissance électrique sur une vaste gamme de vitesse de vent.

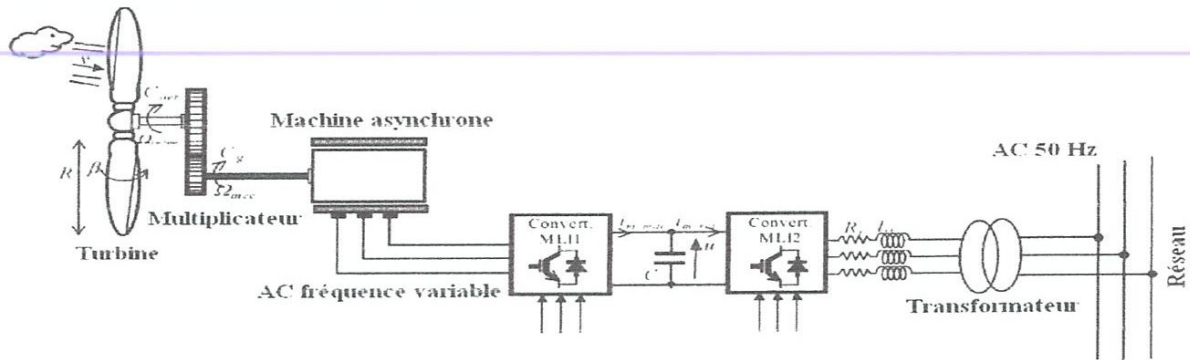


Fig.2.12. Éolienne basée sur une GAS à cage alimentée au stator par deux convertisseurs MLI

- **Eolienne à vitesse variable basée sur une MAS à rotor bobiné à double alimentation:**

Dans ce cas le stator de la génératrice est directement couplé au réseau alors que l'enroulement rotorique triphasé bobiné avec bagues collectrices est connecté à ce même réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance et généralement d'un transformateur. Voir (fig.2.13).

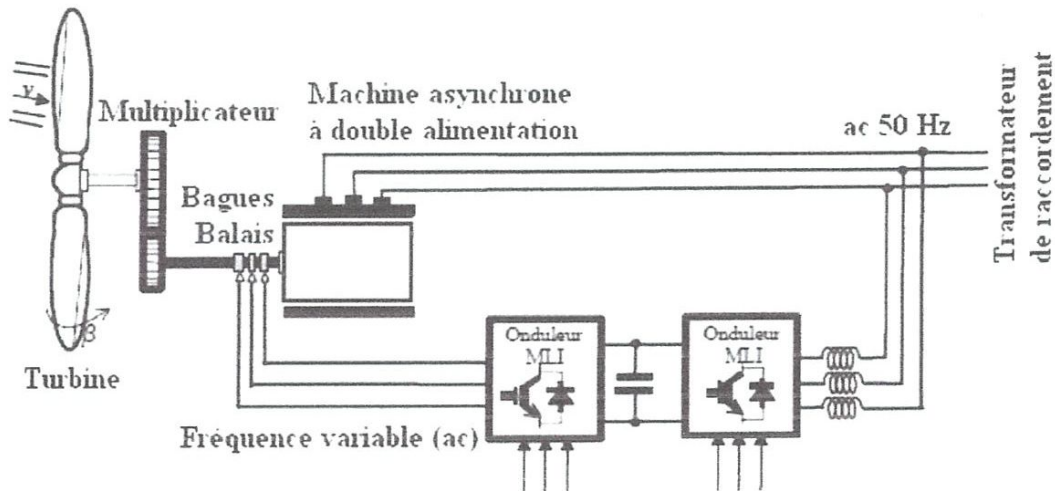


Fig.2.13. Éolienne à vitesse variable basée sur une MAS à double alimentation.

- **Eolienne à vitesse variable basée sur une MS :**

Les éoliennes basées sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné présentent l'inconvénient de nécessiter un système de bagues et de balais et un multiplicateur, induisant des coûts significatifs de maintenance. Pour limiter ces inconvénients, certains constructeurs ont développé des éoliennes basées sur des MS à grand nombre de paires de pôles et couplées directement à la turbine, évitant ainsi le multiplicateur.

Si, de plus, la génératrice est équipée d'aimants permanents ; le système de bagues et de balais est éliminé. L'inconvénient de cette structure est qu'elle nécessite pour sa connexion au réseau, des convertisseurs de puissance dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice. Cet inconvénient est cependant un avantage du point de vue du contrôle de l'éolienne.

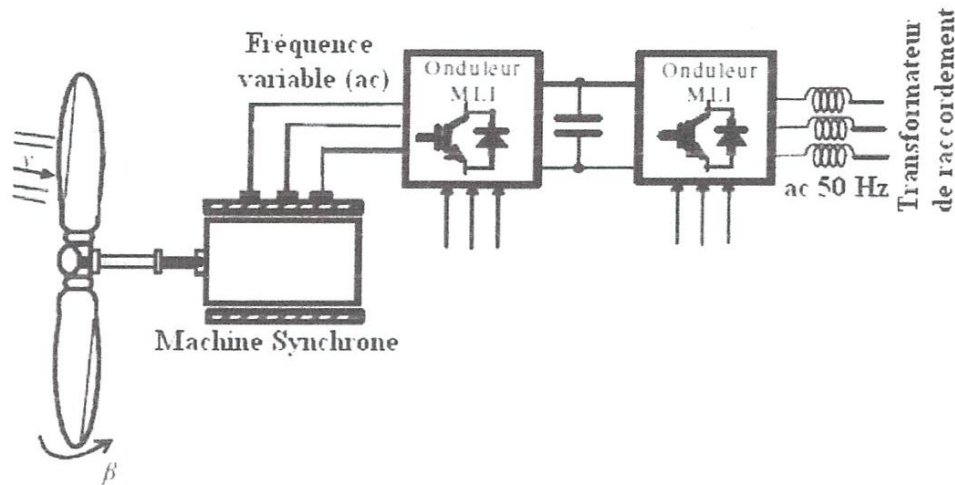


Fig.2.14. Éolienne à vitesse variable basée sur une MS à grand nombre de paires de pôles

II.12. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

• Avantages :

Les principaux avantages de l'éolien sont :

- l'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement.
- l'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables, après celle de

l'hydraulique.

- les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laisse pas de trace.
- C'est une énergie décentralisée (source d'énergie locale) plus proche des consommateurs et qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi, les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres.
- l'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs.

- **Inconvénients :**

L'éolienne a quelques inconvénients :

- L'impact visuel.
- L'impact sonore, il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur.
- Le bruit aérodynamique qui a principalement pour origine le glissement de l'air sur les pales.
- L'impact sur des oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les éoliens. D'autres études disent qu'il faut éloigner les sites éoliens sur les parcours migratoires des oiseaux.
- La qualité de la puissance électrique : l'énergie éolienne reste par nature, une énergie fluctuante ou à disponibilité aléatoire suivant les conditions météorologiques donc n'est pas toujours bonne.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : L'énergie issue des éoliennes implantées dans des sites suffisamment ventés s'accompagne d'une baisse du coût, et ainsi concurrencer la plupart des sources d'énergie classiques. Son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

II.13. Les dispositifs de stockage de l'énergie éolienne :

Une caractéristique essentielle du vent étant la discontinuité dans le temps, un certain nombre d'études ont eu pour objet d'étudier ou de mettre au point des systèmes permettant de stocker l'énergie produite par le vent et non utilisée directement pendant

les périodes de production afin d'en restituer une partie, aussi grande que possible, pendant les périodes de calme.

Il existe différentes possibilités de stockage. Pour la production d'électricité, le système le plus utilisé est celui des batteries d'accumulateurs.

Les batteries à plomb, bien que lourdes et encombrantes, s'accommodent bien à des fluctuations propres au vent. Les autres types sont mal adaptés. Toutefois, ce type de stockage ne convient que pour de petites puissances de quelques kW. Pour les stockages importants, on peut faire appel au pompage de l'eau entre 2 réservoirs et une turbine si le terrain fournit une possibilité intéressante en dénivellement. Le simple pompage de l'eau dans un réservoir est aussi la solution pour stocker de l'eau dans le cas, par exemple, de distribution d'eau alimentaire.

Principe : l'énergie éolienne sert à remplir un réservoir de stockage dont l'eau sera turbinée pour restituer l'énergie, [7]. La ferme éolienne génère de l'électricité grâce à des aérogénérateurs. Cette électricité est utilisée à 70 % pour pomper de l'eau vers une retenue d'altitude. Les 30 % restants sont envoyés sur le réseau. Lors des périodes de moindre vent, l'eau de la retenue est turbinée dans une unité hydroélectrique et stockée dans une retenue basse. L'électricité obtenue est envoyée sur le réseau, [14].

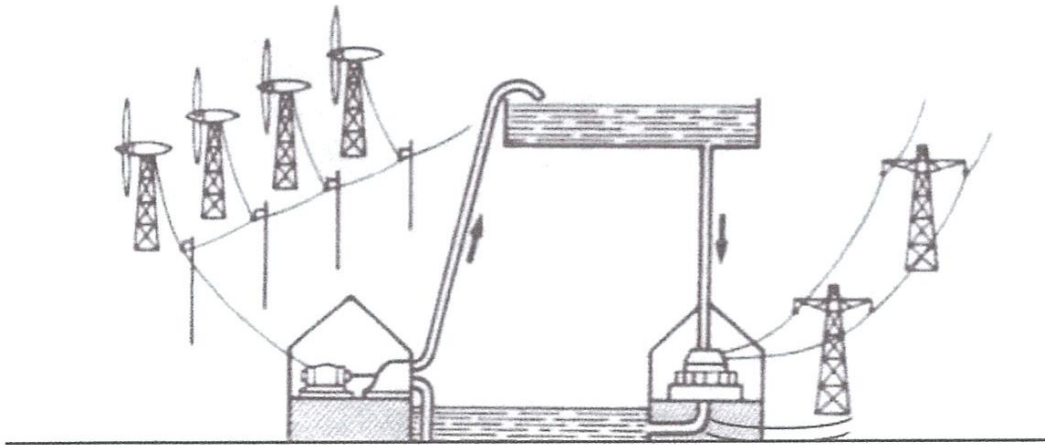


Fig.2.15. Centrale Éolienne à double rôle, [7].

Aux États-Unis, une entreprise conçoit de nouvelles éoliennes qui produisent de l'air comprimé au lieu de l'électricité. Dans la nacelle des éoliennes, au lieu d'un alternateur se trouve donc un compresseur d'air. L'air comprimé est stocké et permet de faire tourner un alternateur aux moments où les besoins se font le plus sentir. Du point de

vue du stockage de l'énergie, cette façon de faire impose une conversion d'énergie (de l'air comprimé vers l'électricité, avec un rendement réduit), mais permet de positionner la production électrique sur le pic de consommation, où l'électricité est payée plus cher, avec une conversion de moins que par le processus classique (électricité vers stockage puis stockage vers électricité). Certains pensent même que l'on pourrait utiliser directement l'air comprimé ainsi produit pour alimenter des voitures automobiles propulsées avec ce fluide, [14].

Le stockage thermique commence aussi à se développer, essentiellement pour le chauffage. Les différents types de stockage thermique existant sont:

Réservoir de fluides, chauffage de produits à haute capacité thermique, etc.

Principe : l'énergie produite est utilisée pour chauffer le fluide d'un réservoir ou des matériaux qui sera restituée pendant les périodes sans vent, [7].

II.14.Application des éoliennes :

Un système éolien peut être utilisé en trois applications distinctes :

- Systèmes isolés.
- Systèmes hybrides.
- Systèmes reliés au réseau.

Les systèmes obéissent à une configuration de base : ils ont besoin d'une unité de contrôle de puissance et dans certains cas, d'une unité de stockage

II.14.1.Systèmes isolés :

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par exemple pour produire de l'électricité dans les îles, pour le pompage de l'eau dans des champs, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises.

Les systèmes isolés en général, utilisent quelque forme de stockage d'énergie. Ce stockage peut être fait par des batteries : il faut alors un dispositif pour contrôler la charge et la décharge de la batterie. Le contrôleur de charge a comme principal objectif d'éviter qu'il y ait des dommages au système de batterie par des surcharges ou des décharges profondes.

Pour l'alimentation d'équipements qui opèrent avec un réseau alternatif (AC), il est nécessaire d'utiliser un onduleur

II.14.2.Systèmes Hybrides :

Les systèmes hybrides sont ceux qui présentent plus d'une source d'énergie comme par exemple, turbines éoliennes, génératrices Diesel, modules photovoltaïques entre eux. L'utilisation de plusieurs formes de génération d'énergie électrique augmente la complexité du système et exige l'optimisation de l'utilisation de chacune des sources. Dans ces systèmes, il faut réaliser un contrôle de toutes les sources pour maximiser la livraison de l'énergie à l'utilisateur.

En général, les systèmes hybrides sont employés dans des petits systèmes destinés à desservir un nombre plus grand d'utilisateurs. Pour travailler avec des charges à courant alternatif, le système hybride aussi a besoin d'un onduleur.

II.14.3.Systèmes liés au réseau :

Les systèmes liés au réseau n'ont pas besoin de systèmes de stockage d'énergie ; par conséquent, toute la génération est livrée directement au réseau électrique. Les systèmes éoliens liés au réseau nécessitent un convertisseur statique, [10].

II.15. La puissance éolienne dans le monde :

L'énergie éolienne est développée par de très nombreux pays et connaît une croissance très importante : + 30 % par an en moyenne depuis 10 ans (+ 22,5 % en 2010). En 2010, plus de 35 000 MW de nouvelles capacités éoliennes ont été installés dans le monde, et les 200 000 MW installés ont été presque atteints fin 2010. L'éolien représente 2,4 % de la consommation totale d'électricité dans le monde et a attiré un total d'investissements de 47,3 milliards d'euros (65 milliards de dollars). Les experts du GWEC (Conseil mondial de l'énergie éolienne) prévoient le maintien d'une croissance soutenue de l'éolien, conduisant à un parc installé de près de 460 000 M W en 2015, [11].

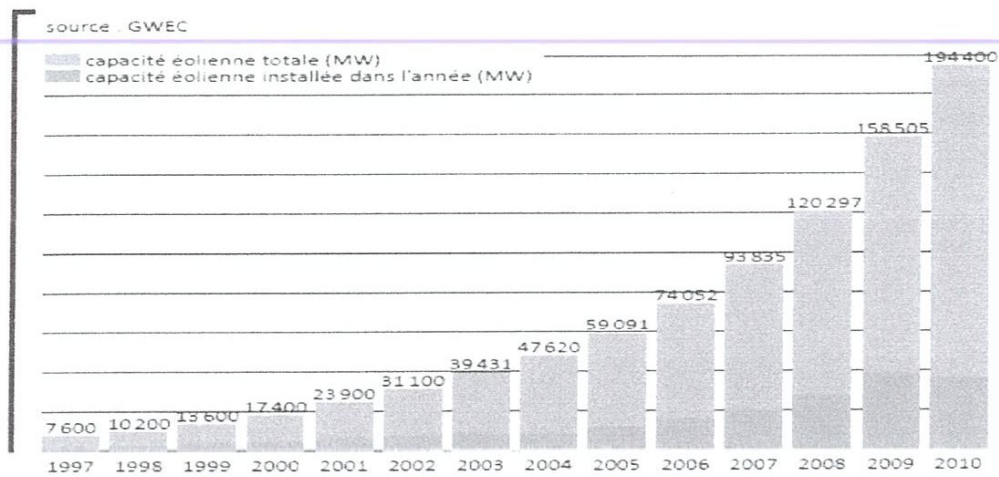


Fig.2.16.La puissance éolienne cumulée dans le monde jusqu'à 2010 en MW, [11].

II.16. La puissance éolienne 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 microclimat 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, [12].

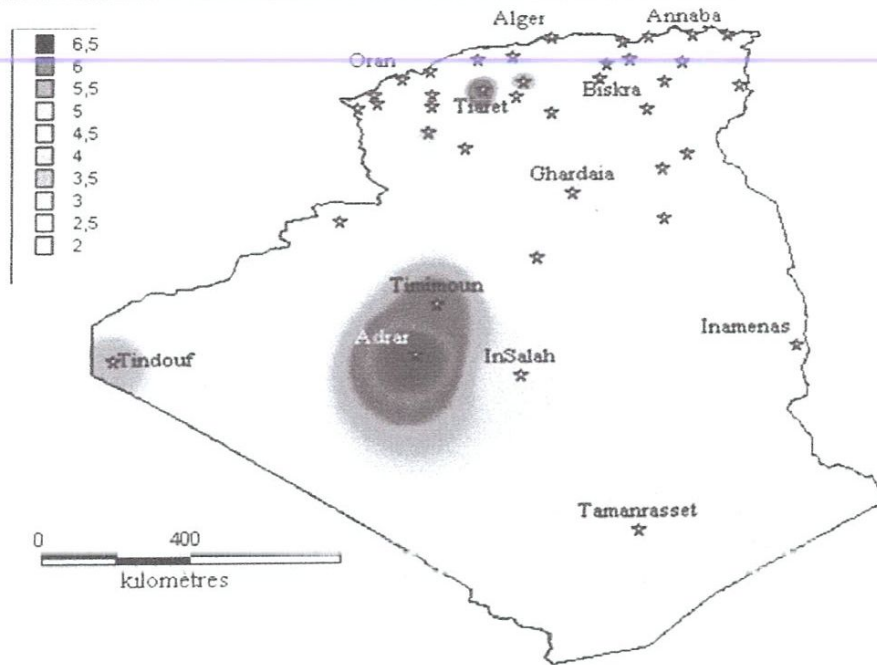


Fig.2.17. Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10m du sol, [12].

Le programme EnR algérien prévoit dans un premier temps, sur la période 2011-2013, l'installation de la première ferme éolienne d'une puissance de 10 MW à Adrar. Entre 2014 et 2015, deux fermes éoliennes de 20 MW chacune devraient être réalisées.

Des études seront menées pour détecter les emplacements favorables afin de réaliser d'autres projets sur la période 2016-2030 pour une puissance d'environ 1 700 MW.

D'ici 2013, il est prévu de lancer les études pour la mise en place de l'industrie éolienne. Sur la période 2014-2020, l'objectif est de parvenir à un taux d'intégration de 50%. Cette période sera marquée par les actions suivantes :

Construction d'une usine de fabrication de mâts et de rotors d'éoliennes; création d'un réseau de sous-traitance nationale pour la fabrication des équipements de la nacelle; montée en compétence de l'activité engineering et capacités de conception procurement et réalisation capables d'atteindre un taux d'intégration d'au moins 50% par des entreprises algériennes.

Le taux d'intégration devrait être supérieur à 80% sur la période 2021-2030, grâce à l'extension des capacités de fabrication des mâts et des rotors d'éoliennes et le développement d'un réseau de sous-traitance nationale pour la fabrication des équipements de la nacelle. Il est prévu aussi la conception, le procurement et la

réalisation d'éoliennes par des moyens propres ainsi que la maîtrise des activités d'engineering, de procurement et de construction de centrales et d'unités de dessalement des eaux saumâtres, [13].

II.17.Impact de l'intégration des générateurs éoliens dans le réseau électrique :

L'insertion de l'éolien et plus généralement de la production décentralisée dans les réseaux de transport et de distribution génère un certain nombre de problèmes et contraintes car ces réseaux n'étaient pas conçus initialement pour accueillir ce type de production.

II.17.1.Impact sur le sens du transit de puissance :

Le réseau électrique achemine l'électricité des centrales de productions principalement situées sur le réseau de transport vers les clients via le réseau de distribution. Dans ce cas, la circulation d'électricité est unidirectionnelle. Ainsi, les dispositifs présents sur le réseau comme les protections ou les organes de réglages de tension comme les transformateurs réglables en charge sont dimensionnés et fonctionnent pour cette configuration de réseau. L'insertion de la production décentralisée (PD) peut induire une inversion du flux de puissance sur le réseau de distribution. Ils deviennent donc bidirectionnels. Ceci fait donc apparaître des problèmes d'incompatibilité entre la situation actuelle du réseau de distribution et la présence de production d'énergie sur celui-ci.

II.17.2.Impact sur la tension au point de raccordement :

La PD va fatalement modifier le plan de tension près de son point de connexion. En général la tension augmente au point de raccordement. La contrainte est alors de maintenir en tout point la tension entre les limites de tension maximale et minimale admissibles quels que soient la configuration et le point de fonctionnement de ferme éolienne et du réseau.

II.17.3.Impact sur la qualité de la tension :

La connexion de PD sur le réseau de distribution peut également altérer la qualité de l'onde des tensions. Celle-ci est déterminée grâce à un ensemble d'indices.

- **Flicker :**

Les variations de tension liées notamment aux variations de la vitesse du vent, à des démarrages-arrêts successifs, à l'ombre du mat et au gradient du vent, peuvent conduire à la génération de phénomène de flicker .Ce sont les éoliennes à vitesse fixe qui sont les plus défavorables et celles qui posent le plus de problèmes en termes de flicker ou de fluctuation de tension. La technologie d'éolienne la mieux adaptée pour limiter l'impact sur le réseau de ces variations est celle complètement interfacée avec le réseau via de l'électronique de puissance permettant ainsi de réaliser un réglage de la tension qui atténue les variations de puissance.

- **A-coups de tension :**

Des à-coups ou des variations rapides de la tension peuvent survenir lors du couplage ou découplage des éoliennes (et de leurs transformateurs) au réseau, lors du changement du mode de connexion (étoile-triangle) de certaines génératrices, etc.....

- **Harmoniques :**

Les convertisseurs à électronique de puissance sont des sources potentielles d'harmoniques. Suivant les technologies utilisées, les éoliennes peuvent donc générer des harmoniques.

II.17.4.Impact sur le plan de protection :

L'introduction de PD dans le réseau de distribution modifie l'impédance globale du réseau et donc les courants de court-circuit et la puissance de court-circuit. La modification des courants de court-circuit due à l'insertion de PD peut conduire à une modification du réglage des protections voire même à leur changement.

II.17.5.Impact sur la fréquence du réseau :

Les variations rapides de la puissance générée par les éoliennes tout comme les variations de charge, peuvent induire des fluctuations de la fréquence du réseau. Cependant, tant que le taux de pénétration de l'éolien reste faible, cette influence peut être considérée comme négligeable. Dans le cas contraire, afin d'assurer la stabilité du réseau, une participation au réglage primaire des éoliennes sera à envisager avec des solutions qui restent à imaginer. Déjà actuellement, lorsque la production est

supérieure à la consommation, donc lorsque la fréquence est supérieure à 50Hz, il peut être demandé aux éoliennes de réduire leur production

II.17.6.Impact sur la Capacité d'accueil du réseau :

La capacité des lignes et des postes est limitée. Cette limitation peut constituer dans le cas de l'éolien un problème aigu, car les lieux de production (sites ventés) sont souvent éloignés des lieux de consommation. Afin d'éviter la congestion des lignes de transport et d'assurer la sécurité du réseau, de nouvelles lignes devraient être construites en particulier aux interconnexions entre les réseaux gérés par des opérateurs différents.

II.17.7.Déconnexions intempestives :

Les générateurs éoliens, tout comme la majorité des générateurs décentralisés, sont très sensibles aux perturbations du réseau et ont tendance à se déconnecter rapidement lors d'un creux de tension ou lors d'une variation de la fréquence.

II.18.Conclusion :

L'utilisation de l'énergie éolienne pour la production de l'énergie électrique connaît un essor croissant.

Dans ce deuxième chapitre, nous avons donné un aperçu sur les différents types d'éoliennes et des dispositifs électrotechniques utilisés, ou pouvant l'être dans le cadre de conversion de cette énergie. Bien qu'il existe plusieurs types de capteur éolien, seul les capteurs à axe horizontal, de type éolien rapide, sont voués à un avenir pour la production d'énergie électrique à grande échelle.

Nous avons vu aussi l'influence de la configuration électrique d'un aérogénérateur sur son fonctionnement, quelque soit le fonctionnement de l'éolienne à vitesse fixe ou à vitesse variable, il dépend de cette configuration.

Enfin, nous avons étudiés l'impacte de l'intégration de l'éolienne dans un réseau électrique, et vu les problèmes associés avec l'insertion de la production décentralisée.

Le troisième chapitre est dédié à la partie simulation sous MATLAB, d'une ferme éolienne intégrée dans un réseau de distribution électrique.

CHAPITRE III

Simulation et résultats

III.1.Introduction :

La modélisation est une phase primordiale durant la conception ou l'étude des systèmes électriques simples ou complexes. Elle consiste à établir un modèle mathématique d'un système quelconque, en recensant les variables ou facteurs explicatifs et l'importance relative de chacune de ces variables, pour faciliter par la suite son étude, dans le but d'obtenir des performances optimales, si des essais sur un banc d'essai s'avèrent quasi-impossible à réaliser ou coûteux.

L'environnement MATLAB/Simulink a retenu notre intérêt parce que c'est l'un des logiciels qui permet la modélisation et la simulation des systèmes électriques quelque soit leur complexité. C'est un moyen efficace et économique pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant qu'au stade de développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes à étudier.

Nous présentons dans ce chapitre, le modèle d'une ferme éolienne pour déterminer la variation de tension et des puissances liée notamment à la variation de la vitesse du vent avec et sans compensateur statique de puissance réactive « STATCOM ». Pour réaliser la simulation, les composants principaux ont été étudiés dans le but de connaître leurs caractéristiques.

III.2.Modèle de simulation :

Le schéma global de simulation est représenté par un bloc fonctionnel ci-dessous (Fig.3.1).

Nous présentons dans cette section, un système d'une ferme éolienne reliée à un réseau de distribution électrique.

Notre objet de simulation, est un système complet composé de principaux éléments suivants :

- Une ferme éolienne comme une source d'énergie renouvelable, constituée de six éoliennes.
- Des générateurs à induction à cage d'écureuil.
- Un compensateur synchrone statique («STATCOM»).
- Un réseau de distribution électrique.

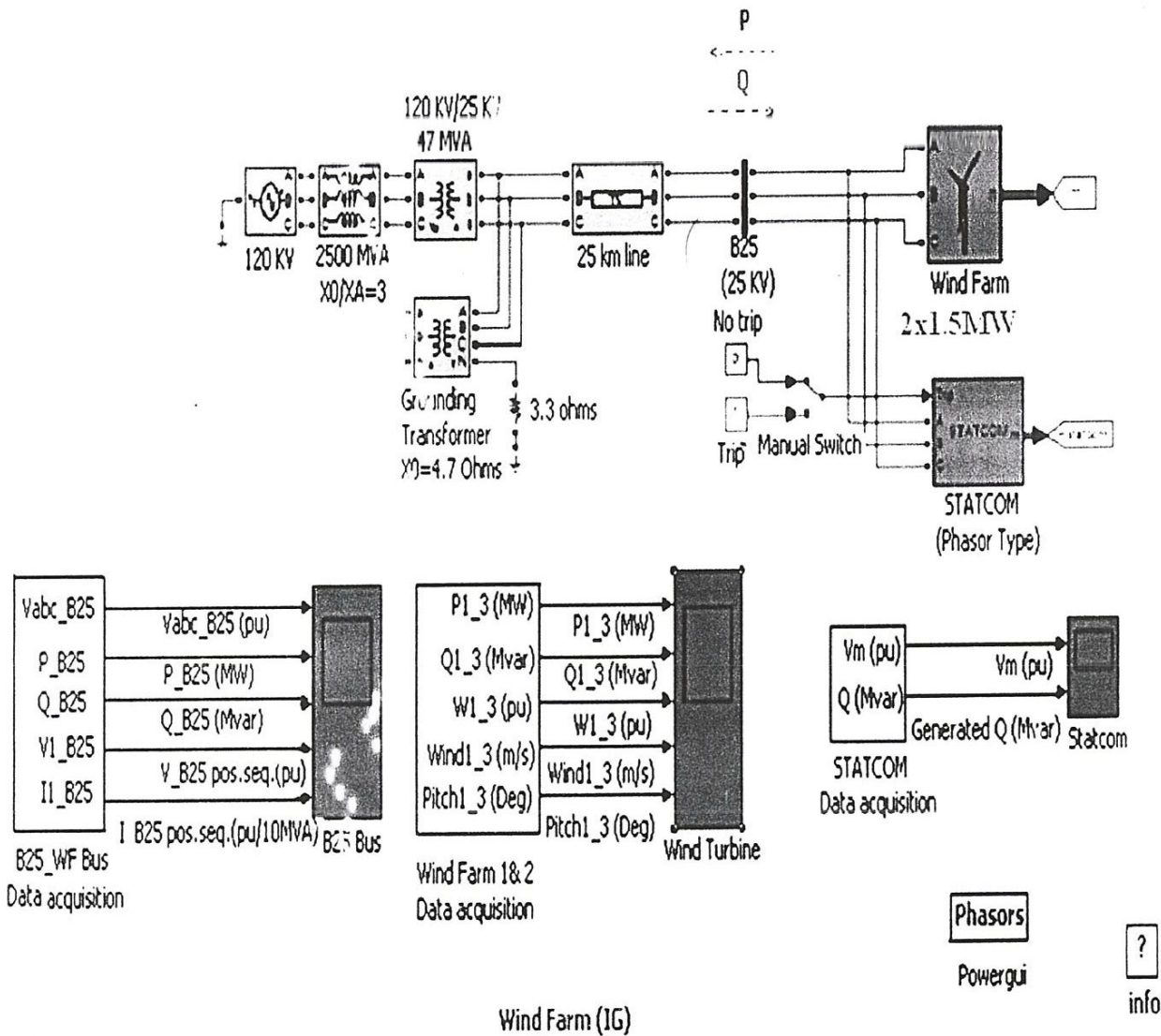


Fig.3.1. Modèle d'une ferme éolienne.

II.3. Description de modèle :

La ferme éolienne, constituée de six éoliennes d'une puissance de 1,5 MW chacune, est reliée à un système de distribution (25kV) de puissance d'exportations à un réseau de 120kV à travers une ligne de 25 km.

Cette ferme éolienne de 9 MW est simulée par trois paires d'éoliennes (Fig.3.2).

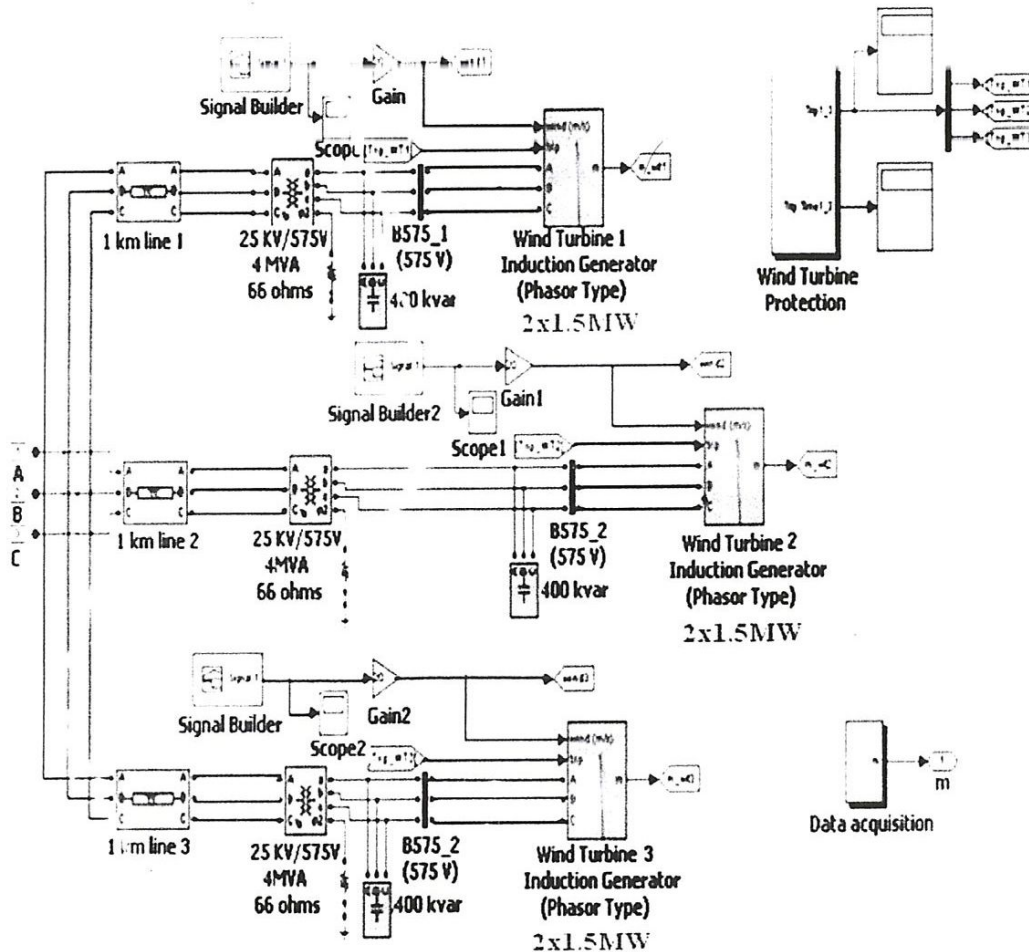


Fig.3.2. Ferme éolienne reliée à un système de distribution électrique.

III.3.1. L'éolienne et le générateur à induction :

Les éoliennes utilisent des générateurs à induction (GI) à cage d'écurieil. L'enroulement du stator est connecté directement au réseau de 60 Hz et le rotor

est entraînée par une turbine éolienne à pas variable (Fig.3.3). La puissance prise par l'éolienne est convertie en énergie électrique par le GI et est transmise au réseau par l'enroulement de stator. L'angle de calage est contrôlé afin de limiter la puissance de sortie du générateur à sa valeur nominale pour des vents dépassant la vitesse nominale de 9 m/s. Afin de produire de l'électricité la vitesse du GI doit être légèrement supérieure à la vitesse synchrone. Mais la variation de vitesse est généralement si petite que l'éolienne à GI est considérée comme une éolienne à vitesse fixe. La puissance réactive absorbée par le GI est fournie par le réseau ou par des dispositifs tels que des batteries de condensateurs, VSC (convertisseur source de tension), «STATCOM» (compensateur synchrone statique) ou condensateur synchrone.

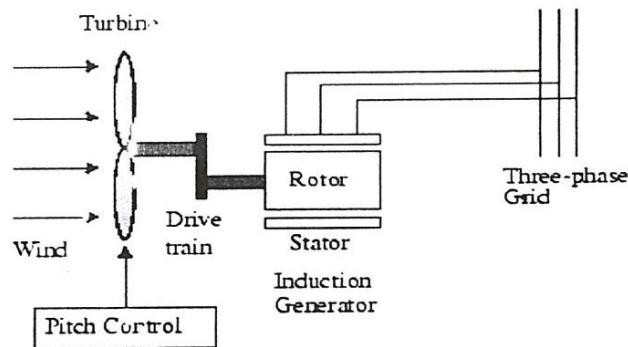


Fig.3.3. modèle de l'éolienne et le générateur à induction.

Les paramètres de générateur sont sauvegardés dans un fichier comme suit (bloc paramètre sous Matlab) :

$$P_n = 2 \cdot 1.5e6 / 0.9 ; \quad (\text{VA})$$

$$V_n = 575 ; \quad (\text{V}_{\text{rms}})$$

$$f_n = 60 ; \quad (\text{Hz})$$

$$R_s = 0.004843 ; \quad (\text{pu})$$

$$L_{ls} = 0.1248 ; \quad (\text{pu})$$

$$R_r' = 0.004377 ; \quad (\text{pu})$$

$$L_{lr}' = 0.1791 ; \quad (\text{pu})$$

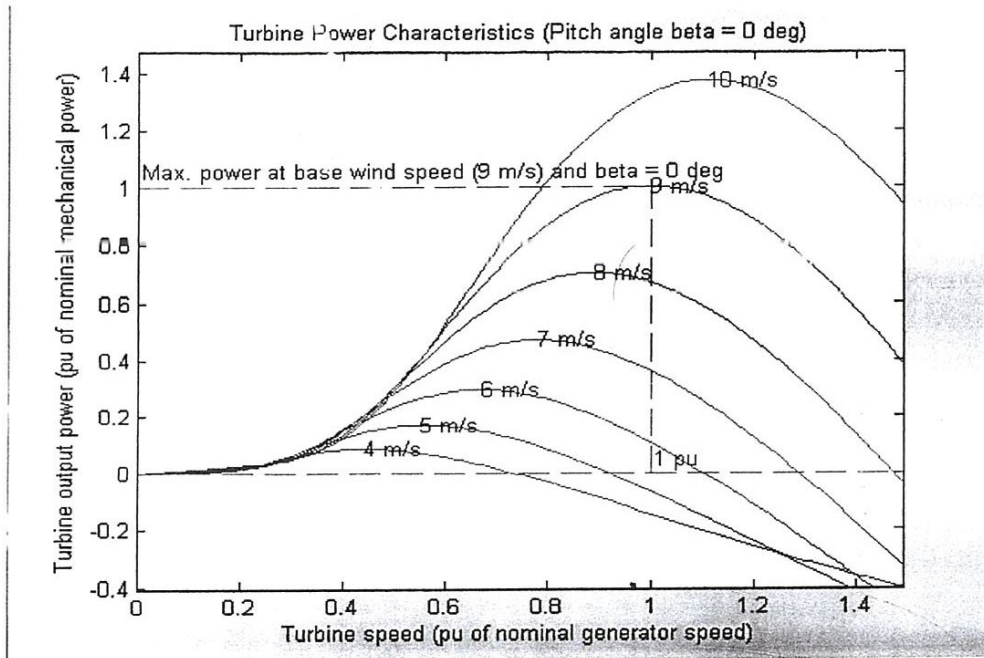
$$L_m = 6.77 ; \quad (\text{pu})$$

$$H = 5.04 ; \quad (\text{s})$$

$$F = 0.01 ; \quad (\mu\text{u})$$

$$P = 3 ;$$

- **Caractéristique de la turbine :**



La puissance réactive absorbée par le GI est partiellement compensée par des condensateurs connectés à chaque bus d'éolienne basse tension (400 kVAr pour chaque paire de turbine de 1,5 MW). Le reste de la puissance réactive requise pour maintenir la tension de 25 kV dans le bus B25 fermé à 1pu est fournie par un compensateur synchrone statique « STATCOM », de 3MVar avec un réglage de statisme de 3%.

III.3.2. Le compensateur synchrone statique :

Le compensateur synchrone statique (Fig.3.4) est un dispositif de dérivation de la famille des systèmes flexibles de transmission en courant alternatif (FACTS : Flexible AC Transmission Systems) utilisant l'électronique de puissance pour contrôler le flux d'énergie et améliorer la stabilité transitoire dans les réseaux électriques. Le «STATCOM» régule la tension aux bornes, par

commande de la quantité de puissance réactive injectée ou absorbée à partir du système d'alimentation.

Lorsque la tension du système est faible, le «STATCOM» génère de la puissance réactive (compensateur capacitif). Lorsque la tension du système est élevée, il absorbe de la puissance réactive (compensateur inductif).

La variation de la puissance réactive est effectuée au moyen d'un convertisseur source de tension (VSC : voltage Source Converter) connecté du côté secondaire à un transformateur de couplage. Le VSC utilise des appareils électroniques à commutation forcée tels que : les IGBT (Insulated Gate Bipolar transistor) pour synthétiser une tension V_2 à partir d'une source de tension continue. Le principe de fonctionnement de «STATCOM» est expliqué sur la figure (3.4) montrant le transfert de puissance active et réactive entre une source V_1 et une source V_2 . Dans cette figure, V_1 représente la tension du système à contrôler et V_2 est la tension générée par le VSC.

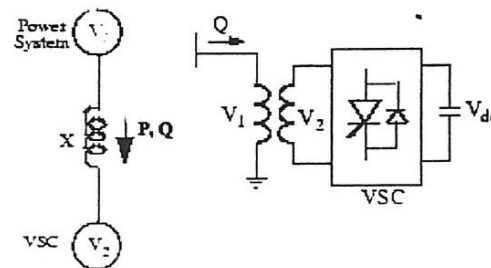


Fig.3.4.modèle d'un compensateur synchrone statique.

III.4.Simulation et résultats :

Nous avons fait la simulation au premier lieu lorsque les éoliennes fonctionnent à une vitesse fixe, et au deuxième lieu à une vitesse variable.

III.4.1.Simulation à vitesse fixe :

La simulation est faite avec une vitesse constante de 8 m/s durant une période de 20s. On a vu les deux cas possibles:

• 1^{er} cas : Sans «Statcom» :

2^{ème} cas : Avec «Statcom»

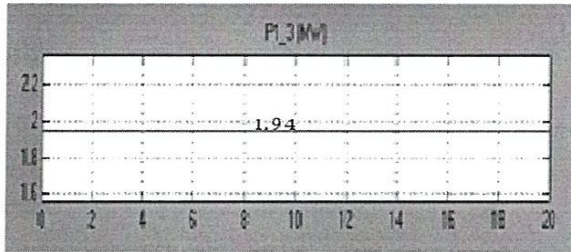


Fig. 3.5. Puissance active de la turbine.

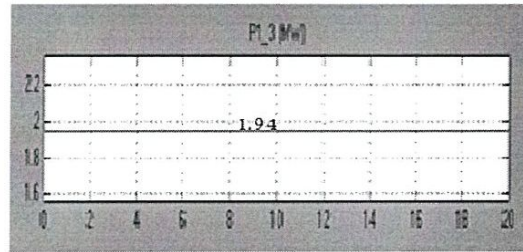


Fig.3.10. Puissance active de la turbine

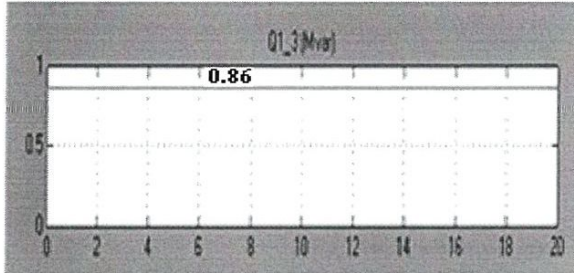


Fig.3.6. Puissance réactive de la turbine.

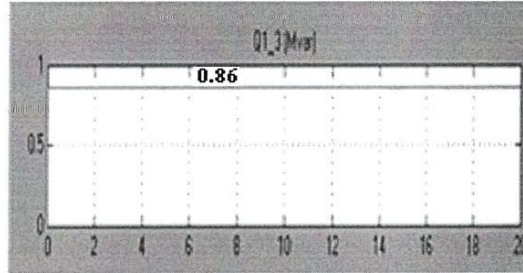


Fig.3.11. Puissance réactive de la turbine

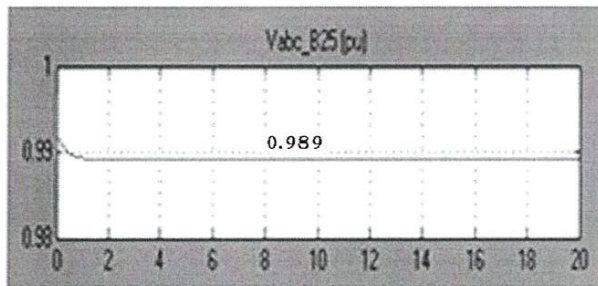


Fig.3.7. Tension au jeu de barre B25.

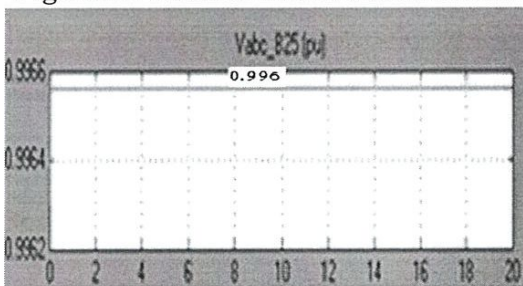


Fig.3.12. Tension au jeu de barre B25.

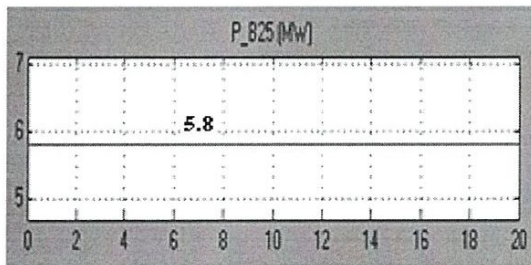


Fig.3.8. Puissance active au B25

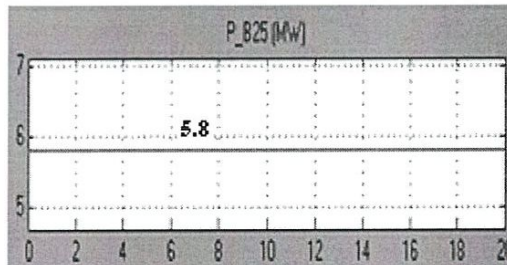


Fig.3.13. Puissance active au B25

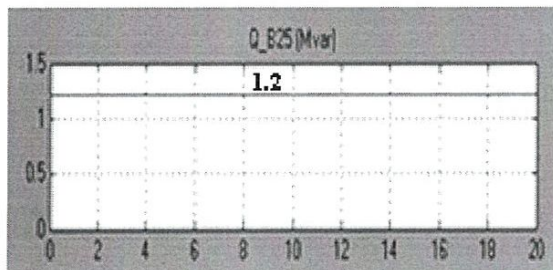


Fig.3.9. Puissance réactive au B25

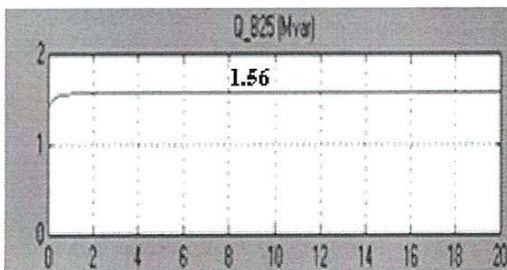


Fig.3.14. Puissance réactive au B25

❖ Interprétation des résultats obtenus :

A partir des résultats de simulation obtenus on a constaté que :

- Les puissances active et réactive de la turbine restent constante ($P=1,94\text{MW}$) dans les deux cas (Fig.3.5, Fig.3.6 et Fig.3.10, Fig.3.11 respectivement).
- Par contre la puissance réactive augmente en présence du Statcom (Fig.3.14.) ce qui implique qu'il a fournie de la puissance réactive au le réseau et la tension est alors légèrement augmentée au jeu de barre B25 (Fig.3.12).
- La puissance active au jeu de barre B25 reste constante dans les deux cas ce qui explique le rôle du Statcom qui agit comme un compensateur statique de la puissance réactive seulement (Fig.3.8 et Fig.3.13 respectivement).

III.4.2.Simulation à vitesse variable :

La simulation est faite à une vitesse variable des éoliennes, durant une période de 20s (Fig.3.21) selon les périodes suivantes:

Vitesse en m/s	Intervalle en s	Vitesse en m/s	Intervalle en s
7m à 8	[0 : 4]	9 à 10	[6 : 12]
8 à 9	[4 : 6]	10 à 15	[12 : 20]

L'étude a été faite selon deux cas :

• 1^{er} cas : Sans Statcom

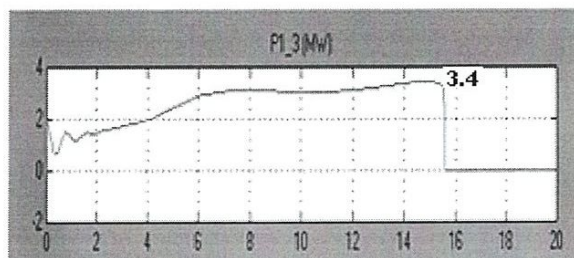


Fig.3.19.Puissance active de la turbine.

2^{ème} cas: Avec «Statcom»

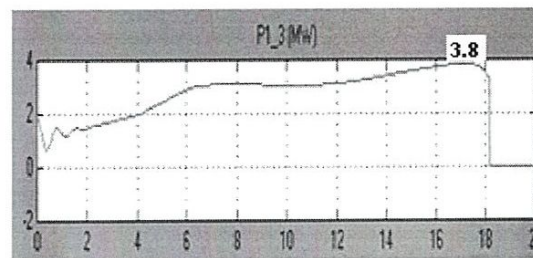


Fig.3.28.Puissance active de la turbine.

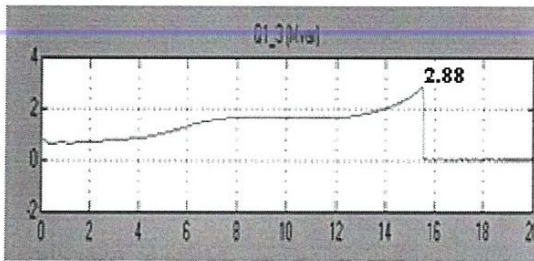


Fig.3.20. Puissance réactive de la turbine.

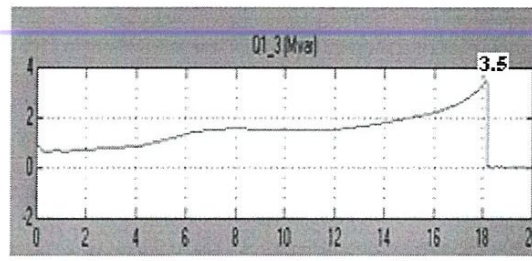


Fig.3.29. Puissance réactive de la turbine.

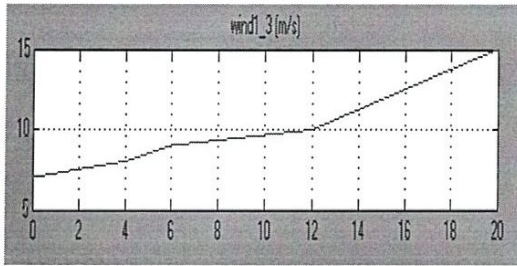


Fig.3.21. Vitesse du vent

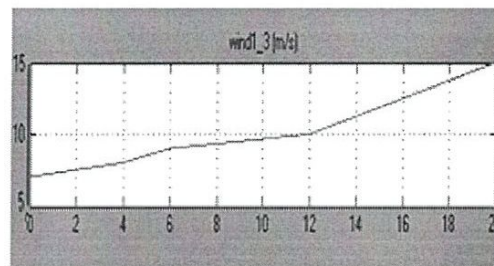


Fig.3.30. Vitesse du vent

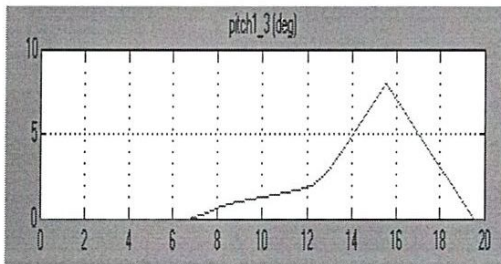


Fig.3.22. Angle de calage des pales

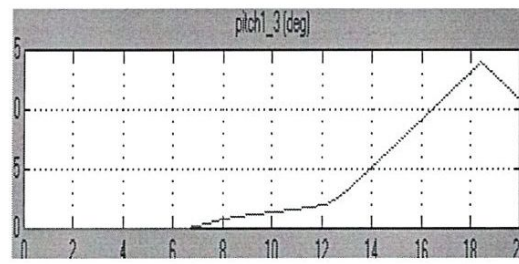


Fig.3.31. Angle de calage des pales

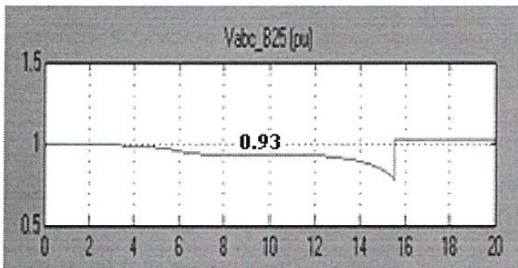


Fig.3.23. Tension au jeu de barre B25.

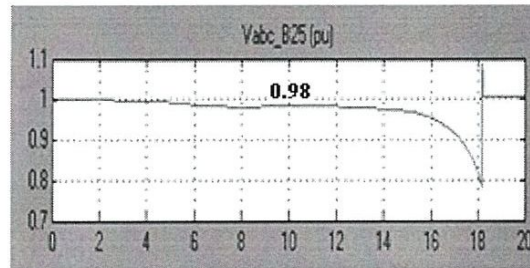


Fig.3.32. Tension au jeu de barre B25.

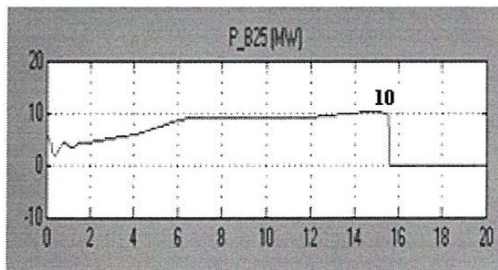


Fig.3.24. Puissance active au B25

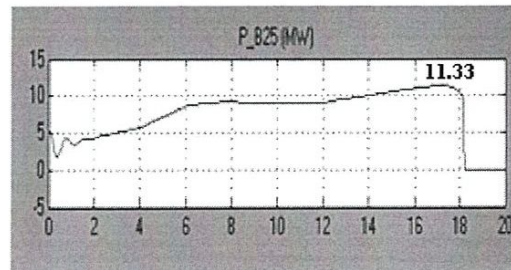


Fig.3.33. Puissance active au B25

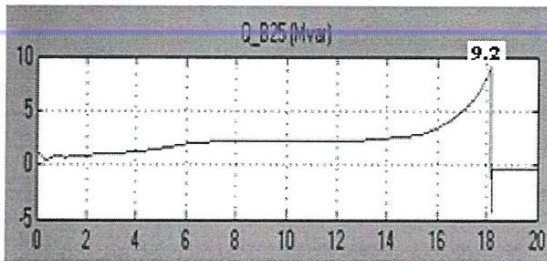


Fig.3.25. Puissance réactive au B25

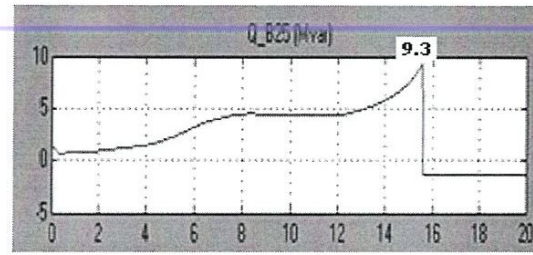


Fig.3.34. Puissance réactive au B25

❖ Interprétation des résultats obtenus:

A partir des courbes obtenues, nous pouvons constater que :

- La puissance active de la turbine reste constante pour les valeurs nominales de la vitesse du vent durant l'intervalle [4 : 6] s pour les deux cas, par contre la puissance P_{max} augmente jusqu'à environ 3,8MW en présence du Statcom avant de s'annuler (Fig.3.28).
- La puissance réactive de la turbine reste constante dans les deux cas pour les valeurs nominales de la vitesse du vent durant l'intervalle [4 : 6]s, par contre la puissance Q_{max} augmente jusqu'à 3,5MVar en présence du Statcom avant de s'annuler (Fig.3.29).
- La puissance réactive, au jeu de barre B25, augmente en présence du Statcom (Fig.3.34) ce qui implique qu'il a fournie de la puissance réactive au le réseau, la tension est alors légèrement augmentée au jeu de barre B25 (Fig.3.32) et par conséquent la puissance active maximale au jeu de barre B25 aussi augmente .
- Les puissances actives et réactives augmentent, au fur et à mesure que la vitesse du vent augmente, jusqu'à une certaine valeur maximale.
- Lorsque la vitesse du vent tend vers sa valeur nominale de 9m/s, la puissance atteint sa valeur nominale, puis croit, au fur et à mesure que la vitesse du vent augmente, jusqu'à une certaine valeur de P_{max} égale à 3,8MW.
- Lorsque la vitesse du vent atteint la vitesse seuil, le système de régulation électronique intervient, pour protéger l'éolienne, en augmentant l'angle de

calage (Fig.3.22 et Fig.3.31) pour que les pales de l'éolienne se positionnent en drapeau donc l'éolienne est freinée.

-La variation de la vitesse du vent provoque des variations rapides de la puissance générée par l'éolienne, qui peuvent également altérer la qualité de l'onde de la tension, ce qui montre l'intérêt de l'utilisation d'un convertisseur de puissance comme le Statcom qui a la possibilité d'assurer le contrôle sur une plage plus large de tension.

III.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de la simulation de d'un modèle d'une ferme éolienne intégrée dans un réseau électrique de distribution.

Au premier lieu, nous avons présenté le modèle de la ferme éolienne utilisée, sa description, et ses principaux composants (la turbine, le générateur à induction, et le compensateur synchrone statique).

En deuxième lieu, nous avons fait la simulation de ce modèle et discuter l'effet de la variation de vitesse du vent sur la qualité de tension et des puissances générées par l'éolienne, et nous avons montré l'avantage de l'utilisation du Statcom pour compenser l'énergie réactive, dans notre cas il a généré de la puissance réactive au réseau.

Le STATCOM est moins encombrant et moins bruyant par rapport à d'autre dispositif tel que le compensateur statique de puissance réactive SVC (**Static Var Compensator**).

Le STATCOM donne la possibilité de contrôle sur une plage plus large de tension. Sa taille est réduite et son cout n'est pas élevé.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

Le travail réalisé dans ce mémoire avait pour objectif d'étudier l'impact de l'intégration d'une ferme éolienne dans un réseau de distribution sur la qualité de la tension et les flux de puissance, en présence du compensateur statique de puissance réactive « STATCOM » qui est branché en parallèle au jeu de barre reliant la ferme éolienne au réseau électrique de distribution.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les différents niveaux de tension, les différents types de topologies d'un réseau électrique ainsi qu'un aperçu sur la modélisation des différents éléments constituant le réseau électrique.

Dans le second chapitre, nous avons présenté les différents types de production d'énergie décentralisée en mettant l'accent sur l'énergie éolienne: son principe de fonctionnement, la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différentes structures des générateurs existants ainsi que leur adaptation à un système éolien, les avantages et inconvénients de la production éolienne et enfin l'impact de l'intégration des générateurs éoliens dans le réseau électrique.

Une simulation a été faite dans le troisième chapitre pour évaluer la qualité de tension et des puissances actives et réactives développées par la ferme éolienne à base de générateurs d'induction, à vitesse fixe et à vitesse variable, avec et sans la présence du STATCOM, pour explorer les possibilités offertes par ce dispositif.

Le STATCOM, possède un effet capacitif lors d'une chute de tension et un effet inductif lors d'une surtension. Les résultats obtenus sont satisfaisants et prometteurs. Il est moins encombrant et moins bruyant. Sa taille est réduite et son cout n'est pas élevé.

Enfin, nous pouvons dire que le développement de l'utilisation de l'énergie éolienne est fortement souhaitable dans notre pays l'Algérie Afin de pouvoir contribuer à ce développement, il nous a semblé utile de s'impliquer dans ce domaine, où la nature du terrain et la vitesse du vent lui a permis d'être un des pays qui peuvent investir dans la production d'énergies renouvelables.

Bibliographie

- [1] **Miguel Angel FONTELA GARCIA Ingénieur ENSIEG** « Interaction des réseaux de transport et de distribution en présence de production décentralisée » thèse de doctorat 2008, de l'Institut Polytechnique de Grenoble.
- [2] **Aouchenni Ounissa** « Étude de l'intégration de la production éolienne dans un réseau de distribution » mémoire Master II 2011, Université Bejaia.
- [3] **Boris Berseneff Ingénieur ENSEEG** « Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur » thèse de doctorat 2010, de l'Institut Polytechnique de Grenoble.
- [4] **Abdelmalek Gacem** « Utilisation des méthodes d'optimisations metaheuristiques pour la résolution du problème de répartition optimale de la puissance dans les réseaux électriques » mémoire Magister 2010 de Centre Universitaire d'El-OUED
- [5] **J. DUNCAN GLOVER FAILURE ELECTRICAL, LLC, MULUKUTLA S. SARMA, NORTHEASTERN UNIVERSITY, THOMAS J. OVERBYE UNIVERSITY OF ILLINOIS** « Power system analysis and design », FIFTH EDITION.
- [6] **Brahim GASBAOUI** « mémoire online optimisation de l'énergie réactive dans un réseau d'énergie électrique » mémoire Magister 2008, Université de BECHAR.
- [7] **DJEMATI DJEMAA** « Etude de l'écoulement autour d'une éolienne de type Savonius. Simulation des performances de l'éolienne » mémoire Magister 2011, Université de BATNA.
- [8] **CHERFIA NAÏM** « Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens » mémoire Magister 2010, Université CONSTANTINE.
- [9] **CHORFI HAMID et MENASRIA FETHI** « Etude et dimensionnement d'une génératrice à réluctance variable dans un système éolien » mémoire d'ingénieur 2005, Université de GUELMA.

[10] **DOUADI TAREK** « Etude et commande d'un système éolien à base d'une génératrice asynchrone » mémoire Magister, Université de BATNA.

[11] http://www.enr/docs/2010122455_01FEEDeveloppementeoilienmode.pdf

[12] **HASSINI née BELGHITRI HOUDA** « Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque » mémoire Magister 2010, Université de TLEMCEM.

[13] http://www.aprue.org.dz/Programme_ENR_et_efficacite_energetique.fr.pdf

[14] fr.wikipedia.org/wiki/Énergie_éolienne