

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED– NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Électrotechnique

Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

MODÉLISATION ET SIMULATION D'UN SYSTÈME ÉOLIEN

Présenté par :

- AIT MIMOUN Abdelkarim
- MELOUK Moustafa
- BENFISSA Amine

le : 22/06/2021 devant le Jury :

<i>M. BRAHIMI MOHAMED</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M.KHATIR Tawfiq</i>	<i>MCA</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>M. LAHCEN Mohamed Reda</i>	<i>MAB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>

Naama – Algérie – 2021

Résumé

Les énergies renouvelables connaissent un développement énorme et une grande course dans les recherches pour être dans la maîtrise de la technologie et trouver une alternative propre et efficace.

L'Algérie a fourni un grand effort pour l'électrification. En effet, les efforts déployés en matière de satisfaction des besoins énergétiques ont permis d'atteindre un taux national d'électrification de plus de 98%. Malgré ça, il existe des foyers qui ne sont pas accordés au réseau à cause des difficultés liées à la localisation, à l'éloignement et au coût très élevé de la connexion.

Le rôle d'un système éolien de production d'électricité permet de créer une certaine autonomie et aider à préserver les énergies fossiles en profitant de la géographie nationale.

Dans ce travail, nous allons présenter, une étude avec des modèles mathématiques et des simulations de la turbine éolienne.

Mots clés : Turbine, réseau électrique, énergie, l'éolienne, générateurs, puissance, graphes, modélisation, autonomie.

ملخص

تشهد الطاقات المتجددة تطوراً هائلاً وسباقاً كبيراً في البحث لإتقان التكنولوجيا وإيجاد بديل نظيف وفعال. لقد بذلت الجزائر جهداً كبيراً في مجال الكهرباء، وبالفعل فإن الجهود المبذولة في تلبية احتياجات الطاقة جعلت من الممكن تحقيق نسبة كهربة وطنية تجاوزت 98%، والتي لم تُمنح للشبكة بسبب الصعوبات المتعلقة بالموقع، المسافة والتكلفة العالية جداً.

يخلق دور نظام توليد طاقة الرياح استقلالية معينة ويساعد في الحفاظ على الوقود الأحفوري من خلال الاستفادة من الجغرافيا الوطنية.

في هذا العمل، سوف نقدم دراسة مع نماذج رياضية ومحاكاة لتربينات الرياح.

الكلمات المفتاحية: التربينات، الشبكة الكهربائية، الطاقة، تربينات الرياح، المولدات، الطاقة، الرسوم البيانية، النمذجة، الاستقلالية.

Abstract

Renewable energies are experiencing enormous development and a great race in research to master the technology and find a clean and efficient alternative.

Algeria has made a great effort for electrification. Indeed, the efforts made in terms of meeting energy needs have made it possible to achieve a national electrification rate of over 98%. And which are not granted to the network because of difficulties related to location, distance and very high cost.

The role of a wind power generation system creates certain autonomy and helps to preserve fossil fuels by taking advantage of the national geography.

In this research paper, we will present a work with mathematical models and simulations of the wind turbine.

Keywords: Turbine, electrical network, energy, wind turbine, generators, power, graphs, modeling, matlab, autonomy.

Dédicaces

- Je dédie ce travail à toute ma famille, mes frères et sœurs, mes parents ainsi que ma petite famille. AIT MIMOUN Abdelkarim
- Dédicace à toute la famille melouk et à tous mes amis. MELOUK Mostafa
- Je dédié ce mémoire à toute ma famille. BENFISSA Amin

Remerciement

Nous remercions Dieu de nous avoir donné la force physique et morale pour accomplir ce travail.

Nous remercions notre encadreur Mr KHATIR maître de conférence au centre universitaire de NAAMA ; pour son aide et ses encouragements continus.

Nous tenons à remercier également tous ceux qui d'une quelconque façon ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Nous remercions les membres du jury qui nous feront l'honneur de juger ce modeste travail.

Nous tenons à remercier Mr BRAHIMI pour son aimable contribution

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------------	---

Chapitre 1

Généralité sur les énergies éoliennes

1.1-Introduction.....	2
1.2-Généralités sur les systèmes éoliens.....	2
1.2.1-Description d'un éoliens	2
1.2.2- Historique	2
1.2.3- Fonctionnement d'une éolienne	3
1.2.4- Caractéristiques d'une éolienne	4
1.2.5- Principe de fonctionnement	5
1.2.6- Catégories des éoliennes à axe horizontal.....	5
1.2.6.1- Courbe de puissance et zones de fonctionnement.....	7
1.2.6.2- Technologies d'aérogénérateurs.....	7
1.2.6.3- Puissance d'une éolienne.....	8
1.2.6.4- Les Bruits et les vibrations.....	9
1.2.7-Éolienne à axe vertical	10
1.2.7.1-Éolienne de type Savonius.....	10
1.2.7.2- Éolienne de type Darrieus.....	11
1.2.7.3- Éolienne à cône.....	12
1.2.8- Comparaison entre les éoliennes à axe horizontal et les éoliennes à axe vertical.....	2
1.2.9- Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	14
1.2.9.1- Les avantages	14
1.2.9.2- Les inconvénients.....	14
1.3-Conclusion.....	15
Bibliographie 1.....	16

Chapitre2

Modélisation d'un système éolien

2.1-Introduction.....	17
2.2-Modélisation d'un système éolien	17
2.3 Modélisation de la chaîne de conversion éolienne	17
2.3.1- Structure de la chaîne de conversion éolienne	17
2.3.2-Modèle du vent	17
2.3.2.1- Correction de la vitesse de vent avec l'altitude	18
2.3.2.2- Distribution de Weibull	18
2.3.3- Modèle de la turbine	19
2.3.3.1-Puissance récupérable par une turbine	19
2.3.3.2- La loi de Betz	20
2.3.3.3-La vitesse spécifique ou normalisé	21
2.3.3.4- Coefficient de puissance	22
2.3.3.5- Coefficient de couple	23
2.3.4. Modèle de l'arbre de la machine	23
2.3.5- Modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents	24
2.3.6-Puissance éolienne produite	25
2.3.7- Modélisation du système de stockage	26
2.3.7.1-Modèle Simulink du système de stockage électrique	27
2.3.7.2-Dimensionnement du banc de batterie	27
2.3.8-Modélisation du hacheur réversible en courant	28
2.3.9- Modélisation de l'onduleur	29
2.4-Conclusion.....	30
Bibliographie 2.....	31

Chapitre3

Simulation du système Eolien

3.1- Introduction	32
3.2- Simulation de l'éolienne	32
3.3- Les résultats de la simulation	35
3.4- Interpretation des résultats de simulation	39
3.5- Conclusion	41
Conclusion GENERALE.....	42
Références bibliographiques.....	43

Liste des figures

Figure1.1 : L'utilisation de l'énergie éolienne par l'homme est ancienne. Moulins dans la région de La Manche, Espagne.....	3
Figure 1.2 : Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur.....	4
Figure1.3 :Éolienne à axe horizontal.....	5
Figure1.4 :Fonctionnement des éoliennes en amont (a) et en aval(b).....	6
Figure1.5 : Technologies d'aérogénérateurs.....	7
Figure1.6 : Variation de C_p vs. λ Et β	9
Figure1.7 : Situation de l'éolienne sur l'échelle du bruit.....	9
Figure1.8 : Éolienne de type Savonius.....	11
Figure1.9 :Éolienne de type Darrieus.....	11
Figure1.10 : Éoliennes à cône.....	12
Figure1.11 :Les éoliennes étudiées: a) – à axe horizontal; b) – à axe vertical.....	12
Figure1.12 : Courbe de puissance de éoliennes traitées a)éolienne axe horizontal ; b) axe éolienne vertical.....	14
Figure2.1 : Structure de la chaine de conversion éolienne.....	17
Figure2.2 : Colonne d'air animée d'une vitesse.....	19
Figure2.3 : Théorie de Betz : Schéma de principe.....	20
Figure2.4 : Puissance en fonction de la vitesse spécifique.....	21
Figure2.5 : Courbes caractéristiques des aérogénérateurs.....	22
Figure2.6 : Hacheur réversible en courant.....	28
Figure2.7 : Représentation des composants bidirectionnels.....	29
Figure3.1 : Schéma d'une ferme éolienne.....	32
Figure 3.2. : Schéma détaillé de la turbine.....	33
Figure 3.3. Schéma block de la turbine.....	34
Figure 3.4 : Vitesse de la turbine.....	35
Figure 3.5. : Vitesse du vent.....	35
Figure 3.6. : Angle d'inclinaison.....	36
Figure 3.7. : La puissance active produite.....	36
Figure 3.8. : La puissance réactive produite.....	37
Figure 3.9. : Consommation P.....	37
Figure 3.10. : Consommation Q.....	38

Figure 3.11. : Tension reseau 15Kv 38

Figure 3.12. : Tension reseau 220Kv 39

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Distribution de puissance des éoliennes selon leur catégorie.....	6
Tableau1.2 : Caractéristiques des éoliennes étudiées.....	13
Tableau 2.1 : facteur d'idéalité (A).....	18

Liste des symboles et abréviations

GPV : Générateur Photovoltaïque

PV: Photovoltaïque

MPP: Point de fonctionnement optimal

DC-DC : Convertisseur continu-continu

DC : Courant Continu (Direct Curent)

MPPT : Maximum Power Point Tracking

P_m : La puissance mécanique de la turbine, [W].

ρ : densité de l'air, [kg/m^3].

S : Région balayée par la turbine, [m^2].

β_1 : L'angle de position (pitch angle), [degrés].

D_1 : Le diamètre du rotor

CA : courant alternatif

CC :courant continu

K_t : Indice de clarté horaire

ε : Facteur de correction de l'excentricité

z : constante solaire

G_0 : L'irradiante extraterrestre sur un plan horizontal

δ : Angle de la déclinaison solaire

ω : l'angle horaire

N_{10} : Le nombre de jour de l'année

ΔGMT : décalage horaire par apport au méridien de Greenwich

T_{sv} : Temps solaire vrai

T_L : Temps légal (donnée par une montre)

E_T : L'équation de correction du temps

L: longitude du lieu

ω_s :L'angle horaire du soleil à son coucher

θ_z :Angle zénithale

h : hauteur

Ψ :l'angle L'azimut

β_2 : L'angle d'inclinaison du capteur

γ_s : L'angle entre la direction de la surface du capteur et plein sud

I_d : Courant de diode

I : Le courant délivré par le module.

I_{ph} : Photo courant.

I_{sh} : Courant de la résistance shunt

R_{sh} : Résistance shunt.

R_s : Résistance série.

I_{sat} : Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité (A)

k : Constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} J/K$)

q : La constante de Charge d'électron ($1,602 \cdot 10^{-19} C$)

V_{co} : Tension de circuit ouvert.

V_t : La potentielle thermodynamique

G_1 : Rayonnement solaire

I_{cc-ref} : Courant de court-circuit de référence

α_{icc} : Coefficient de température du courant de court circuit

T_c : Température absolue de la cellule (K)

G_{noct} : Rayonnement solaire à Noct

T_{aNoct} : Température ambiante à Noct

N_{oct} : Température nominale d'une cellule

T_a : Température ambiante

$n_p; N_p$: Nombre des cellule en parallèle

α_{vco} : Coefficient de température de tension de circuit ouvert

E_G : Irradiation solaire.

P1, P2, P3, P4 : Paramètres.

E_{ref} : Irradiation de référence.

T_j : Température de la cellule.

T_{ref} : Température de référence.

E_g :Energie de gap pour le silicium cristalline 1.12 eV.

A : Facteur d'idéalité de la jonction

k_1, k_2, m :les coefficients

K1, K2, K3, K4 :Les Paramètres

I_{pv} : Le courant généré par le système photovoltaïque

V_{pv} : La tension générée par le système photovoltaïque
 I_m : Le courant à puissance maximale
 V_m : La tension à puissance maximale
 R_p : Une résistance parallèle
 I_{d1} : Courant du diode 1
 I_{d2} : Courant du diode 2
 $n_s; N_s$: nombre des cellules en série
 P_1 : La puissance générée
 η : Rendement
 P_{in} : Puissance incidente sur la surface de la cellule photovoltaïque (W)
 G_a : Eclairement global incident sur la cellule photovoltaïque (W/m²),
 C_1 : Surface totale de la cellule photovoltaïque (m²).
 P_{max} : Puissance maximale
PPM : point de puissance maximale
 P_{pv} : la variation de puissance
 V_{pv} : La variation de tension
G : la conductance
 ΔG : la conductance incrémentielle
 β : le coefficient de correction
K : un paramètre morphologique (sans dimension).
 C_p : Le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine.
 λ : la rapidité de vitesse linéaire
 P_{aer} : La puissance aérodynamique de l'éolienne
F : la force de l'air
Rt: Rayon de la surface balayée (m)
V : Vitesse du vent (m/s)
 Ωt : Vitesse de rotation avant multiplicatrice (rad/s)
 C_p^{opt} : Étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance C_p .
 λ_{opt} : vitesse spécifique nominale de la turbine
 Ω_{tn} : vitesse de rotation nominale
 C_p : Coefficients de puissance habituels
 C_m : Le coefficient de couple

T_t : Couple de la turbine éolienne (N.m).
 J_t : L'inertie de la turbine.
 J_m : L'inertie de la machine.
 C_{eol} : Le couple statique fournie par l'éolienne.
 C_{em} : Le couple électromagnétique de la génératrice.
 f_m : Le coefficient de frottement de la machine.
 f_t : Le coefficient de frottement des pâles.
 V_a, V_b, V_c : les valeurs instantanées des tensions triphasées .
 i_a, i_b, i_c : les valeurs instantanées des courants triphasées.
 R_s : La résistance des enroulements.
 L_s : L'inductance des enroulements.
 P : le nombre de paires des pôles de la génératrice.
 Φ_f : Le flux magnétique des aimants.
 Ω : la vitesse de rotation de la génératrice.
 V_{AK} : Tension aux bornes de la diode
 $I_D = I_F$: l'intensité du courant direct
 nA : courant de fuite
 V_j : Tension aux bornes de la diode
 V_0 : Tension thermique
 K_B : Constante de Boltzmann
 T : la température absolue de la jonction
 V_{01} : Courant de saturation
 C : conduction de la diode
 V_L : La tension aux bornes de l'inductance
 i_L : Le courant dans l'inductance
 $P_{éol.moy}$: La puissance moyenne produite par l'aérogénérateur
 v : La probabilité de la vitesse V .
 $P_{éol}$: La puissance résultante d'une vitesse v .
 P_n : Puissance nominale de l'éolienne.
 V_d : vitesse de démarrage de la turbine.
 V_n : vitesse nominale de la turbine.
 V_c : vitesse de coupure de la turbine.
 K : le facteur de forme.

SOC_0 : L'état de charge initial de la batterie.

t_0 : Le temps en seconde de l'état initial.

C_{bat} : La capacité de la batterie (Ah).

I_{bat} :Le courant de la batterie (A)

P_{res} : La puissance produite par les sources renouvelables

P_{pompe} : La puissance demandée par la pompe.

P_{charge} :La puissance totale des petits appareils de la ferme.

B :charges journalière [Wh/jour]

N :le nombre de jours de réserve ou stockage

D : le taux de décharge maximale des accumulateurs

R : le rendement des accumulateurs

T_1 et T_2 :la commande des interrupteurs

d_b :Rapport cyclique

I_{cb} :Le courant injecté ou absorbé du bus CC

T_i :L'association d'un transistor

D_i : L'association d'une diode

K_i :un composant bidirectionnel

F_i : l'État de l'interrupteur K_i

θ :L'angle d'incidence du rayonnement direct sur un plan incliné

V_{op} : La tension de puissance maximale

I_{op} : Le courant de puissance maximale

V_{esuil} :Donnée fournie par les constructeurs et vaut typiquement

V_{dc} :La charge résistive dans l'inductance

Introduction générale

L'homme utilise l'énergie éolienne depuis des milliers d'années. Les Perses de l'Antiquité utilisaient déjà l'énergie éolienne pour pomper l'eau. On a exploré le monde à l'aide de navires entraînés par le vent bien avant l'invention du moteur. Pas plus tard qu'en 1920, plus d'un million d'éoliennes servaient à pomper l'eau et à fournir l'électricité aux entreprises agricoles de l'Amérique du Nord.

Dans les années 50, des centaines d'éoliennes étaient encore utilisées en Algérie pour le pompage de l'eau, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site de Grand Vent (Alger).

Aujourd'hui, l'énergie électrique d'origine éolienne est parfois considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables à développer pour remplacer le pétrole, le gaz et même le nucléaire. En 2005, 6183 MW ont été installés dans les pays de la communauté européenne (1808 MW pour l'Allemagne et 1764 MW pour l'Espagne), soit une production électrique de 83 TWh, égale à 2.8% de la consommation électrique de 2004.

De nos jours, le vent et l'énergie qu'il véhicule sont l'objet d'études et d'applications multiples dans divers domaines. La volonté de réduire les émissions de gaz responsables de l'effet de serre, a poussé beaucoup de pays à s'intéresser aux énergies éoliennes.

Toutefois, une bonne connaissance des caractéristiques du vent et le choix du site est très important pour une exploitation optimale des éoliennes.

L'Algérie dans certaines de ces régions, possède un bon potentiel, ce qui favorise le développement et l'utilisation de l'énergie éolienne surtout dans les sites proches de l'atlantique comme ADRAR et TINDOUF.

Le but de ce travail est l'étude d'un système éolien. Pour cela, notre travail, sera organisé comme suit :

Le premier chapitre, est consacré sur les généralités où nous allons décrire plus particulièrement le principe de fonctionnement de notre source d'énergies éolienne.

Dans le second chapitre, on procédera à une modélisation mathématique des différentes parties constituant le système étudié.

Le dernier chapitre, nous simulerons les relations mathématiques que nous avons étudiées précédemment en utilisant MATLAB/SIMULINK, avec interprétation des résultats

Finalement, une conclusion générale de ce travail.

1.1-Introduction

La consommation des énergies mondiales qui jouent un rôle trop important dans l'assurance des énergies sont d'origine fossiles comme le pétrole ; le gazect. Sachant que la consommation excessive de ces ressources énergétiques conduira à l'épuisement graduel et progressif de ces réserves et causera par les rejets des gaz à la pollution de l'environnement. Cette dégradation atmosphérique due à l'effet de cause le changement climatique (changement de température, variations climatiques, sécheresse, désertification).

Face à ces conséquences, il est obligatoire et nécessaire de prendre en considération et en application et l'utilisation des énergies alternatives de sources renouvelable.

Nous allons commencer dans ce premier chapitre par présenter les énergies renouvelables et spécialement le système photovoltaïque et le système éolien.

Dans ce travail, nous essayons d'expliquer la nature des énergies renouvelables, leur fonctionnement, leurs caractéristiques, leurs effets sur la santé humaine et quels sont les bienfaits pour l'environnement.

1.2-Généralités sur les systèmes éoliens

1.2.1-Description d'un éoliens

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, dite énergie éolienne, laquelle est ensuite transformée en énergie électrique.

Les éoliennes produisant de l'électricité sont appelées aérogénérateurs, tandis que les éoliennes qui pompent directement de l'eau sont parfois dénommées éoliennes de pompage ou pompe à vent. Une forme ancienne d'éolienne est le moulin à vent.

Les centrales éoliennes, parcs éoliens ou fermes éoliennes sont les unités de production groupées, installées à terre ou en mer.

1.2.2- Historique

Il y'a plus de 3000 ans déjà, l'énergie du vent était transformée en énergie mécanique, d'une part sur terre par les moulins et des systèmes de pompage de l'eau, d'autre part en mer, par les bateaux.

La génération de l'énergie électrique par le vent a débuté à la fin du XIX^e siècle. Parmi les pionniers on cite :

-Paul La Cour au Danemark qui a associé une dynamo à une éolienne en 1891. Dans les années 1950.

-Johannes (élève de Paul La Cour) devient aussi un pionnier dans l'utilisation de l'énergie éolienne en construisant les premières éoliennes produisant du courant alternatif.

La première crise pétrolière en 1973 contribua à éveiller l'intérêt pour l'énergie éolienne dans plusieurs pays ; où les USA ont notamment lancé en Californie une opération à grande échelle au début des années 1980 en passant de 7MW en 1981 à 386 MW en 1985.

Aujourd'hui, les études portent sur l'amélioration de l'aérogénérateur ainsi que sur la chaîne de conversion de l'énergie du vent en énergie électrique exploitable par le réseau.

Les premières éoliennes mettent en œuvre une génératrice asynchrone liée aux pâles par l'intermédiaire d'une boîte de vitesse, fonctionnant à vitesse fixe et directement reliée au réseau (pas d'interface électronique). Cette technologie était surtout utilisée au Danemark dans les années 1970.

Les avancées actuellement se dirigent vers les systèmes les plus récents qui utilisent d'une part la vitesse variable pour maximiser la puissance captée par le vent avec l'insertion de l'électronique entre la génératrice et le réseau, et d'autre part vers l'utilisation de génératrices spéciales tournant à basse vitesse afin de s'affranchir du réducteur de vitesse.



Figure1.1 : L'utilisation de l'énergie éolienne par l'homme est ancienne. Moulins dans la région de La Manche, Espagne

1.2.3- Fonctionnement d'une éolienne

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple, le vent transformé en énergie électrique éolienne dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage d'électricité éolienne.

1.2.4- Caractéristiques d'une éolienne

L'éolienne la plus courante, est à axe horizontal, elle se compose des éléments suivants :

-Un mât qui permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement ou à une hauteur où le vent souffle de façon plus forte et plus régulière qu'au niveau du sol. Le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande, multiplicateur, générateur, etc.).

Les mâts sont généralement en acier, mais des mâts de béton sont de plus en plus utilisés par certains producteurs

-Une nacelle qui est montée au sommet du mât et abrite les composants mécaniques, pneumatiques, et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine. La nacelle peut tourner pour orienter la machine dans la bonne direction.

-Un rotor : Il est composé du nez de l'éolienne recevant les pales (en général trois), fixé sur un arbre tournant dans des paliers installés dans la nacelle. Le rotor, solidaire des pales, est entraîné par l'énergie du vent. Il est branché directement ou indirectement via un Multiplicateur de vitesse à engrenages au système mécanique qui utilise l'énergie recueillie (pompe, générateur électrique, etc.).

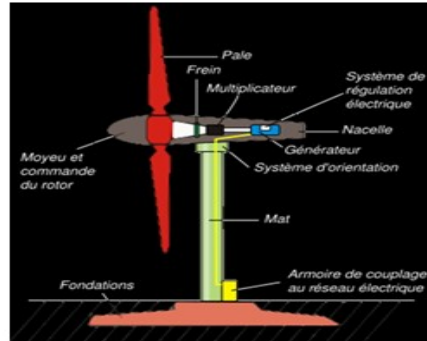


Figure 1.2: Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur

1.2.5- Principe de fonctionnement

La forme des éoliennes à axe horizontal, il a été déduit des moulins à vent. Il se compose de deux ou trois pales en rotation par de aérodynamique. Le principe de son fonctionnement est identique au fonctionnement des turbines hydrauliques, la puissance mécanique du vent fait tourner des pales reliées directement ou via un multiplicateur de vitesse à un alternateur ; ce dernier produit de l'électricité.

Une éolienne est formée de trois parties importantes de fonctionnement qui sont le rotor, la nacelle et la tour (Figure1.18) Les éoliennes à axe horizontal fonctionnent de deux manières en « amont » ou en « aval ». Pour les éoliennes qui fonctionnent en amont, le vent frappe les pales directement. Il y a une grande résistance pour pouvoir résister au vent, et la majorité des grandes éoliennes dont la puissance dépasse les 1000 kW fonctionnent avec ce principe. Pour les éoliennes fonctionnant en aval, le vent frappe sur l'arrière des pales.

Cette configuration est plus utilisée pour les petites éoliennes.



Figure1.3 : Eolienne à axe horizontal

1.2.6- Catégories des éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont divisées en fonction leur efficacité d'utilisation.

Les éoliennes industrielles : Produisent plus d'énergie et donc elles sont les plus chères. Elles sont réservées à des applications de forte puissance. Leu mât possède une hauteur de 50 à 120 m et un diamètre de 4 à 6 m. Ceci nécessite des fondations triées puissantes pour soutenir l'ensemble. La hauteur totale d'une éolienne industrielle est de 25 à 180 m. Sa puissance varie entre 100 kW et 5 MW.

Les éoliennes domestiques : Sont appelées petites éoliennes dont la puissance est comprise entre 100 W et 20 kW. Leur mât ne dépasse pas 12 m. Vu leur taille relativement petite, elles peuvent être installées dans les zones urbaines. En plus la nuisance sonore est quasi nulle.

Le Tableau 1.1 illustre la distribution de puissance des éoliennes selon leur catégorie de puissance pour chaque catégorie.

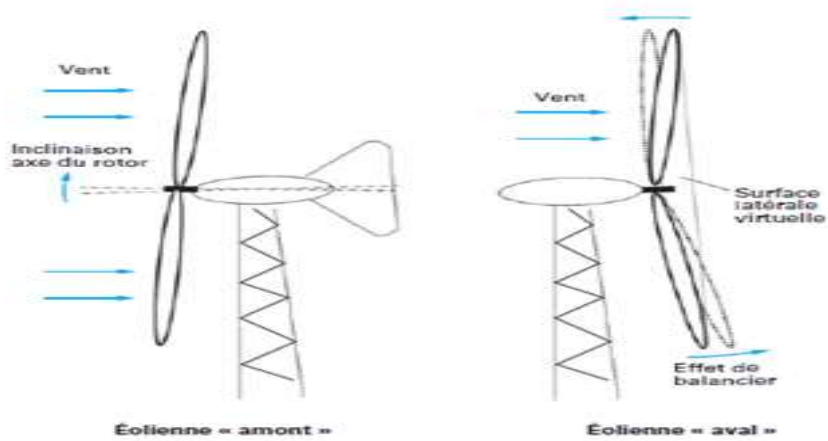


Figure 1.4 : Fonctionnement des éoliennes en amont (a) et en aval (b)

Eoliennes industrielles	Eoliennes domestiques
kw	kw
100	100
200	200
300	300
500	400
600	600
750	750
1000	1000
1500	2000
2000	3000
3000	5000
4000	10000
4500	20000

Tableau 1.1 : Distribution de puissance des éoliennes selon leur catégorie

1.2.6.1- Courbe de puissance et zones de fonctionnement

La vitesse du vent est le principal facteur du principe de fonctionnement des éoliennes. Le champ de changement de vitesse du vent commence à partir d'une vitesse inférieure et cela démarre le fonctionnement de l'éolienne jusqu'à une vitesse maximale et ici il y a un risque que l'éolienne soit endommagée.

En fait, l'éolienne possède quatre zones de fonctionnement.

- Zone I: quand la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage minimum – La turbine est arrêtée.

-Zone II: dans cette zone, la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

-Zone III: à partir de la vitesse nominale, la puissance est maintenue constante avec des méthodes mécaniques de limitation de vitesse de la turbine

-Zone IV: une fois la vitesse maximum atteinte il est dangereux de laisser l'éolienne tourner, des systèmes de freinage mécanique, souvent un frein à disque, sont activés pour arrêter complètement le turbine.

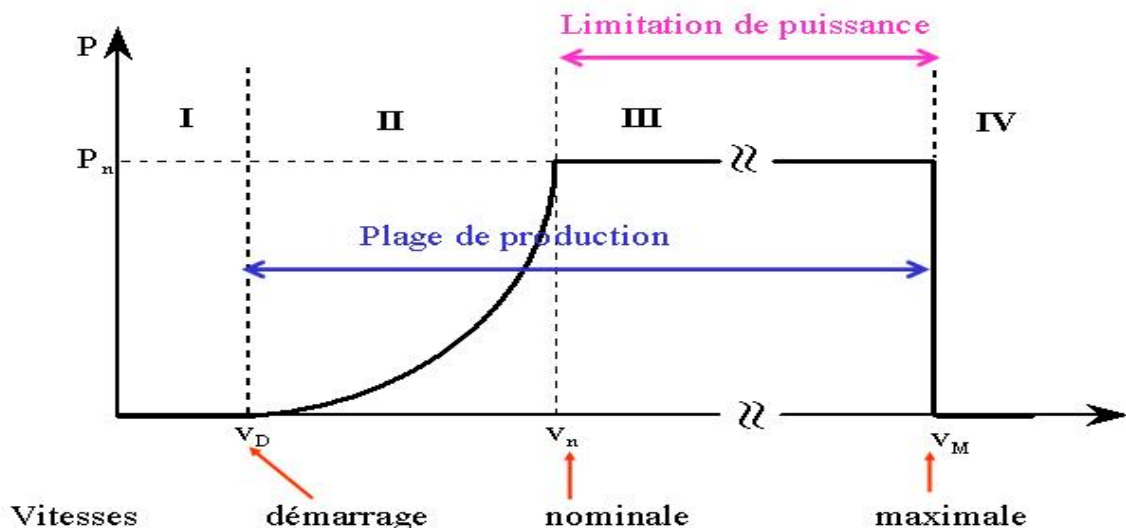


Figure1.5 : Technologies d'aérogénérateurs $P(V)$

1.2.6.2- Technologies d'aérogénérateurs

Il existe de nombreuses technologies d'aérogénérateurs, mais elles diffèrent selon le choix de la génératrice et le mode de commande, Parmi les plus importantes on peut citer les suivantes:

- La machine à courant continu.
- La machine asynchrone à cage fonctionnant à vitesse fixe.
- La machine asynchrone à cage fonctionnant à vitesse variable.
- La machine asynchrone à double alimentation.
- La machine synchrone à aimants.

1.2.6.3-Puissance d'une éolienne

L'expression de la puissance générée par une éolienne est donnée par la relation (Wild & Sybille):

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot S \cdot V^3$$

Avec : $P_m \rightarrow$ la puissance mécanique de la turbine, [W].

$C_p \rightarrow$ coefficient de performance de la turbine (sans unités).

$\rho \rightarrow$ densité de l'air, [kg/m^3].

$S \rightarrow$ région balayée par la turbine, [m^2].

$V \rightarrow$ vitesse de l'air, [m/s].

Pour une turbine donnée, et comme les deux paramètres ρ et S sont des constantes, la valeur de la puissance générée dépend du coefficient de performance, C_p et de la vitesse de l'air v . Pour maximiser cette puissance, et comme la vitesse du vent est variable, le coefficient de performance doit être maximisé, donc contrôlé. L'expression de ce coefficient est de la forme.

$$C_p(\lambda, \beta) = A_1 \left(\frac{A_2}{\lambda_i} - A_3 \beta - A_4 \right) \exp \left(-\frac{A_5}{\lambda_i} \right) + A_6 \lambda$$

Avec: $-\lambda$ le rapport de la vitesse de pointe de la pale de l'éolienne par rapport à la vitesse de l'air.

$-\beta$ l'angle de position (pitch angle), [degrés].

Où λ_i est défini par la relation.

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

Pour :

$$A_1 = 0,5176; A_2 = 116; A_3 = 0,4; A_4 = 5; A_5 = -21; A_6 = 0.0068.$$

La Figure 1.6. Représente les résultats de simulation de la variation de C_p vs.

λ et cela pour plusieurs valeurs de β . Ce coefficient prend une valeur maximale égale à 0,42, et cela pour $\lambda = 9$ et $\beta = 1^\circ$.

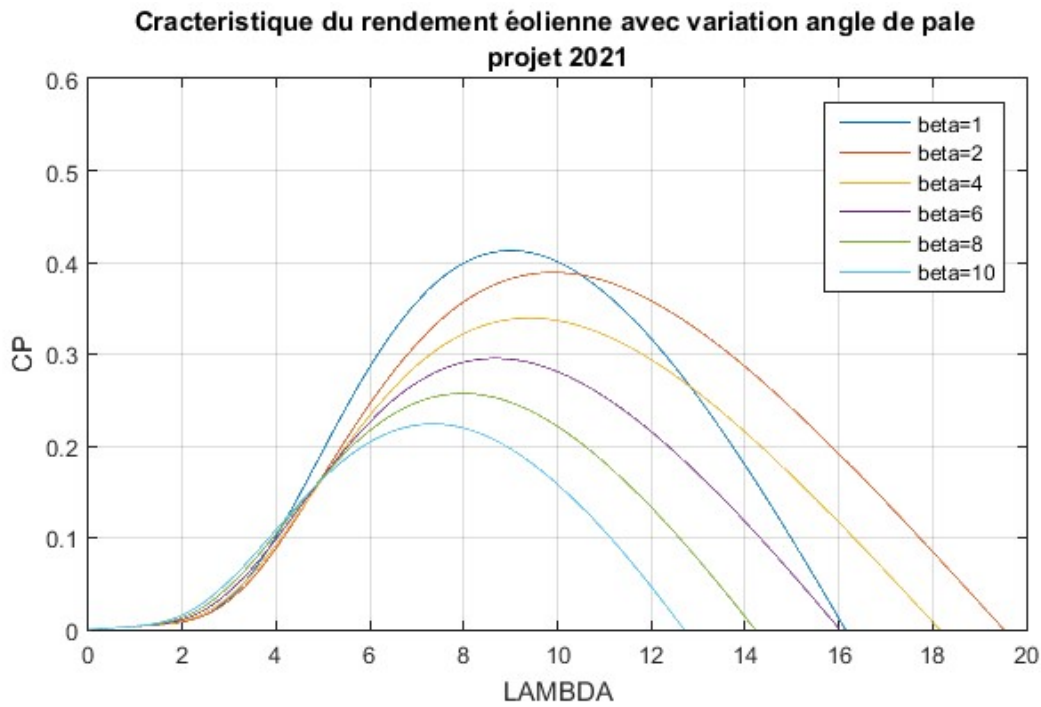


Figure1.6 : Variation de C_p vs. λ Et β .

En général, si λ est inférieur à 3, alors l'éolienne est lente. Sinon elle est considérée comme rapide. À noter que pour de grandes valeurs de λ , des problèmes de stabilité et de bruit apparaissent

1.2.6.4- Les Bruits et les vibrations

Les éoliennes de première génération étaient nuisibles du point de vue sonore, mais aujourd'hui avec l'avancée technologique le bruit produit par ces machines a été réduit de manière considérable. En effet, sur une échelle de bruit, l'éolienne se situe entre le bruit d'un vent léger et le bruit de l'intérieur d'une habitation, soit environ 45 dB. Voir (Figure1.7). L'évolution du niveau sonore en fonction du nombre d'éoliennes est logarithmique, c'est-à-dire que l'ajout d'une deuxième éolienne augmente le niveau sonore de 3 dB au lieu de le doubler.

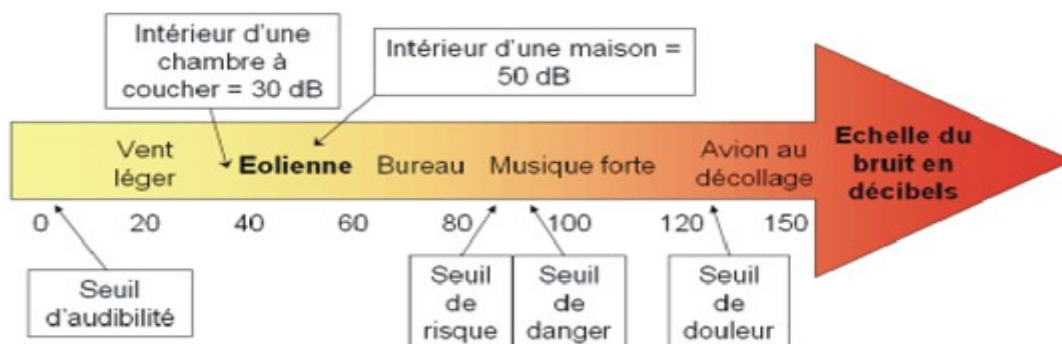


Figure1.7 : Situation de l'éolienne sur l'échelle du bruit.

Le développement des technologies et l'amélioration des éoliennes ont permis de réduire le bruit mécanique lié à la transmission et à l'alternateur. Il a été réduit de manière significative par le biais d'une insonorisation améliorée de la nacelle et d'autres mesures comme la modification ou la suppression des engrenages. Sur certains modèles les arbres de transmission sont placés sur des coussinets amortisseurs et sur d'autres modèles des systèmes d'isolation sont présents en haut du mat permettant l'absorption de la propagation des vibrations et des autres bruits mécaniques à la structure. Mais malgré cet important progrès, la perception du bruit est différente d'une éolienne à l'autre. A cet effet les éoliennes industrielles doivent préserver un éloignement de 300 m par rapport aux habitations. Par contre, les petites éoliennes sont généralement très silencieuses car c'est souvent le réducteur de vitesse des grosses machines qui génère du bruit par gros vent.

1.2.7-Éolienne à axe vertical

En raison de la petite taille de l'éolienne à axe vertical, qui n'a pas besoin de grandes places, elle peut être installée sur un support fixé sur le toit d'une résidence, d'un bâtiment commercial, d'une ferme ou d'une usine. En plus, elles captent l'énergie du vent quel que soit sa direction. Il existe trois types d'éoliennes à axe vertical : Savonius, Darrieux et à cône.

1.2.7.1-Éolienne de type Savonius

Le rotor de Savonius est une éolienne à axe vertical inventée par l'ingénieur finlandais Sigurd Savonius en 1924 et brevetée en 1929. Il est constitué schématiquement de deux, ou plusieurs, godets demi-cylindriques légèrement désaxés qui présentent un grand nombre d'avantages. Outre son faible encombrement, qui permet d'intégrer l'éolienne aux bâtiments sans en dénaturer l'esthétique, il est peu bruyant. Il démarre à de faibles vitesses de vent et présente un couple élevé variant de façon sinusoïdale au cours de la rotation.

L'accroissement important de masse en fonction de la dimension rend l'éolienne de type Savonius peu adaptée à la production de masse dans un parc à éoliennes.

Le modèle original est conçu avec un espace e entre les pales tel que :

$$\frac{e}{D} = \frac{1}{3} \rightarrow \text{le diamètre du rotor}$$



Figure1.8 : Éolienne de type Savonius.

1.2.7.2- Éolienne de type Darrieus

Darrieus est un type d'éolienne à axe vertical qui produit de l'électricité à partir de l'énergie du vent. La turbine se compose d'un certain nombre de pales incurvées ou un cadre. Ce concept d'éolienne a été breveté par Georges Darrieus, ingénieur aéronautique Français en 1931. Dans les versions originales d'éolienne Darrieus, les pales sont disposées de telle sorte qu'elles sont symétriques et sont disposées avec un angle de zéro par rapport à la structure. Cette disposition est aussi efficace, quelle que soit la direction du vent. Lorsque le rotor Darrieus tourne, les pales se dirigent vers l'avant dans les airs avec une trajectoire circulaire. Les principes aérodynamiques qui font tourner le rotor sont équivalentes à ceux des autogires et hélicoptères autorotation. L'éolienne tourne à une vitesse sans rapport avec la vitesse du vent, et généralement beaucoup plus rapide. L'énergie provenant du couple et de la vitesse de rotation peut être extrait et convertie en puissance électrique à l'aide d'un générateur électrique.



Figure1.9 : Éolienne de type Darrieus

1.2.7.3- Éolienne à cône

L'éolienne à cône se compose de plusieurs couches minces de puces aérodynamiques (ailerons) connectés via des sous-fils à un point de distribution central où l'énergie du vent est exploitée par une dynamo et convertie en énergie électrique. Le centre du cône se compose d'une tige de distribution (en graphite) de poids léger. Les cônes ont une extrémité secondaire flexible qui permet aux cônes à poursuivre le chemin de vent et ainsi de recueillir un maximum d'énergie.

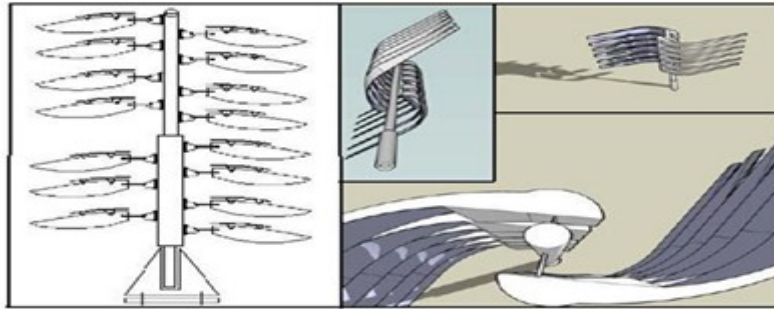


Figure1.10 : Éoliennes à cône.

Les éoliennes à cônes sont légères, elles peuvent être auto détenues et assemblées pour l'usage individuel et sont facilement adoptées dans les milieux urbains. Les cônes résidentiels sont flexibles en taille. La puissance varie de 100 W à 2000 W.

1.2.8- Comparaison entre les éoliennes à axe horizontal et les éoliennes à axe vertical

Elles ont la même puissance nominale, l'une s'appelle éolienne à axe verticale et l'autre s'appelle une éolienne à axe horizontal.



Figure1.11 : Les éoliennes étudiées: a axe horizontal; b) – à axe vertical.

Les caractéristiques de ces de sorte d'éoliennes sont résumées dans le tableau suivant :

Axe d'éolienne	Poids Kg	Nombre de lames	Hauteur Du mat M	Diamètre m	Vitesse De vent m/s	Tension V
Horizontal	320	3	6	3,2	3...25	48
Vertical	395	6	8	1,8	3...30	220

Tableau1.2 : Caractéristiques des éoliennes étudiées

L'étude menée sur ces deux types d'éoliennes montre:

- L'éolienne à axe horizontal démarre à une vitesse du vent supérieure ou égale à 2,5 m/s. Par contre, celle à axe vertical nécessite une vitesse qui avoisine 3,3 m/s.
- L'augmentation de la puissance de l'éolienne à axe horizontal en fonction de la vitesse du vent est plus rapide que celle à axe vertical, exemple pour une vitesse du vent de 4 m/s la puissance produite par l'éolienne à axe horizontal est égale à 200 W tandis que celle délivrée par l'éolienne à axe vertical produit 100 W.
- Le coefficient de performance de l'éolienne à axe horizontal est égal à 0,593. Celui de l'éolienne à axe vertical avoisine 0,3.
- L'éolienne à axe horizontal de diamètre 3 m et de hauteur 6 m occupe plus d'espace que celle à axe vertical, qui est caractérisée par un diamètre de 1,35 m et d'une hauteur de 2,2 m. En général, plus la hauteur de l'éolienne est grande, plus sa production est élevée.
- Le rendement de l'éolienne à axe horizontal est supérieur à celui de l'éolienne à axe vertical.
- L'éolienne à axe horizontal est plus solide et sa fabrication coûte moins cher que celle à axe vertical.
- L'éolienne à axe vertical possède l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles.
- À noter que les éoliennes à axe vertical sont de conception plus complexe que les éoliennes à axe horizontal mais s'adaptent plus facilement à des zones de vent irrégulier alors que les éoliennes à axe horizontal doivent être équipées d'un système d'orientation par gouvernail qui assure une orientation face au vent. Les éoliennes à axe vertical ne connaissent pas les limites dues à la taille des pales et à la vitesse des vents, elles peuvent donc être beaucoup plus adaptées et performantes dans les zones de vents extrêmes.

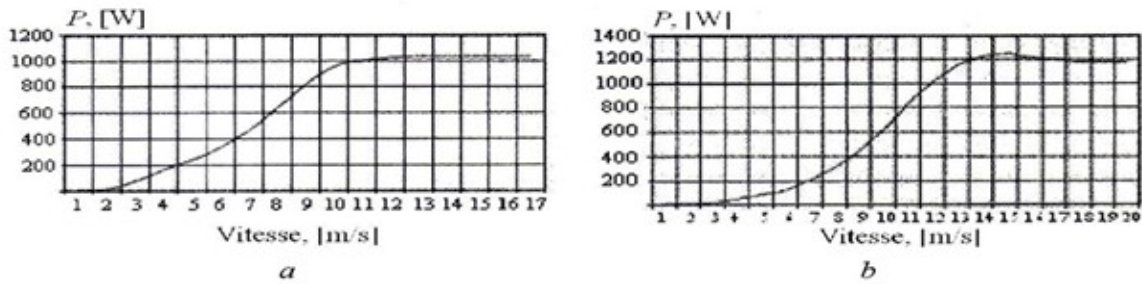


Figure 1.12 : Courbe de puissance d'éoliennes traitées :

a) éolienne axe horizontal ; b) axe éolienne vertical

1.2.9- Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

1.2.9.1- Les avantages

-L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, énergie éolienne participe à long terme au maintien de biodiversité des milieux naturels.

-L'énergie éolienne produit de l'électricité sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols.

-Les parcs éoliens sont installés sur 2% des terres agricoles, la surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.

-Un parc éolien prend peu de temps à construire, et son démantèlement garantit la remise en état du site original.

1.2.9.2- Les inconvénients

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

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

-La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas

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

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

-Il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses.

1.3-Conclusion

L'étude et l'analyse du premier chapitre comprend les définitions, les composants et les fonctionnements des processus générant des énergies éoliennes. Nous remarquons l'intérêt de ces énergies pour l'environnement et la santé de notre planète. Dans le chapitre suivant nous allons définir les modèles mathématiques développés afin d'extraire cette énergie.

Bibliographie 1

- 1- Olivier GERGAUD « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » le 9 décembre 2002 de l'École Normale Supérieure de Cachan
- 2-MEZZAI SONIA, TADJINE KATIA « Etude d'un système hybride (Eolien-Photovoltaïque) » mémoire de master l'université Abderrahmane Mira-Bejaia, Juin 2015
- 3-Mr. *FELLAH Boumediene* «Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah » *EN Octobre 2012*
- 4-N. SARAH, M. NAZIH «étude comparative entre éolienne à axe horizontal et éolienne à axe vertical ». Université Libanaise décembre 2011.
- 5-BENCHEMSA ISSAM « L'Utilisation de l'énergie thermique pour le chauffage domestique » mémoire de master l'université Badji Mokhtar Annaba Année : 2016/2017.
- 6-BAGHDADI FAZIA «Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables» mémoire de magister l'université du mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Soutenu le: 26 /09/2011.
- 7-LIONEL VECHUI, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thème de doctorat de l'université du havre, 15 décembre 2005.

2.1-Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier les différents composants du système éolien ; ses avantages et ses inconvénients. La modélisation d'un système consiste à représenter mathématiquement le système physique afin de pouvoir mieux l'étudier. En d'autres mots, le modèle mathématique du système définit la fonction des sous-systèmes régit par les lois de la physique.

2.2- La modélisation d'un système éolien

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié elle a pour but d'étudier théoriquement le comportement de certains paramètres et de les optimiser en respectant une contrainte donnée. A cet effet, la modélisation est nécessaire pour établir une relation entre l'énergie produite par le système éolien et la demande de l'utilisateur.

2.3- Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

2.3.1- Structure de la chaîne de conversion éolienne

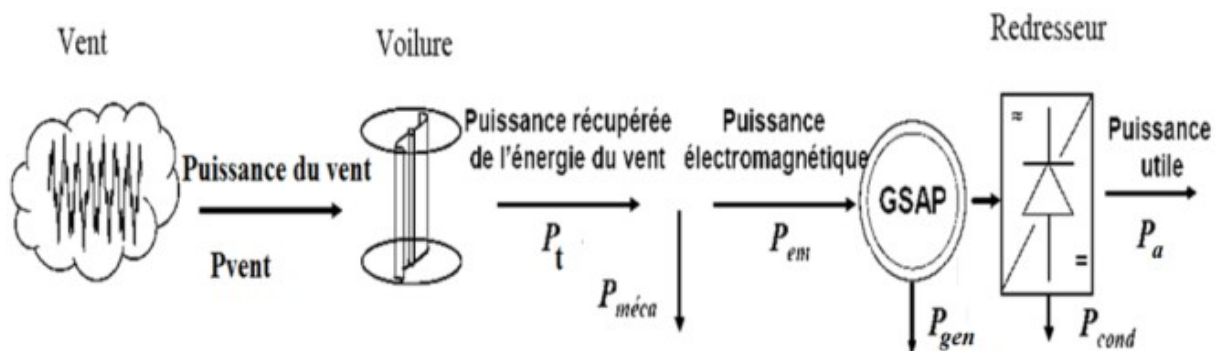


Figure2.1: Structure de la chaîne de conversion éolienne

Pour notre étude et notre modélisation du stockage de l'énergie éolienne, il existe de nombreux paniers de conversion, nous allons donc utiliser l'un d'eux, comme indiqué sur la figure, qui consiste en voilure capte l'énergie cinétique du vent couplée directement à une génératrice synchrone que débite sur un bus continu via un redresseur à diodes et des batteries de stockage.

2.3.2-Modèle du vent

L'efficacité la vitesse de vent dépend notamment de son emplacement. En effet, la puissance fournie augmente avec le cube de la vitesse du vent, raison pour laquelle les sites sont d'abord choisis en fonction de la vitesse et de la fréquence des vents présents. Un site avec des vents de 30km/h de moyenne sera huit fois plus productif qu'un autre site avec des vents de

15km/h de moyenne. Une éolienne fonctionne d'autant mieux que les vents sont réguliers et fréquents.

La vitesse du vent peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps :

$$v_v = f(t)$$

La vitesse du vent sera modélisée, dans cette étude, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme :

$$v_v = A + \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_n \cdot w_v \cdot t))$$

2.3.2.1- Correction de la vitesse de vent avec l'altitude

Une augmentation de la vitesse du vent est une relation directe avec l'altitude par rapport au sol (Hladik1994), car l'altitude était plus élevée, la vitesse du vent était grande.

Nous avons donc converti les vitesses de vent à h_0 en vitesses de vent à la hauteur de moyeu h par la relation de Justus (1978) :

$$V_h = V_{h_0} \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^\beta$$

Où β est le coefficient de correction souvent considéré comme étant égal à 0,15.

Sa valeur dépend de la nature du terrain. Les valeurs habituelles sont montrées dans le Tableau ci-dessous.

Tableau 2.1 : Valeurs du coefficient de correction

Nature du terrain	β
Surface en eau	0.1
Plaine herbeuse	0.15
Culture agricole	0.2
Végétation avec peu d'arbre	0.2
Bois	0.25
Plusieurs bâtiments	0.25
Terrain accidenté, montagneux	0.25

La vitesse ainsi corrigée est utilisée dans les calculs.

2.3.2.2- Distribution de Wei bull

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer l'analyse géographique du vent parmi elles : La distribution de Wei bull permet souvent une bonne approximation de la distribution de la vitesse :

$$f(v) = \frac{v}{A} * \left(\frac{v}{A}\right)^{K-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{A}\right)^K\right)$$

Où : A est le paramètre d'échelle en m/s.

K : est un paramètre morphologique sans dimension.

V : la vitesse.

2.3.3- Modèle de la turbine

Une turbine est un dispositif rotatif convertissant partiellement l'énergie interne d'un, fluide, liquide comme l'eau ou gazeux ou vapeur, air, gaz de combustion, en énergie mécanique au moyen d'aubes disposées sur un arbre tournant à grande vitesse.

L'énergie entrante du fluide est caractérisée notamment par sa vitesse, sa pression, son enthalpie. L'énergie mécanique sortante de la turbine, entraîne un autre mécanisme rotatif comme un alternateur, un compresseur, une pompe ou tout autre récepteur (exemple un générateur).

L'ensemble est alors respectivement appelé turbo-alternateur, turbocompresseur, turbopompe, etc....

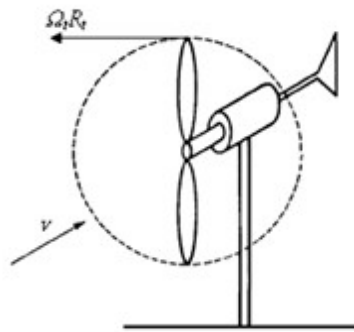


Figure2.2: Colonne d'air animée d'une vitesse

2.3.3.1-Puissance récupérable par une turbine

La puissance fournie par le vent est donnée par la relation suivant :

$$p_v = \frac{1}{2} * \rho * S * V^3$$

L'éolienne ne pouvant récupérer qu'une fraction de la puissance du vent, la puissance de la turbine s'écrit alors :

$$P_t = \frac{1}{2} * C_p * \rho * S * V^3$$

Où C_p est le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine.

2.3.3.2- La loi de Betz

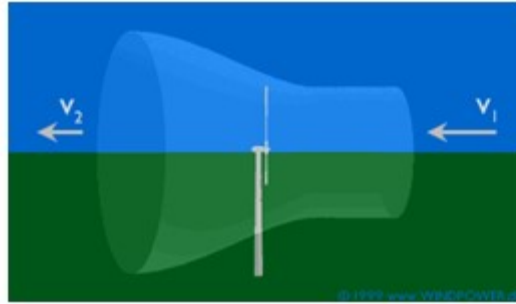


Figure2.3 : Théorie de Betz : Schéma de principe

La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique, la puissance théorique maximale récupérable par un capteur éolien est égale à 16/27 de la puissance incidente du vent que travers l'éolienne. Cette limite sera atteinte lorsque la vitesse de vent sera divisée par trois entre l'amont et l'aval de l'éolienne.

Ce fut l'Allemand Albert Betz pour la première fois. Son livre « Wind-Energie » (Energie éolienne) publié en 1926 donne une idée de l'état des connaissances en énergie éolienne et des aérogénérateurs de l'époque. Il est en fait très surprenant qu'il soit possible de formuler une telle théorie générale qui s'applique à toute éolienne ayant un rotor en forme de disque.

La puissance incidente du vent est cinétique et dépend de la surface que capteur éolien propose au vent, de la vitesse du vent et de la masse volumique de l'air donné par la formule :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} * M * (V_1^2 - V_2^2)$$

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

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

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

$$F = \rho * S * V' * (V_1 - V_2)$$

D'où :

$$P_{aer} = F * V' * \frac{1}{2} * \rho * S * V'^2 * (v_1 - V_2)$$

En identifiant les équations, on aura : $V' = \frac{V_1 + V_2}{2}$

Et donc :

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

2.3.3.3-La vitesse spécifique ou normalisé

La vitesse spécifique ou le paramètre de rapidité noté λ (Lambda) en anglais Tip Speed Ratio (TSR) est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales et la vitesse du vent. Les machines peuvent être classées en fonction de ce paramètre :

Si λ est inférieur à 3, l'éolienne est dite lente

Si λ est supérieur à 3, l'éolienne est dite rapide

Par exemple, une éolienne bipale peut avoir un paramètre λ égal à 20.

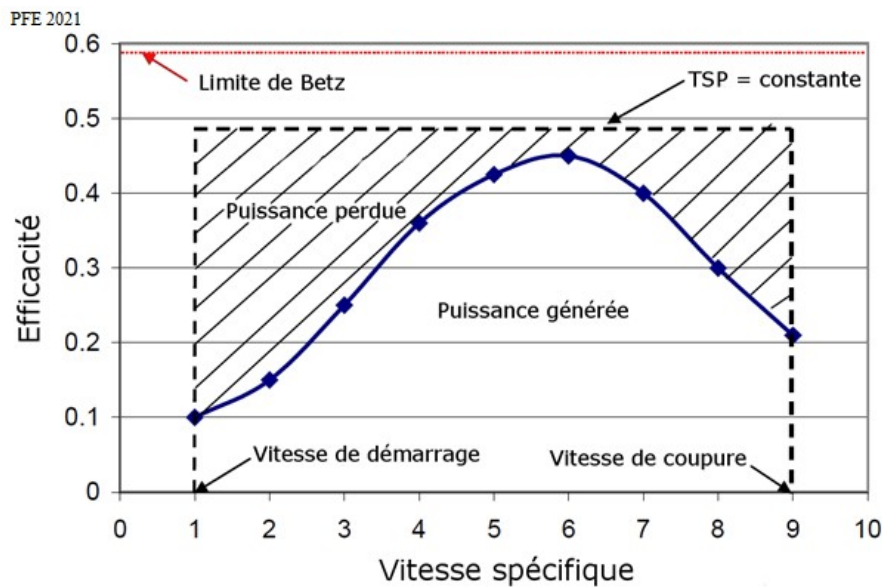


Figure2.4 : Puissance en fonction de la vitesse spécifique

La vitesse spécifique donnée par l'expression suivante:

$$\lambda_n = \frac{\Omega t \cdot R t}{V}$$

Rt : Rayon de la surface balayée (m)

V : Vitesse de vent (m/s)

Ωt : Vitesse de rotation avant multiplicatrice (rad/s)

2.3.3.4- Coefficient de puissance

Au cours de cet exposé, nous aborderons les notions de puissance et coefficient de puissance ainsi que la courbe de puissance d'une éolienne. Nous parlerons de régulation, stalle et pitch et calculerons l'énergie récupérée par une éolienne et son facteur de charge. Alors à cause des vitesses non nulles de l'air derrière l'éolienne, la puissance récupérée sur une éolienne est inférieure à la puissance du vent.

On définit alors ce qu'on appelle un coefficient de puissance comme étant le rapport de la puissance de l'éolienne divisé par la puissance du vent :

$$P_{\acute{e}ol} = C_p * P_v = C_p * \frac{\rho * S * V^3}{2}$$

$$C_p = \frac{2 * P_{\acute{e}ol}}{\rho * S * V^3}$$

Le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_p^{opt} = \frac{P_{\acute{e}ol}}{P_v} = 0,59$$

C_p^{opt} Étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance C_p . Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale λ_{opt} pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale V_n et une vitesse de rotation nominale Ω_{tn} .

La figure donne une vue sur les coefficients de puissance C_p habituels en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types d'éoliennes.

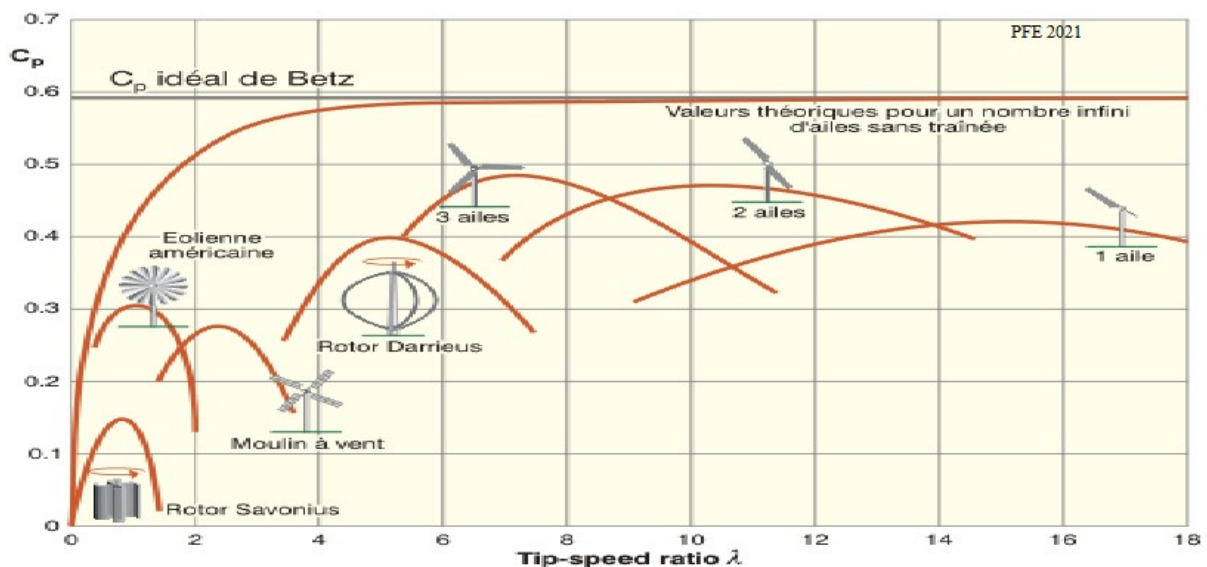


Figure2.5 : Courbes caractéristiques des aérogénérateurs

2.3.3.5- Coefficient de couple

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

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

$$T_t = \frac{P_m}{\Omega_T} = \frac{R_t * P_m}{\lambda * t} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda} * \rho * \pi * R_t^3 * V^2$$

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

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

T_t : Couple de la turbine éolienne (N.m).

2.3.4. Modèle de l'arbre de la machine

C'est la modélisation le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice par l'équation différentielle donnée comme suit :

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega}{dt} = C_{eol} - C_{em} - (f_m + f_t)\Omega$$

J_t : L'inertie de la turbine.

J_m : L'inertie de la machine.

C_{eol} : Le couple statique fournie par l'éolienne.

C_{em} : Le couple électromagnétique de la génératrice.

f_m : Le coefficient de frottement de la machine.

f_t : Le coefficient de frottement des pâles.

Ici nous n'avons que les disposons uniquement des paramètres mécaniques de la machine et de l'inertie de la voilure. C'est pour cela que dans notre application, nous ne considérons que le coefficient de frottement associé à la génératrice (celui de la voilure n'est pas pris en compte).

$$J = J_m + J_t = J_t$$

$$f = f_t + f_m = f_m$$

Par suite, le modèle qui caractérise le comportement mécanique de la chaîne éolienne est donné par l'équation différentielle suivante :

$$C_{eol} = J_t \frac{d\Omega}{dt} + C_m + f_m \Omega$$

2.3.5- Modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour une application en générateur couplé à une turbine éolienne, cela est dû à sa distinction par rapport aux autres machines électriques (robustesse, performances, efficacité,...).

La machine synchrone se compose de quatre prises de type électrique ; les trois extrémités des enroulements du stator et une constante représentant le neutre, Les étapes sont liées à l'étoile.

La génératrice synchrone à aimant permanent est modélisée dans un repère abc. Le modèle circuit en termes de tension et de courant sous forme matricielle est donné par :

$$[V]_3 = [e]_3 - [R_s][i]_3 - [L_s] \frac{d}{dt} [i]_3$$

Avec :

$$[V]_{(3)} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, [e]_{(3)} = P\phi_f\Omega \begin{bmatrix} \sin(P\Omega t) \\ \sin(P\Omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(P\Omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}, [L] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \text{ Et}$$

$$[R]_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em}(t) = \frac{e_a(t)i_a(t) + e_b(t)i_b(t) + e_c(t)i_c(t)}{\Omega(t)}$$

Où

V_a, V_b, V_c : Sont les valeurs instantanées des tensions triphasées.

i_a, i_b, i_c : Sont les valeurs instantanées des courants triphasées.

R_s : Est la résistance des enroulements.

L_s : Est l'inductance des enroulements.

P: Est le nombre de paires des pôles de la génératrice.

ϕ_f : Est le flux magnétique des aimants.

Ω : Est la vitesse de rotation de la génératrice.

2.3.6-Puissance éolienne produite

Les caractéristique des éolienne sont définies par une puissance nominale P_n et cette puissance électrique produite par la chaine de transfère éolienne située au niveau de la sortie du générateur. En soufflant le vent à la vitesse nominale V_n

La présence de position de distribution de la vitesse du vent nous permet de calculer plus facilement l'énergie moyenne produite par le générateur par l'équation suivante

$$P_{\acute{e}ol.moy} = \int P_{\acute{e}ol.moy}(v) * f(v)$$

Ou :

(v) : La probabilité de la vitesse v.

$P_{\acute{e}ol}$:La puissance résultante d'une vitesse v.

La puissance produite par l'aérogénérateur est calculée en fonction de la vitesse de vent selon l'équation :

$$P_{\acute{e}ol} = \begin{cases} 0 & \text{pour } 0 \leq v < v_d \\ P_n * \frac{v^k - v_d^k}{v_n^k - v_d^k} & \text{pour } v_d \leq v \leq v_n \\ P_n & \text{pour } v_c \leq v < v_c \\ 0 & \text{pour } v_c \leq v \end{cases}$$

Où :

P_n : Puissance nominale de l'éolienne.

V_d : vitesse de démarrage de la turbine.

V_n : vitesse nominale de la turbine.

V_c : vitesse de coupure de la turbine.

K : le facteur de forme.

La puissance moyenne produite par l'aérogénérateur est donnée par:

$$P_{\acute{e}ol.moy} = P_n \left[\frac{[\exp(-(\frac{v_n}{c})^k) - \exp(-(\frac{v_d}{c})^k)]}{(\frac{v_n}{c})^k - (\frac{v_d}{c})^k} \right] - \exp(-(\frac{v_c}{c})^k) \quad (2.86)$$

Il suffit d'introduire le rendement du pont de diodes à la puissance moyenne produite par l'aérogénérateur $P_{\acute{e}ol.moy}$ pour trouver la puissance éolienne fournie au bus CC.

2.3.7- Modélisation du système de stockage

Il existe plusieurs types de stockage pour les systèmes d'énergies renouvelables. Les critères pour le choix d'un système de stockage d'énergie sont la fiabilité, l'efficacité, la maturité technique, le coût, la durée de vie et l'impact environnemental. L'efficacité et l'espérance de vie jouent un rôle essentiel lors du choix d'une technologie de stockage, car ils affectent les coûts de stockage.

Pour les petits (quelques kWh) et les grands systèmes (plus de 100 kWh) dans les régions isolées utilisant des énergies renouvelables intermittentes, l'accumulateur électrochimique (batterie) reste le meilleur compromis entre performances et coût.

Les batteries sont le type de système de stockage le plus efficace pour un petit système de production d'énergie. Cependant, les batteries qui sont intégrées aux systèmes d'énergies renouvelables ont à supporter des conditions de fonctionnement tel que les taux variables de charge et de décharge, la fréquence et la profondeur de décharge, les fluctuations de température, etc.

Ces variations rendent très difficile de prédire avec précision les performances de la batterie dans les systèmes d'énergies renouvelables. Les taux de charge et de décharge élevés et la température sont les principales sources de défaillance de la batterie. Compte tenu de ces paramètres, un bon contrôleur de charge et de décharge est exigé pour la fiabilité et la sécurité de fonctionnement de la batterie. Par conséquent, la modélisation de la batterie devient très nécessaire afin d'améliorer les performances de la batterie en intégrant un dispositif de commande.

Il existe deux types d'accumulateurs utilisés actuellement dans les systèmes d'énergies renouvelables: les accumulateurs au Plomb acide et les accumulateurs au Nickel-Cadmium. La batterie au plomb acide est la forme de stockage la plus courante, en raison de son coût qui est relativement faible et de sa large disponibilité. Par contre, les batteries nickel-cadmium sont plus chères, elles sont utilisées dans les applications où la fiabilité est vitale. Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi la batterie au plomb acide compte tenu de l'avantage offert pour les systèmes isolés de production d'énergie.

2.3.7.1-Modélisation dans Simulink du système de stockage électrique

De nombreux facteurs affectant le comportement de la batterie ont été pris en compte tels que le taux de courant, l'efficacité de charge, le taux d'auto -décharge ainsi que la capacité de la batterie. Un bon accord a été trouvé entre les résultats attendus et les données mesurées sur le terrain pour le projet éolien solaire hybride. Enfin, l'état de charge de la batterie de série chronologique (SOC) a été calculé statistiquement à partir des données de terrain pendant un à l'aide du modèle de simulation, en tenant compte de différences mensuelles et horaires en plus des distributions de probabilité.

L'équation permet de calculer le SOC pour une batterie idéale :

$$soc = soc_0 + \int_{t_0}^t \frac{I_{bat}}{C_{bat}} dt$$

Où:

soc_0 : Est l'état de charge initial de la batterie.

t_0 : Est le temps en seconde de l'état initial.

C_{bat} : Est la capacité de la batterie (Ah).

I_{bat} : Est le courant de la batterie (A) et est calculé comme suit:

$$V_{bat} = \frac{P_{res} - P_{pompe} - P_{charge}}{V_{bat}}$$

P_{res} : Est la puissance produite par les sources renouvelables.

P_{pompe} : Est la puissance demandée par la pompe.

P_{charge} : Est la puissance totale des petits appareils de la ferme.

2.3.7.2-Dimensionnement du banc de batterie

Le dimensionnement a pour but de déterminer la capacité du banc de batteries à partir des besoins électriques de l'installation, ce qui peut être obtenu à l'aide de l'équation suivant :

$$Q_h = \frac{B * N}{V * D * R}$$

Où:

B correspond aux besoins électriques de l'utilisateur ou charges journalière et s'exprime en Wh/jour. Avec une pompe de 8,084 kW qui fonctionne pendant 8 heures par jour et des charges qui consomment au maximum 3000 Wh/jour, on peut ainsi estimer les besoins électriques à 67672 Wh/jour.

N est le nombre de jours de réserve ou stockage. En général, on prévoit de trois à cinq jours d'autonomie. Comme dans notre système il y a aussi un système de stockage d'eau, nous prendrons $N = 1$ pour les calculs.

V est la tension nominale des accumulateurs. Dans cette étude, cette tension est de 48 volts. D est le taux de décharge maximale des accumulateurs (entre 20% et 80% de décharge). Ce taux est de 30% pour un système optimal, et de 50% pour un système standard. Nous choisissons le taux pour un système standard.

R est le rendement des accumulateurs (typiquement entre 75% et 90%, incluant les pertes de câblage et de vieillissement). Nous prenons $R = 90\%$.

Avec les valeurs prises, on aura:

$$Q_b = \frac{67672 * 1}{48 * 0,5 * 0,9} = 3132,96 \text{ Ah}$$

2.3.8-Modélisation du hacheur réversible en courant

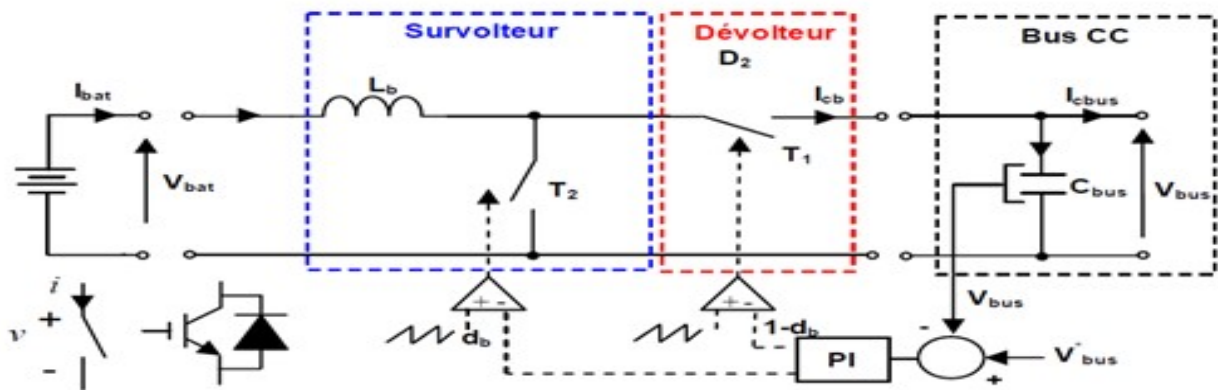


Figure2.6 : Hacheur réversible en courant

Les équations différentielles définissant le fonctionnement des deux hacheurs réunis sur la structure présentée dans la Figure (2.35) ont été résolues en utilisant un modèle en valeurs moyennes. Sachant que la commande des interrupteurs T_1 et T_2 est simultanée avec des rapports cycliques d_b et $1 - d_b$ complémentaires, le fonctionnement du hacheur réversible en courant est décrit par :

$$\frac{dI_{bat}}{dt} = \frac{1}{L} (d_b * V_{bus} - V_{bat})$$

En appliquant la loi de conservation de la puissance, le courant injecté ou absorbé du bus à CC s'exprime :

$$I_{cb} = d_b * I_{bat}$$

Le rapport cyclique d_b est obtenu à partir d'un régulateur PI ayant comme entrée l'erreur de tension sur le bus à CC.

2.3.9- Modélisation de l'onduleur

L'association d'un transistor T_i et d'une diode D_i donne un composant bidirectionnel K_i . Comme les commandes des deux transistors du même bras sont complémentaires, nous pouvons remplacer chaque bras de l'onduleur par un interrupteur à deux positions comme l'indique la figure (2.10).

Soit F_i l'état de l'interrupteur K_i , il est donné par:

$$F_i = \begin{cases} 1 & \text{si } T_i \text{ est ouvert et } T'_i \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } T_i \text{ est fermé et } T'_i \text{ est ouvert} \end{cases}$$

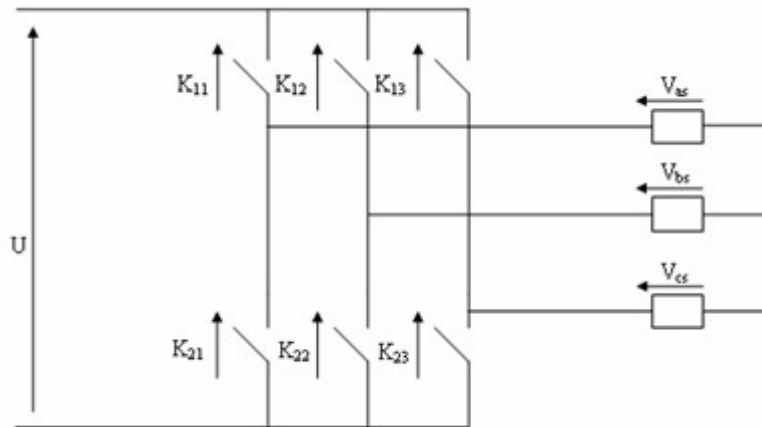


Figure2.7 : Représentation des composants bidirectionnels

Les tensions composées à la sortie de l'onduleur sont données par:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = E * \begin{bmatrix} F_1 & -F_2 \\ F_2 & -F_3 \\ F_3 & -F_1 \end{bmatrix}$$

Par conséquent, les tensions simples et le courant I_s à l'entrée de l'onduleur s'expriment en fonction des fonctions logiques comme suit:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = E * \begin{bmatrix} 2F_1 & -F_2 & -F_3 \\ -F_1 & 2F_2 & -F_3 \\ -F_1 & -F_2 & 2F_3 \end{bmatrix}$$

$$I_s = F_1 * I + F_2 * I_{sb} + F_3 * I_{sc} \quad (2.95)$$

2.4-Conclusion

L'éolienne fournit une source d'énergie prometteuse à court et à long terme. C'est une solution rentable pour alimenter les utilisateurs isolés et les applications connectées au réseau interconnecté ou autonome.

Dans ce chapitre, on a évoqué les modèles mathématiques du système étudié ; de la modélisation d'un système éolien ; après ça on a fait une étude sur la chaîne éolienne : vent, turbine, génératrice synchrone et pont à diodes ; avec un modèle qui peut calculer la puissance éolienne produite.

On continue avec les modèles de la batterie et du hacheur réversible en courant et du bus continu. On finit par le modèle de l'onduleur.

Le stockage d'énergie est souvent nécessaire pour améliorer la rentabilité et la fiabilité du système.

Pour finaliser ; grâce au programme Matlab ; nous allons passer à la simulation des équations après l'étude du chapitre.

Bibliographie 2

- 8-baroud kendo li, « état de l'art et modélisation des microcentrales », magister en électrotechnique de l'université Mentouri de Constantine 2007.
- 9-Olivier Giraud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat en Electrotechnique de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- 10-P. Barrade, « électronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaire, » press polytechnique et universitaires, 1ère édition, 2006.
- 11- W.Théodore, S. Gilbert, « *électrotechnique*, » de boeck, 4e édition, 2005.
- 12- B. Fellah, « Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité, Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah, » Thèse Magister déc 2012.
- 13-F.Boico, B. Lehman, « Study of Different Implementation Approaches for a Maximum Power Point Tracker ». IEEE COMPEL Workshop, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA, July 16-19, 2006
- 14-A. Mirecki, “Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance,” Thèse de doctorat, INP Toulouse, France, 2005.
- 15-LudmilStoyanov, “Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables”, Thèse de doctorat, université technique de Sofia, le 28 octobre 2011.
- 16- Martin TaikiVaitchemé, “Modélisation et simulation d'un système de stockage intégré dans un micro-réseau autonome solaire-éolien ”, Mémoire présenté Comme exigence Partielle de la maitrise en ingénierie, Université DU Québec EN Juin 2019.
- 17-Abdenour Abdelli, “Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive ”, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France 15 octobre 2007.
- 18-Mahammedi Abdellatif, “Etude et optimisation d'un système hybride éolien photovoltaïque», mémoire de magister, Univ Ferhat Abbas –SetiflAlgérie, 15/12/2014.
- 19-W. Zhou, H. Yang, and Z. Fang, “Battery behavior prediction and battery working States analysis of a hybrid solar-wind power generation system», Renew. Energy, Vol. 33, pp. 1413-1423, 2008.

3.1- Introduction

Dans le chapitre précédent on a modélisé une turbine éolienne, grâce à cette modélisation on va pouvoir simuler tout les parties de la production éolienne en commençant par le facteur C_p jusqu'à arriver à l'étude de la puissance par rapport à la variation de la vitesse du vent et des charges appliquées.

3.2- Simulation de l'éolienne

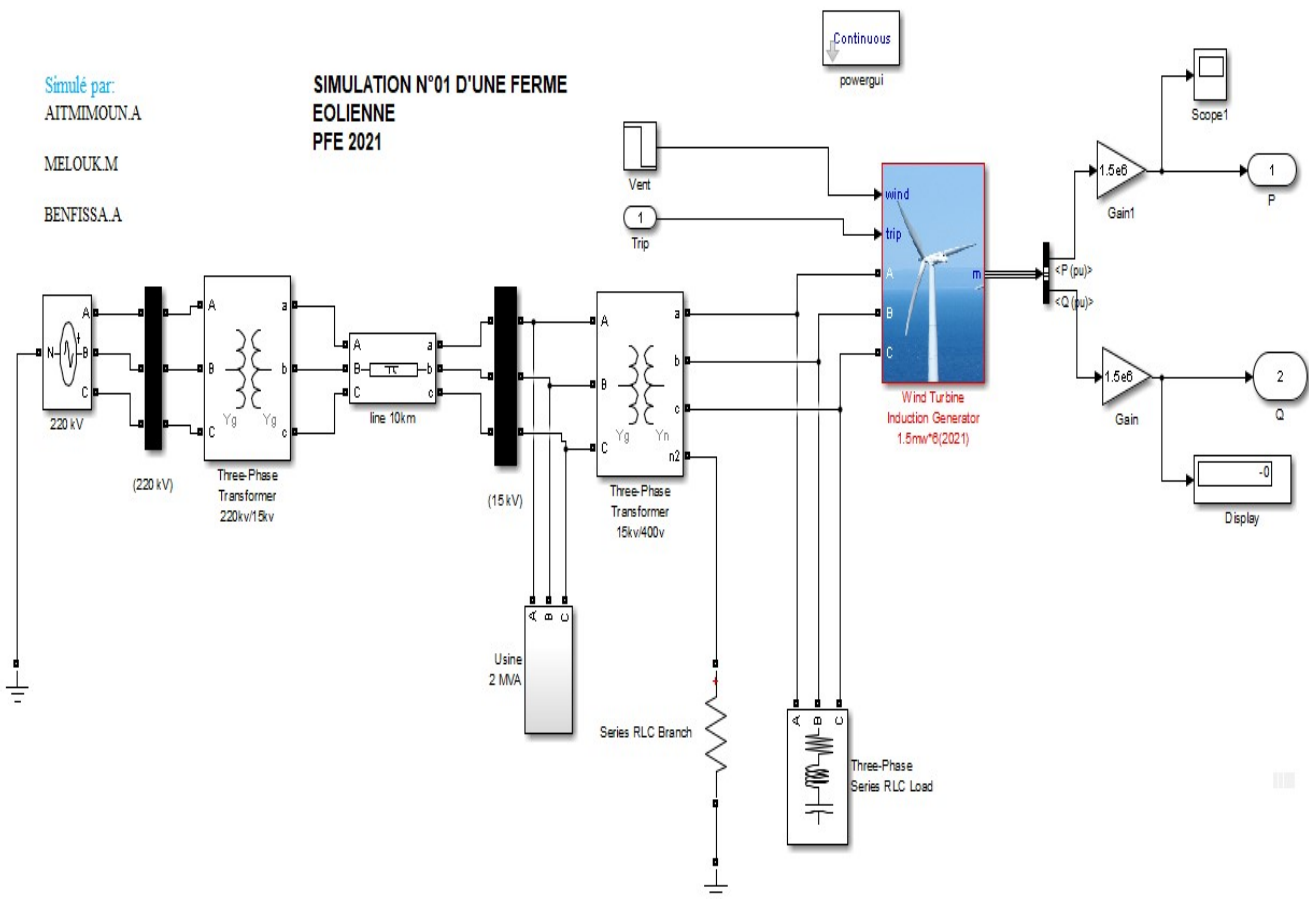


Figure 3.1: Schéma d'une ferme éolienne

Simulé par :

AIT MIMOUN Abdelkarim
MELOUK Moustafa
BENFISSA Amin

SIMULATION DE LA TURBINE ÉOLIENNE N°02

Centre universitaire de naama
PFE juin 2021

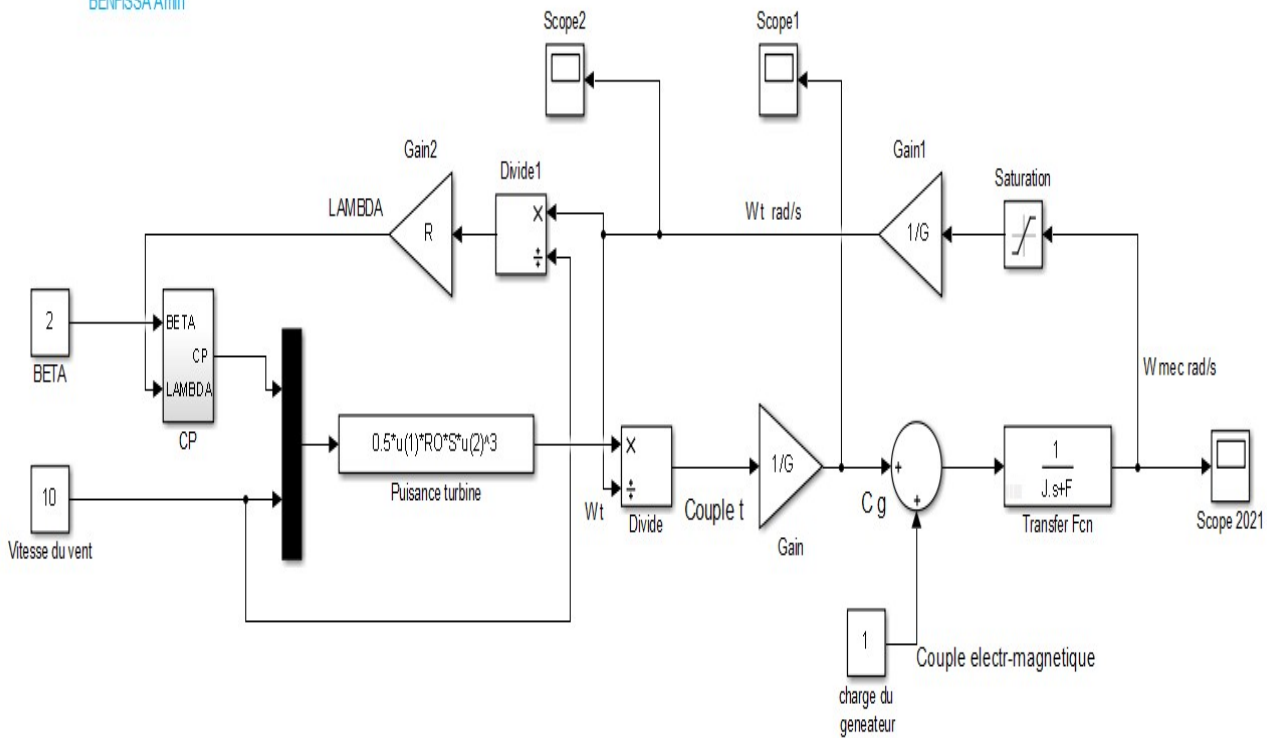


Figure 3.2: Schéma détaillé de la turbine.

Simulé par :

AIT MIMOUN Abdelkarim

MELOUK Moustafa

BENFISSA Amin

SIMULATION EN BLOC DE LA TURBINE ÉOLIENNE N° 03

Centre universitaire de naama
PFE juin 2021

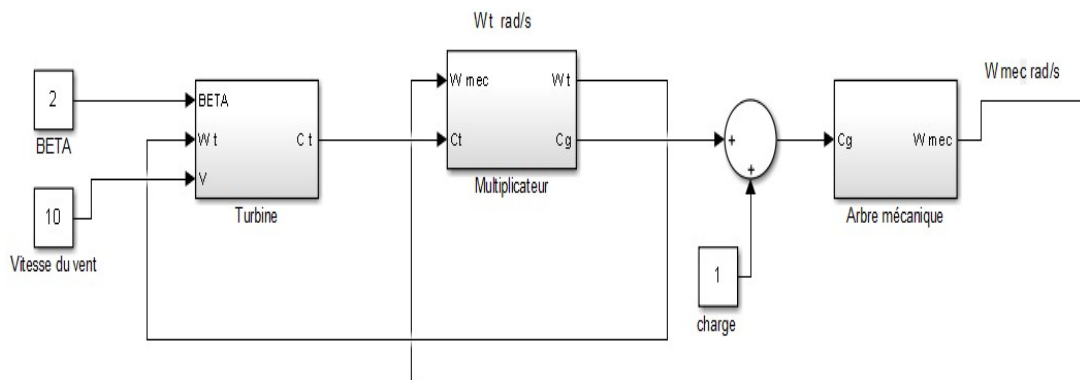


Figure 3.3: Schéma bloc de la turbine.

3.3- les résultats de la simulation

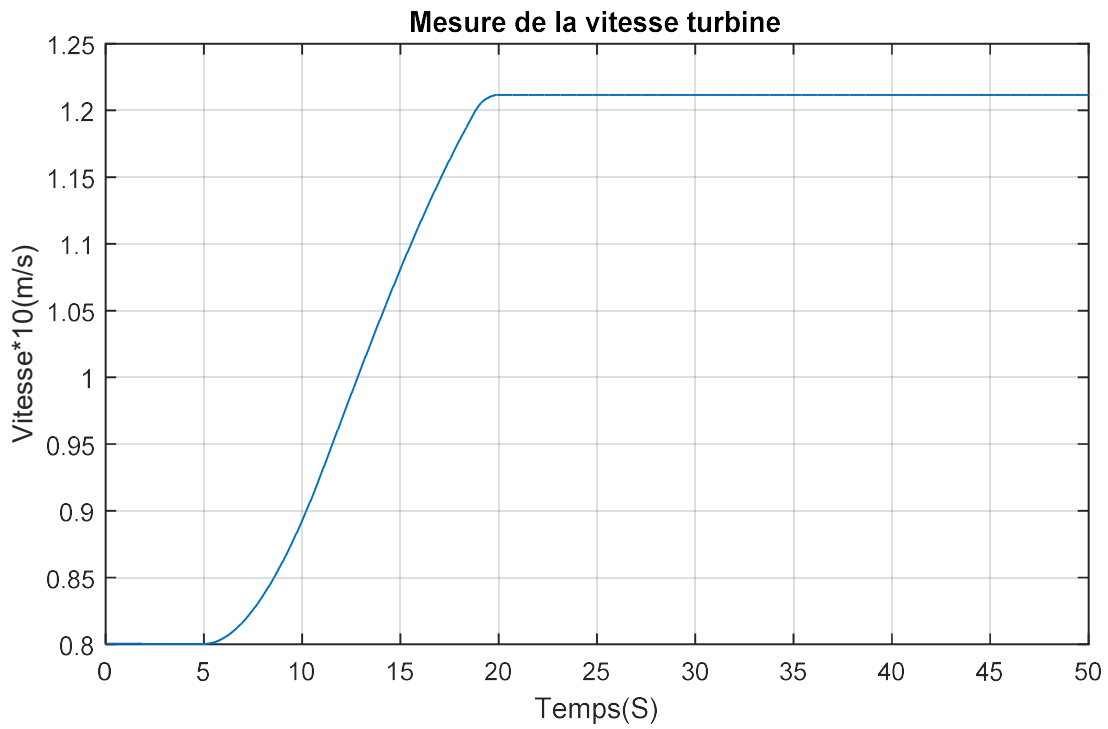


Figure 3.4: vitesse de la turbine.

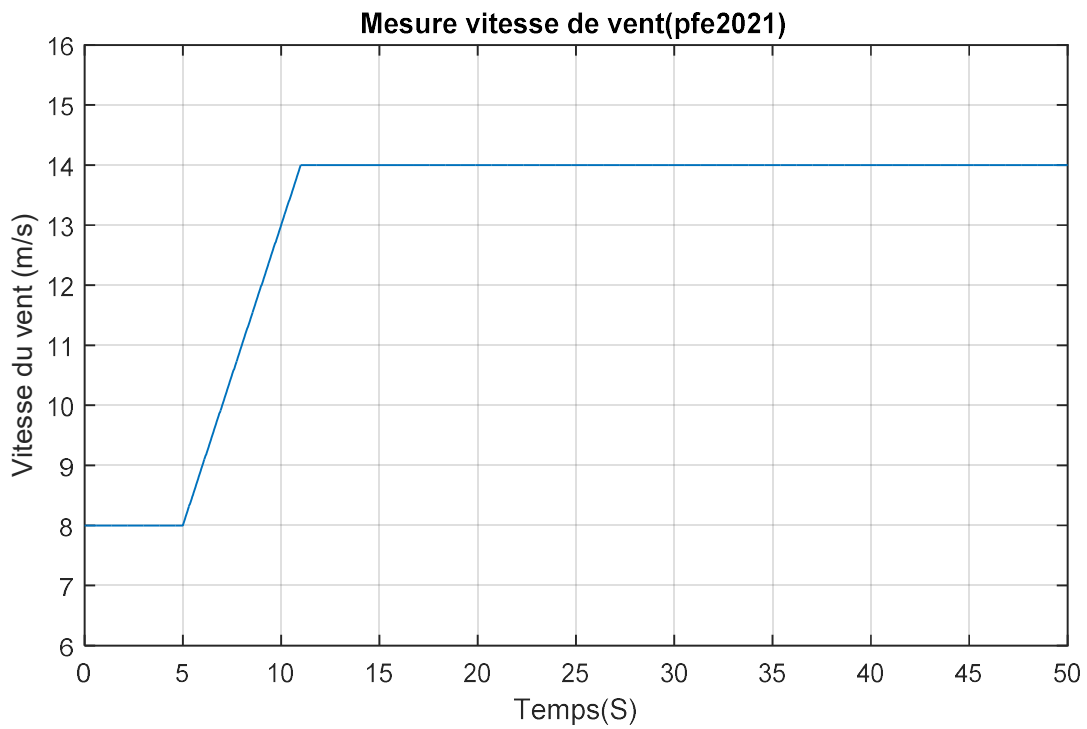


Figure 3.5: Vitesse du vent

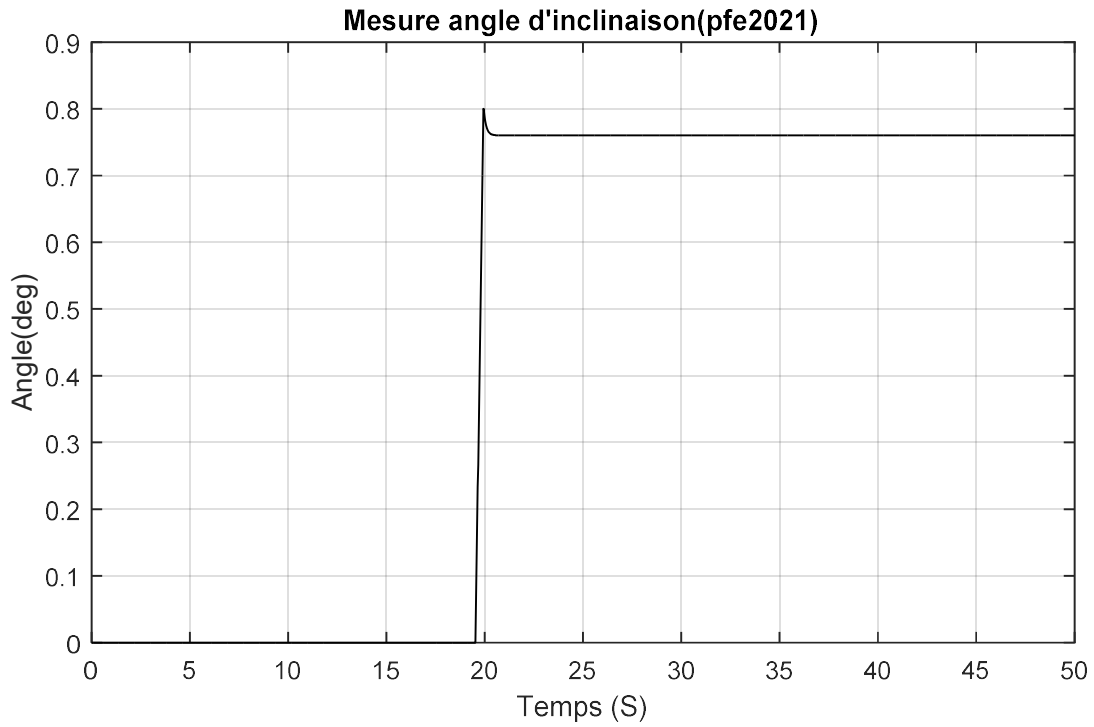


Figure 3.6: Angle d'inclinaison

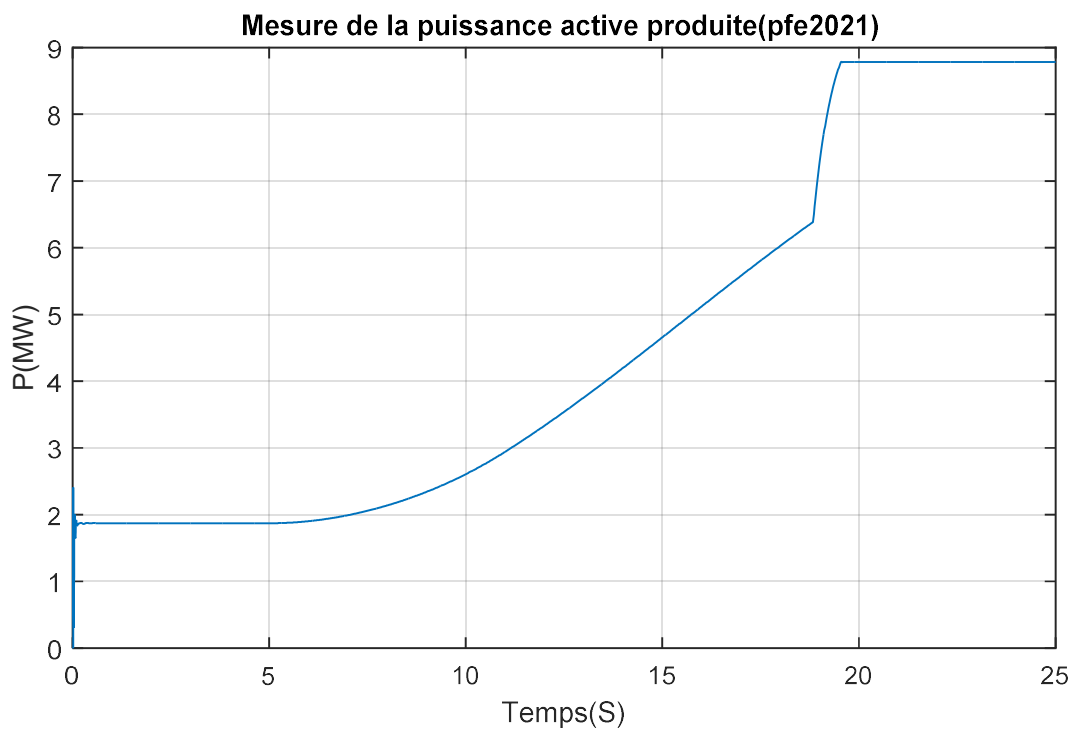


Figure 3.7: La puissance active produite

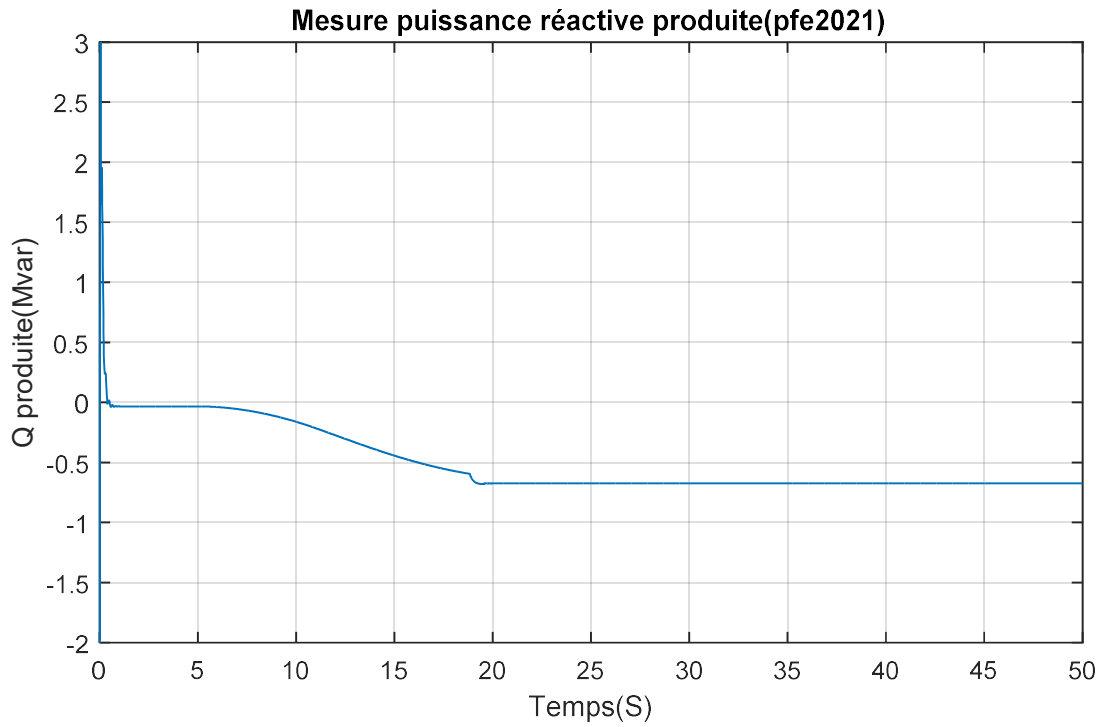


Figure 3.8: La puissance réactive produite.

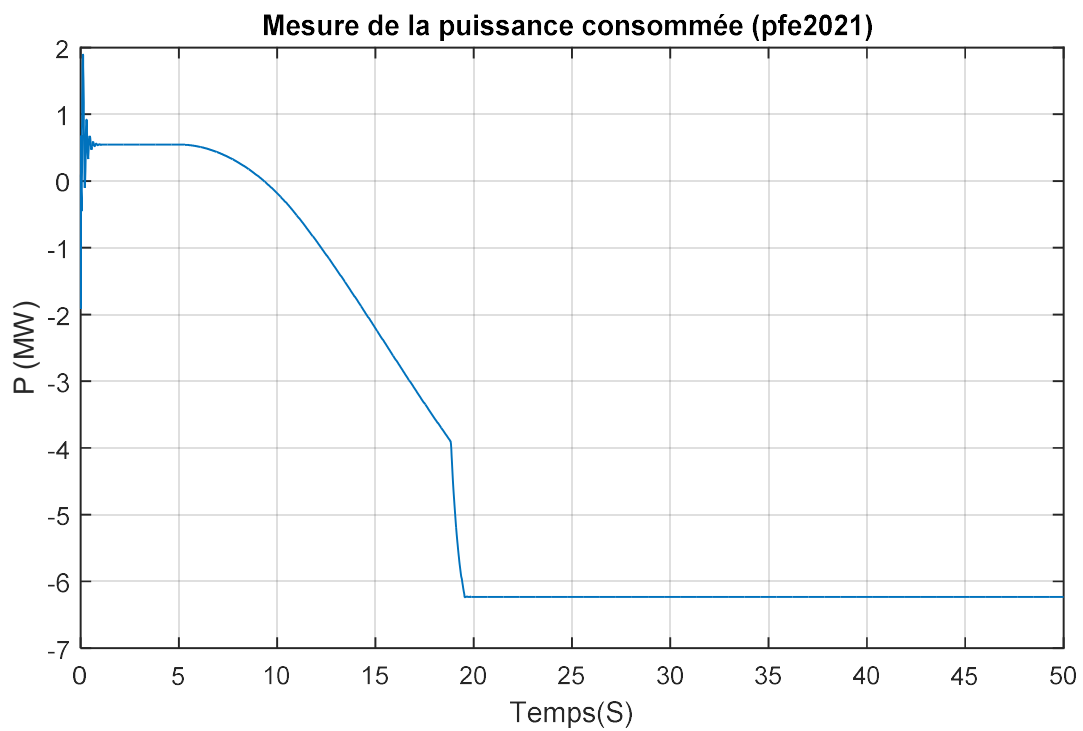


Figure 3.9: Consommation P.

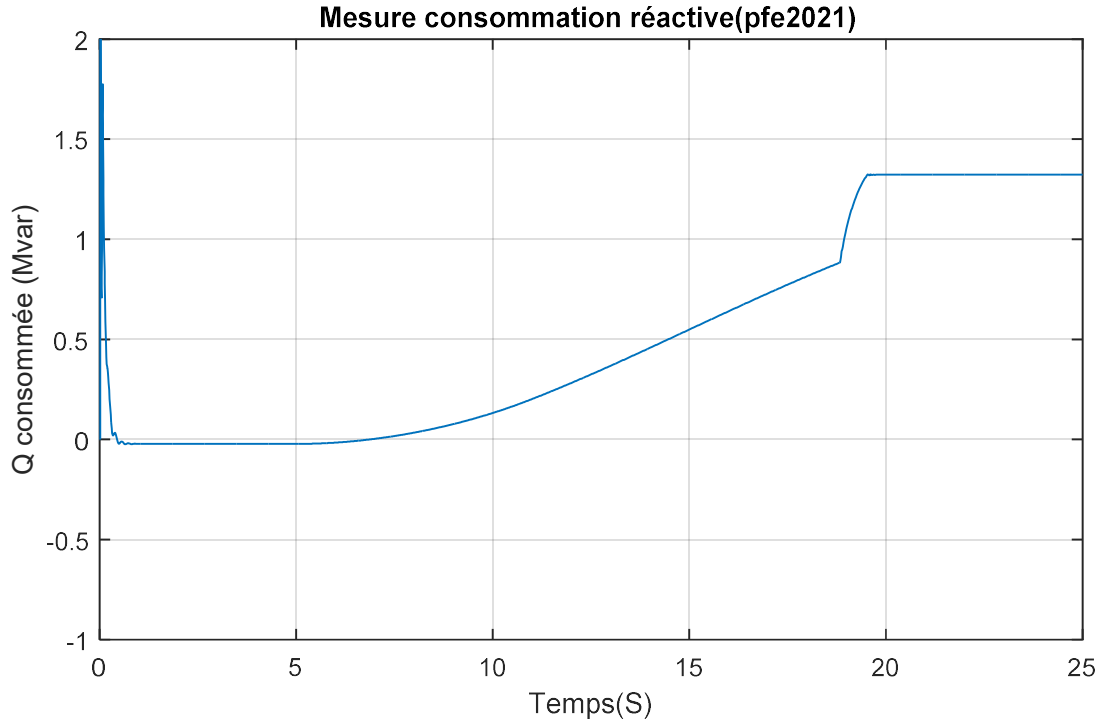


Figure 3.10: Consommation Q.

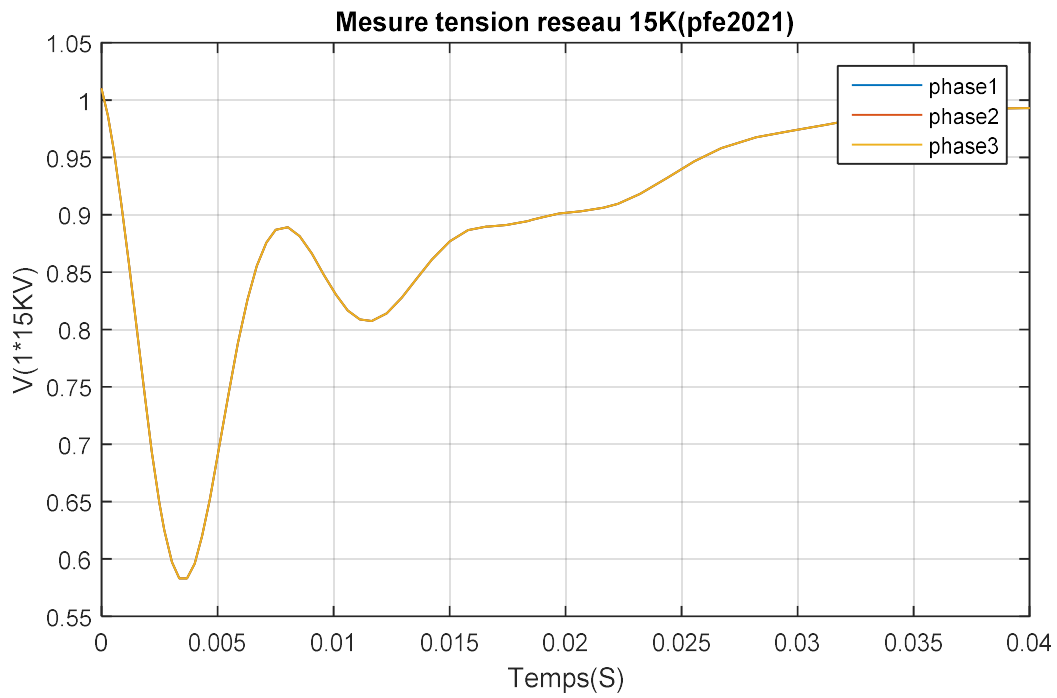


Figure 3.11: Tension réseau 15kv.

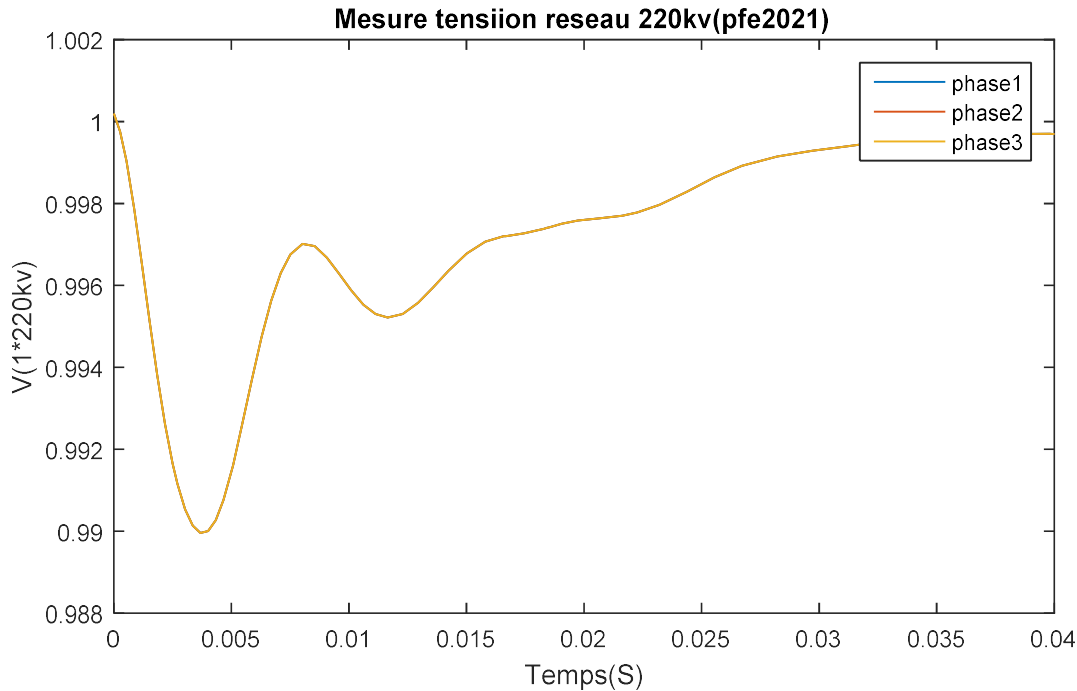


Figure 3.12: Tension réseau 220kv.

3.4- Interprétation des résultats de simulation

1- Vitesse de la turbine

La vitesse de la turbine augmente lorsqu'on augmente la vitesse du vent (à $T=5$ s) d'une façon graduelle, à $T=20$ s elle atteint sa vitesse nominale. **Figure 3.4**

2-Vitesse du vent

En augmentant, la vitesse du vent permet la montée de la vitesse de la turbine et même étant fixe (à $T=12$ s) en utilisant des freins, la vitesse de la turbine continue d'augmenter jusqu'à atteindre sa vitesse nominale. **Figure 3.5**

3-Angle d'inclinaison

Permet de régler la puissance de l'éolienne (à $T=20$ s). **Figure 3.6**

Chapitre 3 : Simulation du système éolien

4-Puissance active produite

Une fois la turbine tourne avec un générateur couplé, on a une production de l'énergie active par palier de charge de 1 MW/04s jusqu'à attendre la puissance nominale du générateur 9MW (6*1.5MW), cette énergie produite doit être consommé instantanément pour garder un équilibre en fréquence .

Figure 3.7

5-Puissance réactive produite

Une fois la turbine tourne avec un générateur couplé au réseau, on a une consommation(-0.5Mvar) par le générateur de l'énergie réactive (négative) pour réguler la tension de réseau.

Figure 3.8

6-Consommation d'énergie active

La consommation de l'énergie dans le point de mesure est égale à 06MW consommée par les charges résistives existantes dans notre réseau.

On remarque que la charge consommée < à la charge produite on aura un déséquilibre en fréquence.

Pour remédier à ce problème soit on diminue la production de l'énergie(le cas normale), ou bien dans certaine circonstance on est obligé d'augmenter les charge.

Figure 3.9

7-Consommation d'énergie réactive

La consommation de l'énergie dans le point de mesure est égale à 1.3Mvar consommée par les charges existantes dans notre réseau.

On remarque que la charge consommée > à la charge produite on aura un déséquilibre en tension.

Pour remédier à ce problème on augment la production de l'énergie réactive

Figure 3.10

8-Mesure de la tension réseau

On a deux niveaux de tension réseau, la moyenne et la haute tension.

a-Moyenne tension (15kv) : on remarque une chute de tension qui peut être du au variation brusque inductive comme le démarrage des moteurs.

Figure 3.11

b-Haute tension (220kv) : on remarque une chute de tension due à un défaut externe qui sera vite redressée grâce aux compensateurs utilisés dans les lignes de distance.

Figure 3.12

3.5- Conclusion :

Le but de l'utilisation de Simulink Matlab dans ce chapitre est de suivre la constitution et le comportement d'un réseau électrique alimenté par l'énergie éolienne, l'évolution des caractéristiques des éoliennes, en convertissant leurs équations mathématiques en un Schéma de simulation.

Les caractéristiques physiques de ces composants sont souvent exprimées sous forme de courbes, Les données affichées par ces courbes sont ensuite utilisées pour déterminer les influences extérieures, telles la vitesse du vent, la charge, la tension etc.

Conclusion Générale

Le but du travail présenté dans ce mémoire, est la contribution à l'étude, la modélisation et la simulation de système de production d'électricité autonome, à partir de ressources éolienne, avec un système de stockage de batteries. A cet effet, une méthodologie d'analyse basée sur la prise en compte des perturbations climatiques.

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne à été effectuée en détail dans le deuxième chapitre. Dans ce contexte, on a modélisé chaque bloc de la chaîne de conversion d'énergie du système. Le problème qui se pose est généralement une exploitation non optimale du système. Alors une adaptation est nécessaire pour maximiser le rendement du système (MPPT).

Dans un site isolé, le besoin de continuité du service en présence de la disponibilité intermittente des éoliennes entraîne l'utilisation indispensable d'un système de stockage. Dans ce contexte, la batterie plomb-acide est la solution la plus utilisée grâce au bon rapport prix/qualité. Pourtant, la mauvaise utilisation de la batterie peut entraîner sa défaillance, cela implique le besoin d'entretenir et remplacer souvent celle-ci. Le coût d'installation et de fonctionnement du système est donc augmenté. Alors, il faut non seulement avoir un schéma d'exploitation exigible des sources, mais aussi prendre en compte la durée de vie des composants, surtout de la batterie.

La commande de l'onduleur et les systèmes de productions déterminent le comportement principal de la production décentralisée sur le réseau basse tension.

D'une manière générale le travail présenté dans ce mémoire nous a permis de montrer l'intérêt que suscitent les énergies renouvelables dans notre pays l'Algérie. Néanmoins, tous ces résultats n'excluent pas des améliorations qui peuvent être apportées dans le futur. Il s'agit en fait des points suivants :

L'étude des commandes avancées pour l'implantation des systèmes éolien afin d'améliorer la qualité d'énergie.

Une intégration d'un système éolien avec stockage dans notre pays avec le suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour faire face à la pointe d'été surtout pour les sites isolés ou l'interconnexion est faible, ou inexistante et donc l'autonomie est inévitable pour assurer une qualité de service en tension et en fréquence.

Références bibliographiques

- 1- Olivier GERGAUD « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » le 9 décembre 2002 de l'École Normale Supérieure de Cachan.
- 2-MEZZAI SONIA, TADJINE KATIA « Etude d'un système hybride (Eolien-Photovoltaïque) » mémoire de master l'université Abderrahmane Mira-Bejaia, Juin 2015.
- 3-Mr. *FELLAH Boumediene* «Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah » EN Octobre 2012.
- 4-N. SARAH, M. NAZIH «étude comparative entre éolienne à axe horizontal et éolienne à axe vertical ». Université Libanaise décembre 2011.
- 5-BENCHEMSA ISSAM « L'Utilisation de l'énergie thermique pour le chauffage domestique » mémoire de master l'université Badji Mokhtar Annaba Année : 2016/2017.
- 6-BAGHDADI FAZIA «Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables» mémoire de magister l'université du mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou , Soutenu le: 26 /09/2011.
- 7-LIONEL VECHUI, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thème de doctorat de l'université du havre, 15 décembre 2005.
- 8-baroud kendo li, « état de l'art et modélisation des microcentrales», magister en électrotechnique de l'université Mentouri de Constantine 2007.
- 9-Olivier Giraud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat en Electrotechnique de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- 10-P. Barrade, « électronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaire, »press polytechnique et universitaires, 1ère édition, 2006.
- 11- W.Théodore, S. Gilbert, « *électrotechnique*, » de boeck, 4e édition, 2005.
- 12- B. Fellah, « Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité, Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah, » Thèse Magister déc 2012.
- 13-F.Boico, B. Lehman, « Study of Different Implementation Approaches for a Maximum Power Point Tracker ». IEEE COMPEL Workshop, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA, July 16-19, 2006.

- 14-A. Mirecki, “Etude comparative de chaînes de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance,” Thèse de doctorat, INP Toulouse, France, 2005.
- 15-LudmilStoyanov, “Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d’énergie renouvelables”, Thèse de doctorat, université technique de Sofia, le 28 octobre 2011.
- 16- Martin TaikiVaitchemé, “Modélisation et simulation d’un système de stockage intégré dans un micro-réseau autonome solaire-éolien ”, Mémoire présenté Comme exigence Partielle de la maitrise en ingénierie, Université DU Québec EN Juin 2019.
- 17-Abdenour Abdelli, “Optimisation multicritère d’une chaîne éolienne passive ”, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France 15 octobre 2007.
- 18-Mahammedi Abdellatif, “Etude et optimisation d’un système hybride éolien photovoltaïque», mémoire de magister, Univ Ferhat Abbas –Setif1Algérie, 15/12/2014.
- 19-W. Zhou, H. Yang, and Z. Fang, “Battery behavior prediction and battery working States analysis of a hybrid solar-wind power generation system», *Renew. Energy*, Vol. 33, pp. 1413-1423, 2008.