



الجمهورية الجزائرية الشعبية الديمقراطية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET LA RECHERCHES SCIENTIFIQUES

جامعة وهران 2 محمد بن احمد

UNIVERSITE D'ORAN 2 – MOHAMED BEN AHMED

معهد الصيانة والامن الصناعي

INSTITUT DE MAINTENANCE ET DE SECURITE INDUSTRIELLE

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de MASTER

Filière : ELECTROMECHANIQUE

Spécialité : MAINTENANCE FIABILITE ET QUALITE

THEME

COMMANDE MPPT D'UN SYSTEME HYBRIDE PAR LA LOGIQUE FLOUE

Présente et déposé par :

LIABES Amir

BOURABA Mehdi

Devant le jury composé de :

Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
BOUHAMRI Nouredine	M.C.A	IMSI	Président
BELKACEM Belkacem	M.C.A	IMSI	Encadreur
ADJLOUA Abdelaziz	M.C.B	IMSI	Examineur

2021/2022

DEDICACES

*Au commencement, louange à Dieu, qui nous a béni
et nous a doté de sa grâce, ainsi louange à mon
Seigneur jusqu'à ce que vous soyez satisfait, mais
louange soit à vous si vous êtes satisfait, mais
louange soit à vous après le contentement.*

*A celui qui a transmis le message, rempli la
confiance et conseillé la nation au Prophète de la
Miséricorde et de la Lumière des Mondes, notre
Maître Muhammad (PSL)*

*Nous dédions ce travail à nos familles
Et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin*

REMERCIEMENTS

Nous remercions Dieu Tout-Puissant pour la bénédiction qu'Il nous a accordée en complétant ce mémorandum.

Nous adressons également nos remerciements et notre gratitude a nos professeurs distingués qui ont tracé la ligne de notre succès tout au long de notre chemin académique.

Nous remercions également notre encadreur docteur BELKACEM Belkacem pour son assistance et patiente dans l'élaboration de ce modeste travail, Docteur CHENOUIF et Docteur ALDJLOUA pour leurs contribution dans comité qui a supervisé la discussion de ce mémorandum.

ملخص

يعد توليد الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة (وخاصة طاقة الرياح والطاقة الشمسية) أحد أهم مجالات البحث العلمي واهتمام العديد من الباحثين في ذلك الوقت بسبب التأثير الإيجابي لهذه التكنولوجيات على البيئة والاقتصاد، ولكن الوضع يتطلب المزيد من الجهود لتحسين كفاءة محطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. سنعمل أيضاً عن طريق المحاكاة والنمذجة لمعرفة مدى قدرة بعض البرامج على التنبؤ بتطور الكميات الكهربائية المستخرجة من محطة للطاقة الشمسية أو طاقة الرياح. **الكلمات المفتاحية :** الطاقة الكهربائية، الألواح الشمسية، توربينات الرياح، المحاكاة.

RESUME

La production d'énergie électrique à partir des énergies renouvelables (en particulier l'énergie éolienne et solaire) est l'un des domaines les plus importants de la recherche scientifique et la préoccupation de nombreux chercheurs à cette époque en raison de l'impact positif de ces technologies sur l'environnement et l'économie, mais la situation nécessite plus d'efforts pour améliorer l'efficacité des centrales solaires et éoliennes. Nous travaillerons également par simulation et modélisation pour connaître l'étendue de la capacité de certains logiciels à prédire l'évolution des quantités électriques extraites d'une centrale électrique solaire ou éolienne dans un milieu désertique sec.

Mots clés : énergie électrique, panneau solaire, éolienne, simulation.

ABSTRACT

Electricity generation from renewable energy sources (especially wind and solar) is one of the most important areas of scientific research and the concern of many researchers at that time because of the positive impact of these technologies on the environment and the economy, But the situation requires more efforts to improve the efficiency of solar and wind power plants. We will also work by simulation and modelling to know the extent of the ability of certain software to predict the evolution of electrical quantities extracted from a solar or wind power plant.

Keywords : Electrical energy, solar panel, wind turbine, simulation.

TABLES DES MATIERES

DEDICACES	2
REMERCIEMENTS	3
ملخص	4
RESUME	4
ABSTRACT	4
TABLES DES MATIERES	5
LISTES DES FIGURES.....	8
LISTES D'ACRONYMES ET ABREVIATIONS	9
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE. I ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE	2
<i>1.1 introduction.....</i>	<i>3</i>
<i>1.2 Définition.....</i>	<i>3</i>
<i>1.3 Cellule photovoltaïque</i>	<i>3</i>
1.3.1 Matériau semi-conducteur	3
1.3.1.1 Dopage du silicium.....	4
1.3.2 Transformation photovoltaïque	4
1.3.2.1 Absorption de la lumière	5
1.3.2.2 Transfert d'énergie des photons	5
1.3.3 Paramètres des cellules photovoltaïques	6
1.3.3.1 Silicium métallurgique	6
1.3.4 Importance du procédé	8
1.3.5 Puissance (point de fonctionnement).....	10
1.4 SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE	10
1.4.1 Type de systèmes PV	10
1.4.1.1 Système photovoltaïque autonome.....	10
1.4.1.2 Système photovoltaïque relié au réseau de distribution électrique	11
1.5 Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	16
1.5.1 Présentation du modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque.....	17
1.5.2 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque.....	17
1.5.2.1 Courant de court-circuit	17
1.5.2.2 Tension à vide.....	18

I.5.2.3	Notion de Facteur de forme	18
I.5.2.4	Rendement	18
I.5.3	Module photovoltaïque	18
I.5.3.1	Mise en série	19
I.5.3.2	Mise en parallèle	19
I.5.4	Caractéristique électrique d'un module photovoltaïque	20
I.5.5	Système de conversion PV	21
I.6	<i>Avantages et inconvénients du photovoltaïque</i>	22
I.6.1	Avantages	22
I.6.2	Inconvénients	22
I.7	<i>Conclusion</i> :	23

CHAPITRE. II ENERGIE EOLIENNE24

II.1	<i>Introduction</i>	25
II.2	<i>Présentation de l'énergie éolienne</i>	25
II.2.1	Définition	25
II.2.2	Le système éolien	25
II.3	<i>Principe de système l'éolienne</i>	26
II.4	<i>les types des systèmes éoliennes</i>	28
II.4.1	Eoliennes à axe vertical	28
II.4.1.1	Éolienne de Savonius :	28
II.4.2	Éolienne de Darrieus :	28
II.4.3	Eoliennes à axe horizontal	29
II.4.4	Les composants d'une éolienne à axe horizontal	31
II.5	<i>Contrôle des puissances d'une turbine éolienne</i>	35
II.5.2	Action du vent sur une pale	36
II.5.3	Contrôle de la puissance captée par la turbine	38
II.5.3.1	Contrôle par décrochage aérodynamique passif (« Passive Stall »)	38
II.5.3.2	Contrôle par décrochage aérodynamique actif (« active stall » ou « combi stall »)	39
II.5.3.3	Contrôle par angle de calage variable (Pitch control)	39
II.6	<i>Modes d'exploitation de l'énergie éolienne</i> :	40
II.6.1	Les systèmes à vitesse fixe	40
II.6.2	Les systèmes à vitesse variable	41
II.6.2.1	Système basé sur les machines asynchrones	41
II.6.2.2	Système basé sur les machines synchrones	41
II.6.2.3	Système basé sur les machines asynchrones doublement alimentées	42
II.7	<i>Modèle aérodynamique</i>	43
II.7.1	Modèle du vent :	43
II.7.2	Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	43
II.8	<i>Stratégies de MPPT pour une éolienne</i>	47
II.8.1	Maximisation de la puissance sans connaissance de la caractéristique Cp	48
II.8.2	Maximisation de la puissance avec la connaissance de la courbe Cp	48

II.8.2.1	Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse	49
II.8.2.2	Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse	51
II.9	Modélisation du système éolien.....	52
II.9.1	Modèle de la turbine :	53
II.9.2	Modèle du multiplicateur :	53
II.9.3	Equation dynamique de l'arbre de transmission :	54
II.10	Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	54
II.10.1	Avantages :	55
II.10.2	Inconvénients :	55
II.11	Présentation de la Machine Synchrone à Aimants Permanents MSAP	56
II.11.1	Généralités	56
II.11.2	Principe de fonctionnement des MSAP	58
II.11.3	Fonctionnement en mode générateur GSAP	59
II.12	Modélisation de la MSAP	60
II.12.2	Hypothèses simplificatrices	61
II.12.3	Modèle de la MSAP dans le repère triphasé abc	61
II.12.3.1	Equations électriques	61
II.12.3.2	Equations mécaniques	62
II.12.4	Modèle de la MSAP dans le repère de Park (d, q)	62
II.12.4.2	Expressions des tensions	64
II.12.4.3	Expressions des flux	64
II.12.5	Expressions de la puissance et du couple	65
II.13	Modèle généralisé de la MSAP en mode générateur PMSG.....	66
II.14	Conclusion	66
CHAPITRE. III LOGIQUE DE FLOUE.....		67
III.1	introduction	68
III.2	Historique	69
III.3	APPLICATION DE LA LOGIQUE FLOUE.....	69
III.4	La commande Floue :	71
III.4.1	Classification et reconnaissance de formes :	71
III.4.2	Conception d'un régulateur à logique flou	71
III.5	Structure du regulator.....	72
III.5.1	Différentes méthodes d'inférence.....	72
III.6	Application de logique floue dans les panneaux solaires	73
III.6.1	Analyse	73
III.6.2	Description.....	73
CHAPITRE. IV SIMULATION DU SYSTEME HYBRIDE		75
IV.1	Introduction.....	76
IV.2	Simulation de la chaine globale :.....	76
IV.2.2	Présentation de la chaine de conversion éolienne :	76

IV.2.3	Présentation de la chaîne de conversion photovoltaïque :	78
IV.3	<i>Simulation de la chaîne globale</i>	79
IV.3.1	Simulation de la chaîne de production éolienne	79
IV.3.2	Simulation de la chaîne de production photovoltaïque.....	80
IV.4	<i>Simulation d'un modèle de référence</i>	82
IV.5	<i>Simulation de la chaîne de stockage</i>	83
IV.6	<i>Conclusion</i>	84
CONCLUSION GENERALE		85
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		86

LISTES DES FIGURES

Figure.I.1	Passage du silicium pur à la cellule photovoltaïque monocristalline.	7
Figure.I.2	Schéma d'un système photovoltaïque connecté au réseau de distribution électrique	11
Figure.I.3	Cellules [8]	12
Figure.I.4	Champ des modules.....	13
Figure.I.5	Batterie au plomb.....	14
Figure.I.6	Régulateur.....	15
Figure.I.7	Schéma électrique équivalent du modèle à une seule diode d'une cellule photovoltaïque. .	16
Figure.I.8	Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairements à température constante 25°C	20
Figure.I.9	Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairements à température constante 25°C	20
Figure.I.10	Caractéristique I(V) pour différentes valeurs de températures à éclairnement constant 1000 W/m ²	21
Figure.I.11	Connexion d'un GPV à une charge DC à travers un étage d'adaptation survolteur associé à une commande MPPT.	21
Figure.II.1	. Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	26
Figure.II.2	Éolienne de Savonius.	28
Figure.II.3	Éolienne de Darrieus	29
Figure.II.4	Éoliennes à axe horizontal.....	30
Figure.II.5	Type de montage de la voilure	31
Figure.II.6	Exemples d'éoliennes.....	31
Figure.II.7	Parties d'une éolienne	32
Figure.II.8	Tour d'un aérogénérateur	32
Figure.II.9	Constituants principaux d'une nacelle.....	33
Figure.II.10	Vues d'un multiplicateur	34
Figure.II.11	Caractéristique puissance/vitesse de vent d'une éolienne classique	36
Figure.II.12	Éléments caractéristiques d'une pale.....	37
Figure.II.13	Forces appliquées sur un tronçon de pale.....	37
Figure.II.14	Différentes configurations d'éoliennes à vitesse de vent variable	43
Figure.II.15	Schéma simplifié d'une éolienne	44
Figure.II.16	Tube de courant autour d'une éolienne.	46
Figure.II.17	Paramétrage une éolienne tripale pour différentes valeurs β [30].....	47
Figure.II.18	Caractéristiques d'une éolienne en fonction de la vitesse de vent	48
Figure.II.19	Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse	50
Figure.II.20	Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse.....	52
Figure.II.21	Représentation du système mécanique de l'éolienne.	53
Figure.II.22	Modèle mécanique simplifié de la turbine	53

Figure.II.23	Modèle aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne.....	54
Figure.II.24	Structure générale d'une machine synchrone à aimants.....	57
Figure.II.25	Structure à rotor interne a) Structure à rotor externe b)	59
Figure.II.26	Principe de fonctionnement d'une GSAP.....	59
Figure.II.27	Structure du générateur éolien à base d'une GSAP.....	60
Figure.II.28	Représentation d'une machine synchrone à aimants permanents.	61
Figure.II.29	Représentation de la MSAP dans le repère d-q [64].	63
Figure.III.1	Exemple de définition d'ensembles sur un univers de discours en logique Binaire et en logique floue.....	70
Figure.III.2	Diagramme du système de suivi des panneaux.....	74
Figure.IV.1	Schéma hybride général.....	76
Figure.IV.2	Schéma du système éolien	77
Figure.IV.3	Tension de sortie du système éolienne.....	78
Figure.IV.4	Schéma bloc chaîne de conversion photovoltaïque.	79
Figure.IV.5	Profile de la vitesse de vent	79
Figure.IV.6	A/Stator current – B/Rotor speed – C/Electromagnetic torc.....	80
Figure.IV.7	Tension de sortie du panneau photovoltaïque.....	81
Figure.IV.8	DC/DC Buck.....	81
Figure.IV.9	Sortie de système PV	82
Figure.IV.10	Model de référence	82
Figure.IV.11	Tension de sortie du panneau solaire.....	83
Figure.IV.12	Tension de charge de la batterie	84

LISTES D'ACRONYMES ET ABREVIATIONS

Eolienne

v_n	La vitesse du vent nominale de l'aérogénérateur.
v	La vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur.
S_1	La section amont du tube d'air.
S_2	La section aval du tube d'air.
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne.
F	Force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable.
ρ	Masse volumique de l'air 1,225 kg. m ⁻³ .
R	Rayon de la surface balayée par la turbine.
P_{aero}	La puissance absorbée par l'aérogénérateur.
P_{mt}	La puissance disponible.
E_c	L'énergie cinétique de la masse d'air qui traverse l'aérogénérateur.
C_p	Le coefficient de puissance.
β	L'angle de calage des pales.
$C_{p_{max}}$	Le coefficient de puissance maximal de la turbine.
λ	La vitesse relative de l'éolienne.
λ_{opt}	La vitesse relative optimale de l'éolienne.
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de rotation de la turbine.
Ω_{mec}	Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.
Ω_{opt}	Vitesse de rotation optimale de l'arbre du générateur.
G	Gain du multiplicateur.
C_{mec}	Couple résistant issue du multiplicateur.
C_{aero}	Couple aérodynamique de l'éolienne.
F_{ro}	Fréquence rotorique.
G	Glissement.

P_{mec}	Puissance mécanique disponible au niveau de l'arbre de la machine.
$[\mathbf{V}_s]$	Vecteur tension statorique.
$[\mathbf{I}_s]$	Vecteur courant statorique.
$[\mathbf{I}_r]$	Vecteur courant rotorique.
$[\Phi_s]$	Vecteur flux statorique.
$[\Phi_r]$	Vecteur flux rotorique.
$[\mathbf{R}_s]$	Matrice résistance statorique.
$[\mathbf{R}_r]$	Matrice résistance rotorique.
$[\mathbf{L}_{ss}]$	Matrice inductance statorique.
$[\mathbf{L}_{rr}]$	Matrice inductance rotorique.
$[\mathbf{M}_{sr}]$	Matrice inductance mutuelle stator-rotor.
$P[\theta_s]$	Matrice de PARK correspondant à l'enroulement statorique.
$P[\theta_r]$	Matrice de PARK correspondant au rotor.
P	Nombre de paires de pôles.
s, r	Indice relatif au stator et rotor respectivement.
D	Indice de l'axe direct.
Q	Indice de l'axe en quadrature.
θ_s	L'angle électrique entre l'axe a_s et l'axe d .
θ_r	L'angle électrique entre l'axe A_r et l'axe d .
Θ	La position angulaire du rotor par rapport au stator.

INTRODUCTION GENERALE

Les systèmes de production d'énergie décentralisés basés sur les énergies renouvelables, sont utilisés pour remédier à la demande sans cesse croissante de la consommation mondiale et diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Par cause du comportement intermittent de la vitesse du vent et de l'irradiation solaire dans la nature, la production d'énergie à partir de certaines sources est incertaine du point de vue de l'exploitation de réseaux autonomes.

Le principal défi lié à l'utilisation de l'énergie éolienne et solaire comme source d'énergie réside dans le fait que l'énergie éolienne comme le solaire peut ne pas être disponible en cas de besoin d'électricité. L'intégration du système de stockage d'énergie afin de réduire l'incertitude liée à la production solaire-éolienne améliorera la fiabilité et la sécurité de la production. Ces systèmes peuvent jouer un rôle essentiel dans la génération de l'énergie et ainsi lisser les variations de l'énergie produite sur un horizon temporel désiré.

La dynamique d'un système hybride solaire photovoltaïque PV-Eolien est fortement influencée par l'ensoleillement, le vent et le profil de charge considéré. La nature variable des sources d'énergie renouvelable, associée à des changements imprévisibles de la charge, nécessite la mise en œuvre simultanée de systèmes de stockages à haute puissance et à forte densité énergétique. Ce travail porte sur la modélisation, la simulation dynamique d'un système autonome solaire-éolien avec des batteries de stockage.

Dans un contexte socio-économique primordial, marqué par des interrogations sur les problèmes environnementaux grandissantes, les motivations sont orientées vers l'utilisation des énergies dites « vertes », pour l'efficacité énergétique et l'économie d'énergie.

Les systèmes solaire et/ou éolien sont largement utilisés dans les applications autonomes, cependant, le comportement intermittent de l'irradiation et du vent affecte sérieusement la stabilité de la production. En effet, l'énergie photovoltaïque n'est pas disponible la nuit, par temps nuageux et par temps neigeux, lorsque de l'électricité est nécessaire, tout comme l'énergie éolienne, inexistante à l'absence du vent. L'extraction de la puissance maximale des sources de natures fluctuantes est un problème majeur. L'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPPM) ou en anglais « maximum power point tracking (MPPT) » est largement utilisé dans la littérature afin de remédier à ce problème.

Le présent travail se situe donc dans un souci d'exploitation du potentiel en énergie renouvelable d'un système hybride Solaire-Éolien avec récupération d'énergie. Nous avons pour tâche la modélisation et la simulation d'un système de stockage associé au dit système hybride pour l'exploitation efficace et simultanée de ces deux formes d'énergie.

Chapitre. I ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE



I.1 INTRODUCTION

L'énergie photovoltaïque est basée sur l'effet photoélectrique. Celui-ci permet de créer un courant électrique continu à partir de l'irradiation solaire. Cette ressource a donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point d'un territoire. Cette ressource a toutefois deux inconvénients, la production est invariablement liée aux conditions climatiques et un rendement relativement faible (typiquement entre 10 et 18 %). [1]

I.2 DEFINITION

Le mot photovoltaïque vient du grec photos qui veut dire lumière et de volta du nom du physicien italien qui a découvert la pile électrique dans les années 1800.

L'énergie photovoltaïque est une transformation directe du rayonnement solaire en électricité à partir de la cellule photovoltaïque.

Cette transformation appelée Effet photovoltaïque, a été découverte en 1839 par Antoine BECQUEL et, est utilisée dans les cellules photovoltaïques que l'on assemble en modules puis en panneaux photovoltaïques permettant de convertir directement l'énergie solaire en électricité par a partir de la production et du transport des charges électriques sous l'effet de la lumière dans un matériau semi-conducteur. [1]

I.3 CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

La cellule ou photopile photovoltaïque est un composant opto-électrique, composé d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et qui la transforme directement en énergie électrique.

Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement solaire et à celles des semi-conducteurs.

I.3.1 Matériau semi-conducteur

Un semi-conducteur est une structure cristalline intermédiaire entre la structure du conducteur et celle de l'isolant du moins pour ce qui concerne ses propriétés électriques. Le semi-conducteur le plus utilisé est le silicium. [5]

Sous forme très pure, le silicium présente une conduction dite intrinsèque c'est-à dire une conduction par l'intermédiaire d'électrons libres fournis par les atomes même de la structure.

En arrivant sur la cellule solaire, le rayonnement se repartit en trois, dont une partie sera réfléchi, une autre absorbée et la dernière passera au travers de la cellule. Lors du rayonnement,

il y a distribution des photons (gains de lumière) et les photons absorbés vont libérer les électrons fournis par l'atome.

Pour que les électrons libérés sous illumination génèrent de l'énergie, il faut les attirer hors du matériau semi-conducteur dans un circuit électrique. Si non ils se recombinaient. Lorsqu'un électron se libère, il laisse un trou chargé positivement qui sera neutralisé par l'électron chargé négativement d'un autre atome. Autrement dit, les électrons retrouveraient leurs états initiaux à la l'extérieur de leurs atomes.

De ce fait, on réalise l'extraction des charges au sein d'une jonction créée volontairement dans le semi-conducteur et le but est celui d'engendrer un champ électrique à l'intérieur du matériau qui va entraîner les électrons (charges négatives) d'un côté et les trous (charges positives) de l'autre côté. C'est donc le dopage du silicium.

1.3.1.1 Dopage du silicium

Le dopage est l'ajout des impuretés en vue de détruire la parfaite symétrie électron- trou suivant le cas et de là le cristal sera caractérisé par un excès d'électrons libres ou par un excès de trous selon que le dopage se fait au phosphore(P) ou au bore(B).

En dopant le cristal avec des atomes étrangers de phosphore ayant cinq électrons à leurs couches externes, un électron par atome de phosphore ne pourra pas se lier à ses correspondants du silicium, il y aura alors un excédent d'électrons (charges négatives) dans le cristal. Le matériau sera donc potentiellement « donneur » d'électrons disponibles pour la conduction électrique et le silicium ainsi dopé est dit de type « n ».

Par symétrie, on peut également doper le silicium avec du bore n'ayant que trois électrons dans sa bande de valence. Il y aura donc un excédent de trous (charges positives) et dans ce cas, il y a un manque d'électron à chaque atome de bore pour compléter les quatre électrons du silicium. Le matériau est dit « accepteur » d'électrons et il est de type « P ».

La mise ensemble de deux zones de dopage opposées, constitue la diode (jonction p-n).

La jonction d'une cellule au silicium est donc constituée d'une partie dopée au phosphore associée à celle dopée au bore et c'est à la frontière de ces deux parties que se crée un champ électrique pour séparer les charges positives des négatives.

1.3.2 Transformation photovoltaïque

La conversion de la lumière en électricité rassemble trois phénomènes physiques intimement liés et simultanés :

- L'absorption de la lumière dans le matériau

- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques
- La collecte des charges

1.3.2.1 Absorption de la lumière

La lumière se compose des photons (gains de lumière) et chacun porte une énergie dépendante de sa longueur d'onde.

Le rayon lumineux qui arrive sur un solide peut donc subir trois événements optiques :

- La réflexion : la lumière est renvoyée par la surface de l'objet ;
- La transmission : la lumière traverse l'objet ;
- L'absorption : la lumière pénètre dans l'objet et n'en sort plus, l'énergie est restituée sous une autre forme.

Dans un matériau photovoltaïque, une partie du flux lumineux absorbé sera restitué sous forme d'énergie électrique. Donc au départ, il faut que le matériau ait la capacité d'absorber la lumière visible. Ce qui fait qu'on prendra soin de minimiser les pertes purement optiques par la réflexion ou par transmission.

1.3.2.2 Transfert d'énergie des photons

Dans ce paragraphe on va s'intéresser à la lumière absorbée dans le matériau photovoltaïque et expliquer comment l'énergie contenue dans le photon est convertie en électricité

Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont des électrons (charges négatives élémentaires) contenues dans la matière semi conductrice.

Tout solide est en effet constitué d'atomes qui comprennent chacun un noyau (constitué de protons et neutrons) et un ensemble d'électrons gravitant tout autour.

Les photons absorbés vont transférer leur énergie aux électrons périphériques (les plus éloignés du noyau), ce qui leur permet ainsi de se libérer de l'attraction du noyau. Ces électrons libérés sont capables de produire un courant électrique si on les attire ensuite vers l'extérieur.

En régime permanent, l'électron libéré laisse un trou qui se traduit par une charge positive. Si cet électron est attiré au dehors, c'est l'électron d'un atome voisin qui viendra combler ce trou, laissant à nouveau un trou, lui-même comblé par un électron voisin et ainsi de suite.

On génère ainsi une circulation de charges élémentaire d'électrons dans un sens et de trous dans l'autre sens, ce qui donne un courant électrique. [3]

Il existe dépendant du matériau, un seuil d'énergie minimum nécessaire à cette libération des électrons par les photons.

On appelle ce seuil, le gap optique du matériau ou la largeur de bande interdite. En effet si le photon a une énergie inférieure, il ne pourra pas créer la paire électron- trou et ne sera pas

absorbé. Les propriétés optiques et électroniques sont intimement liées. Si un photon a une énergie supérieure ou égale au gap optique, ce qu'il a une longueur d'onde inférieure à une certaine valeur puis que ces deux grandeurs sont inversement proportionnelles :

Pour une radiation de longueur d'onde λ (en m) dans le vide et de fréquence ν (en Hz), chaque photon transporte un quantum d'énergie E :

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

E énergie en Joule (J)	
h constante de Planck (J.s)	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$
λ longueur d'onde (m)	
c célérité de la lumière dans le vide (m.s^{-1})	$c = 3.0 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
ν fréquence (Hz)	

Tous les photons d'énergie supérieure à ce seuil et donc de longueur d'onde inférieure et sont opérationnels pour la conversion photovoltaïque.

1.3.3 Paramètres des cellules photovoltaïques

Les matériaux qui constituent les cellules photovoltaïques sont classés en deux grandes familles à savoir :

- Les matériaux solides cristallisés
- Les couches minces.

Les couches minces sont également solides, mais d'épaisseur nettement plus faible et sont déposées sur un support, alors que les cellules cristallines sont massives et épaisses de 0.15 à 0.2 mm.

Le semi-conducteur le plus utilisé est le silicium tétravalent d'où l'étude des cellules au silicium.

1.3.3.1 Silicium métallurgique

Pour fabriquer le silicium pur, on va donc avoir besoin de sable sous forme de quartz réduction qui se fait suite au procédé de raffinage dans un four à arc électrique par du carbone.



La pureté de ce silicium est de l'ordre de 98 à 99%.

Pour obtenir un matériau suffisamment pur pour fabriquer des composants électroniques, on utilise le procédé siemens qui transforme en trichlorosilane à l'aide d'acide chlorhydrique :



Cette relation étant réversible, elle servira également à récupérer le silicium après la purification, qui est réalisée par distillation fractionnée du trichlorosilane.

Le silicium obtenu par réduction à l'hydrogène est finalement déposé sur une baguette de silicium chauffée sous forme de petits grains poly cristallins. Ce silicium poly cristallin pur est environ de 99,99%, est onéreuse car cette étape a un mauvais rendement de matière et nécessite

beaucoup d'énergie.2.6

➤ Cellules au silicium cristallin

Les cellules les plus répandues sont celles au silicium cristallin et se présentent sous forme des plaquettes rondes, carrées ou pseudos carrés.

Le silicium qui constitue le matériau étant un cristal, c'est pour cela qu'on appelle le matériau (cristallin) avec un arrangement parfait des atomes selon une structure atomique ordonnée de type tétravalent.

Si la cellule est constituée d'un seul cristal, on parle de silicium monocristallin et elle a un aspect uniforme et gris bleuté, parfois noir. Si par contre la cellule est composée de plusieurs cristaux assemblés, on dit qu'elle est faite de silicium multi cristallin et présente l'aspect d'une mosaïque compacte de fragments cristallins bleutés de quelques millimètres à quelques centimètres appelés gains. [3]

➤ Cellules au silicium monocristallin

La première consiste à étirer des barreaux cylindriques de silicium fondu dans un creuset et de scier ensuite ces barreaux en wafers (tranches de silicium).

Ensuite on passe à la fabrication de la cellule solaire après avoir constitué les wafers de silicium.

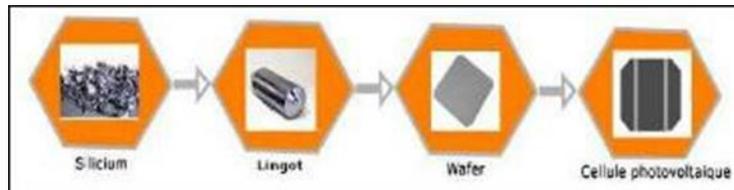


Figure.I.1 Passage du silicium pur à la cellule photovoltaïque monocristalline.

Les différentes étapes de fabrication de la cellule au silicium monocristallin sont les suivantes: Tout d'abord le décapage de la surface pour éliminer les défauts de sciage et ensuite une gravure sélective pour obtenir une surface texturée en petites pyramides, ce qui améliore la collecte de la lumière dans toutes les directions ;

- Une diffusion de phosphore pour réaliser la jonction ;
- Un dopage de l'arrière avec l'aluminium pour une bonne collecte de charge ;
- Le dépôt d'une couche antireflet sur l'avant ;
- Le dépôt d'une grille de métallisation sur l'avant ;
- Le dépôt d'un métal soudable sur l'arrière ;
- Le test et le tri de toutes les cellules fabriquées.

➤ Cellules poly cristallines

C'est dans le besoin d'améliorer le rendement des cellules solaires et d'avoir la capacité de

fabriquer un cristal de silicium bon marché de qualité solaire qu'est né le silicium poly cristallin ou multi cristallin. Ce semi-conducteur apparait comme la juxtaposition des petits cristaux mono cristaux d'orientations différentes et de dimensions du millièème au centièème.

Pour fabriquer ce matériau, on fait refondre tous les déchets provenant du tirage des monocristaux dans une cuve carrée à température et atmosphère contrôlées. Divers procédés thermiques et chimiques sont employés à ce stade pour repousser les principales impuretés à l'extérieur du creuset formant une croûte qui est ensuite éliminer après durcissement. le bloc qui est ainsi obtenu sera ensuite taillé en barreaux de section carrée (10 x 10 ou 15 x 15) qui seront sciés en wafers.(1)

1.3.4 Importance du procédé

L'économie de la surface puisque les wafers sont carrés, le rendement en matière est bon. La recristallisation a également un effet bénéfique sur la pureté locale de matériau.

De nos jours, cette technologie est la plus répandue car bien maitrisée sur le plan industriel et offre un bon rapport qualité- prix.

➤ Cellules au silicium amorphe

Le silicium utilisé en couche mince est dit «amorphe» où l'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal.

Le silicium amorphe pur est donc un mauvais conducteur car contenant plein de défauts et difficile à doper.

Cependant, lorsque le silicium amorphe est fabriqué à partir du gaz silane (SiH_4), il contient une proportion importante d'hydrogène qui va se lier à ses liaisons pendantes puisque le matériau comporte des déformations et les atomes ne sont liés qu'à trois autres atomes au lieu de quatre, ceci permet donc la collecte des charges et le dopage du matériau.

➤ Paramètres des cellules photovoltaïques

Une cellule finie est mesurée à l'aide d'un appareil simulant la distribution des photons en fonction de leur énergie (spectre solaire).

Les cellules mesurées sont classées suivant leur courant de court circuit I_{cc} et leur rendement. Les cellules de même classe seront assemblées en série ou en parallèle, entre elles pour former le module photovoltaïque.

Les paramètres caractérisant le module sont pareils à ceux de la cellule, seulement que le simulateur utilisé diffère par le fait que son rayonnement est uniforme sur une large surface.

Les paramètres caractérisant la cellule sont :

Puissance crête (P.c.)

C'est la puissance exprimée en Watt- Crête (WC) et qui est définie comme la puissance électrique maximum que peut fournir un module dans les conditions standards à 25°C sous un éclairement de 1000 W/m² (en plein soleil).

Caractéristique courant- tension

La jonction servant de base à la photopile (cellule), est une diode. Lorsqu'elle est illuminée, un photo courant apparaît dans cette diode qui est dépendant de la quantité de la lumière incidente. D'où le terme photodiode.

Sous illumination, la relation est simplement décalée par rapport à la première d'une valeur ICC, traduisant la génération constante du courant par la lumière. Cette valeur est appelée courant de court circuit, puisque c'est le courant que génère la photodiode sous illumination à tension nulle. La valeur u_{CO}, est la tension de circuit de circuit ouvert, tension de la photodiode sous illumination à courant nul.

Pour déterminer la relation caractéristique d'une cellule solaire, on part de la caractéristique connue d'une diode au silicium dans l'obscurité qui s'écrit :

$$I = IS(e^{U/U_t} - 1)$$

$$U = \text{tension imposée à la diode } U_t = kT/q = 26 \text{ mV à } 300$$

$$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ constante de Boltzmann } q = 1,602 \times 10^{-19} \text{ charge de l'électron}$$

$$T = \text{température absolue en kelvin } IS = \text{courant de saturation de la diode}$$

Sous illumination, avec un changement de signe purement conventionnel pour le courant, cette relation devient :

$$I = I_p - IS(e^{U/U_t} - 1) \quad (I.3); \quad \text{Avec } I_p = \text{photo courant}$$

Grace à cette équation, on peut quantifier les paramètres suivants :

Le courant de court circuit ICC, valeur du courant lorsque la tension U= 0, il vaut : ICC= I_p et la tension de circuit ouvert UCO, lorsque le courant est nul.

$$UCO = (kT/q)[\ln(I_p/IS)] \text{ pour } ICC \gg \gg \gg IS$$

On voit bien que cette tension augmente avec le logarithme de I_p, donc avec le logarithme de l'illumination. En revanche elle décroît avec la température malgré le terme kT/q. en effet, le courant de saturation IS, dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction : il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme kT/q. donc la tension de circuit ouvert UCO baisse

Avec la température, ce qui est important dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques.

Il faut donc noter que :

Le courant d'une cellule solaire est proportionnel à l'éclairement et à la surface de la cellule. Il augmente avec la température.

La tension de circuit ouvert d'une cellule solaire varie de manière logarithmique avec l'éclairement et baisse avec la température.

1.3.5 Puissance (point de fonctionnement)

La partie intéressante de la caractéristique courant- tension, pour un utilisateur est celle qui génère l'énergie. Donc ce ne sera ni au point de tension de circuit ouvert (UCO) ni à celui du courant de court-circuit (ICC) qui ne génère aucune énergie car la puissance est le produit du courant par la tension.

Au point P_m situé au coude de la caractéristique, la puissance de la cellule est maximale pour un éclairement considéré. Ce point dit de puissance maximale, est

Associé à une tension dite tension maximale U_m et à un courant dit courant maximal I_m .

I.4 SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

L'ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles, constitue le module photovoltaïque. Plusieurs modules sont groupés pour former un système photovoltaïque qui comprend d'autres composants comme le régulateur, la batterie et l'onduleur pour un site isolé (autonome).

Dans le cas où le système photovoltaïque alimente un réseau de distribution électrique, on ne fait plus intervenir la batterie car c'est le réseau qui restitue de l'énergie en cas de déficit.

1.4.1 Type de systèmes PV

Il existe deux types de systèmes photovoltaïques :

- Autonome, pour un site isolé.
- Connecté au réseau de distribution électrique.

1.4.1.1 Système photovoltaïque autonome.

C'est un système dont l'énergie produite est utilisée dans un site isolé et qui a un système de stockage d'énergie. Cette énergie est produite en courant continu et comme on touche à l'habitat où la plupart d'appareils fonctionnent en courant alternatif, il y a nécessité de la convertir.

La batterie servant de stockage, se charge le jour. L'alimentation des applications par la batterie se fait par l'intermédiaire d'un régulateur de charge pour éviter qu'elle souffre de surcharge et

d'un onduleur (convertisseur du courant continu à celui alternatif).

Ce système présente quelques conséquences :

- Augmentation du coût et l'encombrement de l'installation ;
- Réduction du rendement énergétique ;
- Risque de panne complète en cas de problème sur l'onduleur.
 - ➔ Champ de modules ;
 - ➔ Utilisation en courant continu ;
 - ➔ Utilisation en courant alternative ;
 - ➔ Régulateur ;
 - ➔ Batterie ;
 - ➔ Onduleur.

1.4.1.2 Système photovoltaïque relié au réseau de distribution électrique

Il est possible d'utiliser un générateur photovoltaïque de façon non autonome, en le connectant au réseau public de distribution électrique. Dans ce cas l'énergie produite est soit consommée sur place par le site ou soit revendue sur le réseau en cas de production excédentaire. Lorsqu'il y a déficit ou pendant les moments défavorables, le réseau alimente le site. Il n'y a donc pas de batterie.

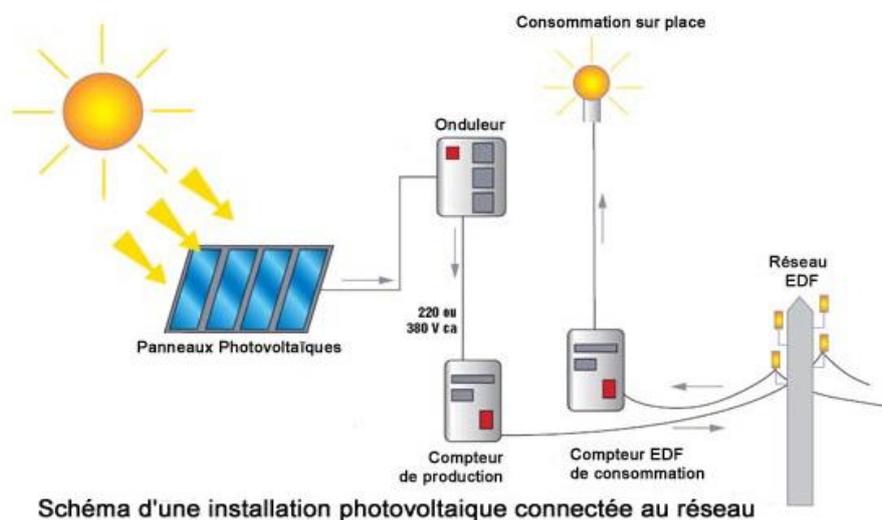


Figure.I.2 Schéma d'un système photovoltaïque connecté au réseau de distribution électrique

➤ **Composants du système photovoltaïque**

Modules et Panneau

En assemblant les cellules on obtient les modules nécessaires pour générer une puissance exploitable lors de l'exposition à la lumière puisqu'une cellule élémentaire ne génère qu'une

tension allant de 0.5 à 1.5 Volt. [5]

Il faut donc plusieurs cellules pour générer une tension utilisable.

Montage des cellules

Pour obtenir une tension utilisable, il est indispensable de faire la mise en série des cellules (photopiles).

Lorsque les cellules sont en série, les tensions de toutes les cellules s'ajoutent tandis que le courant lui, reste le même que celui d'une seule cellule. Il faut donc des cellules de même courant pour les mettre en série.

selon la surface mise en œuvre on réalise donc des modules de diverse puissance, capable de générer du courant continu en basse tension lorsqu'ils sont exposés à la lumière. En conclusion le montage des cellules en série constitue le module.

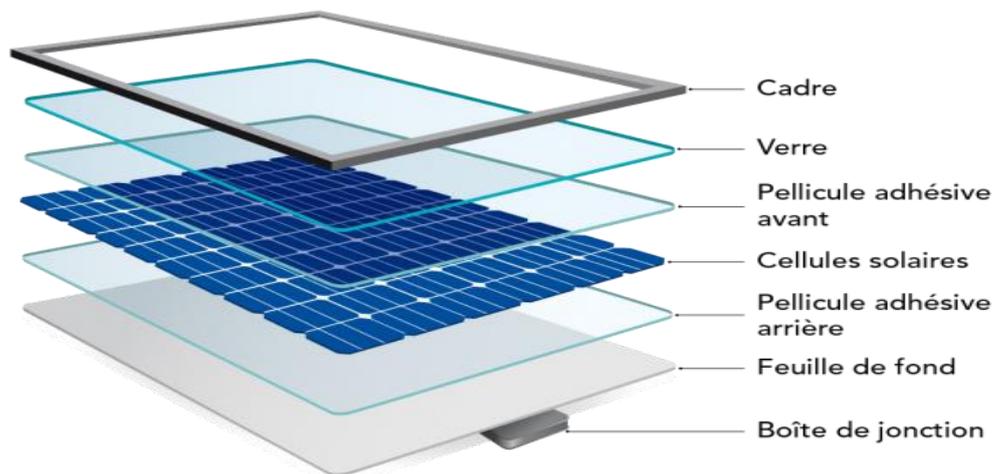


Figure.I.3 Cellules [8]

Montage des modules

Les panneaux solaires sont l'assemblage des modules formant un dispositif. Pour le montage des modules, la mise en série augmente la tension alors que le courant reste le même tandis que la mise en parallèle, augmente le courant mais la tension reste la même.

Assemblage des panneaux

Il est nécessaire d'assembler les panneaux photovoltaïques pour l'obtention d'une grande tension. Le montage se fait en série pour un même courant et inversement pour l'obtention d'un grand courant. [10]

En réalité, on n'a toujours pas des panneaux identiques, ce qui fait qu'il faut les appairer en tension ou en courant selon le cas.

Le panneau peu exposé au rayonnement ne produira pas la même énergie que les autres et deviendra dans ce cas récepteur des autres panneaux et recevra de la puissance en inverse d'où il y a risque de court-circuit et de destruction du système.

De ce fait, il faut placer une diode anti retour de puissance adéquate en sortie de chaque série de panneaux.



Figure.I.4 Champ des modules

Batterie de stockage

C'est des batteries qui assure le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes

Les batteries les plus utilisées pour des générateurs autonomes sont en générale de type au plomb- acide (Pb). Celles de type au nickel-cadmium (NiCd) sont parfois préférées pour les petites applications.

Batterie au plomb

Ce composant a une électrode de plomb et celle d'oxyde de plomb, toutes plongées dans un électrolyse composé d'acide sulfurique dilué en reliant les deux électrodes à un récepteur externe consommant du courant. Une électrode se transforme en sulfate de plomb et l'acide se dilue, phénomène qui permet d'évaluer l'état de charge de la batterie en mesurant la densité d'acide. En fournissant un courant opposé au système, l'acide se concentre et les deux électrodes retrouvent leurs états initiaux, la tension nominale est la somme des équilibres aux deux électrodes soit 2.08 volts.

Cependant cette batterie a une durée de vie variant entre 10 à 15 ans si elle est entretenue régulièrement.

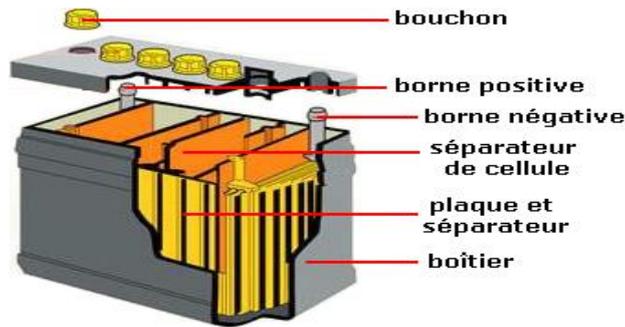
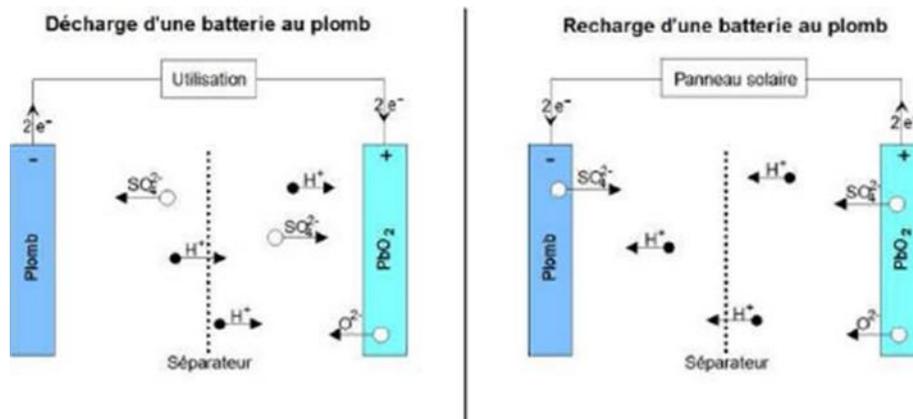


Figure.1.5 Batterie au plomb

Principe de fonctionnement d'une Batterie au plomb



A la décharge, les deux polarités se sulfatent, l'électrolyte est consommé (les ions SO_4^{2-} vont sur les électrodes). L'oxygène libéré par l'électrode positive s'unit aux ions H^+ en solution pour former de l'eau. Si la décharge est totale, l'électrolyte ne sera plus composé que d'eau distillée. A la recharge, les deux polarités se dé-sulfatent, l'électrolyte est régénéré (mise en solution d'ions SO_4^{2-}). La plaque positive est peroxydée (formation de PbO_2) et des ions sont libérés (augmentation de la concentration H^+ de l'électrolyte).

Montage

Pour augmenter la tension le montage en série de plusieurs batteries est fréquent, mais le couplage de des batteries en parallèle augmente la capacité de stockage, ce qui est délicat.

Régulateur



Figure.I.6 Régulateur

La batterie est l'élément le plus délicat du système et la qualité de son contrôle et son entretien influent grandement sa durée de vie d'où le rôle du régulateur.

Le régulateur est l'élément central d'un système photovoltaïque autonome car contrôlant les flux d'énergie et protège la batterie contre les surcharges et décharges profondes dues à l'utilisation.

Pour les systèmes photovoltaïques, on distingue :

- Les régulateurs série qui incorporent un interrupteur entre le générateur et l'accumulateur pour arrêter la charge
- Les régulateurs shunt, dont l'interrupteur court-circuite le générateur solaire en fin de charge ;
- Les régulateurs à recherche de point de puissance maximale qui utilise un circuit électronique spécial permettant de soutirer en permanence du champ des capteurs.

Onduleur

Les onduleurs sont des appareils qui convertir la tension continue fournie par les panneaux ou batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant avec une tension alternative.

Il existe des onduleurs dits à :

- Onde sinusoïdale- chargeur ;
- Onde carrée ;
- Onde pseudo- sinusoïdale.

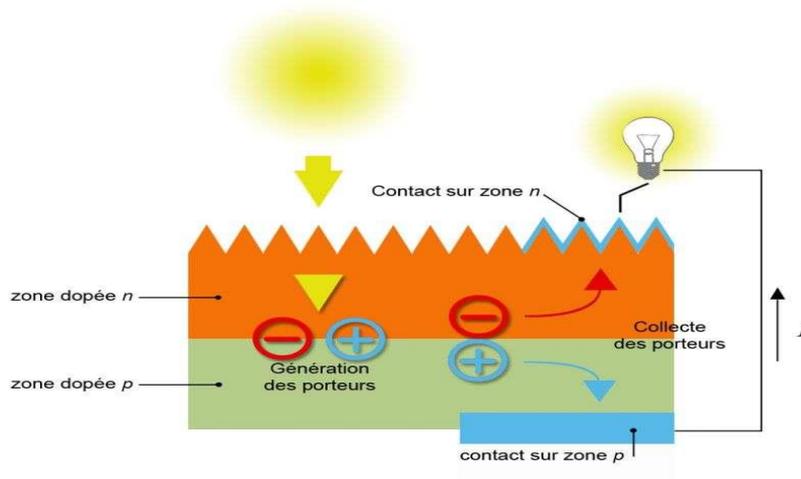
Avant de faire le choix d'un onduleur, Il faut s'assurer que ;

- L'onduleur peut démarrer le récepteur (seul un essai est vraiment relevant)
- Son rendement est suffisant au point de fonctionnement de la charge ;
- La charge tolère la distorsion de l'onduleur (forme de l'onde) ;

- Les variations de la tension de sortie sont acceptées par la charge (récepteur) ;
- L'onduleur protège contre la surcharge ;
- L'onduleur coupe l'utilisateur en cas de basse tension (protection de la batterie).

Modélisation d'une cellule photovoltaïque

I.5 MODELISATION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE



Il y a plusieurs modèles du générateur photovoltaïque (à une, à deux ou à trois diodes). Ils diffèrent entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant final du générateur photovoltaïque.

Le modèle à une seule diode est le plus connues. Il est caractérisé par son schéma électrique équivalent qui est représenté sur la figure . Il se compose d'une source de courant symbolisant la conversion du flux lumineux en énergie électrique, d'une résistance shunt R_{sh} caractérisant le courant de fuite à la surface de la cellule dû à la non-idéalité de la jonction PN et des impuretés près de la jonction. Une résistance série R_s représente les diverses résistances de contact et de connexions. [1]

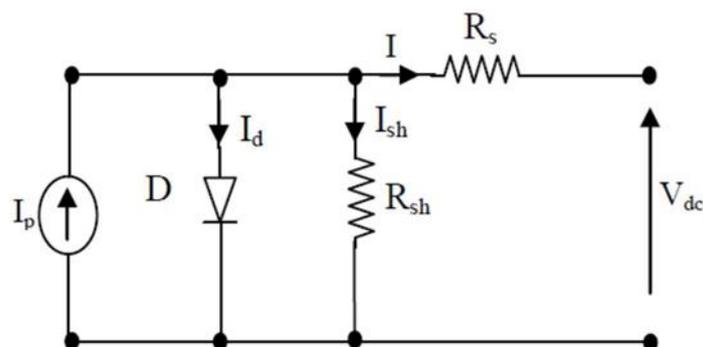


Figure.I.7 Schéma électrique équivalent du modèle à une seule diode d'une cellule photovoltaïque.

1.5.1 Présentation du modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque

En appliquant la première loi de Kirchhoff (loi des nœuds), on peut écrire :

$$I_p = I + I_d + I_{sh}$$

Le courant de jonction I_d est donné par :

$$I_d = I_0 \left[\exp^{q \left(\frac{V + R_s I}{nKT} \right)} - 1 \right]$$

Le courant dans la résistance R_{sh} vaut :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}}$$

Si on combine ces relations, on trouve ;

$$I = I_p - I_0 \left[\exp^{q \left(\frac{V + R_s I}{nKT} \right)} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right]$$

Avec :

I : Le courant de cellule [A]. V : La tension de cellule [V]. I_p : Le photo-courant de la cellule [A]. R_s : La résistance série de la cellule [Ω]. R_{sh} : La résistance shunt de la cellule [Ω].

T : La température de la cellule [$^{\circ}\text{K}$]. q : La charge de l'électron $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ [C]. I_0 : Le courant de saturation [A]. K : Constante de Boltzmann ($1.3854 \cdot 10^{-2}$ [JK $^{-1}$]). n : Le facteur de non-idéalité de la diode.

$$I_{cc} = I_p - I_0 \left[\exp^{q \left(\frac{R_s I_{cc}}{nKT} \right)} - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \right]$$

1.5.2 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes, :

1.5.2.1 Courant de court-circuit

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s est nulle et R_{sh} est infinie), ce courant se confond avec le photo courant I_p . Dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation, on obtient ;

$$I_0 \left[\exp^{q \left(\frac{R_s I_{cc}}{nKT} \right)} - 1 \right] \ll I_p$$

La plupart des photopiles ont une résistance série qui est faible, on peut négliger le terme : donc le courant de court-circuit aura pour valeur

$$I_{cc} = \frac{I_p}{\left(1 - \frac{R_s}{R_{sh}}\right)}$$

Avec I_{cc} intensité de court-circuit

1.5.2.2 Tension à vide

C'est la tension V_{c0} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (circuit ouvert). On la définit comme étant la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque.

$$0 = I_p - I_0 \left[\exp^{q \left(\frac{V_{c0}}{nKT} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{c0}}{R_{sh}} \Rightarrow V_{c0} = \left(\frac{q}{nKT} \right) \ln \left(\frac{I_p}{I_0} + 1 \right)$$

Avec : V_{c0} tension à vide (circuit ouvert).

1.5.2.3 Notion de Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit.

$$FF = \frac{V_{pm} \cdot I_{pm}}{I_{cc} \cdot V_{c0}}$$

1.5.2.4 Rendement

Le rendement (η), d'une cellule photovoltaïque est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in}

$$\eta = \frac{p_m}{p_{in}} = \left(\frac{FF \cdot I_{c0} \cdot V_{c0}}{p_{in}} \right)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à vide.

1.5.3 Module photovoltaïque

on peut construire un module (générateur) photovoltaïque selon le besoin des applications visées. En associant les cellules photovoltaïques en série ou en parallèle, Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. La puissance disponible en sortie du module photovoltaïque est

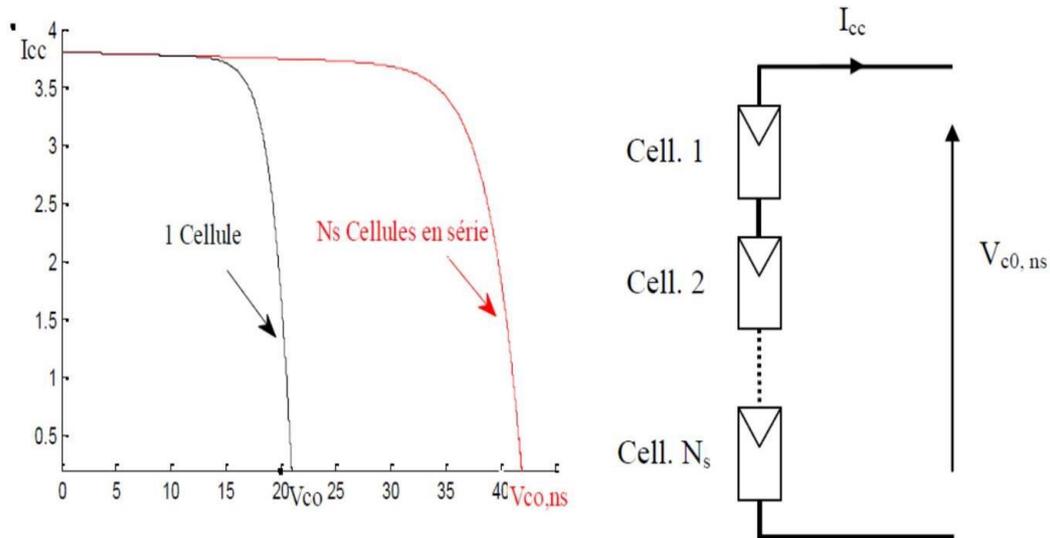
$$P = N_s \cdot V \cdot N_p \cdot I$$

Où :

- N_s : Le nombre de cellules photovoltaïques mises en série ;
- N_p : Le nombre de cellules photovoltaïques mises en parallèle.

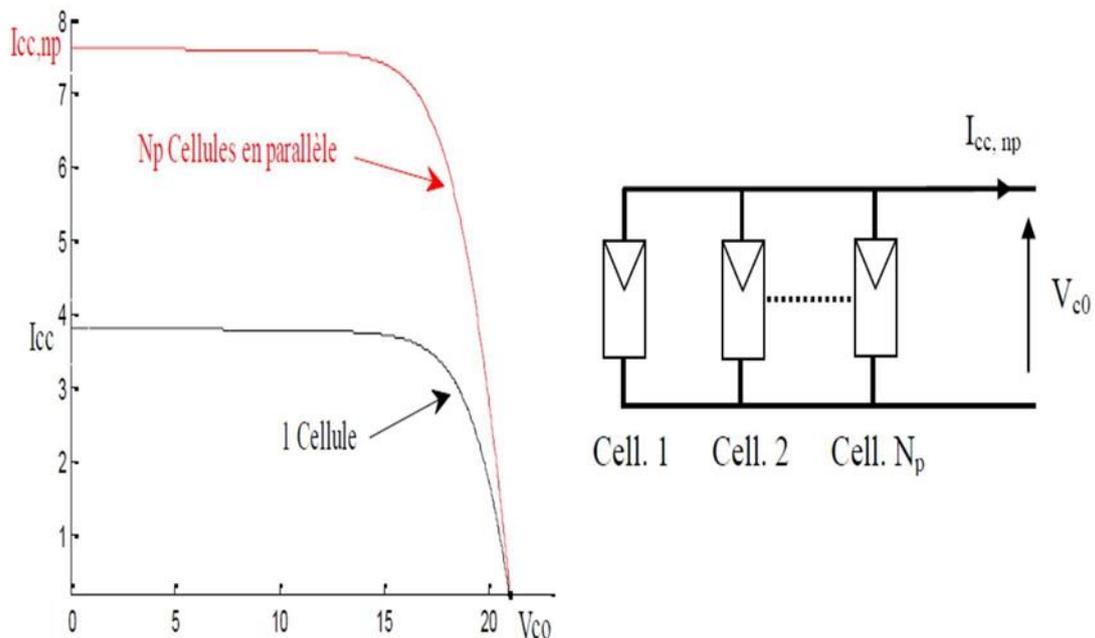
1.5.3.1 Mise en série

Une association de N_s cellules permet d'accroître la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules étant en série seront traversées par la même intensité de courant. La caractéristique de ce groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_s cellules



1.5.3.2 Mise en parallèle

D'autre part, on peut assembler N_p cellules en parallèle ; ce qui permettra d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique de ce groupement est obtenue par addition des courants. L'équation résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules.



I.5.4 Caractéristique électrique d'un module photovoltaïque

Les figures ci-dessous montrent respectivement les résultats de simulation des caractéristiques I(V) et P(V) d'un panneau photovoltaïque pour différentes valeurs de l'éclairement et de la température.

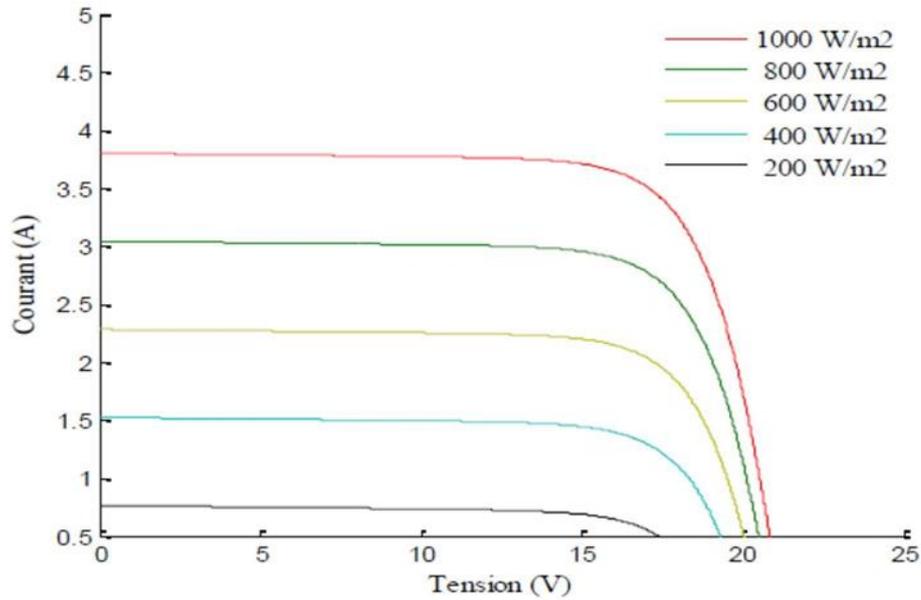


Figure.I.8 Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairements à température constante 25°C

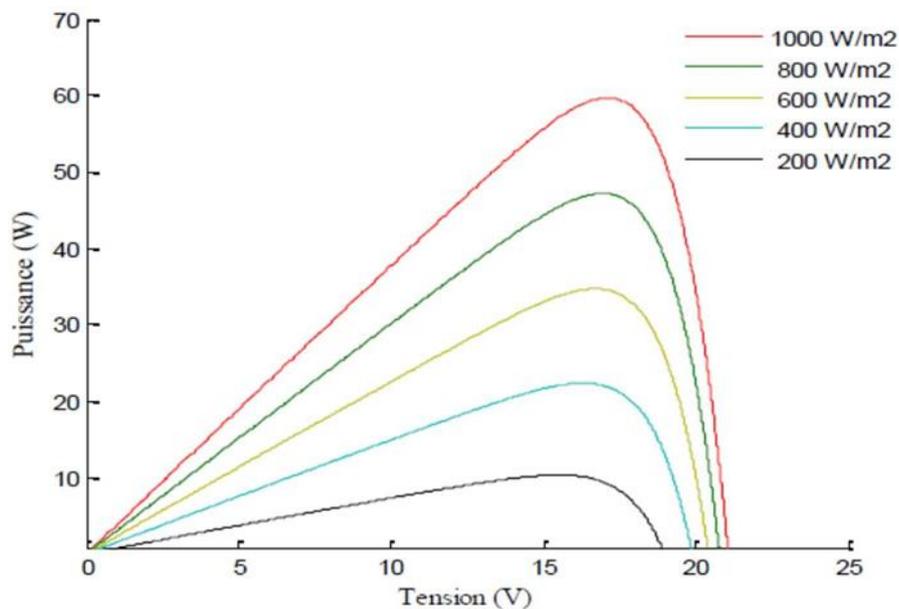


Figure.I.9 Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairements à température constante 25°C

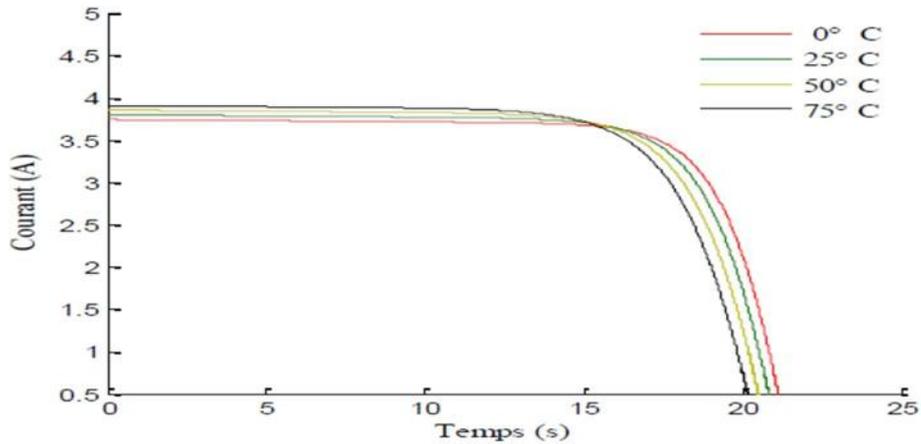


Figure.I.10 Caractéristique I(V) pour différentes valeurs de températures à éclairement constant 1000 W/m²

Nous observons que l'ensoleillement affecte beaucoup plus le courant I_{pv} du générateur que la tension V_{pv} . La température quant à elle, influe beaucoup plus sur la tension que sur le courant. L'ensoleillement augmente la puissance fournie par le module, alors que la température l'abaisse.

I.5.5 Système de conversion PV

La figure présente le schéma synoptique d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge. Le rôle du convertisseur DC/DC (dans le cadre du PV) est de réaliser l'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour un transfert de puissance maximal. [9]

Ceci est obtenu en maintenant le point de fonctionnement sur ou assez proche du MPP (point de puissance maximale) pour n'importe quelle condition de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc...). [77].

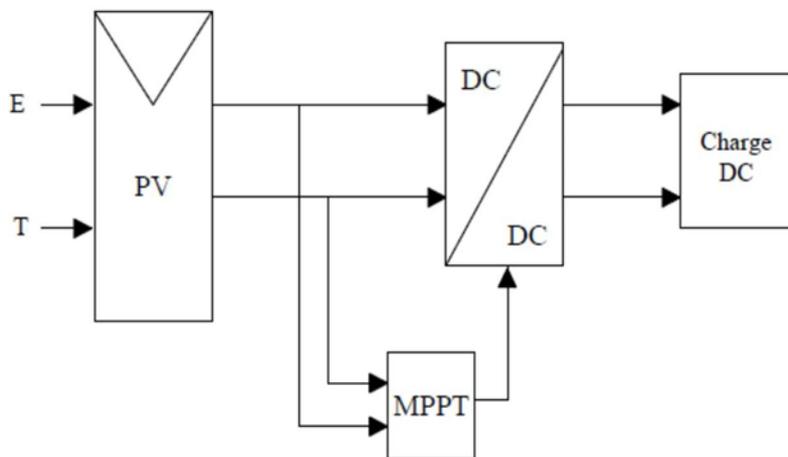


Figure.I.11 Connexion d'un GPV à une charge DC à travers un étage d'adaptation survolteur associé à une commande MPPT.

Cet étage d'adaptation utilise un algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui permet de rechercher le Point de Puissance maximum que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. Plusieurs algorithmes ont été proposés pour la réalisation de la commande MPPT. Parmi ces algorithmes on citera : la méthode de Hill Climbing, Perturb & Observe (P&O), de l'incrément de Conductance (IncCond) et par intelligence artificielle (logique floue, réseaux de neurones)

I.6 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU PHOTOVOLTAÏQUE

Le recours au photovoltaïque se pose souvent en termes de choix par rapport à une autre source d'électricité telle que : la source éolienne, le groupe électrogène etc.

I.6.1 Avantages

- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adapté à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés par des applications de puissance allant du milliwatt au mégawatt ;
- Les couts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent, ni combustible, ni transport, ni personnel hautement qualifié ;
- La haute fiabilité, ne comportant pas des pièces mobiles qui la rendent
- Particulièrement appropriée aux régions isolées ;
- Enfin, cette technologie présente les qualités sur le plan écologique car le système photovoltaïque est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu sicle n'est que l'occupation de l'espace pour l'installation de grande dimension.

I.6.2 Inconvénients

- La fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé ;
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28 %) ;
- L'onduleur ne donne pas l'énergie produite à 100 % ;
- Enfin lorsque le stockage d'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût de générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants associés soient judicieusement choisis.

I.7 CONCLUSION :

Le soleil fournit une source d'énergie propre à court et long terme. C'est une des solutions rentables pour alimenter les utilisateurs isolés. Une présentation globale de la modélisation, du fonctionnement, de la structure et des différents composants du système photovoltaïque est faite.

Dans ce chapitre, le modèle du panneau photovoltaïque est présenté, on a entre autres décrit les différents paramètres influençant les principales caractéristiques, à savoir la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ en fonction de l'ensoleillement et de la température.

Chapitre. II ENERGIE EOLIENNE

II.1 INTRODUCTION

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, l'être humain étant de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Cette dernière sert à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique ; là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, on utilise des machines synchrones ou asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

Dans ce chapitre, on présente des notions théoriques sur l'énergie éolienne, des différents types d'aérogénérateurs (verticaux, horizontaux, à vitesse fixe et vitesse variable ...etc.), puis on passe à un état de l'art sur les dispositifs électrotechniques permettant de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. On termine notre chapitre par la présentation de la génératrice électrique, il s'agira d'un générateur synchrone à aimants permanents (PMSG ou GSAP).

II.2 PRESENTATION DE L'ENERGIE EOLIENNE

II.2.1 Définition

Le principe de production de l'énergie éolienne est assez simple. L'énergie cinétique générée par la force du vent est transmise à une turbine (aérogénérateur) ; cette force fait tourner les pales d'un rotor ; L'énergie mécanique produite est ainsi transformée en énergie électrique.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusée, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée) [11]. Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle, mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable aux autres énergies sans pour autant prétendre les remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes Offshore) où la présence du vent est plus régulière.

II.2.2 Le système éolien

Un aérogénérateur a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, ce

Le système est connu sous l'appellation anglaise Wind Energy Conversion System (WECS), (Figure II.1). Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique ; d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, idéalement. Une éolienne doit comporter :

- Un système qui permet un contrôle mécanique (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle).
- Un système capable de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande).

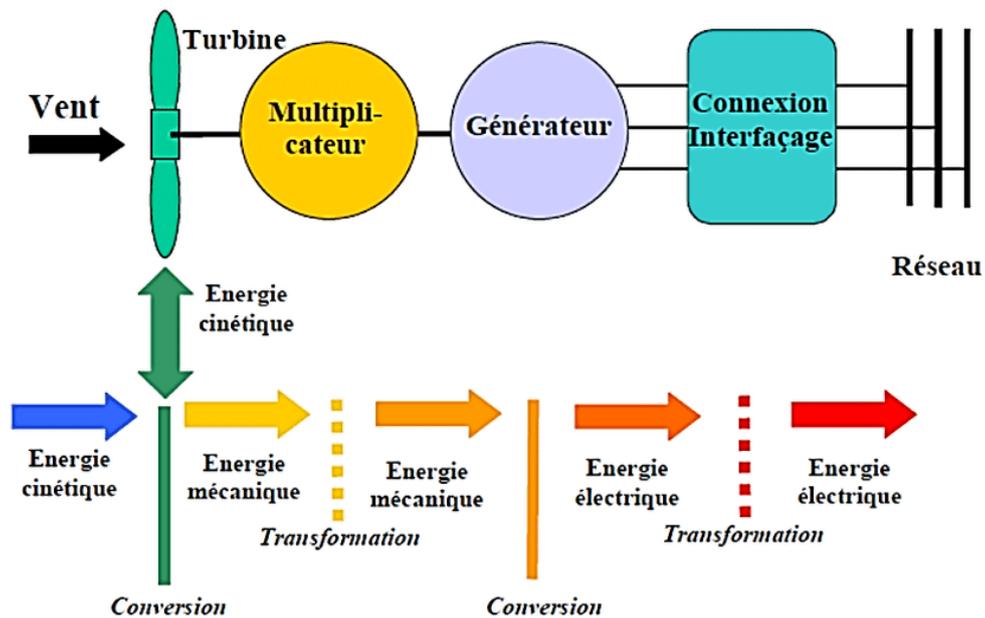


Figure.II.1 . Conversion de l'énergie cinétique du vent.

II.3 Principe de système l'éolienne

Une éolienne est conçue pour transformer l'énergie du vent en une énergie électrique. Plusieurs étapes sont nécessaires pour cette transformation [13] :

- Les pales sont fixées sur un moyeu, portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical, elles fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion : la différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique fera tourner le rotor.
- La vitesse de rotation des pales est relativement lente (5 à 15 tr/min), d'autant plus lente que l'éolienne est grande. Pour pouvoir produire de l'électricité, les générateurs ont besoin d'une vitesse (de 1000 à environ 3000 tr/min). Ce problème est réglé par l'installation d'un multiplicateur pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par. Quelques modèles

d'éoliennes n'ont pas besoin du multiplicateur, elles sont équipées de machines synchrones (génératrices annulaires).

- Le rotor d'un générateur reçoit l'énergie mécanique transmise par le multiplicateur, une énergie électrique est par conséquent produite. Dans les grandes éoliennes, la tension générée est d'environ 690 V.
- L'ensemble est fixé sur une nacelle. Un système d'orientation permet de guider la nacelle pour que les pâles soient toujours face au vent.
- L'électricité ne peut pas être utilisée directement ; elle est traitée grâce à un convertisseur, puis grâce à un transformateur sa tension est élevée à 20000 V. L'électricité est alors acheminée à travers un câble souterrain jusqu'au poste de transformation, pour être injectée sur le réseau électrique.

Pour produire de l'électricité par une éolienne, plusieurs paramètres sont à considérer :

- La longueur des pales : la puissance produite par une éolienne augmente avec le carré de la longueur des pales, une éolienne produira quatre fois plus d'énergie si la pale est deux fois plus grande.
- La vitesse du vent : la puissance générée croît avec le cube de la vitesse du vent. Lorsque la vitesse du vent double, la production sera multipliée par 8.
- La densité de l'air : une éolienne produit 3% de plus d'électricité si, pour une même vitesse de vent, l'air est 10 degrés plus froid.

Les éoliennes fonctionnent pour des vitesses de vent (à hauteur de nacelle) généralement comprises entre 14 et 90 km / h. Lorsque le vent est inférieur à 10 km/h (2,8 m/s), l'éolienne est arrêtée car la rentabilité est à un très bas niveau. Cela n'arrive que 15 à 20 % du temps. Entre 10 et 36 km/h (2,8 et 10 m/s), la totalité de l'énergie du vent disponible est convertie en électricité, la production augmente très rapidement. A partir de 36 km/h (10 m/s), l'éolienne approche de sa production maximale : les pales se mettent progressivement à tourner sur elles-mêmes afin de réguler la production. A 45 km/h (12,5 m/s), l'éolienne produit à pleine puissance. Les pales sont orientées en fonction de la vitesse du vent. La production reste constante et maximale jusqu'à une vitesse de vent de 90 km/h (25 m/s) ; à partir de cette vitesse, l'éolienne est arrêtée progressivement pour des raisons de sécurité, et les pales sont mises en drapeau. La probabilité d'apparition de vents violents reste néanmoins faible, pour cette raison on ne peut fabriquer ses machines pour produire à des vitesses de vents supérieures à 25 m/s, faute de rentabilité économique.

Une éolienne est équipée d'un système de freinage afin d'assurer l'arrêt rapide de la machine et son immobilisation lors de la maintenance.

II.4 LES TYPES DES SYSTEMES EOLIENNES

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

II.4.1 Éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal:

II.4.1.1 Éolienne de Savonius :

L'éolienne verticale Savonius consiste en au moins deux demi-cylindres installés de manière légèrement désaxée l'un par rapport à l'autre. Le vent se submerge dans l'un des demi-cylindres et le pousse, il continue sa course dans l'autre demi-cylindre, qu'il pousse à son tour. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre les deux demi-cylindres, ce qui augmente le couple moteur. En 1929, Sigurd Savonius (Finlande, 1884 - 1931) fut breveté pour ce système.

Les avantages de cette éolienne se résument sur [15] :

- La possibilité d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, ils seront donc facilement accessibles,
- Il est possible de l'installer sur une toiture.
- Contrairement au système Darrieus, l'éolienne Savonius peut fonctionner même avec un vent faible, quelle que soit sa direction (Figure II.2) [39].

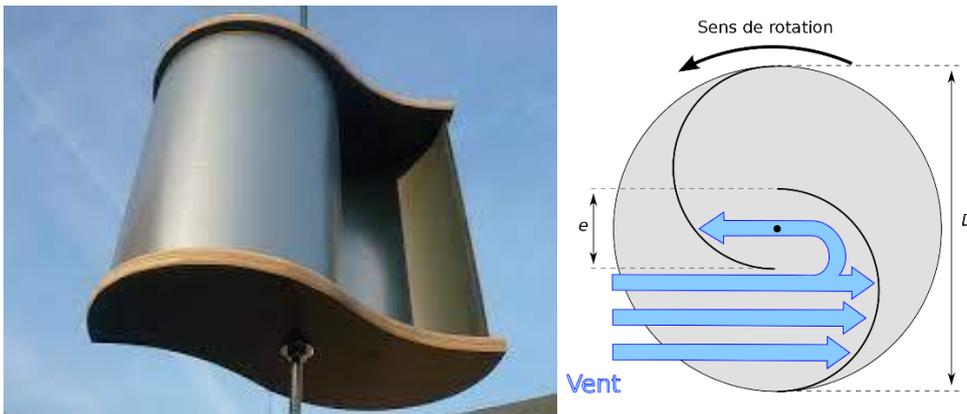


Figure.II.2 Éolienne de Savonius.

II.4.2 Éolienne de Darrieus :

Ce sont des éoliennes à variation cyclique d'incidence. La structure la plus répandue est celle de Darrieus. C'est une éolienne verticale qui produit de l'électricité grâce à un rotor, qui peut être lui aussi de différents types (hélicoïdal, H, cylindrique), et qui tourne autour d'une tige fixe,

appelée stator à ailettes. On trouve désormais des éoliennes à axe vertical développées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Ce sont en effet des machines de faible puissance, elles sont destinées à des utilisations permanentes et peuvent être installées dans des zones très ventées (dépassant les 220 km/h). L'éolienne verticale type Darrieus émet moins de bruit qu'une éolienne horizontale et occupe moins de place, on peut l'installer directement sur le toit ; de plus son générateur est facilement accessible puisqu'il est installé en bas, La vérification et l'entretien de celui-ci est à portée. La présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité [16].

On peut toutefois citer quelques inconvénients des éoliennes à axe vertical Darrieus, tel qu'un faible rendement et un démarrage difficile dû au poids du rotor sur le stator.

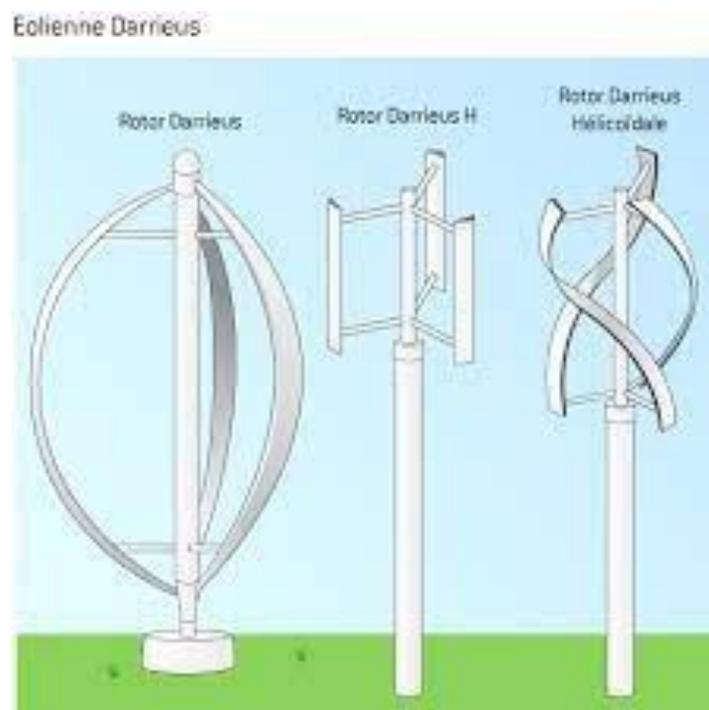


Figure.II.3 Éolienne de Darrieus

II.4.3 Éoliennes à axe horizontal

Les aérogénérateurs à axe horizontal ont été inspirés des moulins à vent. Cette technologie ancestrale est devenue largement dominante de nos jours, car la plupart des éoliennes commerciales et industrielles installées sont à axe horizontal [17]. Leur principe de fonctionnement est similaire à celui des turbines hydrauliques : la puissance mécanique du vent fait tourner des pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion ; ces pales sont couplées à un rotor, ce qui va générer un couple moteur entraînant sa rotation.

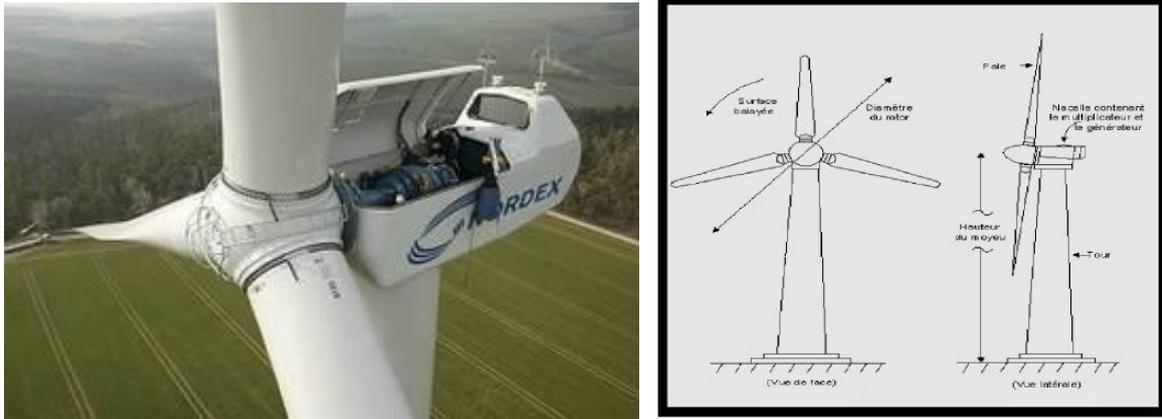


Figure.II.4 Éoliennes à axe horizontal

Une éolienne à axe horizontal est souvent constituée de trois pales tournantes, mais on trouve également des systèmes constitués d'une, de deux ou d'une multitude de pales ; ces dernières sont bien adaptées aux vents de faible vitesse, mais ils sont toutefois fragiles en présence de fortes intempéries, ceux constitués de deux pales doivent de tourner plus rapidement pour produire une même quantité d'énergie. Les éoliennes tripales sont de loin les plus utilisées ; en effet le vent en haut d'une éolienne souffle plus fort qu'en bas puisque la vitesse du vent augmente avec l'altitude. Dans le cas où le nombre de pales est de deux, la variation de la force sur le moyeu est alors importante car lorsqu'une pale est au plus haut la quantité de vent présente est plus grande, l'autre pale étant au plus bas le vent s'affaiblit. L'utilisation de trois pales permet une compensation de ces différences, et une grande stabilité car la charge aérodynamique est relativement uniforme et elles présentent le coefficient de puissance le plus élevé actuellement. Suivant leur position en fonction du vent et leur site d'implantation, on distingue :

- En amont (UP-WIND) : le rotor est face au vent sans la présence d'obstacles, toutefois un système d'orientation de la nacelle face au vent sera plus que nécessaire.
- En aval (DOWN-WIND) : pour ces dispositifs l'éolienne est positionnée automatiquement face au vent, ceci permet d'éviter le système mécanique d'orientation, notamment pour les fortes puissances ; mais la répartition de charge sur la pale sera différente, pour cette raison l'éolienne en amont est largement prédominante.
- Eolienne terrestre dite Onshore installée sur terre.
- Eolienne marine dite Offshore installée en mer.

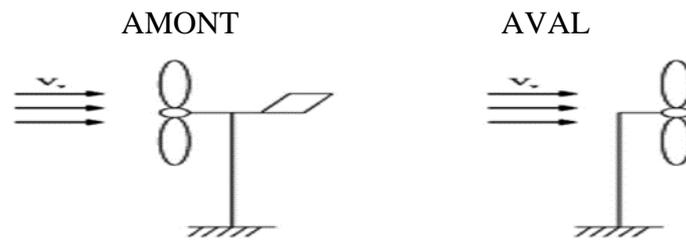


Figure.II.5 Type de montage de la voilure



Parc Offshore

Ferme Onshore

Figure.II.6 Exemples d'éoliennes

La plupart des éoliennes actuellement installées utilisent des turbines à axe horizontal. Le tableau II.1 propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice.

Tableau.II.1 Classification des turbines

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

II.4.4 Les composants d'une éolienne à axe horizontal

Tous les éléments constituant Une éolienne sont représentés sur la figure II.7 [20]. On peut classer une éolienne en plusieurs éléments principaux :

La tour (ou le mât) :

La tour sert de support à la nacelle et au rotor, elle permet à l'éolienne d'avoir une hauteur où la vitesse moyenne du vent est plus élevée et plus constante qu'au sol. Elle peut être tubulaire (tube en béton ou en acier) ou en treillis (voir Fig. II.8). La première structure offre plusieurs avantages : les oiseaux la voient de loin et la définissent comme quelque chose à éviter ; ils ne peuvent pas y faire de nid. La nuisance sonore est presque éliminée pour une tour en tubulaire.

La nacelle:

La nacelle est placée au sommet de la tour, elle regroupe tous les éléments électroniques et mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, le frein à disques, différent du frein aérodynamique (permettant d'arrêter le système en cas de surcharge), le générateur et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) ; à cela vient s'ajouter le système de refroidissement, enfin un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

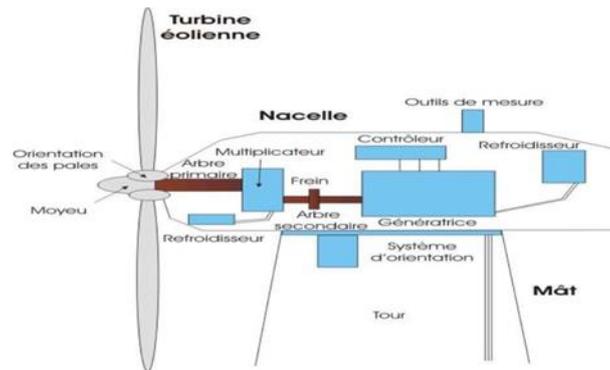


Figure.II.7 Parties d'une éolienne



a) Tour tubulaire

b) Tour en treillis

Figure.II.8 Tour d'un aérogénérateur

Le rotor:

Le rotor est composé des pales et du moyeu. Cet ensemble assure la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui sera transmise au reste de l'éolienne via l'arbre lent. Le moyeu est la pièce qui reçoit les pales. Il est souvent protégé par une coque en polyester en forme d'obus qui lui donne une forme aérodynamique. Les pales sont montées sur l'axe du moyeu et servent à capter la puissance du vent. Leur profil ressemble à celui d'une aile d'avion. En général sur les éoliennes modernes le rotor tripale (concept danois) est de loin le plus

répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [21].

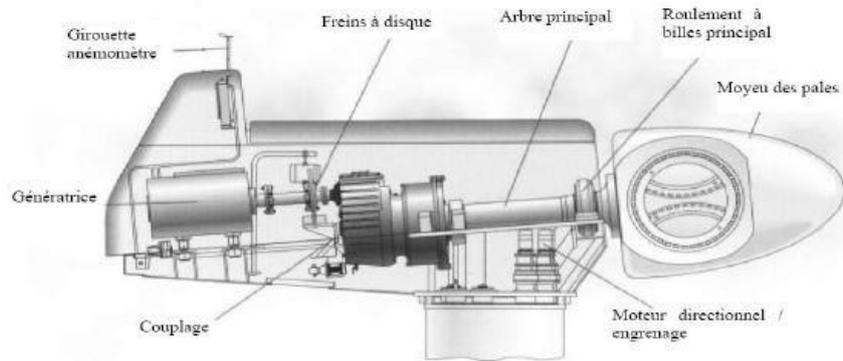


Figure.II.9 Constituants principaux d'une nacelle

Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé. Toutefois, une interface de régulation électronique entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées actuellement, les matériaux composites telles que la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone et matériaux composites, sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique.

Le multiplicateur :

Les vitesses de rotation des rotors dont le diamètre est supérieur à 5 m sont trop faibles pour pouvoir entraîner directement un générateur ; un multiplicateur (boîte à vitesses) serait indispensable pour pouvoir accroître la vitesse entre l'aéromoteur et l'alternateur.

Il existe plusieurs types de multiplicateurs pouvant être utilisés :



a) Multiplicateur



b) Multiplicateur



c) Vérification du frein à disque



d) Remplacement de la boîte de vitesse

Figure.II.10 Vues d'un multiplicateur

- ➔ Un multiplicateur à engrenages ayant un ou plusieurs trains de roues cylindriques dentées ; cette réalisation étant économique mais tout de même encombrante pour un rapport de multiplication élevé. Un multiplicateur à trains planétaires, celui-ci permet de réaliser des multiplications élevées sous un encombrement réduit. Cette technique permet de réaliser des rapports de multiplication élevés sous un encombrement réduit avec un bon rendement de transmission. Les axes d'entrée et de sortie sont colinéaires voire coaxiaux.
- ➔ Un réducteur à couple conique où l'arbre de sortie est perpendiculaire à l'arbre d'entrée.
- ➔ L'arbre rapide est muni d'un frein à disque, utilisé uniquement qu'en cas d'extrême urgence. La génératrice reçoit l'arbre rapide afin de transformer son énergie mécanique en énergie électrique.

La génératrice :

Les génératrices utilisées dans les éoliennes, permettent de transformer l'énergie mécanique

présente dans l'arbre rapide qui est accouplé au rotor, en énergie électrique. Différentes technologies des générateurs peuvent être utilisées :

- Les générateurs asynchrones à cage d'écureuil « GAS »,
- Les générateurs synchrones à rotor bobiné « GSRB »,
- Les générateurs synchrones à aimants permanents « GSAP »,
- Les générateurs asynchrones à rotor bobiné à double alimentation « GADA ».

Le système de contrôle-commande (Le contrôleur électronique) :

Le contrôleur électronique est considéré comme le cerveau de l'éolienne, il gère tous les paramètres (de 100 à 500) ; un ordinateur surveille en permanence l'état de l'éolienne et enregistre chaque changement. Si un défaut surgit, le système stoppe immédiatement l'éolienne, un signal de défaut est transmis à l'opérateur. Le contrôleur électronique est aussi chargé de gérer.

Le système d'orientation des pales, et de la nacelle qui à travers une couronne dentée entraînée par des moteurs électriques permet de l'orienter face au vent, et de la verrouiller en cas d'un vent très fort grâce à un frein.

Le système de refroidissement qui comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile ou à eau froide pour le multiplicateur.

Une armoire de commande qui comporte tous les convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur, redresseur), ainsi que les systèmes de régulation de puissance, de courant et de tension et d'orientation des pales et de la nacelle ; ainsi que les appareils de protection et de mesure.

Le système de mesure (anémomètre, girouette), ces deux capteurs mesurent successivement la vitesse et la direction du vent ; les signaux mesurés sont aussitôt envoyés au système de contrôle, qui arrête l'éolienne aux limites d'un vent trop faible ou quand il est très fort.

La cabine de dispersion :

Elle est située au pied du mat ; cette cabine abrite un transformateur BT/HT pour connecter l'éolienne au réseau. Pour les grandes éoliennes l'armoire de commande peut se situer sur la cabine de dispersion.

II.5 CONTROLE DES PUISSANCES D'UNE TURBINE EOLIENNE

Une éolienne industrielle se doit d'être protégée contre les vents forts afin de délimiter la puissance fournie, et de ne pas dépasser une puissance nominale P_n . Au-delà d'une vitesse de vent nominale v_n , les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance

nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale v_m au risque d'endommager la turbine. Quatre zones de fonctionnement sont donc à définir [25] :

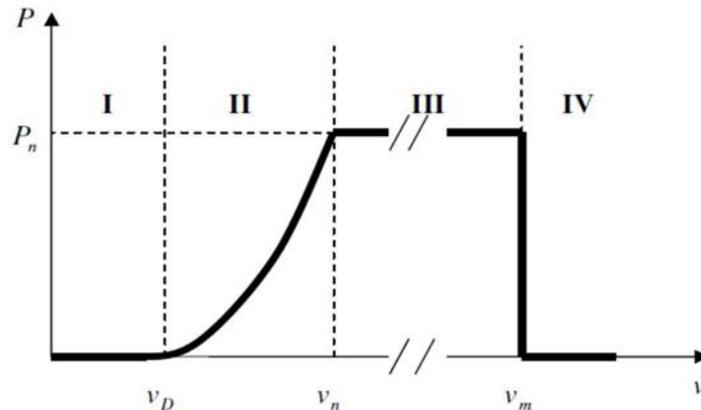


Figure.II.11 Caractéristique puissance/vitesse de vent d'une éolienne classique

- ❖ Zone I : le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine, l'éolienne est à l'arrêt.
- ❖ Zone II : Pour des vitesses moyennes, le système de contrôle de l'aérogénérateur intervient pour contrôler la puissance électrique à générer.
- ❖ Zone III : La vitesse du vent devient progressivement très élevée, la puissance électrique produite est maintenue constante et égale à sa valeur nominale P_n , par le dispositif de régulation.
- ❖ Zone IV: la vitesse de vent est trop importante, elle dépasse la valeur maximale admissible par l'éolienne v_m , les pales de la turbine sont mises en drapeaux ($\beta=90^\circ$) ; au risque d'endommagement du système turbine-générateur, la turbine s'arrête et la puissance générée sera nulle.

II.5.2 Action du vent sur une pale

L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la surface des pales (Figure II.15).

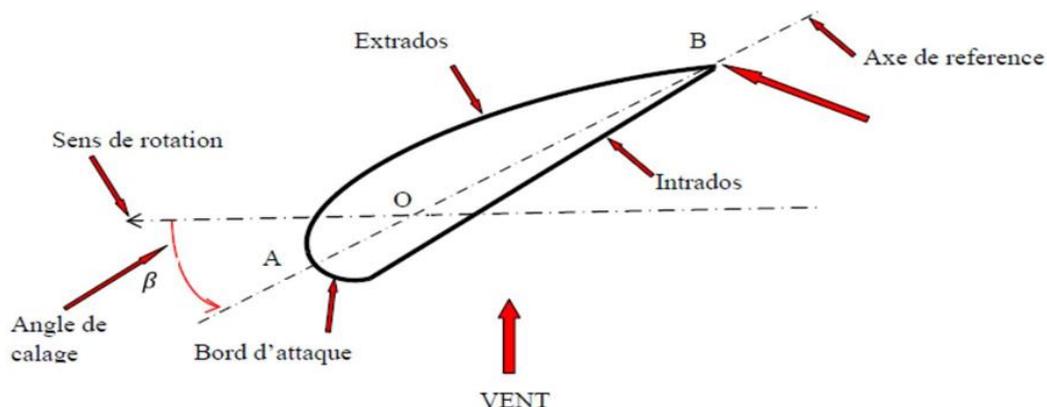


Figure.II.12 Eléments caractéristiques d'une pale

On remarque plus particulièrement les éléments suivants :

- Corde : longueur l du profil du bord d'attaque au bord de fuite.
- Angle de calage (inclinaison de l'axe de référence par rapport au plan de rotation) β .
- Extrados : dessus des pales.
- Intrados : dessous des pales.

Les profils sont généralement de type plan-convexe (l'intrados est plan alors que l'extrados est convexe) ou alors biconvexe (l'intrados et l'extrados sont convexes). Ils sont normalisés et les paramètres sont bien définis [18].

La résultante du vent (apparent) : $W = U + V$ II.1

La vitesse du vent apparent W fait un angle d'attaque ψ avec le plan de rotation. Cet angle vaut:

$$\psi = \tan^{-1} \frac{V}{U}$$

On introduit un angle dit d'incidence, noté α entre l'axe de référence de la pale et la direction du vent apparent :

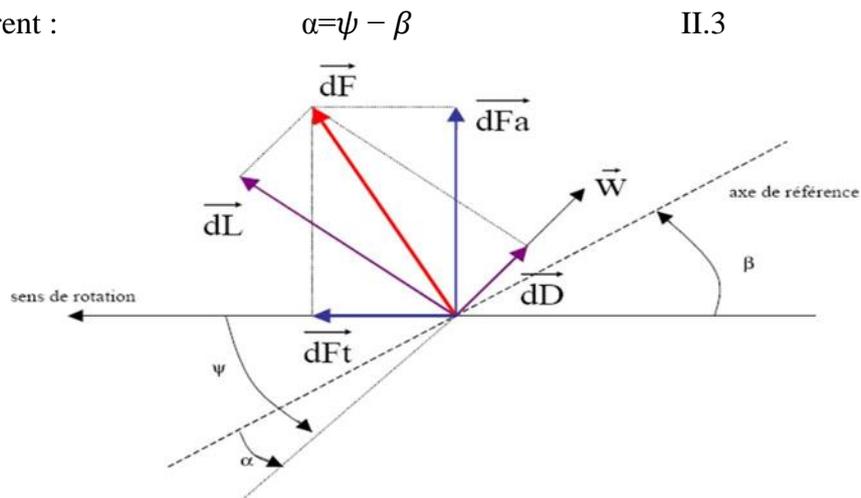


Figure.II.13 Forces appliquées sur un tronçon de pale

On peut décomposer la force résultante $d\vec{F}$ de la manière suivante :

La portance $d\vec{L}$, normale à la direction du vent apparent.

La force de traînée $d\vec{D}$, parallèle à la direction du vent. On peut aussi la décomposer d'une autre manière :

La poussée axiale $d\vec{F}_a$, perpendiculaire au plan de rotation.

La poussée tangentielle $d\vec{F}_t$, dans la direction de rotation.

On déduit aisément les expressions de la poussée axiale et tangentielle en fonction de la portance et de la traînée :

$$\begin{cases} dF_t = dL \cdot \sin \psi - dD \cdot \cos \psi \\ dF_t = dD \cdot \sin \psi + dL \cdot \cos \psi \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

C'est le couple résultant des forces tangentielles qui va provoquer la rotation de la turbine. Les modules des forces dL et dD sont données par :

$$\begin{cases} dL = \frac{1}{2} \rho w^2 \cdot dA C_L \\ dD = \frac{1}{2} \rho w^2 \cdot dA C_D \end{cases} \quad \text{Avec :} \quad \text{II.5}$$

- dA : Surface du « tronçon » de la pale.
- C_L : Coefficient de portance (sans dimension)
- C_D : Coefficient de traînée (sans dimension)
- W : Module du vent apparent

Les coefficients C_L et C_D dépendent fortement de l'angle d'incidence α . Pour des angles faibles, l'écoulement de l'air le long de la pale est laminaire et plus rapide sur l'extrados que sur l'intrados. La dépression qui en résulte à l'extrados crée la portance ; c'est cette force qui soulève un avion et qui lui permet de voler, elle « aspire » la pale vers l'avant. Si α augmente, la portance augmentera jusqu'au point où l'écoulement deviendra turbulent. Du coup, la portance résultant de la dépression sur l'extrados disparaît. Ce phénomène s'appelle le décrochage aérodynamique. Cependant, les concepteurs de pales ne se préoccupent pas uniquement de la portance et du décrochage. Ils prêtent également beaucoup d'attention à la résistance de l'air, appelée aussi dans le langage technique de l'aérodynamique, la traînée. La traînée augmente en général si la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air augmente. Ce phénomène apparaîtra ici pour des angles d'incidence importants.

II.5.3 Contrôle de la puissance captée par la turbine

Le réglage du couple, donc de la puissance captée par la turbine, se fait essentiellement par action sur la portance des pales qui dépend principalement de l'angle d'incidence. Le réglage de la puissance va donc se faire par action sur α .

Trois méthodes de contrôle des pales sont décrites ci-dessous. Elles servent principalement à limiter la puissance captée au moment où les vents sont très forts [26].

II.5.3.1 Contrôle par décrochage aérodynamique passif (« Passive Stall »)

L'angle de calage β est fixe, l'angle d'incidence augmente naturellement avec la vitesse du vent incident pour une vitesse mécanique pratiquement constante. Cette augmentation provoque l'augmentation de la traînée (coefficient C_p) et par suite un décrochage progressif de la pale, le

couple est maintenu à peu près constant jusqu'au décrochage (chute brutale de C_L et augmentation importante de C_D) où il chute rapidement. La puissance est donc bien limitée. Du fait de sa simplicité et l'absence de tout système électrique ou mécanique, ce système montre des insuffisances :

- La puissance captée par la turbine est seulement fonction de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation. Il n'y a donc aucune possibilité d'adaptation.
- Nécessité de freins dimensionnés pour absorber l'énergie cinétique de la turbine ainsi que l'énergie captée pendant le freinage, même en cas de problème sur la transmission, ce qui suppose un système de freinage sur l'arbre de la turbine lui-même (couple de freinage très élevé).

II.5.3.2 Contrôle par décrochage aérodynamique actif (« active stall » ou « combi stall »)

L'angle α peut être augmenté (ou diminué) légèrement par diminution (ou augmentation) de l'angle de calage β de quelques degrés (3 à 5° généralement). Le décrochage peut être légèrement avancé (ou retardé). Le couple est maintenu pratiquement constant jusqu'au décrochage total où il chute rapidement. La puissance peut donc être limitée à sa valeur nominale.

Parmi les avantages de ce système :

- Possibilité d'adaptation de la turbine aux conditions d'exploitation.
- Les actionneurs, électriques ou hydrauliques nécessaires, sont de taille réduite,
- Les mouvements de rotation des pales restant de faible amplitude, Comme inconvénients, on peut citer :
- L'énergie nécessaire aux actionneurs doit être transmise au moyeu de la turbine.
- Si les actionneurs sont électriques, cela nécessite des contacts glissants (bagues/charbons) sujets à l'usure et nécessitant un entretien.

II.5.3.3 Contrôle par angle de calage variable (Pitch control)

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. Avec un tel système, la pale est tournée par un dispositif de commande appelé "pitch control".

En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine, et plus précisément le coefficient de puissance. Les pales sont face au vent en basses vitesses, puis, pour les fortes vitesses de vent, s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance. Elles atteignent la position "en drapeau" à la vitesse maximale.

Le système de régulation de la puissance par orientation des pales possède les avantages

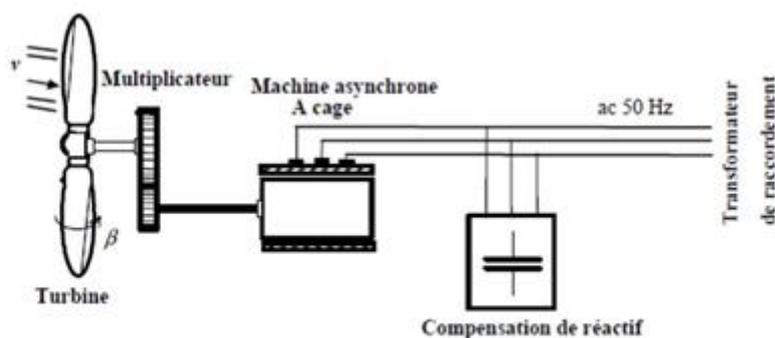
suivants :

- Il permet d'effectuer un contrôle actif de la puissance pour de larges variations du vent (bien sûr en dessous de la limite de sécurité).
- Il offre une production d'énergie plus importante que les éoliennes à décrochage STALL pour la plage de fonctionnement correspondant aux fortes vitesses de vent.
- Il facilite le freinage de l'éolienne, en réduisant la prise du vent des pales, ce qui limite l'utilisation de freins puissants.
- Ce type de régulation réduit les efforts mécaniques lors des fonctionnements sous puissance nominale et sous grandes vitesses.
- Ce système présente néanmoins des inconvénients :
- Les actionneurs nécessaires sont de puissance supérieure à celle du cas précédent.
- L'énergie nécessaire aux actionneurs doit être transmise au moyeu de la turbine. Si les actionneurs sont électriques, cela nécessite également des contacts glissants bagues/charbons sujets à l'usure et nécessitant un entretien.

II.6 MODES D'EXPLOITATION DE L'ENERGIE EOLIENNE :

II.6.1 Les systèmes à vitesse fixe

Les premiers modèles d'éoliennes commercialisées ont été équipées d'une machine asynchrone à cage couplée directement au réseau électrique; qui est entraînée par un multiplicateur à une vitesse qui sera maintenue approximativement constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales aérodynamiques et mécaniques. Le temps de réponse de certaines des parties de ces turbines éoliennes se situe dans la gamme de la dizaine de millisecondes [27]. On pourra en conséquence observer une sérieuse variation de la puissance électrique générée, en présence de rafales de vent. Les possibilités de réglages de la puissance générée par ce type d'éoliennes resteront toutefois quasiment impossibles.



Pour pallier au problème de vents violents, Certaines modèles sont équipées d'un système à décrochage aérodynamique des pales dit « Stall control ». L'augmentation de la vitesse du vent s'accompagne automatiquement d'une diminution de l'angle de calage afin de permettre le décrochage aérodynamique de la turbine aux vitesses du vent plus grandes que la vitesse nominale. La structure de ces éoliennes demeure ainsi plus simple, et présente des inconvénients tels que :

- La nécessité d'un dispositif consommateur d'énergie réactive à la magnétisation de la machine asynchrone,
- La présence de bruyance, à cause de la modification du système d'orientation des pales,
- Les variations fréquentes du couple mécanique à cause du mouvement des pales pour garder une vitesse constante, ce qui entraîne des variations rapides du courant dans le réseau,
- L'impossibilité de réglage de la puissance générée.

II.6.2 Les systèmes à vitesse variable

II.6.2.1 Système basé sur les machines asynchrones

Il existe plusieurs variantes d'éoliennes à vitesse variable, La configuration de la figure (Fig. II.18.a) est basée sur une machine asynchrone à cage pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques. La machine est couplée à la turbine via un multiplicateur, sa vitesse de rotation est maintenue constante grâce au système mécanique d'orientation des pales.

II.6.2.2 Système basé sur les machines synchrones

Il existe deux possibilités de coupler la machine synchrone à la turbine :

Couplage direct (Fig. II.18.b)

Certains constructeurs se sont spécialisés dans la réalisation d'éoliennes basées sur des machines synchrones à rotor bobiné couplées directement à la turbine, et ayant un grand nombre de paires de pôles, L'avantage de ce système étant d'éviter l'installation du multiplicateur, source de bruit. L'inconvénient d'utilisation des bagues et de balais serait exclu, si la génératrice était à aimants permanents. L'ennui de cette structure, est qu'elle nécessite pour une connexion au réseau des convertisseurs de puissance doivent être dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice.

Couplage via un multiplicateur (Fig. II.18.c).

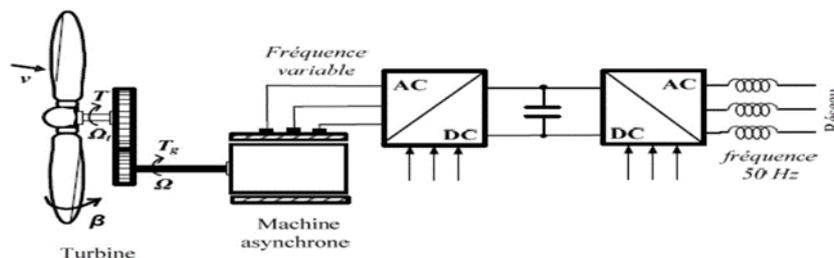
On trouve également chez certains constructeurs des machines synchrones « rapides » associées à un multiplicateur de vitesse, ces machines fonctionnent à vitesse variable. Elles débitent généralement sur un redresseur à diodes, puis la tension continue est convertie à travers un onduleur MLI pour être compatible avec le réseau auquel elles sont connectées comme le montre la Figure II.18.c.

II.6.2.3 Système basé sur les machines asynchrones doublement alimentées

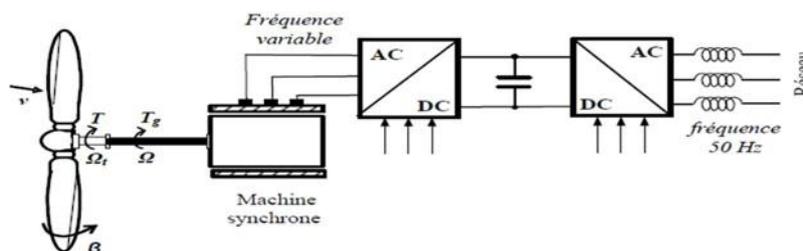
Une des configurations qui se développe dans le marché des turbines éoliennes est sans doute machine asynchrone doublement alimentée, utilisée en génératrice (GADA). Le stator est relié directement au réseau, tandis ce que le rotor est connecté via un convertisseur de tension en « back-to-back », utilisé comme variateur de fréquence. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur compense la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor (Figure II.18.d).

Les avantages de cette configuration sont :

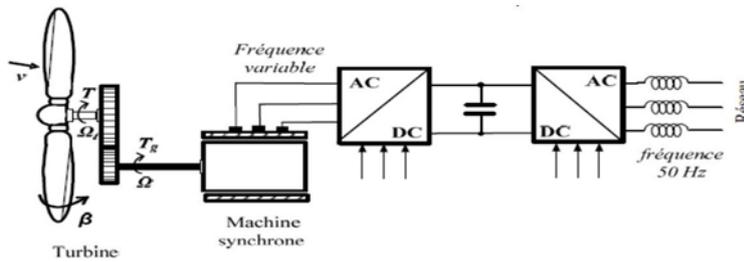
- Aptitude de réguler la puissance réactive, par conséquent un découplage de la commande des puissances active et réactive peut se réaliser.
- Magnétisation à partir du rotor sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire.
- La taille du convertisseur n'est pas simplement en rapport avec la puissance totale du générateur, mais aussi avec la gamme de vitesse choisie. En fait, le coût du convertisseur augmente avec la gamme de vitesse autour de la vitesse de synchronisme.
- Les convertisseurs statiques utilisés sont moins volumineux, moins coûteux,



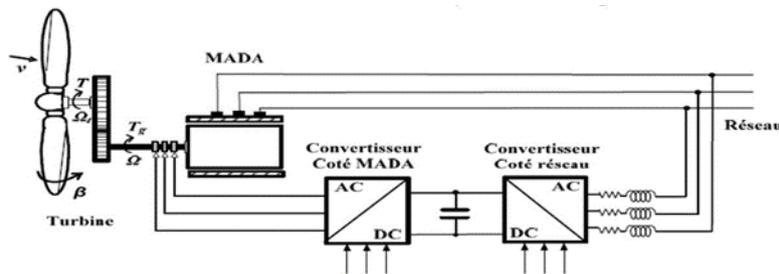
a) Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone.



b) Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone directement couplée à la turbine.



c) Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone couplée à la turbine via un multiplicateur.



d) Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

Figure.II.14 Différentes configurations d'éoliennes à vitesse de vent variable

II.7 MODELE AERODYNAMIQUE

II.7.1 Modèle du vent :

Le vent est l'énergie source de l'aérogénérateur, c'est la variable d'entrée du système éolien. L'énergie cinétique contenue dans le vent est récupérée en partie, transformée en énergie mécanique par le biais de la turbine. Le vecteur de vitesse évolue dans les plans horizontaux, alors le modèle du vent comportemental est simplifié considérablement. La vitesse du vent peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps [29].

$$V = f(T) \quad \text{II.6}$$

Cette fonction du vent, peut être décomposée en une composante moyenne et une somme de plusieurs harmoniques [27], [37] :

$$V_v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^k (a_i \sin(w_i t + \varphi_i)) \quad \text{ou} \quad \text{II.7}$$

a_i, w_i, φ_i : sont respectivement l'amplitude, la pulsation et phase initiale de chaque harmonique

II.7.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté dans la figure (II.19), sur lequel on a représenté respectivement les vitesses du vent v_1 en amont et v_2 en aval de l'aérogénérateur.

L'énergie cinétique d'une particule de masse m dans l'air qui se déplace avec une vitesse v est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

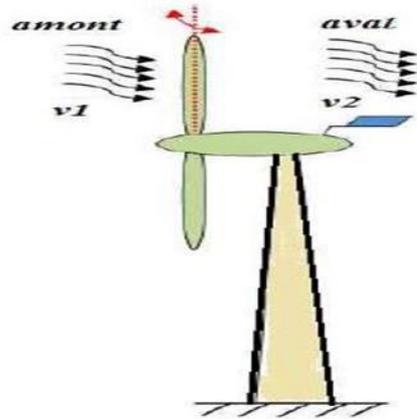


Figure.II.15 Schéma simplifié d'une éolienne

A partir de la définition mécanique d'une masse ; on sait que la densité d'un tel matériel est multipliée par son volume ce qui donne :

$$m = \rho \cdot V \text{ avec } \rho = 1,225\text{kg/m}^3 \text{ masse volumique de l'air} \quad \text{II.9}$$

On dérive par rapport au temps, on obtient :

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot \frac{dV}{dt} = \rho \cdot S \cdot \frac{dx}{dt} = \rho \cdot S \cdot v \quad \text{II.10}$$

Sachant que le volume est obtenu en multipliant la surface par la longueur x , et en considérant seulement une seule dimension car la quantité d'air varie le long d'un seul axe, on aura :

$$\dot{m} = \rho \cdot S \cdot v \quad \text{II.11}$$

Si on suppose que la vitesse du vent est constante, la puissance du mouvement d'air sera donnée par :

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{d\left(\frac{1}{2}m \cdot v^2\right)}{dt} = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot v^2 \quad \text{II.12}$$

On remplace \dot{m} par sa valeur dans l'équation (II.11), la puissance du vent sera :

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^3 \quad \text{I.13}$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur :

$$P_{\text{aéro}} = P_{\text{vent 1}} - P_{\text{vent 2}} = \frac{1}{2} (\rho_1 \cdot S_1 \cdot v_1^3 - \rho_2 \cdot S_2 \cdot v_2^3) \quad \text{II.14}$$

Selon la loi de conservation de la masse, la quantité de masse d'air avant et après contact avec la turbine reste constante :

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \rightarrow \rho_1 \cdot S_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot S_2 \cdot v_2 \quad \text{II.15}$$

La masse volumique de l'air étant constante, $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ on trouve donc :

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \quad \text{II.16}$$

L'équation de la puissance absorbée par l'aérogénérateur sera donnée par :

$$P_t \cong P_{\text{aero}} = \frac{1}{2} \rho (S_1 \cdot v_1^3 - S_2 \cdot v_2^3) = \frac{1}{2} \rho \cdot S_1 \cdot v_1 (v_1^2 - v_2^2) \quad \text{II.17}$$

Et selon la deuxième loi de Newton :

$$F = \frac{d}{dt} (m \cdot v) = \frac{dm}{dt} \cdot v + m \cdot \frac{dv}{dt} \quad \text{I.18}$$

Lorsqu'on considère la vitesse constante, on obtient la relation suivante de la force exercée :

$$F = \dot{m} \cdot v \quad \text{II.19}$$

On remplace (m) de l'équation (II.11) on trouve :

$$F = \rho \cdot S \cdot v^2 \quad \text{II.20}$$

La variation de la force entre les deux côtés de l'aérogénérateur est exprimée par la relation suivante :

$$P_{\text{aero}} = \Delta F \cdot v = (\dot{m}_1 v_1 - \dot{m}_2 v_2) \cdot v \quad \text{II.21}$$

On remplace m par sa valeur, on obtient la relation de la puissance absorbée par l'aérogénérateur :

$$P_{\text{aero}} = \rho \cdot S_1 \cdot v_1 (v_1 - v_2) \cdot v \quad \text{II.22}$$

On remarque que la relation de la puissance est définie par la vitesse du vent avant et après la turbine et une vitesse du vent v au bord de l'hélice. Pour déterminer la valeur de cette dernière, on compare entre les deux relations de la puissance absorbée par l'aérogénérateur c'est-à-dire (II.22) et (II.17), on trouve :

$$v = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) \quad \text{II.23}$$

On considère le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (II.20) sur lequel on a représenté la vitesse du vent v_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse v_2 en aval ; v est la vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur, S_1 et S_2 sont les sections en amont et en aval du tube d'air et S la surface balayée par l'hélice. L'égalité qui traduit l'incompressibilité de l'air et la permanence de l'écoulement s'écrit :

$$P_t \cong P_{\text{aero}} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad \text{II.24}$$

En remplaçant l'expression de v (II.23) dans la relation (II.24) ; on obtient :

$$P_t \cong P_{\text{aero}} = \frac{1}{4} \rho \cdot S \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad \text{II.25}$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit la vitesse v_1 , la puissance P vent correspondante serait alors :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v_1^3 \quad \text{II.26}$$

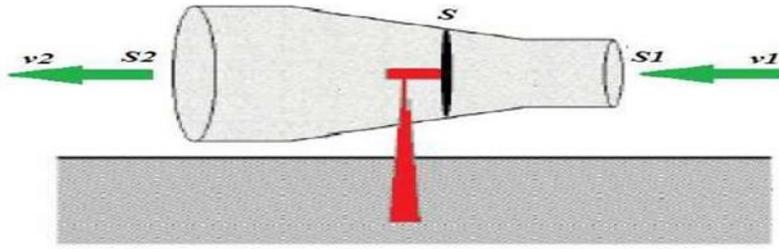


Figure.II.16 Tube de courant autour d'une éolienne.

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est défini comme étant le coefficient de puissance, il a pour valeur :

$$C_p = \frac{P_r}{P_{vent}} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \cdot \left[1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \right] \quad \text{II.27}$$

λ est définie comme étant la vitesse spécifique relative tel que :

$$\lambda = \frac{v_2}{v_1} = \frac{r\Omega_t}{v_1} \quad \text{II.28}$$

Avec : r : rayon de la turbine, et Ω_t : vitesse angulaire de rotation de la turbine, Alors :

$$P_t = C_p \cdot P_{vent} \cong P_{aero} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^3 \quad \text{II.29}$$

C'est exactement la puissance absorbée par l'aérogénérateur. Le couple mécanique est donné par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} C_p = \frac{1}{2} \frac{C_p \cdot \rho S \cdot v^3}{\Omega_t} \quad \text{II.30}$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et dépend également de la caractéristique de la turbine. Ce coefficient présente une limite théorique, appelée limite de Betz, qui n'est jamais atteinte en pratique ; en effet la vitesse des masses d'air derrière l'aéromoteur n'est pas nulle, une turbine éolienne extrait une puissance P inférieure à la puissance disponible P_e . L'aptitude de conversion de l'énergie éolienne est donnée par le coefficient de puissance C_p , défini par la relation (II.27). A partir de l'équation (I.24), et en définissant la puissance disponible maximale P_{e-max} ; on montre que :

$$P_{e-max} \leftrightarrow \frac{dP_e}{dv_2} = 0 \rightarrow v_1 = 3 \cdot v_2 \rightarrow P_{emax} = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v_1^3 \quad \text{II.31}$$

Cette relation constitue la formule de Betz. La valeur maximale du coefficient de puissance est:

$$C_{p-max} = \frac{P_{e-max}}{P_e} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad \text{II.32}$$

59% au maximum de la puissance reçue sera disponible ; Le maximum de prélèvement d'énergie, dépendra des caractéristiques aérodynamiques et des réglages de la chaîne de conversion, ne dépassera jamais cette limite.

Chaque éolienne est définie expérimentalement par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse spécifique relative λ qui représente les performances aérodynamiques

de cette éolienne.

Le rendement aérodynamique η_a traduit la qualité aérodynamique de l'éolienne dans les meilleures conditions de réglage, on l'exprime par :

$$N = C_{p\left(\frac{\lambda}{3}\right)} / C_{p-max} \quad \text{II.33}$$

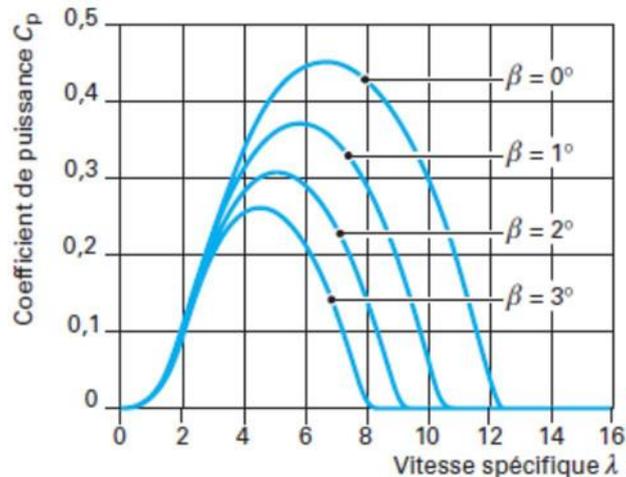


Figure.II.17 Paramétrage une éolienne tripale pour différentes valeurs β [30]

II.8 STRATEGIES DE MPPT POUR UNE EOLIENNE

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et en forme de cloche. La puissance capturée par une turbine éolienne peut être maximisée en ajustant le coefficient C_p , qui dépend fortement de la vitesse de la génératrice.

Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait de cette courbe. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance générée en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice.

Pour s'approcher de ce but, une commande spécifique connue sous la terminologie : Maximum Power Point Tracking (MPPT) peut être utilisée. La stratégie de cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée.

Pour cela, on peut distinguer deux approches possibles :

- La première, la moins classique, considère que la caractéristique C_p n'est pas connue ;
- La seconde façon d'agir, plus répandue, suppose que cette caractéristique de voilure est connue. Il suffit de suivre la courbe de puissance optimale comme caractéristique de charge pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

II.8.1 Maximisation de la puissance sans connaissance de la caractéristique C_p

En l'absence de toute connaissance des caractéristiques de voilure, des algorithmes de comportement sont à tenir afin de converger vers le point optimal. Ces algorithmes dépendent des variations de puissance et de vitesse.

L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Le système doit trouver pour chaque vitesse de vent, la puissance maximale de ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale. Le schéma de la Figure II.22 illustre les courbes caractéristiques de la puissance éolienne en fonction de différentes vitesses de rotation de la turbine.

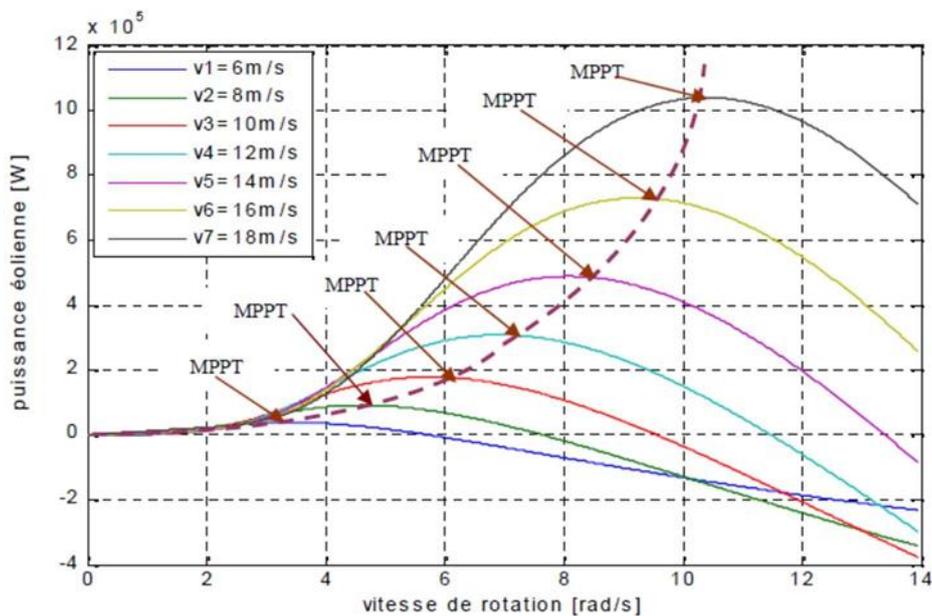


Figure.II.18 Caractéristiques d'une éolienne en fonction de la vitesse de vent

L'ensemble des sommets de ces caractéristiques qui sont les points optimaux recherchés, conduit à une courbe (en pointillé) dite de puissance optimale définie par l'équation :

$$C_p\left(\frac{\omega}{v}\right) / C_{p-max} \quad \text{II.34}$$

II.8.2 Maximisation de la puissance avec la connaissance de la courbe C_p

Une autre façon de procéder consiste en une recherche du point maximal de puissance en connaissant la courbe caractéristique C_p . Ces méthodes permettent de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simples de vitesse de rotation, sans (ou avec) l'obligation d'utilisation des capteurs de vitesse du vent [30], [31]. Ces techniques diffèrent selon le type d'informations dont elles ont besoin pour délivrer la référence de vitesse. On peut classer ces techniques en deux familles, selon que la vitesse du vent est nécessaire ou non à la genèse de

référence :

- Contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.
- Contrôle par asservissement de la vitesse mécanique.

II.8.2.1 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

Ce mode de contrôle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électriques du système éolien, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser pour deux raisons :

L'anémomètre étant situé derrière la turbine, les perturbations à ce niveau de la nacelle causent des erreurs de lecture de la vitesse du vent.

Etant donné le grand diamètre de la surface balayée par les pales (70 m pour les éoliennes de 1.5 MW), l'utilisation d'un seul anémomètre conduit à n'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales.

Une fausse mesure de la vitesse conduit donc à imposer une consigne non adaptée d'où une dégradation de la puissance captée.

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation décrivant le régime permanent de l'aérogénérateur on obtient :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \Sigma C = 0 = C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad \text{II.35}$$

Ceci revient à considérer le couple mécanique C_{mec} développé comme étant nul.

Donc, en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux $C_r = 0$, on obtient :

$$C_{em} = C_g \quad \text{II.36}$$

Le couple électromagnétique de référence est donc estimé à partir du couple éolien :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer}}{G} \quad \text{II.37}$$

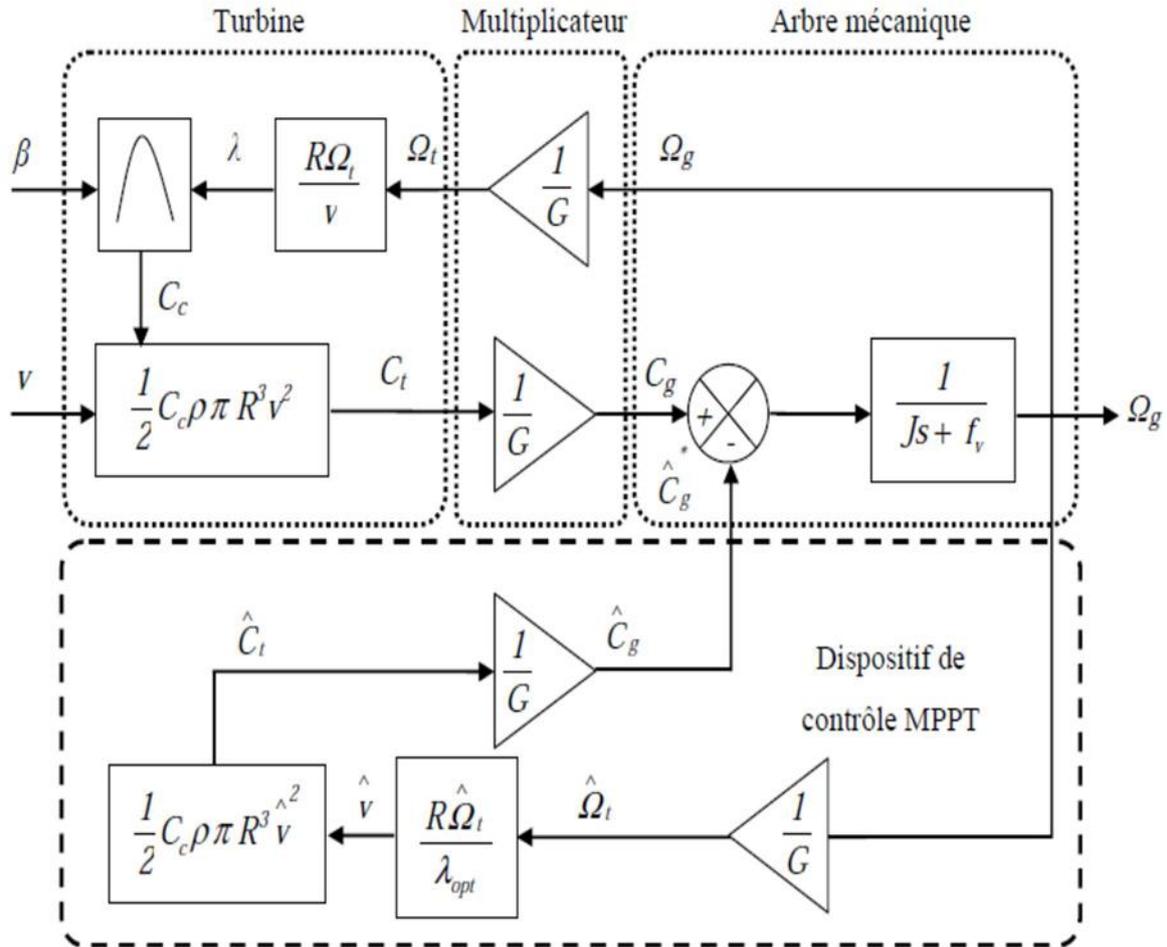


Figure.II.19 Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse

Le couple éolien peut être estimé à partir de la vitesse du vent et de la vitesse de la turbine :

$$C_{aer-estimé} = \frac{C_p \rho S \cdot v_{estim}^3}{2 \Omega_t} \quad \text{II.38}$$

L'estimation de la vitesse de la turbine Ω_{t-est} est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{t-est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad \text{II.39}$$

La mesure de la vitesse du vent étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation :

$$v_{estimi} = \frac{R \cdot \Omega_{t-est}}{\lambda} \quad \text{II.40}$$

On obtient donc une relation globale de contrôle :

$$C_{6m-ref} = \frac{C_p \cdot \rho \pi \cdot R^5 \Omega_{mec}^2}{2 \cdot \lambda^3 \cdot G^3} \quad \text{II.41}$$

Pour extraire le maximum de puissance générée, il faut fixer le rapport d'avance à λ_{opt} qui correspond au maximum du coefficient de puissance C_{p-max} . Le couple électromagnétique de

référence doit alors être réglé à la valeur suivante :

$$C_{em-r} = \frac{C_{p-max,\rho,\pi \cdot R^5,\Omega_{mec}}}{2,\lambda_{opt}^3 \cdot G^3} \quad \text{II.42}$$

A partir de la valeur référence du couple électromagnétique, il est aisé de déterminer la valeur de la puissance électromagnétique de réglage :

$$P_{em-re} = C_{em-r} \cdot \Omega_{mec} = \frac{C_{p-max} \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_{mec}^3}{2 \cdot \lambda_{opt}^3 \cdot G^3} \quad \text{II.43}$$

Il est à noter que l'expression de la puissance électromagnétique de référence est proportionnelle au cube de la vitesse de génératrice. La représentation sous forme de schéma blocs du dispositif de commande est illustrée dans la figure (II.23) [30].

II.8.2.2 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse

Cette stratégie de contrôle consiste à régler le couple électromagnétique de la génératrice de manière à fixer la vitesse de rotation mécanique à une vitesse de référence permettant d'extraire le maximum de puissance de la turbine. Pour un point de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe), la puissance mécanique est maximale si la valeur maximale du coefficient C_p est atteinte. Celle-ci est obtenue si la vitesse relative λ est égale à sa valeur optimale λ_{opt} . Par conséquent, la vitesse de rotation de référence de la MADA Ω_{g-ref} est obtenue à partir de l'équation (2.18) comme suit :

$$\Omega_{g-re} = G \cdot \Omega_{t-ref} = G \cdot \frac{v \cdot \lambda_{opt}}{R} \quad \text{II.44}$$

Le couple électromagnétique de référence C_{em-re} permettant d'avoir une vitesse de rotation de référence Ω_{g-ref} obtenue en sortie d'un régulateur de vitesse de type proportionnel-intégral (PI) ; qui va permettre d'asservir la vitesse de rotation et d'atténuer l'effet du couple de la MADA C_{mec} considéré comme une perturbation. Le schéma de principe du contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique de rotation est montré à la figure II.24.

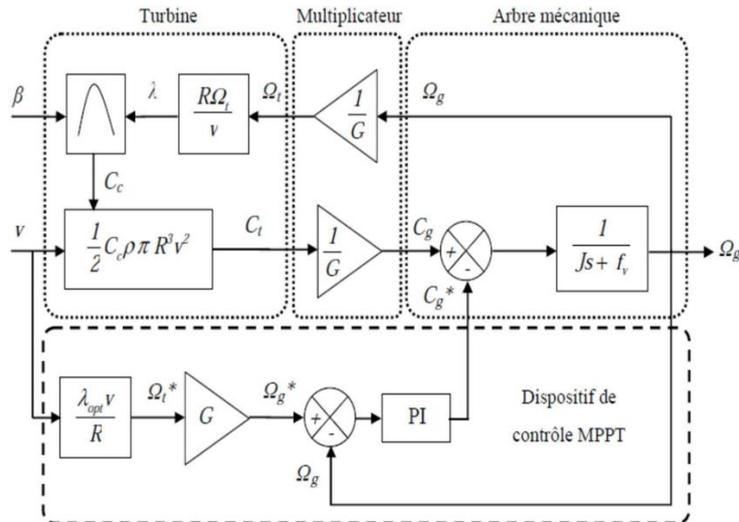


Figure.II.20 Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse

II.9 MODELISATION DU SYSTEME EOLIEN

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe à cause de la multiplicité des domaines existants, à savoir, le domaine aérodynamique, mécanique, et électrique. Les facteurs déterminant la puissance mécanique, sont la vitesse du vent, la dimension, et la forme de la turbine. Ce système peut être représenté sur la figure (II.25), il comporte :

- Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :
- La même inertie J pales
- La même élasticité K b
- Le même coefficient de frottement par rapport à l'air d b

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement f pale par rapport au support. Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées β_{b1} , β_{b2} , β_{b3} . Chaque pale reçoit une force T_{b1} , T_{b2} , T_{b3} qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée.

- L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par : son l'inertie (J h), son élasticité (K h) et son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur (D h). Le rotor de la génératrice possède aussi son inertie (J g), et son coefficient de frottement par rapport à l'air (d g) ; ce rotor transmet un couple (C g) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée Ω_{mec} .

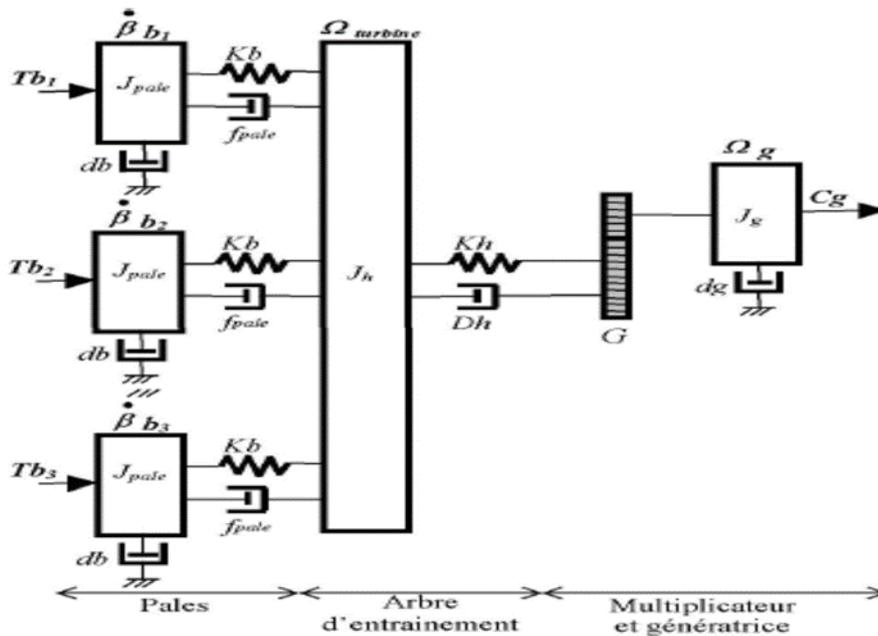


Figure.II.21 Représentation du système mécanique de l'éolienne.

II.9.1 Modèle de la turbine :

On peut simplifier le schéma de la figure II.25, si l'on considère les forces de poussée ($Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$), puisque qu'on a une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales. L'ensemble des trois pales peut être simplifié comme un seul système.

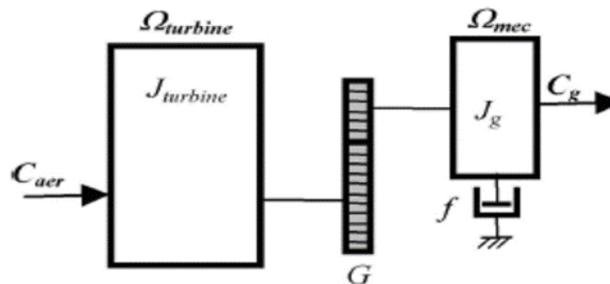


Figure.II.22 Modèle mécanique simplifié de la turbine

Le coefficient de frottement des pales, (db) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique simplifiée (figure II.26)

II.9.2 Modèle du multiplicateur :

L'aérogénérateur tourne généralement à une vitesse nominale. Le multiplicateur a pour rôle d'ajuster cette vitesse à celle du générateur électrique à travers un coefficient appelé le gain G [26].

$$G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_t} \quad \text{II.45}$$

Ω_{mec} représente vitesse angulaire de rotation du générateur, toutefois le gain peut s'exprimer en fonction de :

Où C_{mec} est le Couple mécanique sur l'axe du générateur en (N. m)

II.9.3 Equation dynamique de l'arbre de transmission :

$$G = \frac{C_{mec}}{C_t} \quad \text{II.46}$$

D'après la figure (II.26), nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique du générateur (modèle de l'arbre) par [54] :

$$\begin{cases} J \frac{d\omega_{mec}}{dt} + f \Omega_{mec} = C_T \\ \text{Transformée de Laplace} \rightarrow \Omega_{mec}(s) = J \frac{1}{Js+f} + C_T(s) \end{cases} \quad \text{I.47}$$

Où :

- C_T étant le couple total de l'éolienne (N. m), donné par :

$$C_T = C_{mec} - C_{em} \quad \text{II.48}$$

- J : Inertie totale des parties tournantes ($kg.m^2$) : qui est la somme de l'inertie du générateur et de la turbine ramenée au côté générateur :

$$J = \frac{J_r}{G^2} + J_g \quad \text{II.49}$$

Le schéma bloc de la figure (II.27) correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne [29]. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation mécanique Ω_{mec} qui entraîne le générateur, peut être contrôlée de deux manières différentes : soit par la variation de l'angle de calage des pales, soit par contrôle du couple électromagnétique C_{em} .

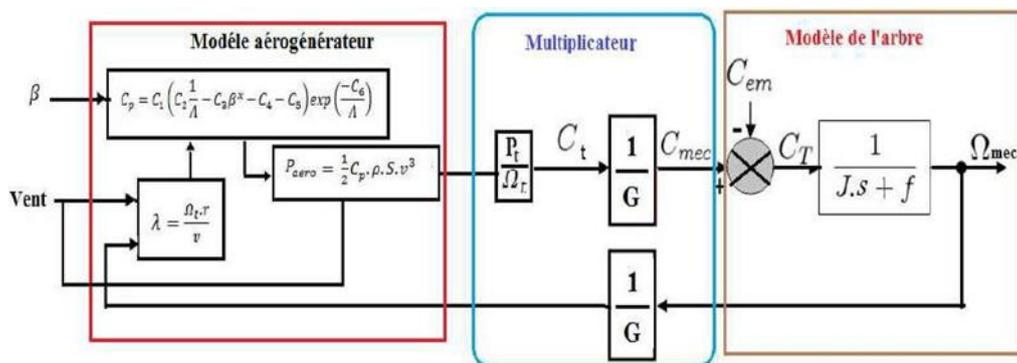


Figure.II.23 Modèle aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne.

II.10 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE

L'énergie éolienne est classée parmi les filières qui ont un bilan très positif, c'est une des

techniques de production d'énergie les plus prometteuses aujourd'hui, et bien au-delà [54].

II.10.1 Avantages :

- ✓ C'est une énergie propre qui n'engendre aucune pollution, qui ne produit directement ni dioxyde de carbone, ni dioxyde de soufre, ni fines particules, ni déchets radioactifs, comme d'autres sources de production d'électricité.
- ✓ Elle est de plus disponible presque partout, de manière décentralisée.
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable dont le gisement est inépuisable à l'échelle des temps. En effet le vent est inépuisable et abondant ; il constitue donc une véritable ressource renouvelable.
- ✓ Elle est désormais la moins chère de toutes les énergies renouvelables existantes. Les avancées technologiques de pointe en matière d'aérodynamique, de résistance des matériaux et de météorologie ont contribué à une diminution des coûts de cette énergie.
- ✓ L'énergie éolienne est fiable, puisque le facteur de disponibilité de ce moyen de production est bien supérieur à d'autres moyens de production d'électricité. Les opérations liées à la vérification et la maintenance se font quelquefois.
- ✓ Lorsque le temps de fonctionnement d'une ferme éolienne est écoulé (environ 20 ans), les fondations sont entièrement démantelées, elles peuvent être réutilisées.
- ✓ L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple ; le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.
- ✓ La ressource de production éolienne peut jouer de complément à d'autres types d'énergies, notamment durant des pics de consommation.
- ✓ L'énergie éolienne est créatrice d'emploi, l'industrie éolienne offre de plus en plus d'emplois de diverses spécialités. C'est une source de richesse pour les pays qui ont le savoir technologique de cette filière.

II.10.2 Inconvénients :

L'énergie éolienne dévoile également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement [29] :

- L'énergie éolienne est une énergie intermittente. Elle n'est prévisible que dans la limite des prévisions météorologiques et ne peut être stockée sous sa forme primaire ; aussi la vitesse du vent peut être affaiblie par de nombreux facteurs, qui peuvent influencer la rentabilité du système de production.
- Impact visuel : Les premiers parcs éoliens installés sur terre étaient très denses et

dénatureraient le paysage, cependant, les nouveaux parcs voient leurs éoliennes plus espacées, celles-ci étant de plus grande taille et puissance, ils ont donc perdu leur aspect fourmillant commence à se perdre. L'apparition des fermes offshore tend aussi à exclure ce problème.

- L'influence des éoliennes est connue au niveau des impacts sur la biodiversité et particulièrement sur les oiseaux. Cela peut être maîtrisé par une réflexion appropriée au niveau de l'implantation.
- Les éoliennes constituent un obstacle à la propagation des ondes. Les radars météorologiques ou militaires les perçoivent comme des interférences. Selon la proximité et la densité du parc d'éoliennes, ceci peut constituer un blocage majeur à basse altitude donnant une zone d'ombre dans les données. De plus, comme les pales sont en rotation, un radar note leur vitesse de déplacement, et peut les voir comme cible [31].
- Une éolienne a une durée de vie limitée entre 20 et 30 ans, le rendement moyen de production se limite entre 20 et 60%.
- Le bruit que génèrent les éoliennes peut être d'origine mécanique (rotation du rotor et fonctionnement de la génératrice) ou d'origine aérodynamique (lorsque les pales disjoignent l'air). Même si les éoliennes actuelles sont relativement silencieuses, une étude de l'impact sonore sur les habitations doit être effectuée avant l'implantation des parcs éoliens. En fonction du résultat, cette implantation peut être modifiée afin de respecter la réglementation (émergence maximale de 5 dB le jour et 3 dB la nuit). La distance entre les éoliennes et les habitations est généralement de 300 m à environ 500 m, elles sont inaudibles ou très peu audibles et leur bruit est généralement couvert par le bruit du vent.

II.11 PRESENTATION DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS MSAP

II.11.1 Généralités

Les machines synchrones en général, sont alimentées au stator par des enroulements triphasés et au rotor par une tension continue. Alimentée à fréquence constante, sa vitesse est synchrone avec le champ tournant et ne dépend que de la fréquence de l'alimentation et du nombre de pôles de la machine.

Au rotor, la bobine d'excitation peut être remplacée par des aimants permanents, la machine est dite alors machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ce type de machines possède un

bon rendement puisque les pertes Joule sont localisées au stator. En outre, la compacité du rotor conduit à un bon rapport couple/inertie, autorisant des accélérations élevées.

Inversement, lorsque l'arbre du rotor est entraîné à une certaine vitesse, le moteur fonctionne en mode générateur et génère des tensions triphasées au stator à une fréquence proportionnelle à la vitesse d'entraînement [32].

Suivant sa structure, la machine synchrone à aimant permanent peut être divisée en plusieurs groupes :

- Les machines synchrones à rotor bobiné
- Les machines synchrones à réluctance
- Les machines synchrones à aimants permanents.

Notre intérêt va plus particulièrement vers cette dernière catégorie. En effet avec l'apparition d'aimants permanents de plus en plus performants (faible désaimantation, plus grande énergie stockée), la machine synchrone à aimant permanent est devenue compétitive par rapport à la machine asynchrone, même dans le domaine de la moyenne puissance.

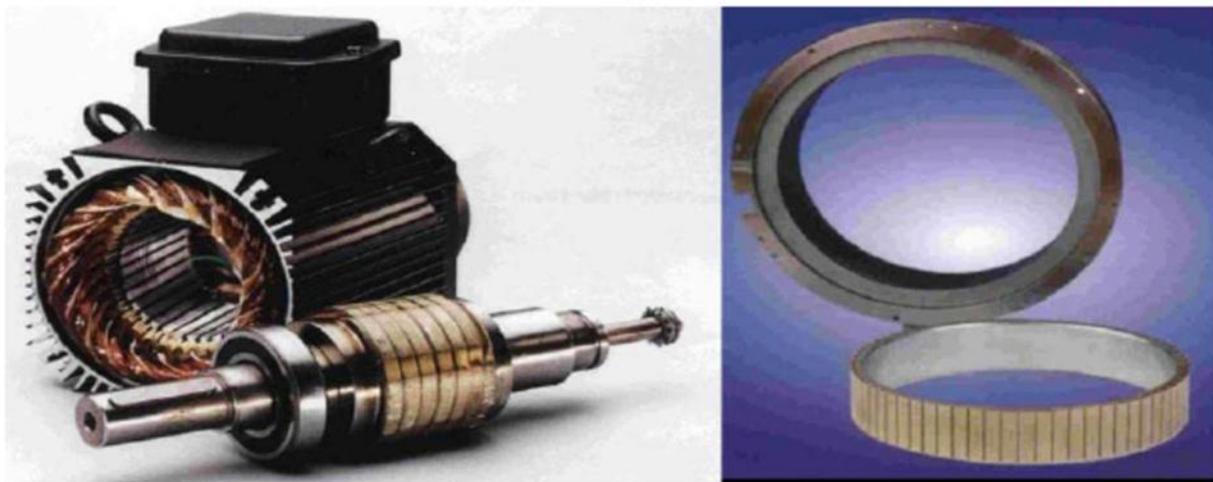


Figure.II.24 Structure générale d'une machine synchrone à aimants

Le stator de la machine synchrone à aimant permanent est identique à celui d'une machine asynchrone. Il est constitué d'un empilage de tôles magnétiques qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de 120° . Le rotor de la MSAP est généralement de deux types :

- Rotor possédant des pièces polaires, servant à la concentration du flux d'induction dans lequel les aimants sont orientés soit parallèlement soit perpendiculairement à l'entrefer, soit de manière plus complexe. Dans ce type de machine, l'inducteur est à pôles saillants.
- Rotor sans pièces polaires, donc à entrefer constant, dans lequel l'aimantation des

aimants est généralement perpendiculaire à l'entrefer.

II.11.2 Principe de fonctionnement des MSAP

La machine synchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor qui tourne autour de l'axe de symétrie de la machine. Les trois enroulements identiques, à p paires de pôles sont logés sur des encoches régulièrement réparties sur la surface interne du stator ; leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égale à : $\frac{2}{3p}$

La structure du rotor est réalisée par un enroulement monophasé excité en courant continu, ou par un aimant permanent. La roue est conçue soit à pôles lisses ou à pôles saillants. Il sera admis que pour cette dernière structure, la machine pourrait être munie d'enroulements amortisseurs qui ont pour rôle de permettre à la machine de s'opposer à des régimes de déséquilibres ; et d'augmenter le couple électromagnétique.

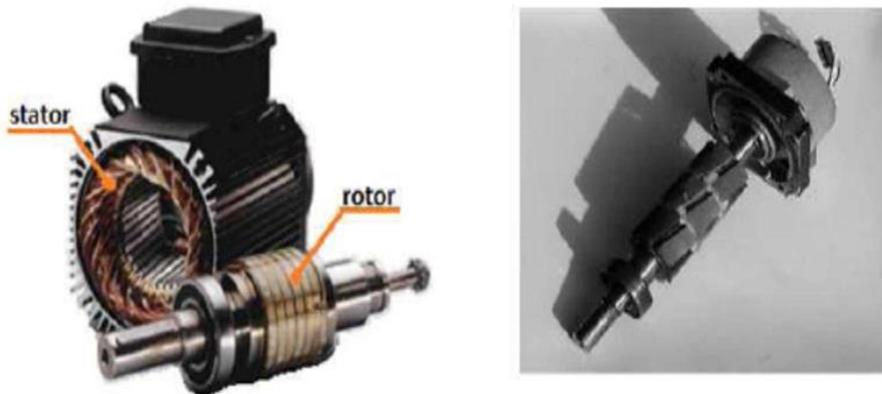


Figure.II.2. Constituants d'une machine synchrone à aimants

Le nombre de pôles d'un MSAP est imposé par la vitesse du rotor et par la fréquence du courant à produire, cette dernière est donnée par $f = \frac{p\Omega_t}{120}$; Avec :

Ω_t : Vitesse mécanique (rad/s).

La GSAP, est une machine synchrone fonctionnant en mode générateur, l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique alternative, et dans laquelle les champs magnétiques statorique et rotorique sont en rotation synchrone, c'est-à-dire à la même vitesse, raison pour laquelle un couple d'origine électromagnétique prend naissance.

L'excitation de la GSAP est faite par des aimants permanents liés au rotor (inducteur). Il y a des structures de génératrices à aimants permanents à rotor interne et stator externe d'une part, et des structures d'alternateurs à stator interne et rotor externe, d'autre part, figure II.3.

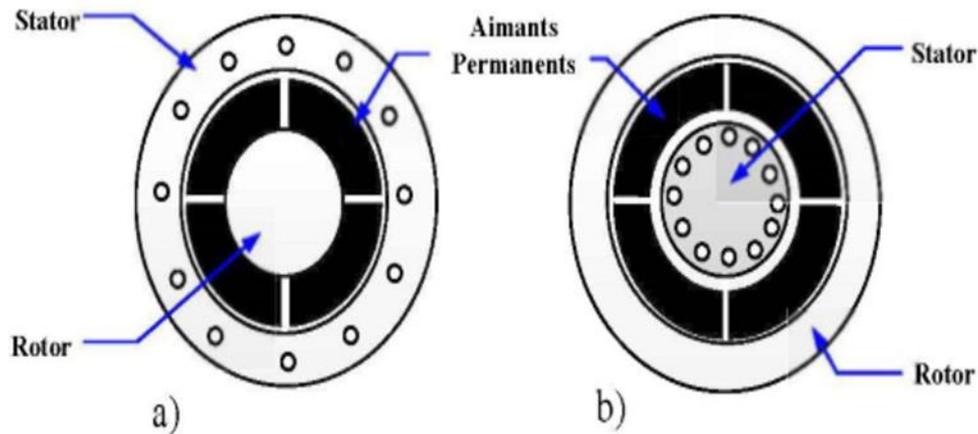


Figure.II.25 Structure à rotor interne a) Structure à rotor externe b)

II.11.3 Fonctionnement en mode générateur GSAP

Ce type de machines est parmi les plus utilisés dans les systèmes de production d'électricité, (centrales électriques, énergie éolienne...). L'inducteur de la génératrice synchrone, mécaniquement entraîné, crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statoriques, les f.é.m. induites dans ces bobinages provoquent la circulation de courants induits qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer, qui tourne à la même vitesse que celle de champ inducteur. Dans les alternateurs à aimants permanents, le champ magnétique créé par les aimants est constant.

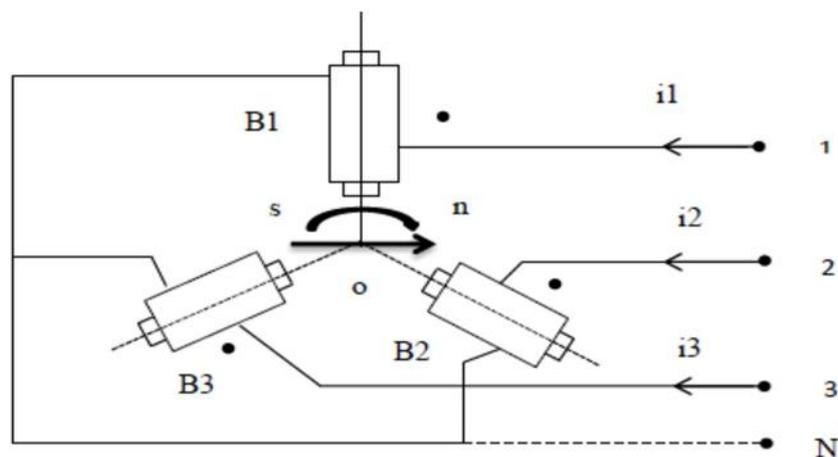


Figure.II.26 Principe de fonctionnement d'une GSAP

La caractéristique d'auto-excitation du GSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui la rend favorable pour des applications tels que la production d'énergie éolienne. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font un choix moins compétitif [35].

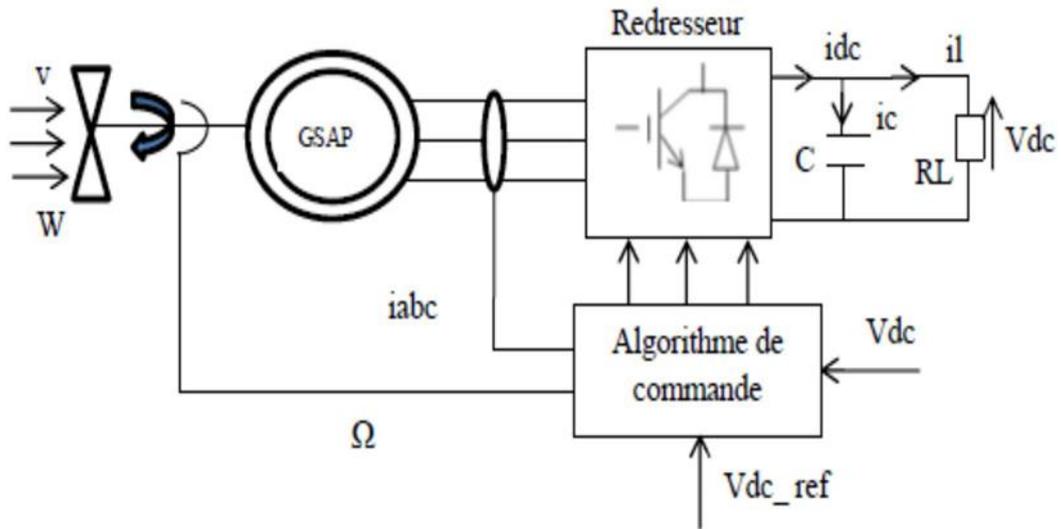


Figure.II.27 Structure du générateur éolien à base d'une GSAP

Au regard des qualités générales des différents types de machines, le générateur synchrone à aimants permanents est réputé par ses caractéristiques principales qui lui permettent d'être un générateur à fort couple massique et possédant un bon rendement facilement adaptable aux applications spécifiques. Ses principaux inconvénients sont le cout lie à celui des aimants et sa faible aptitude aux fonctionnements en survitesse.

II.12 MODELISATION DE LA MSAP

Dans la machine synchrone à aimants permanents (MSAP), l'inducteur est remplacé par des aimants permanents. Le champ d'excitation créé par les aimants permanents, présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques.

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte trois enroulements statoriques triphasés (a, b, c) décalées entre eux par un angle de $(2\pi/3)$. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ils sont modélisés par un enroulement alimenté par une source du courant continu 'if' qui produit un champ magnétique constant, (figure II.5).

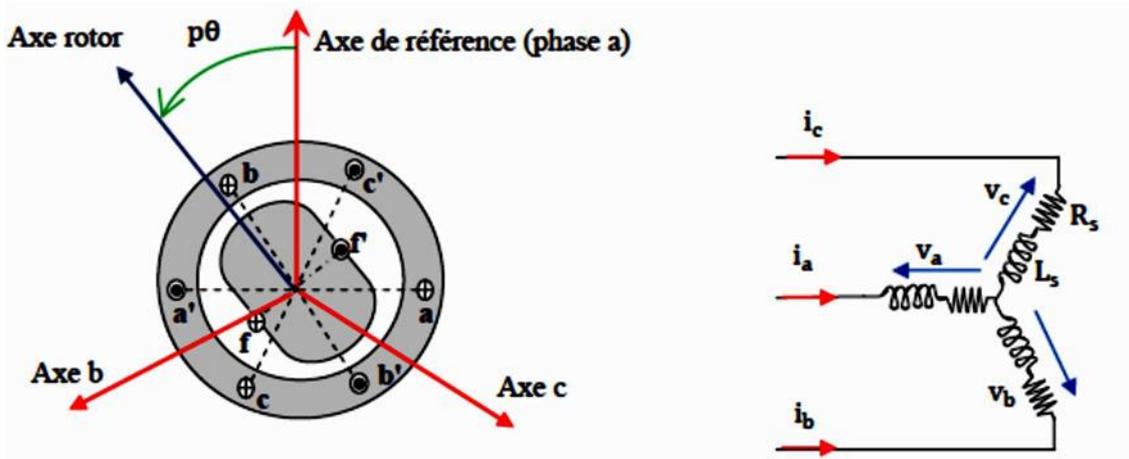


Figure.II.28 Représentation d'une machine synchrone à aimants permanents.

II.12.2 Hypothèses simplificatrices

Le modèle mathématique de la machine synchrone obéit à certaines hypothèses simplificatrices essentielles [62] :

- La saturation est négligée, il en résulte que les inductances propres et mutuelles sont indépendantes des courants qui circulent dans les différents enroulements ;
- Les forces magnétomotrices (fmm) sont à répartition sinusoïdale dans l'entrefer de la machine, ce qui induit une symétrie par rapport à l'axe magnétique des enroulements ;
- L'effet d'encochage est négligé ;
- On ne tient pas compte de l'hystérésis, des courants de Foucault et de l'effet de peau dans les parties magnétiques.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.

II.12.3 Modèle de la MSAP dans le repère triphasé abc

II.12.3.1 Equations électriques

Les équations électriques qui régissent le fonctionnement d'une machine synchrone dans un repère fixe lié au stator (a, b, c) s'énoncent sous la forme suivante:

$$[Vs] = [Rs][Is] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad \text{II.51}$$

Avec :

Vecteur des tensions statoriques	$[Vs] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}$
----------------------------------	---

Vecteur des courants statoriques	$[Is] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}$
----------------------------------	---

Vecteur des flux totaux statoriques	$[\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}$
-------------------------------------	--

Matrice des résistances statoriques	$[Rs] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$
-------------------------------------	--

En vertu de l'hypothèse d'une répartition spatiale sinusoïdale des fmm, Le vecteur des flux totalisés des phases statoriques s'écrit dans le repère lié au stator (a, b, c) par la relation :

$$[\Phi_s] = [L][i] + [\Phi_{sr}] \quad \text{Où :} \quad \text{II.52}$$

• $[\Phi_{sr}] = [\Phi_{sra} \ \Phi_{srb} \ \Phi_{src}]^T$	Où :	II.53
--	------	-------

- $[L]$: étant la matrice inductance statorique (propre et mutuelle)
- Φ_{sr} : Flux de l'aimant permanent

$$[\Phi_{sr}] = \Phi_m \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{Où :} \quad \text{II.54}$$

- $\theta_r = p\theta_m$: Position angulaire électrique ;
- p : Nombre de paires de pôles ;
- θ_m : Position angulaire mécanique ;
- Φ_m : Flux maximum produit par l'aimant dans les enroulements statoriques.

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad \text{II.55}$$

On remplace dans l'équation II.1, on obtient alors :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + [L] \frac{d}{dt} [I_s] + [\Phi_{sr}] \quad \text{II.56}$$

II.12.3.2 Equations mécaniques

A travers la dynamique du rotor, on définit l'équation électromécanique comme étant :

Où :

$$C_{em} - c_r - c_f = J \frac{d}{dt} \Omega \Rightarrow C_{em} - c_r - f\Omega = J \frac{d}{dt} \Omega \quad \text{II.57}$$

- C_{em} : Couple électromagnétique [N.m];
- C_T : Couple résistant [N.m] ;
- J : Moment d'Inertie de la partie tournante de la machine ;
- f : Coefficient de frottement visqueux ;
- Ω : Vitesse angulaire mécanique du rotor.

II.12.4 Modèle de la MSAP dans le repère de Park (d, q)

La mise en équation des moteurs synchrones triphasés aboutit à des équations différentielles à coefficients variables. La résolution analytique dans ce repère reste très difficile. Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère ; on utilise des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement du moteur à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. On obtient un système équivalent formé de trois enroulements orthogonaux, deux de ces enroulements sont situés dans le même plan que les enroulements a, b, et c. Le troisième enroulement est situé dans le plan orthogonal au plan formé par les axes de phases a, b, et c et représente la composante homopolaire, en se

basant sur les hypothèses simplificatrices, et en appliquant la transformation de Park au rotor. Cette transformation mathématique, transforme ainsi les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor (Figure II.29).

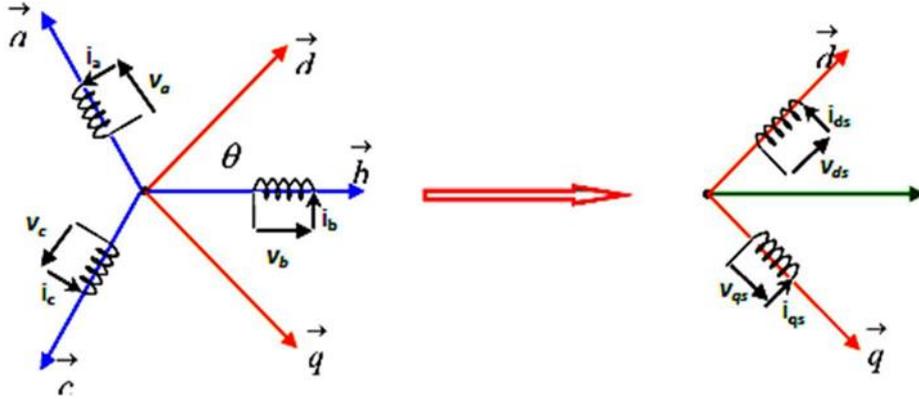


Figure.II.29 Représentation de la MSAP dans le repère d-q [64].

Pour passer d'un système triphasé (abc) à un système biphasé (dq) (ou vice versa), on utilise les relations par la transformation de Park qui est définie comme suit :

$$\begin{cases} [X_{dqo}] = [P(\theta)][X_{abc}] \\ [X_{abc}] = [P(\theta)]^{-1}[X_{dqo}] \end{cases} \quad \text{II.58}$$

$[P(\theta)]$ est définie comme étant la matrice de transformation de Park, sa valeur vaut :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

La matrice inverse de Park, vaut :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Dans le cas particulier où : $(\theta = 0)$ ceci nous mène à la matrice appelé de Concordia qui va permettre le passage entre les deux référentiels abc et $\alpha\beta$ qui est un repère biphasé orthogonal fixe :

$$\begin{cases} [X_{\alpha\beta o}] = [T][X_{abc}] \\ [X_{abc}] = [T]^{-1}[X_{\alpha\beta o}] \end{cases} \quad \text{II.59}$$

$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{2}{3}} & -\sqrt{\frac{2}{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \text{ et } [T]^{-1} = [P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{2}{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{2}{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Le passage de la transformation $\alpha\beta$ à la transformation dq est assuré par la matrice de rotation $n [R(\theta)]$ définie par :

$$\begin{cases} [X_{dq}] = [R(\theta)][X_{\alpha\beta}] \\ [X_{\alpha\beta}] = [R(\theta)]^{-1}[X_{dq}] \end{cases} \quad \text{II.60}$$

$$\begin{cases} [R(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \\ [R(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \end{cases} \quad \text{II.61}$$

En se basant sur les hypothèses simplificatrices, on peut exprimer l'ensemble des relations de la machine dans le repère de Park (d, q, o) qui est à priori quelconque, on peut ainsi considérer qu'il tourne à une vitesse arbitraire .

II.12.4.2 Expressions des tensions

En appliquant la transformation de Park au système d'équations (II.51), on aboutit à :

$$[V_{dqo}] = [P(\theta)][v_s] = [P(\theta)][R_s][I_s] + [P(\theta)] \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad \text{II.62}$$

De la même façon, On peut déduire les équations de Park sous une forme vectorielle :

En remarquant que la matrice $[R_s]$ est diagonale, donc :

$$\begin{cases} [P(\theta)][R_s][P(\theta)]^{-1} = [R_s] \\ [P(\theta)] \left(\frac{d}{dt} [P(\theta)]^{-1} \right) = \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad \text{II.64}$$

Après toutes ces transformations, et en posant : $\frac{d\theta}{dt} = \omega$; on obtient les équations statoriques de la GSAP exprimées dans le référentiel de Park lié au rotor :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + \frac{d\Phi_d}{dt} - \omega \Phi_q \\ V_q = R_s i_q + \frac{d\Phi_q}{dt} + \omega \Phi_d \end{cases} \quad \text{II.65}$$

II.12.4.3 Expressions des flux

$$[\Phi_{dqo}] = [P(\theta)][\Phi_s] = [P(\theta)][L] \cdot [P(\theta)]^{-1} [i_{dqo}] + [\Phi_{sr}] \quad \text{II.66}$$

On obtient donc les équations des flux statoriques de la GSAP, exprimées dans le référentiel de Park :

$$\begin{cases} \Phi_d = L_d i_d + \Phi_{sr} \\ \Phi_q = L_q i_q \end{cases} \quad \text{Où :} \quad \text{II.67}$$

- (L_d, L_q) sont les inductances d'axes direct et en quadrature.

La machine étant supposée à pôles lisses, ce qui signifie que $(L_d = L_q)$

Le modèle de la MSAP est enfin donné par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega (L_d i_d + \Phi_{sr}) \end{cases} \quad \text{II.68}$$

II.12.5 Expressions de la puissance et du couple

La puissance électrique absorbée par la machine est exprimée dans le référentiel triphasé et celui de Park par :

$$\begin{cases} P(t) = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \\ P(t) = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \end{cases} \quad \text{II.69}$$

Le système étant équilibré, alors : $\begin{cases} i_0 = 0 \\ V_0 = 0 \end{cases}$

En remplaçant les valeurs des tensions et des courants par leurs similaires dans l'équation II.69, la puissance électrique absorbée par la machine dans le référentiel de Park s'écrit :

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[R_s \cdot (i_d^2 + i_q^2) + \left(i_d \frac{d\Phi_d}{dt} + i_q \frac{d\Phi_q}{dt} \right) + (i_q \Phi_d - i_d \Phi_q) \omega \right] \quad \text{Où :} \quad \text{II.70}$$

$$\begin{cases} R_s (i_d^2 + i_q^2) : \text{Pertes par effet joule,} \\ \left(i_d \frac{d\Phi_d}{dt} + i_q \frac{d\Phi_q}{dt} \right) : \text{Variation de l'énergimagnétique emmagasinée,} \\ (i_q \Phi_d - i_d \Phi_q) \omega : \text{Puissance électromagnétique.} \end{cases}$$

Les pertes par effet Joule étant négligeables du fait de la faible valeur de la résistance statorique ; en régime permanent le flux étant constant, il en résulte :

$$\begin{cases} P(t) = \frac{3}{2} (i_q \Phi_d - i_d \Phi_q) \omega = \omega C_{em} \\ P(t) = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \end{cases} \quad P(t) = \frac{3}{2} (i_q \Phi_d - i_d \Phi_q) \omega \quad \text{II.71} \quad \text{II.71}$$

L'expression du couple en fonction des courant statoriques $((i_d, i_q))$ et du flux d'induction maximum des aimants permanents (ψ_{md}) de la MSAP est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p [i_q \Phi_{sr} + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad \text{II.72}$$

Pour une MSAP bipolaire $(p=1)$, à rotor lisse $(L_d = L_q)$ on aura le couple suivant :

$$C_{em} = \frac{3}{2} i_d \Phi_{sr} = \frac{3}{2} i_d i_q \Phi_{sr} \quad \text{II.73}$$

II.13 MODELE GENERALISE DE LA MSAP EN MODE GENERATEUR PMSG

Le modèle mathématique de la génératrice synchrone à aimants permanents est donné par les systèmes d'équations suivants :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{II.74}$$

En appliquant les transformations de Park, comme auparavant :

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - \frac{d\Phi_d}{dt} + \omega \Phi_q; & \Phi_d = L_d i_d + \Phi_{sr}; \\ V_q = -R_s i_q - \frac{d\Phi_q}{dt} - \omega \Phi_d; & \Phi_q = L_q i_q \end{cases} ; J \frac{d\Omega}{dt} - C_f = C_m - C_{em} \quad \text{II.75}$$

II.14 CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a présenté un rappel des notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, les différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement ont été décrits. Après ce rappel descriptif, on est passé à la conversion électromécanique où on a présenté et évalué les différentes configurations qui sont utilisées dans le domaine éolien. L'évaluation a été faite sur la base des principales exigences d'un système de conversion d'énergie éolienne. Ensuite on a traité le modèle du générateur qui sera couplé à la turbine, on a choisi un générateur synchrone à aimants permanents (PMSG).

Chapitre. III LOGIQUE DE FLOUE

III.1 INTRODUCTION

Les méthodes classiques de l'automatique ont été largement appliquées dans de nombreux problèmes de régulation industrielle. Cependant, la plupart des systèmes physiques présentent des non linéarités et leurs paramètres sont souvent mal connus et/ou variables dans le temps. Pour la commande de telles classes de systèmes les méthodes conventionnelles de l'automatique ont montré leurs limites en termes de stabilisation et performances.

Avec le développement des calculateurs numériques, les automaticiens commencent à s'intéresser aux nouvelles approches de commande telles que la commande adaptative, la commande prédictive, la commande robuste, ainsi que les techniques basées sur l'intelligence artificielle [37].

Parmi ces dernières ; la commande par logique floue. Cette commande est à l'heure actuelle une des préoccupations des chercheurs dans le monde.

Durant ces dernières décennies, l'utilisation de la théorie des ensembles flous dans la modélisation et la commande des systèmes complexes a connu une évolution considérable. En effet, le principe de la commande floue a été expérimenté pour la première fois en 1974 par l'équipe du professeur E.H. Mamdani. Les résultats obtenus, ont été repris et développés par plusieurs équipes en Europe de l'Ouest. Puis ensuite par l'Institut de Technologie de Tokyo et dans quelques autres universités japonaises. Depuis 1987, date à laquelle la première application " grand public" a vu le jour. Utilisant la logique floue, le métro de Sendai, a été mis sur le marché. De puis cette époque, l'utilisation des techniques de commande floue n'a cessé d'évoluer. Aujourd'hui, les différents travaux et publications récentes dans ces domaines semblent indiquer que les deux domaines d'application de la logique floue les plus importants sont :

- La conception de régulateurs pour des processus difficilement modélisables,
- La conception de régulateurs linéaires pour des processus modélisables

La commande floue se différencie d'une commande classique par le fait que l'approche par logique floue synthétise une loi de commande à partir de l'expertise de l'opérateur humain. Dans le premier cas, la commande est synthétisée en évitant la phase modélisation. Par contre dans le second cas, la structure non linéaire du régulateur floue permet d'améliorer les performances en termes de précision et de robustesse du système non linéaire vis-à-vis des incertitudes structurées et non structurées.

Les avancées récentes en informatique et en électronique de puissance permettent la fabrication des systèmes prototypes, qui jouent le rôle de simulateurs réels miniatures. Ces derniers

permettent de tester de nouvelles techniques de commande. Les systèmes comme le simple et le double pendule [Messner, 97], [Passino&Yurkovich, 98], [Mudry, 01], [Shi & Singh, 92], ainsi que le simulateur de vol d'hélicoptère (Twin Rotor Mimo system) [F, Instruments Ltd,IV,97], sont de très bons exemples de ces prototypes réels. Ces derniers, sont caractérisé par des comportements physiques non-linéaires difficilement modélisables. Cette Caractéristique a motivé les chercheurs pour les utilisera fin de valider et tester les lois de Commande développées théoriquement. Le travail présenté dans ce mémoire, s'intègre dans cet objectif.

III.2 HISTORIQUE

C'est à l'université de Berkeley Californie, USA en 1963, qu'est née la logique floue ou "Fuzzy logic". Son père créateur c'est Monsieur Lotfi A. Zadeh, né en ex-URSS de parents iraniens, professeur d'informatique au département ingénierie électrique et informatique de l'université. Mr Zadeh fait une comparaison entre les ordinateurs de l'époque et le raisonnement humain (comparaison toujours valable d'ailleurs) :

Si l'ordinateur calcule beaucoup plus vite de façon rigoureuse, ses capacités de réflexion et d'apprentissage sont limitées. De plus sa rigidité entant que machine et son fonctionnement binaire, rend l'ordinateur peu adapté à certaines tâches, qui pour un humain emble si simple. Mr Zadeh prend l'exemple du créneau réalisé par un automobiliste pour garer sa voiture ; si le conducteur réalise cette opération en une minute environ, la simulation de la même action sur un ordinateur demandait à l'époque plusieurs heures de calculs complexes. Le pire dans l'histoire, c'est que l'humain fait tout ceci de façon approximative que ce soit pour la conduite dans le cas présent, comme bon nombre d'actions de la vie quotidienne ? Ce la marche donc avec l'approximation et une expérience des fonctions à réaliser. Naissance de la logique floue, dont le concept sera complètement ignoré aux USA, comme en Europe. Il faut attendre 25 ans pour voir apparaître les premières applications au Japon ; à noter que l'exemple de la voiture à garer de Mr Zadeh est repris, et mis en application avec une voiture truffée de capteurs, d'un calculateur flou et qui parvient à se garer toute seule [46].

III.3 APPLICATION DE LA LOGIQUE FLOUE

Les compréhensions de l'univers dans lequel nous évoluons sont généralement imparfaites dans la mesure où elles peuvent être tachées d'incertitudes et/ou d'imprécisions, ne serait-ce qu'à travers la perception que nous en avons. Or, nous pouvons constater que l'homme intègre naturellement ces imperfections dans la vie de tous les jours, en particulier au niveau du

raisonnement et de la décision. L'idée du professeur Lotfi Zadeh à travers le nouveau concept ensembliste d'appartenance graduelle d'un élément à un ensemble, a été de définir une logique multi évaluée permettant de modéliser ces imperfections c'est prendre en compte les états intermédiaires entre le tout et le rien. L'utilité de cette approche peut être illustrée de la manière suivante :

Une température de 10°C, pour un humain, est généralement considérée comme froide ; une autre de 40°C est qualifiée de chaude. Si chacune de ces valeurs appartient à une Catégorie (ensemble) bien définie, qu'en est-il pour des valeurs intermédiaires ? Une réponse intuitive consiste à affirmer qu'elles appartiennent à une ou deux des catégories précédentes avec des niveaux ou des degrés (normalisés) différents. On évite ainsi des transitions brusques entre différentes catégories, comme cela est le cas en logique binaire (figureI.1).

Il semble en effet surprenant de considérer qu'une température de 40°C est chaude, alors qu'une température de 39,9°C ne l'est pas.

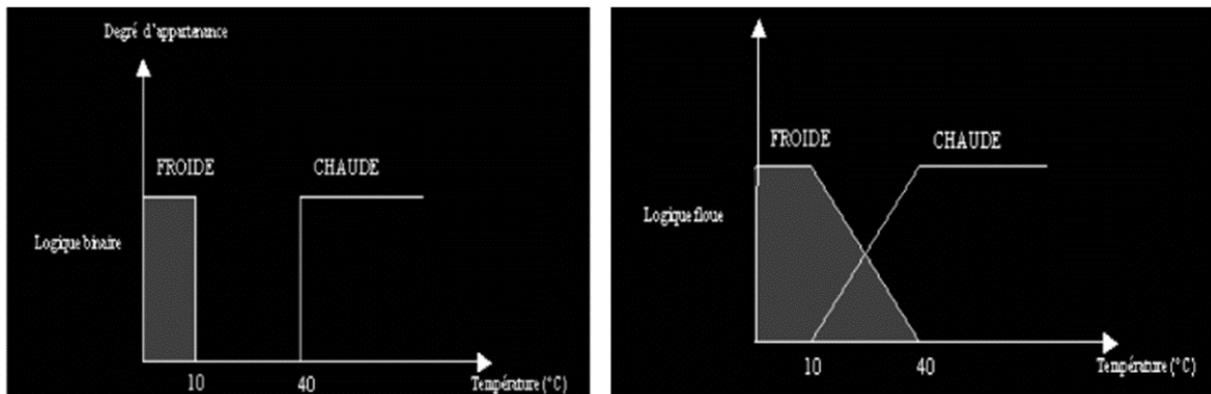


Figure.III.1 Exemple de définition d'ensembles sur un univers de discours en logique Binaire et en logique floue

Cet exemple permet d'illustrer le fait qu'une logique binaire classique soit, dans certains cas, trop limitative. Donc il est nécessaire de faire appel à une autre logique multi évaluée qui sera vue comme une extension de la précédente, c'est bien la logique floue [43].

En ce qui concerne la commande d'un processus quelconque, la logique floue permet une approche fondatrice par rapport à l'automatique classique. En automatique, en général, on s'attache à modéliser le processus à travers un certain nombre d'équations différentielles. Cette modélisation est rendue difficile et parfois impossible à mesurer que la complexité des processus à contrôler augmentent. D'une manière radicalement opposée, un contrôleur va décrire non pas le processus mais la façon de le contrôler, tout comme le ferait un expert humain à travers des règles intégrant naturellement imprécisions et incertitudes.

III.4 LA COMMANDE FLOUE :

Parmi les nombreuses applications de la logique floue, la commande floues s'avère être le champ d'application le plus actif à travers le monde [42].

Exemples :

- Commande de tubes broyeurs pour la fabrication du ciment (première réalisation en 1979 au Danemark).
- Commande de métros avec un fonctionnement plus confortable et économique et une précision d'arrêt augmentée (1987 à Sendai, Japon).
- Production du fer et de l'acier, purification, de l'eau, chaînes et robots de fabrication,
- Opérateurs, unités arithmétique, micro-ordinateurs, ...

III.4.1 Classification et reconnaissance de formes :

Classifier consiste à regrouper des objets en catégories les plus homogènes possibles (contenant des objets similaires) : Classifier est une activité qui intervient dans des nombreux domaines d'applications tels que :

- La reconnaissance vocale ;
- L'analyse d'images (médical, radar, télédétection) ;
- La reconnaissance de cibles (domaine militaire).
- Consultation, investissement et développement, horaires de train, ...
- Base de données, recherche d'information, modélisation de systèmes

III.4.2 Conception d'un régulateur à logique flou

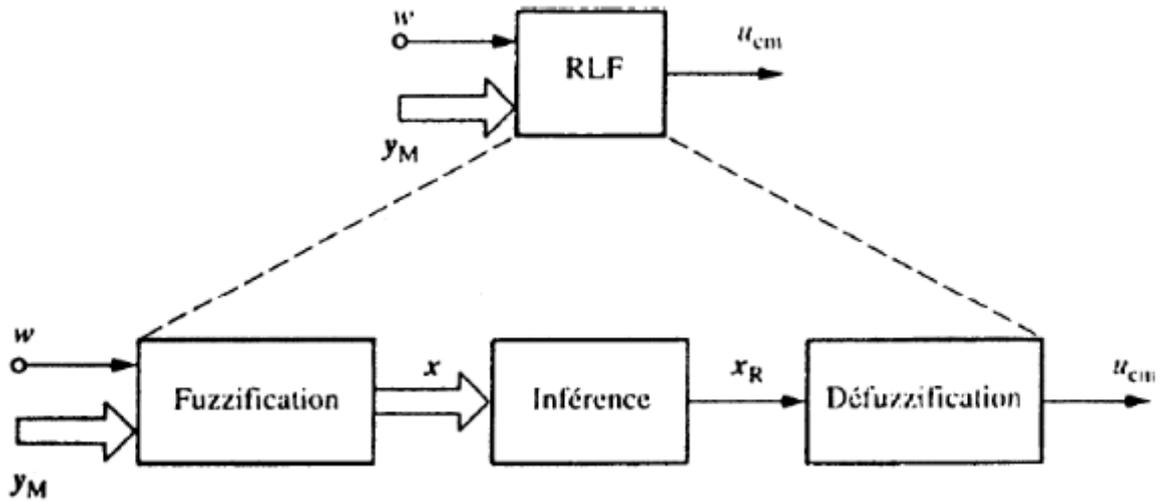
Un contrôleur standard (PID ou autres) demande toujours un modèle le plus précis possible (équations différentielles).

Un contrôleur flou ne demande pas de modèle du système à régler. Les algorithmes de réglage se basent sur des règles linguistiques de la forme Si ... Alors ...

En fait, ces règles peuvent être exprimées en utilisant le langage de tous les jours et la connaissance intuitive d'un opérateur humain.

Pour les systèmes mal connus ou complexes (non-linéaires), un contrôleur flou s'avère très intéressant.

III.5 STRUCTURE DU REGULATOR



- Fuzzification : transforme les entrées en grandeurs floues.
- Inférence (avec la base de règles) : prend les décisions
- Défuzzification : transforme les grandeurs floues en valeurs déterminées

En général, on utilise des formes triangulaires ou trapézoïdales pour les fonctions d'appartenance, bien qu'il n'existe pas de règles précises sur ce choix.

III.5.1 Différentes méthodes d'inférence.

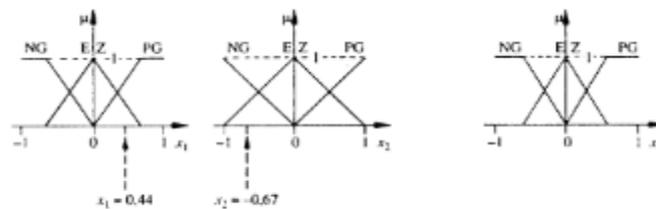


Fig. 3.17 Fonctions d'appartenance pour l'exemple servant à la description des méthodes d'inférence.

Supposons que l'on ait deux entrées x_1 et x_2 et une sortie x_R , toutes définies par les sous-ensembles suivants :

Supposons que $x_1 = 0.44$, $x_2 = -0.67$ et que l'inférence est composée des deux règles suivantes:

Si (x_1 PG **ET** x_2 EZ), **Alors** x_R EZ **ou**

Si (x_1 NG **OU** x_2 PM), **Alors** x_R PM

Il faut maintenant « traduire » les opérateurs ET, OU et l'implication par une des fonctions (Minimum, Maximum, Produit, ...).

- Méthode MAX-MIN ;
- Méthode MAX-PROD ;
- Méthode SOMME-PROD ;
- Méthode du maximum ;
- Méthode de la moyenne des maximas ;
- Méthode du centroïde ;
- Méthode de la somme pondérée ;

III.6 APPLICATION DE LOGIQUE FLOUE DANS LES PANNEAUX SOLAIRES

III.6.1 Analyse

Au stade actuel, l'énergie solaire a été largement développée, car elle est respectueuse de l'environnement et exige beaucoup de ressources. Les panneaux solaires modernes sont des systèmes techniques complexes aux paramètres indéfinis. Leur efficacité dépend de l'intensité du flux solaire qui tombe sur le panneau, de la température du panneau, des saisons de l'année, des conditions météorologiques et de la position relative des panneaux et du soleil.

Dans le travail [37, 38], l'influence de l'intensité du rayonnement solaire et de la température ambiante est considérée. Pour une conversion optimale de l'énergie, une conception d'un système de suivi uniaxial ou à deux axes est proposée, dont la commande est réalisée sur la base d'un moteur CC.

Le travail [39] présente la conception d'un système de suivi utilisant un servo-système, qui comprend une unité de transmission de la lumière du soleil, une unité de logique floue, une unité de commande d'entraînement de sortie, une unité de comparaison et de réglage.

Au travail [40], le système de suivi est contrôlé en utilisant une logique floue avec trois fonctions d'adhésion. Les variables contrôlées sont l'angle de tangage et l'angle de lacet dans le système de suivi solaire biaxial actif. Le contrôle logique flou est une erreur à l'entrée et un modulateur de largeur d'impulsion à la sortie.

Dans les travaux [41], une analyse comparative de l'utilisation d'un régulateur PID et d'une logique floue dans un système de suivi de structure uniaxiale est envisagée

III.6.2 Description

Ce travail traite de la conception d'un système de suivi à deux axes utilisant des moteurs pas à pas.

La figure III.2 montre un diagramme du système de suivi des panneaux, ici M1 et M2 sont des moteurs pas à pas ; P1 et P2 – boîte de vitesses ; une photorésistance est utilisée comme capteur.

Les dispositifs électromécaniques permettent de changer l'angle d'azimut et l'angle d'élévation.

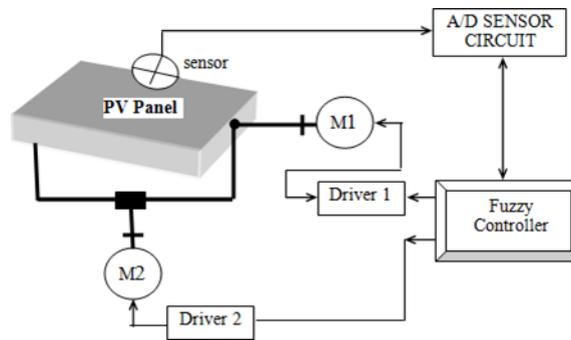


Figure.III.2 Diagramme du système de suivi des panneaux

Il existe un seul point de puissance maximum (MPP) correspondant à une tension et un courant spécifiques (Figure III.2).

En faisant varier la température du mécanisme de suivi du point de puissance maximum (MPPT), le nouveau point de puissance maximum modifié sur la courbe correspondante est suivi. MPPT vous permet d'extraire la puissance maximale d'un module solaire photovoltaïque et de le transférer à une charge. AC le convertisseur CC sert d'interface entre la charge et le module. Le MPPT modifie le cycle de service pour maintenir la puissance de transmission du module solaire photovoltaïque à la charge à son niveau maximal.

Chapitre. IV SIMULATION DU SYSTEME HYBRIDE

IV.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons entamer l'association des deux sources d'énergie renouvelable simulées précédemment, qui seront couplés avec une batterie de stockage qui sera une source de secours. L'association de ces différentes sources va constituer notre système hybride qui sera la seule source de production de l'énergie électrique pour la charge.

Le modèle global sera ensuite simulé à l'aide du logiciel Matlab Simulink, l'influence des paramètres du panneau solaire (température et ensoleillement) ainsi que la turbine éolienne (Variation de la vitesse du vent), seront mises en évidence [48].

IV.2 SIMULATION DE LA CHAÎNE GLOBALE :

L'objectif de notre contribution est de développer un système hybride combinant les deux sources d'énergie renouvelable, à savoir un générateur photovoltaïque pour convertir l'énergie du soleil et un générateur éolien pour convertir celle du vent. Ce système hybride éolien-photovoltaïque sera autonome, il servira de source électrique pour les zones isolées dont le raccordement au réseau n'est économiquement pas avantageux. Les batteries de stockage auront le rôle de secours en cas d'absence de soleil et de vent. Ces deux sources d'énergie sont connectées vers un bus continu via des convertisseurs. Ce système global est illustré dans la figure suivante [48]:

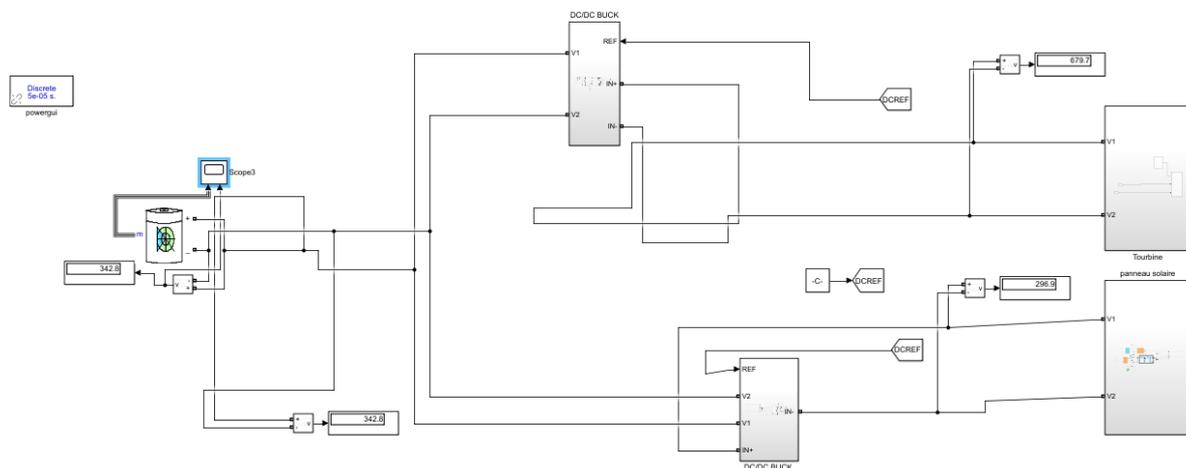


Figure.IV.1 Schéma hybride général

On présentera dans ce qui suit, et de manière séparée les trois chaînes du système hybride

IV.2.2 Présentation de la chaîne de conversion éolienne :

La première chaîne est celle qui permet de produire de l'énergie à travers une turbine éolienne soumise à un profil de vent variable.

Une turbine éolienne soumise à un profil de vent où la vitesse est variable de façon aléatoire.

Un générateur synchrone à aimants permanents (PMSG) qui transforme l'énergie mécanique issue de la turbine éolienne en énergie électrique.

Un redresseur (pont triphasé de diodes), qui joue le rôle d'un convertisseur AC/DC

Un hacheur survolteur série DC/DC muni d'une régulation, ce dernier permet de générer la tension désirée pour pouvoir la raccorder au bus continu.

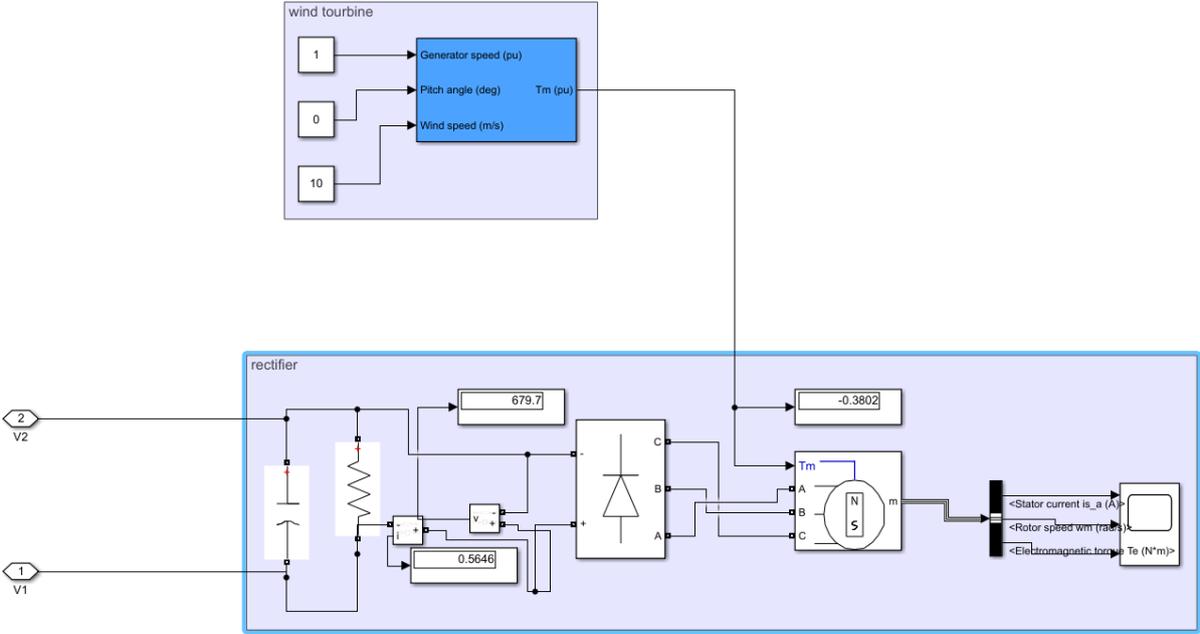


Figure.IV.2 Schéma du système éolien

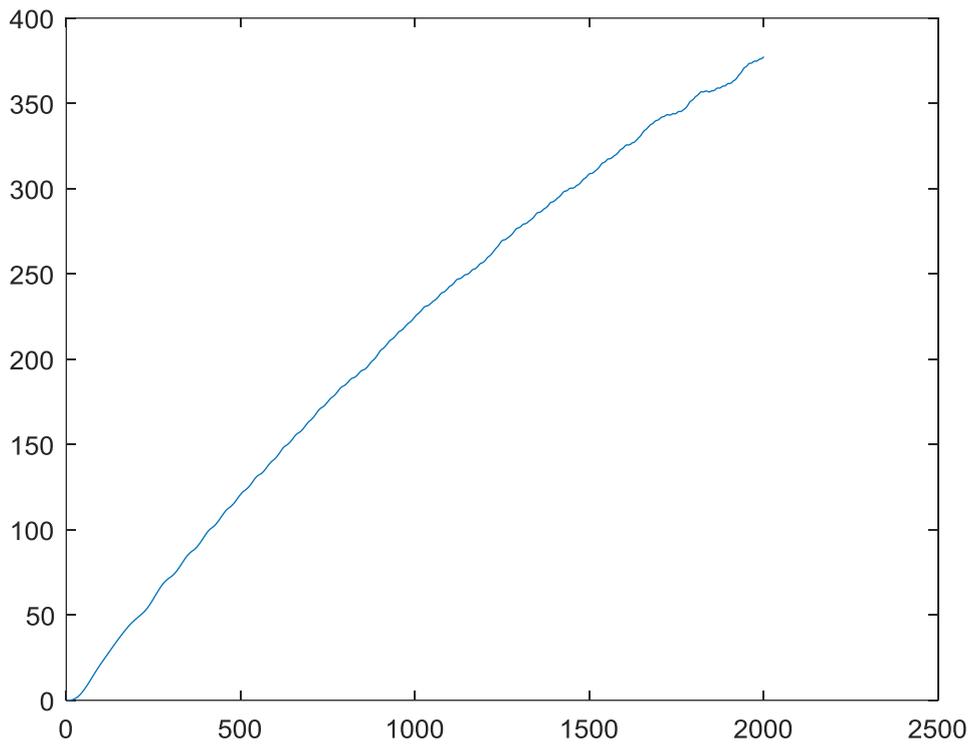


Figure.IV.3 Tension de sortie du système éolienne

IV.2.3 Présentation de la chaine de conversion photovoltaïque :

La chaine de conversion photovoltaïque a été conçue pour générer la même valeur de tension que celle de la chaine éolienne, nous avons pour cela ajouté un hacheur survolteur série afin d'obtenir la même tension désirée que la chaine précédente.

Cette chaine est composée de (figure IV.3) :

Un panneau solaire d'une puissance de 80 W, ce dernier permettra de convertir l'énergie solaire en énergie électrique.

Un convertisseur DC/DC survolteur (BOOST Converter), une commande MPPT est insérée pour pouvoir extraire la puissance maximale présente dans le panneau.

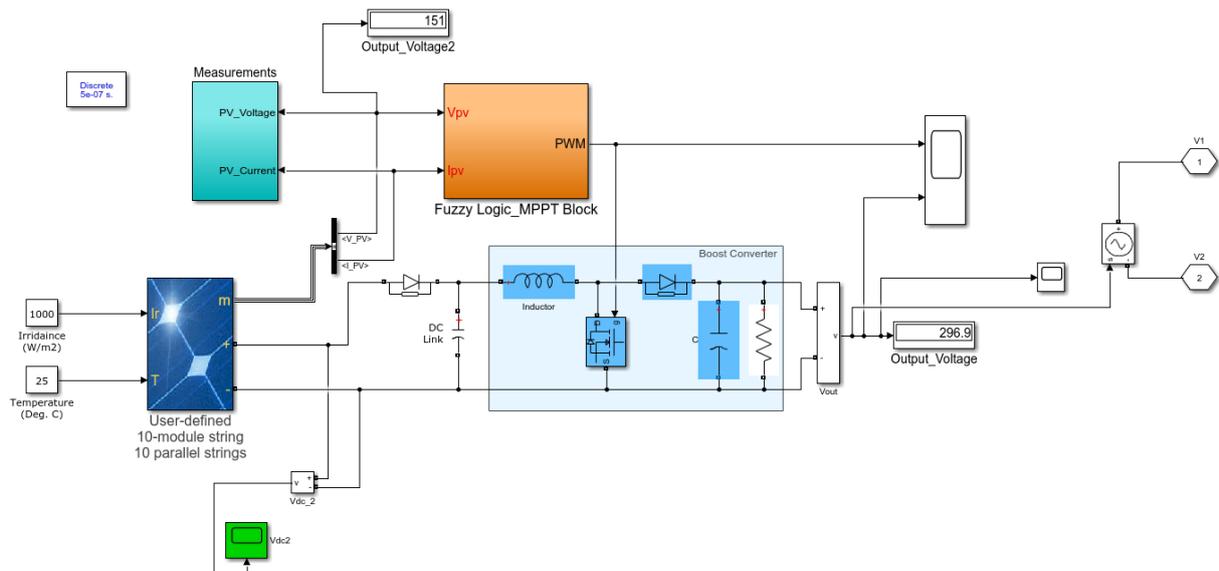


Figure.IV.4 Schéma bloc chaîne de conversion photovoltaïque.

La chaîne de stockage est visible dans la figure IV.1, il s'agit d'une batterie qui joue aussi le rôle d'une source d'énergie de secours (absence ou non satisfaction à la demande de la charge de la première et la deuxième chaîne).

IV.3 SIMULATION DE LA CHAÎNE GLOBALE

Une fois avoir modéliser chaîne globale de production, nous l'avons implémentée dans l'environnement MATLAB/SIMULINK afin d'effectuer tous les tests de la régulation. Nous avons donc soumis le système éolien à un profil de vent aléatoire où la vitesse mécanique est constamment variable [80]. Le but de la stratégie de gestion est de produire des références de puissance pour les sources (éolien, photovoltaïque, et stockage) afin de garantir un réseau continu.

IV.3.1 Simulation de la chaîne de production éolienne

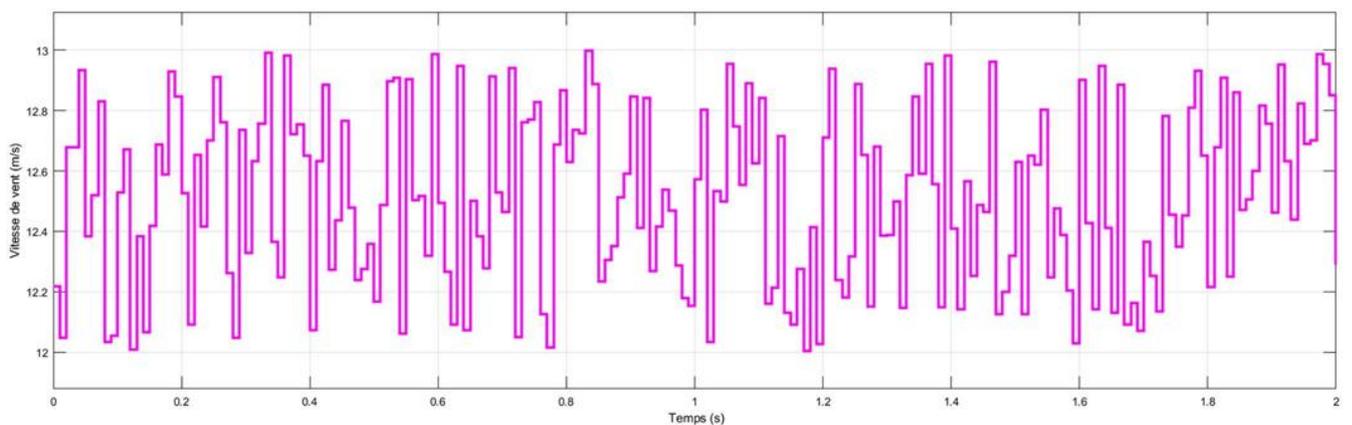


Figure.IV.5 Profile de la vitesse de vent

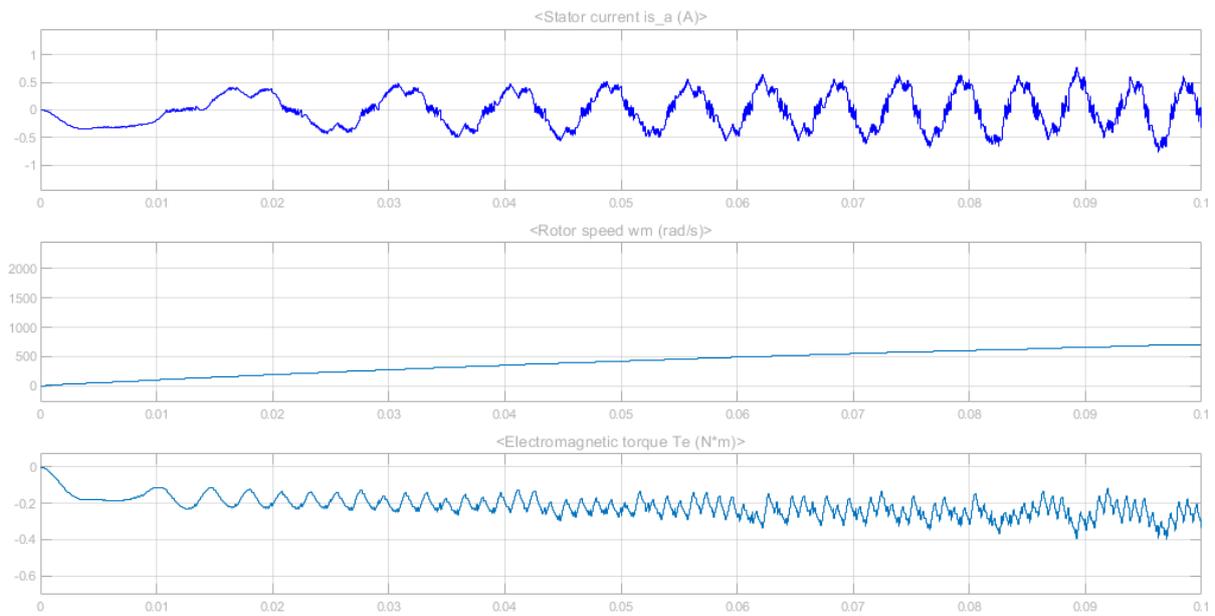


Figure.IV.6 A/Stator current – B/Rotor speed – C/Electromagnetic torc

IV.3.2 Simulation de la chaine de production photovoltaïque

Les caractéristiques de ce panneau photovoltaïque sont données dans le tableau suivant :

Tableau.IV.1 Caractéristiques du panneau photovoltaïque

Caractéristiques du panneau	Indéfini
Nombre de cellules en parallèle	10
Nombre de cellules en série	10
Puissance maximale	230,4 W
Tension maximale – Tension à vide	30m72V
Courant maximal – Courant de CC	7,5 A

Les paramètres de simulation sont comme suit

- Un profil d'éclairement constant, égal à 1000 W/m².
- Un profil de température constante, égal à 25°C.

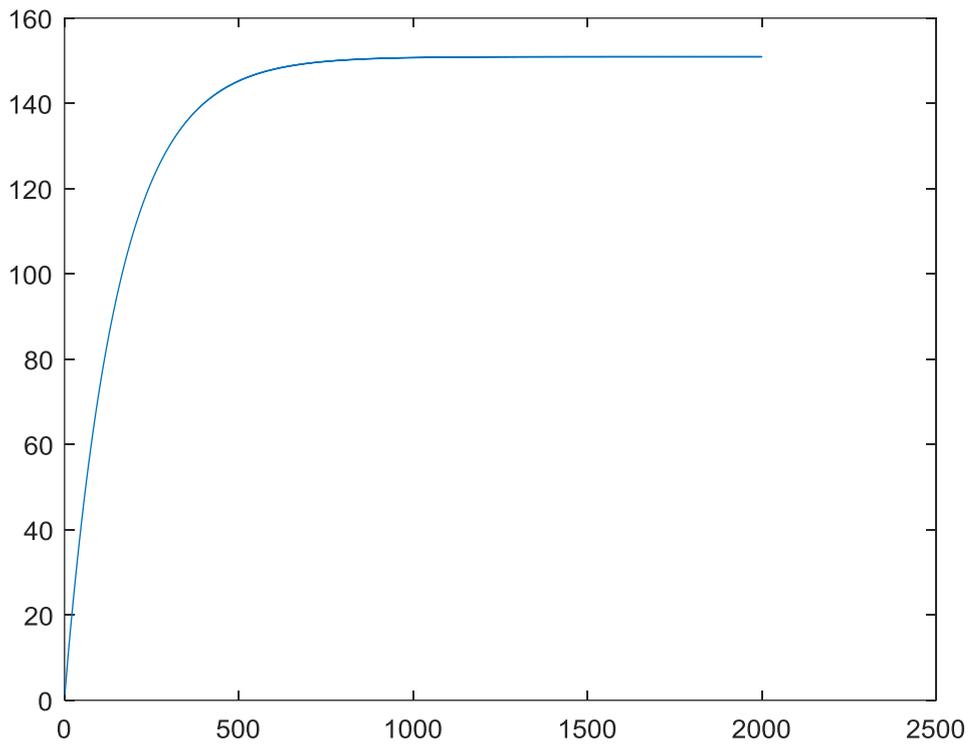


Figure.IV.7 Tension de sortie du panneau photovoltaïque

Les résultats de simulation effectués pour la chaîne photovoltaïque montrent que la tension de sortie est maintenue constante, ce qui nous permet de conclure que la commande MPPT du système est efficace.

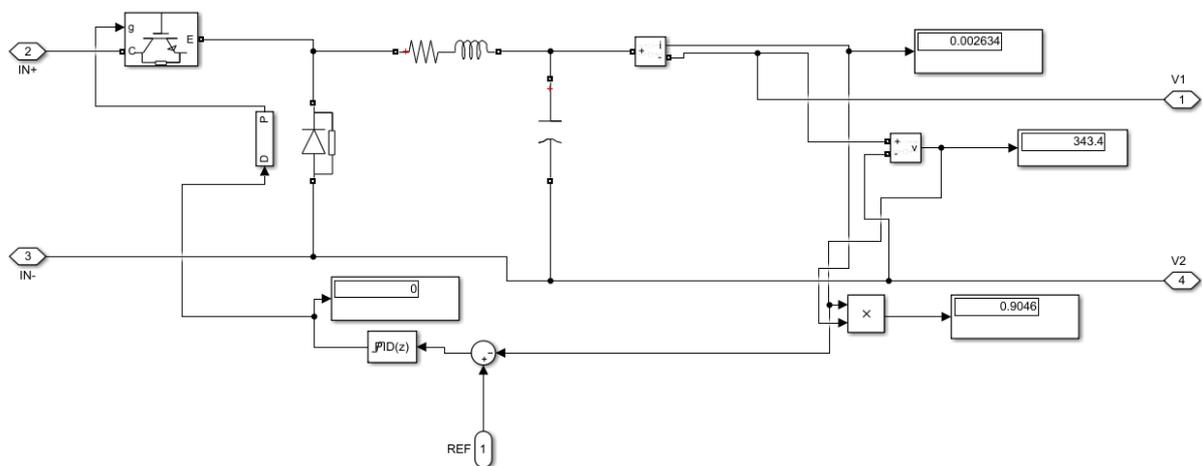


Figure.IV.8 DC/DC Buck

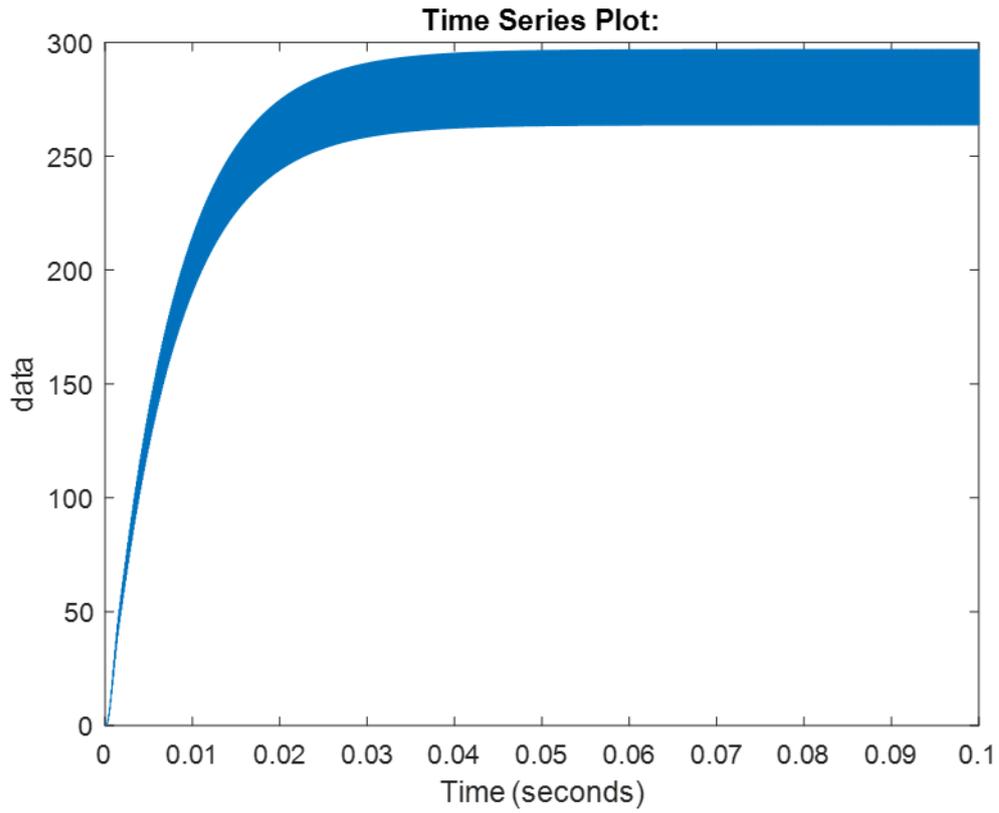


Figure.IV.9 Sortie de système PV

IV.4 SIMULATION D'UN MODELE DE REFERENCE

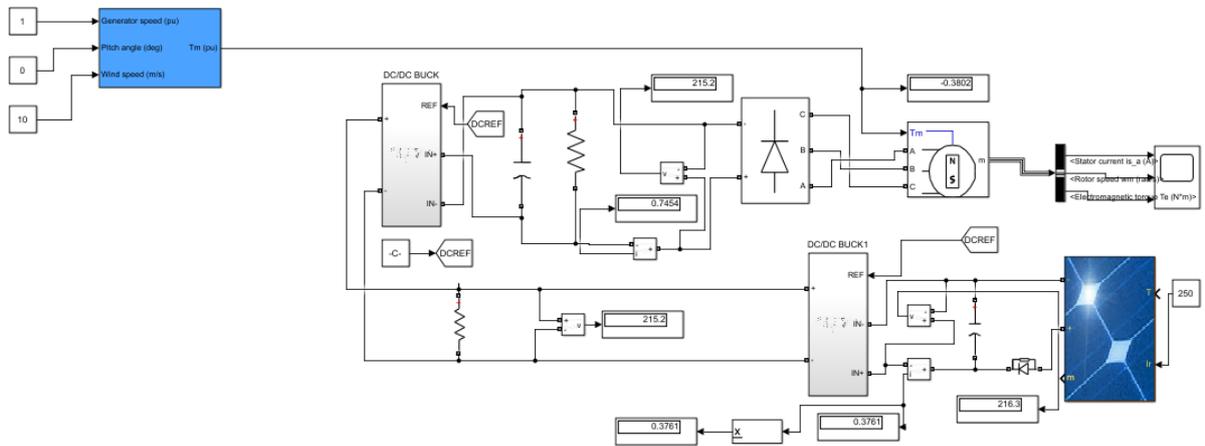


Figure.IV.10 Model de référence

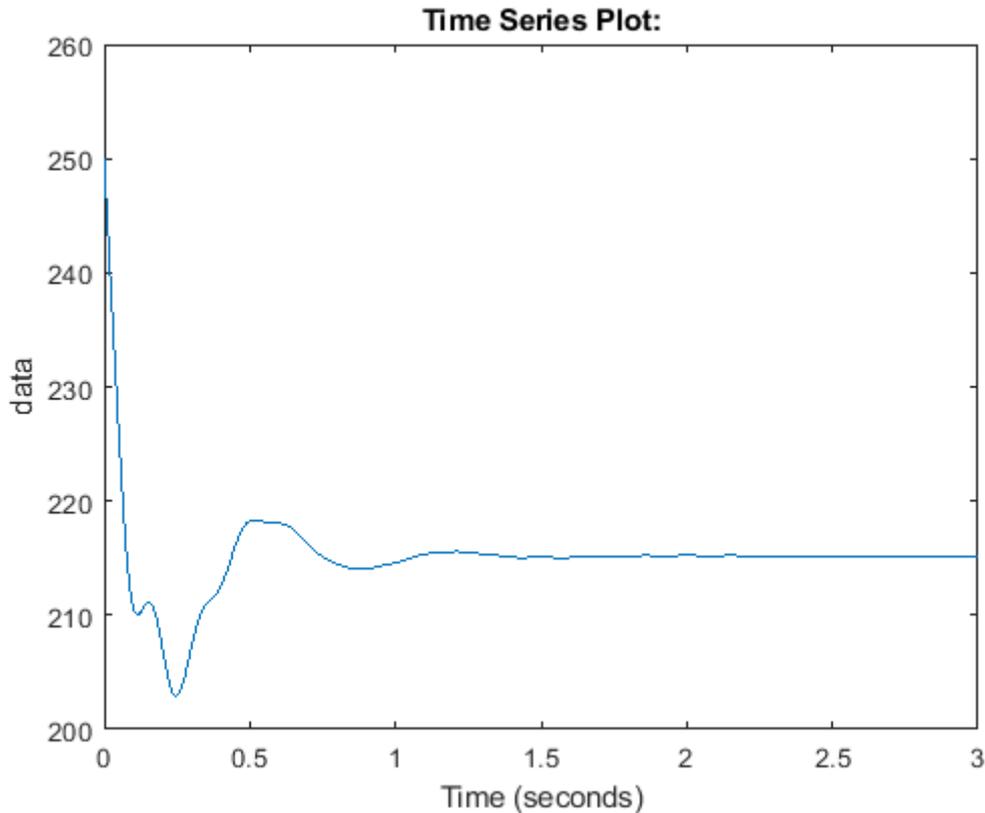


Figure.IV.11 Tension de sortie du panneau solaire

IV.5 SIMULATION DE LA CHAÎNE DE STOCKAGE

Le stockage de l'énergie électrique est principalement réalisé grâce à des accumulateurs électrochimiques. Pour la modélisation et la simulation de la batterie choisie, nous avons pris l'initiative d'exploiter la bibliothèque de Matlab.

Cette chaîne est obligatoire dans les systèmes de production autonomes, ceci afin de garantir la continuité de service et aussi assurer l'équilibre des puissances entre les sources de production et la charge. La chaîne de stockage illustrée dans le système hybride qu'on a présenté est composée de :

- Une batterie de type Lithium-Ion ;
- Tension nominale : 320V ;
- Capacité : 2.4AH

Les figures ci-dessous illustrent les allures de charge et de décharge de la batterie.

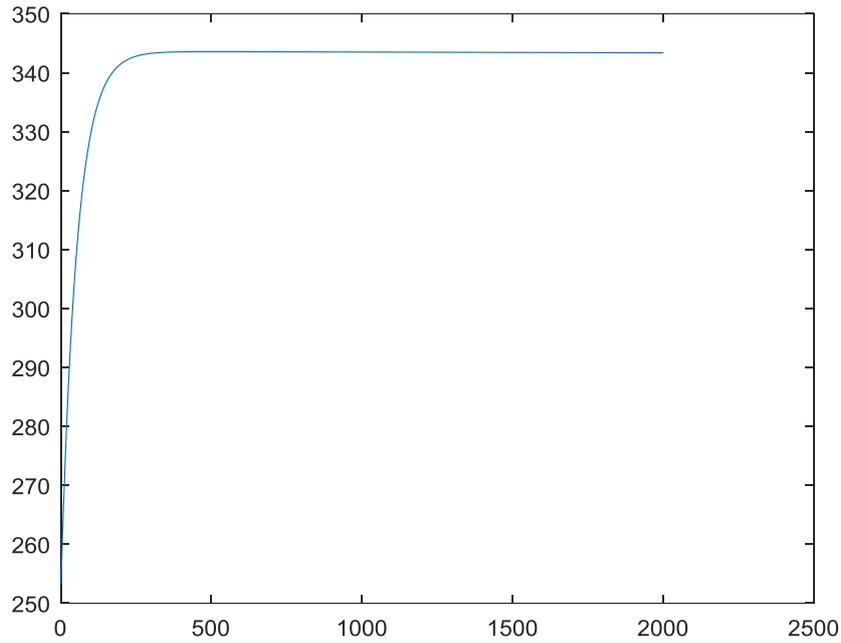


Figure.IV.12 Tension de charge de la batterie

IV.6 CONCLUSION

Ce chapitre est consacré à la simulation du système hybride d'énergie électrique constitué d'une éolienne associée à des panneaux photovoltaïques et un système de stockage par batterie. Le système global est présenté dans un premier temps ; ensuite, on a dimensionné les trois sources d'énergie pour les connecter vers un même bus continu par l'intermédiaire des convertisseurs, pour assurer la commande en puissance et assurer une tension du bus continu constante et ce en dépit des variations de la charge. Les résultats des différents blocs réalisés sous environnement Matlab/Simulink ont été discutés.

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire a pour objectif de faire la comparaison entre l'efficacité de logique floue dans station éolienne et photovoltaïque de la production de l'énergie, fonctionnant dans les mêmes conditions climatiques et géographiques d'un milieu désertique. Nous sommes arrivés à confirmer que logique floue est la plus appropriée et efficace pour la production d'énergie électrique dans cette station désertique en fonction du rendement énergétique de la production. Nous avons vérifié aussi l'étendue de la capacité des logiciels utilisés à prédire l'évolution des puissances maximales électriques extraites d'une centrale électrique solaire ou éolienne dans cette expérience

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. Anne LABOURET et Michel VILLOZ, Energie solaire photovoltaïque, édition Paris 2006.
- [2]. Idriss KYONI , Cours d'Analyse des circuits et mesures électriques/deuxième graduat électromécanique. Université de Lubumbashi, Faculté Polytechnique (notes inédites 2009).
- [3]. KABEYA NZOLO, Etude d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau/TFC. Université de Lubumbashi, Faculté Polytechnique, année académique 2006-2007.
- [4]. LIANGO M. Cours d'Electronique générale/troisième graduat électromécanique. Université de Lubumbashi, Faculté Polytechnique (notes inédites 2010).
- [5]. YAMUME KITENGE, Avant-projet d'installation d'une centrale photovoltaïque pour l'alimentation permanente de la tour de contrôle de la Luano/TFC. Université de Lubumbashi, Faculté Polytechnique, année académique 2003- 2004.
- [6]. www.energetique.com/ ARCEA.com (mai 2010).
- [7]. www.energetique.com (mai 2010).
- [8]. [www.google/dimensionnement d'un système photovoltaïque.com](http://www.google/dimensionnement+d'un+système+photovoltaïque.com) (aout 2010)
- [9]. C. Cabal, C. Alonsol, "Adaptive Digital MPPT Control for Photovoltaic Applications".IEEE Trans Power Electronics, pp 2414-2419, 2007.
- [10]. L. Mazence. "Les Techniques de Commande Vectorielle des Machines Asynchrones Destinées à la Variation de Vitesse à Haute Performance ", électricité de France, Janv. 1992.
- [11]. Madaci Bouthaina « Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multisystèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs » Thèse de doctorat de l'université des Frères Mentouri Constantine ;2018.
- [12]. D. Doncker RW. "Parameters sensitivity of indirect universal field-oriented controllers "IEEE Trans., Power Electronics 1994.
- [13]. F. Messai, " Contribution à l'Etude d'une Génératrice à Réductance Variable." .Thèse de Magister Institut d'électrotechnique Université mentouri constantine2009
- [14]. J. Appelbaum, "Starting and Study State Characteristics of DC Motors by Solar Cell ". Solar Energy, Vol. EC-1, N°1, pp17-25, March1989.
- [15]. Hassaine Mohamed nabil « Commande floue d'un générateur synchrone à aimants permanents (GSAP) intégré dans un système éolien » mémoire de master de l'Université d'Oran 2 ;2020.
- [16]. W.R. Anis, H. Metwally, " Dynamic Performance of a Directly Coupled PV Pumping System", Solar Energy, Vol.53, N°4, pp369-377, 1994.
- [17]. Gabriele GRANDI, Domenico CASADEI, "Dynamic Performance of a Power Condition Applied to Photovoltaic Sources ", EPE-PEMC, Dubrovnik & Cavtat. pp. 01-10, 2002.
- [18]. Mahammedi Abdellatif « Etude et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque » Thèse de magister de l'université Ferhat Abbas –Setif1 ; 2014.
- [19]. R Duzat. "Analytic and Experimental Investigation of a Photovoltaic Pumping System", PhD thesis, Oldenburg University 2000.
- [20]. A. Tlemçani, H. Chekireb, M. Boucherit, "Perturb and Observe MPPT Technique Robustness Improved", IEEE pp 845- 850, 2004.
- [21]. F. Nicola, G. Petrone, " Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method ", IEEE. Vol.20, N°4, pp.963-973, 2005.
- [22]. T. Ching - Pan et al. "A Fast Maximum Power Point Trackers for Photovoltaic Power Systems " IEEE, 1999, pp 390-393.

- [23]. A. Betka, A. Moussi, "Performance Optimization of a Photovoltaic Pumping System Based on Induction Motor Drive", *Renewable Energy*, Vol 29, N° 1, pp 2167-2181,2004.
- [24]. L Zarour, R. Chenni, A Bouzid, T Kerbache " Optimisation de la performance d'un Système de Pompage Photovoltaïque à l'aide d'un Moteur Asynchrone", *International Conférence on Electrotechnics, University of science and Technology of Oran ICEL2005*.
- [25]. Laroui Rachid « Modélisation et simulation d'un système multi-sources Photovoltaïque-éolien-diesel dans la région d'Adrar » Mémoire de Magister de l'Université Ahmed Draya Adrar ; 2015.
- [26]. L Zarour, R. Chenni, A. Borni, A Bouzid, "Improvement of Synchronous and Asynchronous Motor Drive Systems Supplied by photovoltaic Arrays with Frequency Control", *Journal of Electrical Engineering Volume59 N°4 2008* pp169-177.
- [27]. N. Hamrouni, M. Jraidi," Measurements and Simulation of PV Pumping Systems Parameters using MPPT and PWM Control Strategies" *IEEE MELECON 2006*, May 16-19,Benalmádena (Málaga), Spain 2006
- [28]. R. Chenni, L Zarour, M. Amarouayache, A Bouzid, A New Design for Analogue Maximum Power Point Tracking " *International Review of Electrical Engineering - February 2008*.
- [29]. R Chedid, Y Saliba " Optimization of Autonomous Solar-Wind Power Systems for Lebanon", *Solar Energy*, pp. 51 1-5 17. (1996)
- [30]. Martin Taïki Vaïtchemén « modélisation et simulation d'un système de stockage intégré dans un micro-réseau autonome solaire-éolien » Thèse de doctorat de l'université du Québec en Abitibi Témiscamingue ; 2019.
- [31]. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo," Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method ", *IEEE*. Vol.20, N°4, pp.963-973, 2005.
- [32]. B. S. Borrowsy and Z. M. Salameh, "Methodology for Optimally Sizing the Combination of Battery Bank and PV Array in a Wind/PV Hybrid System, " *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 12, no. 1, Mar. 1997
- [33]. H. D Battista, P. F. Puleston, "Sliding Mode Control of Wind Energy Systems with DOIG. Power Efficiency and Torsional Dynamics Optimization, " *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 2, pp. 728–734, May 2000
- [34]. F. Valenciaga and P. F. Puleston, "Supervisor Control for a Stand-Alone Hybrid Generation System Using Wind and Photovoltaic Energy, " *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 20, N°. 2, June 2005.
- [35]. Shigeo Morimoto, " Sensorless Output Maximization Control for Variable-Speed Wind Generation System Using IPMSG, " *IEEE Transactions on industry applications*, Vol. 41, N). 1, January/February 2005.
- [36]. I. Abadi, A. Soeprijanto, A. Musyafa, Design of single axis solar tracking system at photovoltaic panel using fuzzy logic controller, 5th Brunei International Conference on Engineering and Technology (BICET 2014), Brunei, 2014, pp. 1-6.DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7120264>
- [37]. Hung-Ching Lu, Te-Lung Shih, Fuzzy system control design with application to solar panel active dual-axis sun tracker system, 2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2010, pp. 1878-1883. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5642275>
- [38]. W. Luo, Y. Wu, A servo system of tracking automatically for solar cell based on fuzzy controller, 2010 International Conference on Management and Service Science, Wuhan, China, 2010,pp.4–1 DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5578527>
- [39]. Chairul Imron, Imam Abadi, Nurika Brillianti, Muhammad Khamim Asy'ari, Yusilawati Ahmad Nor, and Aep Saepul Uyun. Fuzzy Logic Controller Application for

- an Active Two-Axis Solar Tracking System, in: E3S Web Conf., 1st International Conference on Renewable Energy Research and Challenge (ICoRER 2019), vol. 190, article number 00004 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019000004>
- [40]. Emre Kiyak, Gokhan Gol, A comparison of fuzzy logic and PID controller for a single-axis solar tracking system, in: Renewables: Wind, Water, and Solar, Springer, Berlin, Heidelberg, 2016, vol. 3, Article number , 7.DOI: <https://jrenewables.springeropen.com/articles/10.1186/s40807-016-0023-7>
- [41]. O.A. Kozlova, L.P. Kozlova, Osnovy teorii nechetkih mnozhestv [Fundamentals of the theory of fuzzy sets: textbook], Saint-Peterburg, SPbGUT Publ., 2014, 160 p. (in Russian)
- [42]. O.A. Kozlova, L.P. Kozlova, Using of fuzzy set theory when designing technical systems, 2015 XVIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 2015, pp. 193-194, DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7190453>
- [43].]I.P. Kopylov, Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin [Mathematical modeling of electrical machines], Moscow, Vyssh. shk. Publ., 2001, 327 p. (in Russian)
- [44]. A.A. Soloha, Matematicheskaya model' shagovogo dvigatelya [Stepper motor mathematical model], Materials of the XVII International Scientific Conference Mathematical Methods in Engineering and Technology, Kostroma, 2004, vol.5, pp. 111-119
- [45]. Otmane EL ALAOUI JAMAL, « Application de la Logique Floue », mémoire d'ingénieur, 2010
- [46]. Boutabba Tarek « Contribution à la modélisation et à la commande d'un système de génération hybride Solaire-Eolien » Thèse de doctorat de l'Université de Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd ; 2018.