
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie Département de Génie Electrique

Projet de Fin d'Etude

Pour l'obtention du diplôme de MASTER en
Electrotechnique

Option Automatismes Industriels

Thème

**Gestion de la production de l'énergie hybride éolienne-
photovoltaïque avec intégration au réseau électrique**

Préparé par:

HAMITUCHE Katia

TIZI Walid

Encadré par:

BABOURI Rabah

Année Universitaire:2020/2021

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail ,on tient à remercier dieux le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour achever ce travail.

On a l'honneur et le plaisir de présenter notre profonde gratitude et nos sincères remerciements aux staffs des enseignants qui ont transmis leurs connaissances durant notre parcours et membre de jury

Qui ont pris la peine de corriger notre travail.

*Nous adressons également nos chaleureux remerciements à notre cher encadreur Mr
BABOURI Rabah*

On remercie également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de notre travail, spécifiquement : nos chères parents, nos frères et sœurs.

DEDICACE

Je dédie ce travail

A mes chers parents

Ma raison d'être, ma raison de vivre,

*En signe d'amour, de reconnaissance, et de gratitude pour tous
les sacrifices dont ils sont faits preuve à mon égard*

*Aux membres de ma famille qui me comble de leur amour Aucun
mot, ni aucun signe ne pourront témoigner mon amour et ma
reconnaissance pour tous leurs soutiens
et à mon cher frère Zahir en témoignage du soutien
inébranlable que
vous m'avez apporté durant ces années*

A mes chers amis

Et toutes les personnes que j'aime.

TIZI Walid

DEDICACE

Je dédie ce travail

A mes chers parents

Ma raison d'être, ma raison de vivre,

*En signe d'amour, de reconnaissance, et de gratitude pour tous
les sacrifices dont ils sont faits preuve à mon égard*

*A mes frères Nazim et Islam qui me comble de leur amour Aucun
mot, ni aucun signe ne pourront témoigner mon amour et ma
reconnaissance pour tous leurs soutiens
et à ma chère sœur Farah en témoignage du soutien
inébranlable que
vous m'avez apporté durant ces années*

A mes chers amis

Et toutes les personnes que j'aime.

HAMITOUCHE Katia

Chapitre I Généralités sur l'énergie éolienne et photovoltaïque

I.1.Introduction.....	2
I.2.Energie solaire.....	2
I.2.1.Energie solaire thermique.....	3
I.2.2.Energie solaire photovoltaïque.....	4
I.2.3.Rayonnement solaire.....	4
I.2.3.1.Rayonnement direct.....	4
I.2.3.2.Rayonnement réfléchi (L'albédo).....	4
I.2.3.3.Rayonnement diffus.....	4
I.2.4.Systèmes photovoltaïques.....	5
I.2.4.1.Système photovoltaïque autonome.....	5
I.2.4.2.système photovoltaïque connecté au réseau de distribution électrique	6
I.2.5.Cellule photovoltaïque.....	7
I.2.5.1.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	7
1.3. Energie éolienne.....	8
I.3.1.Définition de l'énergie éolienne.....	8
I.3.2.Différentes types d'éolienne.....	9
I.3.3.Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	11
I.3.4.Elément constituant un aérogénérateur (à axe horizontal).....	11
I.3.5.Avantage et inconvénient de l'énergie éolienne.....	13
I.4.Hybridation des ressources éolienne et solaires.....	13
I.4.1.Architecture et composants d'un système hybride.....	14
I.4.1.1.Les architectures.....	14
I.4.1.2.Les composants.....	16

SOMMAIRE

I.5.structure de notre système étudié.....	16
I.6.Conclusion.....	17

Chapitre II

Modélisation d'un système hybride éolienne-photovoltaïque

Introduction.....	18
II.1.Modélisation d'un système photovoltaïque.....	18
II.1.1.Composition d'un système photovoltaïque.....	18
II.1.2.Cellules photovoltaïques.....	18
II.1.2.1.Modèle à une diode.....	18
II.1.2.2.Modèle à deux diodes.....	20
II.1.2.3.Module photovoltaïque.....	20
II.1.2.4.Générateur photovoltaïque (GPV).....	21
II.1.2.4.1. Association en série.....	22
II.1.2.4.2.Association en parallèle.....	23
II.1.2.5.Convertisseur.....	23
II.1.2.5.1.Convertisseur DC/DC.....	23
II.1.2.5.2.Convertisseur DC/AC (onduleur).....	24
II.1.2.6.Paramètres photovoltaïques.....	24
II.1.2.6.1.Courant de court-circuit (I_{cc}).....	25
II.1.2.6.2.Tension de circuit ouvert (V_{co}).....	25
II.1.2.6.3.Facteur de forme(FF)	26
II.1.2.6.4.Rendement(η).....	26

SOMMAIRE

II.1.2.7.Méthode de recherche du point de puissance maximale.....	26
II.2.Modélisation de la chaine de conversion éolienne.....	28
II.2.1.Description du système éolien.....	28
II.2.2.Modèle de la turbine.....	29
II.2.2.1.Modèle aérodynamique.....	29
II.2.2.2.Modèle des pales.....	29
II.2.2.3.Modèle du multiplicateur de vitesse.....	31
II.2.3.Technique d'extraction du maximum de puissance(MPPT).....	32
II.2.4.Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	33
II.2.4.1.Constitution de la MADA.....	33
II.2.4.2.Fonctionnement de la MADA.....	33
II.2.4.3.Avantages et inconvénients de la MADA.....	34
II.2.4.4.Hypothèse.....	35
II.2.4.5.Equations des tensions.....	36
II.2.4.6.Equations des flux	36
II.2.4.7.Equations mécanique.....	37
II.2.4.8.Modèle de la MADA dans le référentiel de Park.....	37
II.2.4.9.Equations des tensions.....	38
II.2.4.10.Equations des flux.....	38
II.2.4.11.Equation du couple électromagnétique.....	38
II.3.Modèle du convertisseur électronique de puissance.....	39
II.4.Elément de stockage.....	39
II.4.1.Batteries.....	39
II.4.2.Principe de fonctionnement des batteries.....	40

SOMMAIRE

II.4.3.Modèle Batterie.....	40
II.5.Conclusion.....	40

Chapitre III

Gestion du système hybride photovoltaïque-éolienne

III.1.Introduction.....	41
III.2.Les différents cas.....	41
III.3.Simulation.....	43
III.3.1.Circuit de gestion.....	44
III.3.2.Résultats de simulation et discussion.....	44
III.4.Conclusion.....	48

Liste des symboles

Notations

I. Cellule photovoltaïque

I: Intensité aux bornes du générateur.

I_d : Le courant de saturation de la diode.

I_{ph} : Photo courant, proportionnel à l'irradiation G, avec correction selon T.

I_{sh} : Le courant shunt.

E_{Sref} : Ensoleillement de référence.

T_{jref} : Température de référence.

P1, P2, P3: Paramètres constants.

T_a : Température ambiante.

N_{oct} : Condition de température nominale.

I_{sat} : Courant de saturation (A).

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

q: Charge de l'électron. (10^{-19}).

N: nombre de cellule.

E_g : Energie de gap.

P4: Paramètre constant.

I_{s1} et I_{s2} : Sont les courants de saturation de la première et la deuxième diode respectivement;

A: Facteur d'idéalité de la diode comprise entre 1 et 2.

II. Turbine :

v_m : La vitesse du vent (m/s).

ρ : masse volumique de l'air (1.225 Kg/m^3).

P_t : Puissance de la turbine éolienne.

p_v : Puissance du vent.

C_p : coefficient de puissance.

Liste des symboles

λ : vitesse spécifique.

R : Rayon des pales de l'éolienne.

Ω : La vitesse de rotation de l'éolienne (rad/s).

C_{pmax} : Coefficient de puissance maximale.

β : angle d'orientation des pales ($^{\circ}$).

C_t : couple de la turbine éolienne (N.m).

$c_{méc}$: Couple mécanique.

$\Omega_{méc}$: vitesse de la génératrice (rad/s).

G : rapport de multiplicateur adaptant la vitesse de la turbine à celle de la génératrice.

J_t : Inertie de la turbine (Kg /m^2).

J_m : Inertie de la génératrice.

II. MADA :

$v_{sa} \cdot v_{sb} \cdot v_{sc}$: Les tensions des phases statorique.

R_s : La résistance des phases statoriques.

$i_{sa} \cdot i_{sb} \cdot i_{sc}$: Les courants des phases statoriques.

$\varphi_{sa} \cdot \varphi_{sb} \cdot \varphi_{sc}$: Vecteur des flux totaux à travers les enroulements statoriques.

$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.

$[L_{ss}]$: Matrice des inductances statorique.

$[R_r]$: Matrice des résistances rotoriques.

$[L_{rr}]$: Matrice des inductances rotoriques.

J_m : Moment d'inertie totale ($Kg.m^2$).

Ω_m : vitesse mécanique de la MADA.

f_V : Coefficient de frottement visqueux de la MADA (N.m/rad. s).

C_m : Couple moteur appliqué sur la MADA(N.m).

C_{em} : Couple magnétique développé par la MADA (N.m).

M_{so} : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

Liste des symboles

θ : Position angulaire du rotor par rapport au stator ($^{\circ}$).

$p(\theta)$: Matrice de transformation de Park.

$[p(\theta)]^{-1}$: Matrice de transformation de Park inverse.

$[V_{dqo}]$: Matrice des tensions statoriques dans les axes (d, q, o) (V).

V_{sd}, V_{sq} : Tensions statoriques dans le repair (d, q, o) de Park (d, q) (V).

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tensions de références.

i_{red} : Courant redressé (A).

i_a, i_b, i_c : Courant à l'entrée de redresseur (A).

S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

III. redresseur :

V_{ar}, V_{br}, V_{cr} : Tensions de sortie du redresseur (V).

V_{dc} : Tensions de bus continu (V).

S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondantes à l'état de l'amorçage.

III. Batterie

U_{soc} : État de charge de la batterie.

U_{soci} : État de charge initiales de la batterie.

Liste des figures

Figure I.1: formes d'énergie solaire.....	3
Figure I.2: principe d'un chauffage d'eau solaire.....	3
Figure I.3: principe de production d'énergie électrique grâce à l'énergie photovoltaïque	4
Figure I.4: types de rayonnements solaires.....	5
Figure I.5: système photovoltaïque isolé.....	6
Figure I.6: système Connecté au réseau.....	6
Figure I.7: schéma équivalent simplifié d'une cellule photovoltaïque.....	7
Figure I.8: Principe de la conversion photovoltaïque.....	8
Figure I.9: Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	9
Figure I.10: Configuration à axe horizontal.....	9
Figure I.11: Eolienne de type Darrieus et Savonius.....	11
Figure I.12: constitution d'une éolienne à axe vertical.....	12
Figure I.13 : Architecture d'un système hybride bus CC/CA.....	14
Figure I.14 : Architecture d'un système hybride bus CC.....	15
Figure I.15 : Architecture d'un système hybride bus CC.....	15
Figure I.16 : Structure de la chaîne hybride (éolienne, photovoltaïque).....	17
FigureII.1: Circuitélectriqueéquivalentd'unecellulephotovoltaïqueadeuxdiodes...	20
Figure II.2: module photovoltaïque.....	21
FigureII.3: Caractéristiquesrésultantesd'ungroupementdeNscellulesensérie.....	22
FigureII.4: caractéristiquerésultanted'ungroupementenparallèleNpcellules.....	23
Figure II.5: symbole convertisseur DC/DC.....	24
Figure II.6: symbole convertisseur DC/AC.....	24
Figure II.7: Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule PV	25

Liste des figures

Figure II.8 : Recherche du PPM par la méthode (P&O).....	27
Figure II.9. Système de conversion éolienne à base de la MADA.....	29
Figure II.10. Schéma explicatif de la turbine éolienne.....	29
Figure II.11. Coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative.....	31
Figure II.12. Modèle mécanique simplifié de la turbine.....	31
Figure II.13: Schéma général d'un système utilisant une MADA alimenté par un seul Convertisseur statique	33
Figure II.14: Représentations partiale de la machine asynchrone dans le repère triphasé	35
Figure II.15. Représentation de la machine dans le repère diphasé.....	37
Figure II.16. Schéma du redresseur MLI.....	39
Figure III.1: Organigramme d'algorithme de gestion.....	42
Figure III.2: schéma simulink de la simulation.....	43
Figure III.3: schéma simulink du circuit de gestion.....	44
Figure III.4: Puissance de mandée par la charge.....	45
Figure III.5: Puissance fournie par le système éolien.....	45
Figure III.6: Puissance fournie par le système photovoltaïque.....	45
Figure III.7 : Etat de charge de la batterie.....	46
Figure III.8: La puissance hybride fournie.....	46
Figure III.9 : Allures des Puissances.....	46
Figure III.10: Allure de la puissance de charge de la batterie.....	47
Figure III.11: Allure de la puissance de décharge de la batterie.....	48

Introduction générale

La production d'énergie électrique est un défi de grande importance pour les années avenir. Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que ceux des pays en voie de développement ne cessent de ce multiplié. Cette production a triplé pendant 60 ans.

Après la découverte du charbon, pétrole et le gaz. L'homme a exploité ces ressources comme si elles étaient inépuisables. Depuis quelque dizaine d'années les approvisionnements énergétiques sont devenus un problème, non seulement en raison des difficultés croissantes liées aux produits pétroliers, mais aussi parce qu'il est aujourd'hui nécessaire d'admettre qu'à l'échelle de notre planète les sources énergétiques, fossiles ou autres sont limités. La consommation de ces énergies provoque en premier lieu l'augmentation de la pollution.

Aujourd'hui, il est évident que les besoins mondiaux en énergie sont comblés en grande partie par ces énergies fossiles. Or, il a été prouvé que la consommation massive de ces types d'énergies a un effet néfaste sur la planète (réchauffement climatique). Un des inconvénients de ceci se remarque par la désertification de plusieurs régions dans le monde. Une des meilleures idées pour contrer la désertification est l'utilisation de sources d'énergies renouvelable.

L'inconvénient de la production d'électricité à base d'énergie renouvelable, c'est la production non continue de l'énergie électrique en plus de la puissance qui est variable et non garantie. Ce problème peut être résolu par un couplage entre les sources d'énergies et la formation d'un système dit hybride.

Les systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelable comme celui du photovoltaïque-éolien peut être une solution pour garantir les différents besoins journaliers de la population, l'utilisation de ce système consiste en l'exploitation optimale de deux source naturel ainsi cette complémentarité d'énergie est accompagnée par un système de stockage.

La gestion et le contrôle de l'énergie des systèmes hybrides sont nécessaires pour avoir une énergie électrique continue à faible coût de production.

Le but de notre travail est d'assurer la gestion de l'énergie fournie par le système

Photovoltaïque-éolien connecté au réseau et au système de stockage.

Le premier chapitre, sera consacré à des généralités sur les énergies renouvelables ou nous allons décrire plus précisément la structure, les composants et le principe de fonctionnement de nos deux sources d'énergie (photovoltaïque et éolienne).

Le second chapitre, nous procéderons à une modélisation mathématique de différentes parties constituant les systèmes à étudier.

Chapitre I

Généralités sur l'énergie éolienne et photovoltaïque

I.1 Introduction

La production classique de l'énergie électrique se fait, généralement, à partir des sources d'énergie fossile, (gaz, charbon...).

La limitation de l'énergie fossile et la forte demande d'énergie dans le monde on conduit les chercheurs a développé une nouvelle forme d'énergie dite « énergies renouvelable ».

Les sources d'énergie renouvelable peuvent être considérées comme inépuisables à l'échelle humaines, puisqu'elles utilisent des flux énergétiques naturels (soleil, eau, vent...) et une autre raison de choix de ce type de centrale est la lutte contre les émissions polluantes des centrales électriques à base d'énergie fossile qui sont la cause de nombreux phénomènes néfaste comme le trou d'ozone, le réchauffement climatique globale.

Ce chapitre est consacré à l'étude des structures des systèmes hybrides, d'énergie renouvelable photovoltaïque, et l'éolienne.

I.2. Energie solaire

La source utilisée très récemment est l'énergie solaire. En réalité cette énergie telle que l'utilisation de la lumière ou du soleil est beaucoup plus ancienne, c'est l'énergie transmise par le soleil sous la forme de lumière et de chaleur. Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables.

Grâce à des centrales photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, on peut transformer cette énergie en électricité qu'on utilise quotidiennement, en sachant que l'énergie solaire est considérée comme pure, propre, gratuite et elle présente la plus importante source d'énergie malgré la distance entre le soleil et la terre [1].

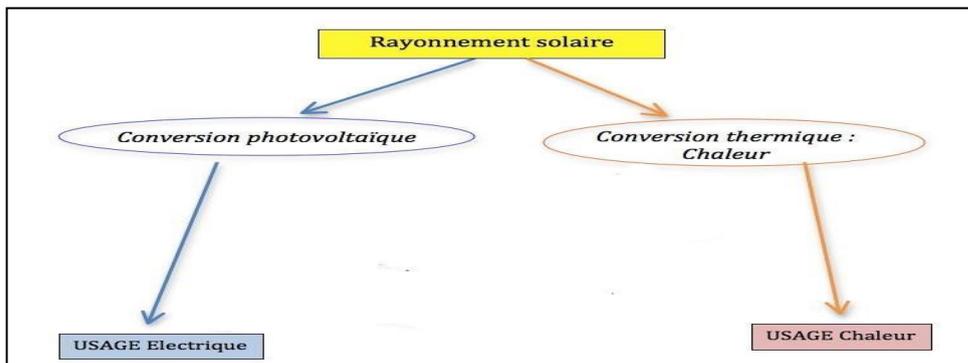


Figure I.1: formes d'énergie solaire

I.2.1 Energie solaire thermique

Elle peut être utilisée pour chauffer des bâtiments ou l'eau domestique qui y est utilisée, grâce à des chauffe-eaux solaires. Dans ces cas précis, son usage est qualifié de direct, ce qui signifie qu'il peut également être indirect. En effet, l'énergie solaire thermique peut aussi être utilisée pour produire de la vapeur d'eau (ou d'un autre liquide) qui peut alors servir, par exemple, à faire tourner un alternateur, et donc à produire de l'énergie électrique. Ce système est notamment utilisé dans les centrales solaires thermiques [1].

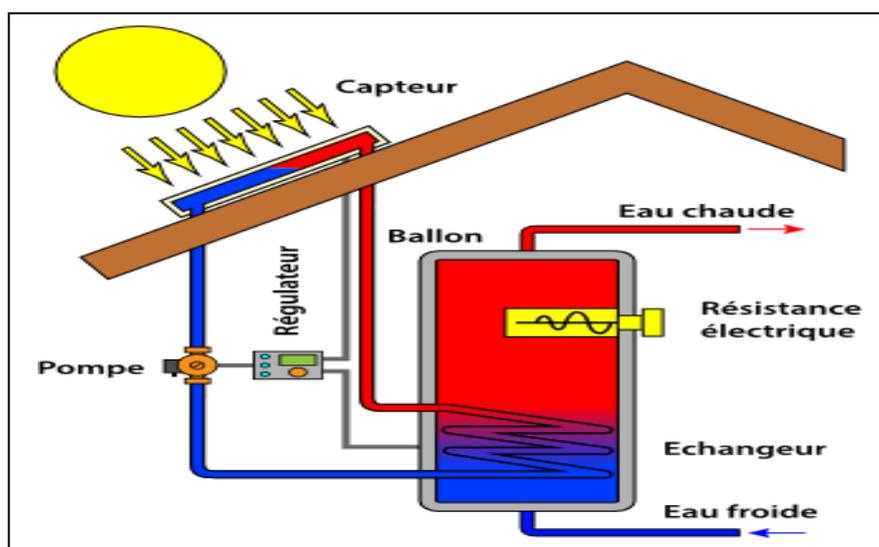


Figure I.2: principe d'un chauffage d'eau solaire [1].

I.2.2 Energie solaire photovoltaïque

On désigne par l'énergie solaire photovoltaïque la transformation du rayonnement solaire en électricité et se fait par l'intermédiaire d'un matériau semi-conducteur comme le silicium. L'élément de base est la cellule-photovoltaïque et le produit commercial s'appelle un module photovoltaïque, et grâce à un onduleur on peut convertir le courant continu donné par les panneaux solaires en courant alternatif pour l'usage quotidien [2].

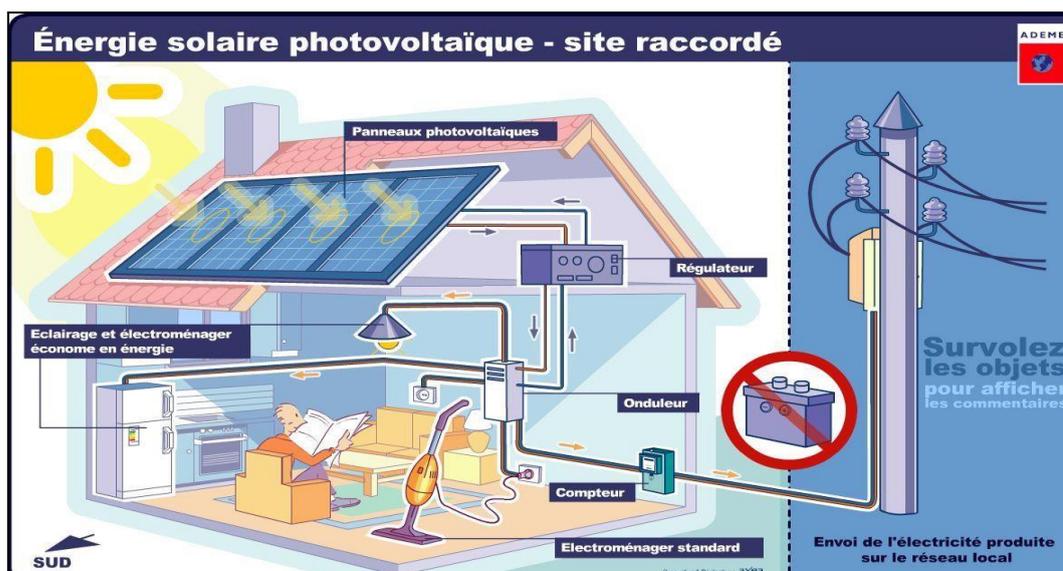


Figure I.3: principe de production d'énergie électrique grâce à l'énergie photovoltaïque [2].

I.2.3. Rayonnement solaire

I.2.3.1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil. Il dépend de l'épaisseur de l'atmosphère que la radiation solaire doit traverser et de l'inclinaison des rayons par rapport au sol [2].

I.2.3.2. Rayonnement réfléchi (L'albédo)

Ce rayonnement est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface, Il dépend de l'albédo du sol et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige). Il peut être mesuré par un "albédo mètre" [3].

I.2.3.3. Rayonnement diffus

Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Ainsi, par ciel serein, il constitue 20% de l'énergie globale. Par ciel couvert, il correspond à la totalité de l'énergie reçue au sol [3].

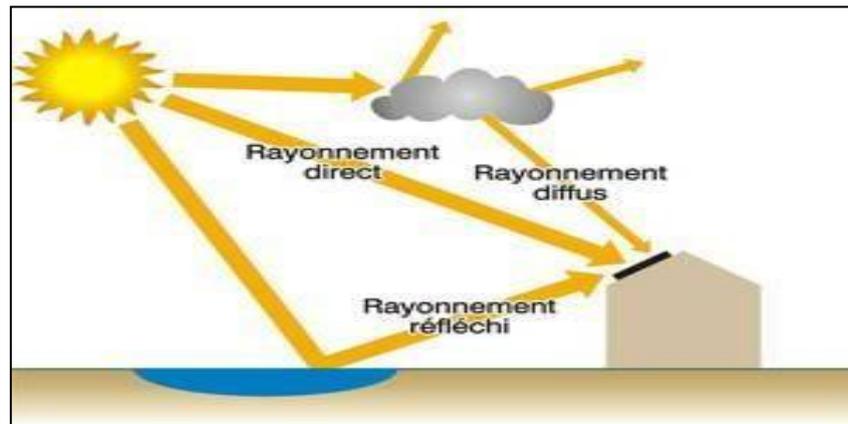


Figure I.4: types de rayonnements solaires [3].

I.2.4. Systèmes photovoltaïques

Nous distinguons deux types de systèmes photovoltaïques à savoir :

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

I.2.4.1 photovoltaïque autonome

C'est un système dont l'énergie produite est utilisée dans un site isolé et ayant un système de stockage d'énergie. L'énergie produite par les modules est 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) [4].

● Avantages

- Avoir accès à l'électricité dans des endroits isolés non raccordés au réseau ;
- Produire et consommer sa propre énergie propre ;
- Ne pas dépendre du distributeur d'électricité pour le rachat de l'électricité produite ;
- Avoir la possibilité de tester une petite installation à faible coût.

● Inconvénients

- La nécessité d'un dimensionnement approprié de son système afin de ne jamais manquer d'électricité ;

- La nécessité de maîtriser sa consommation électrique ;
- Le coût des batteries.

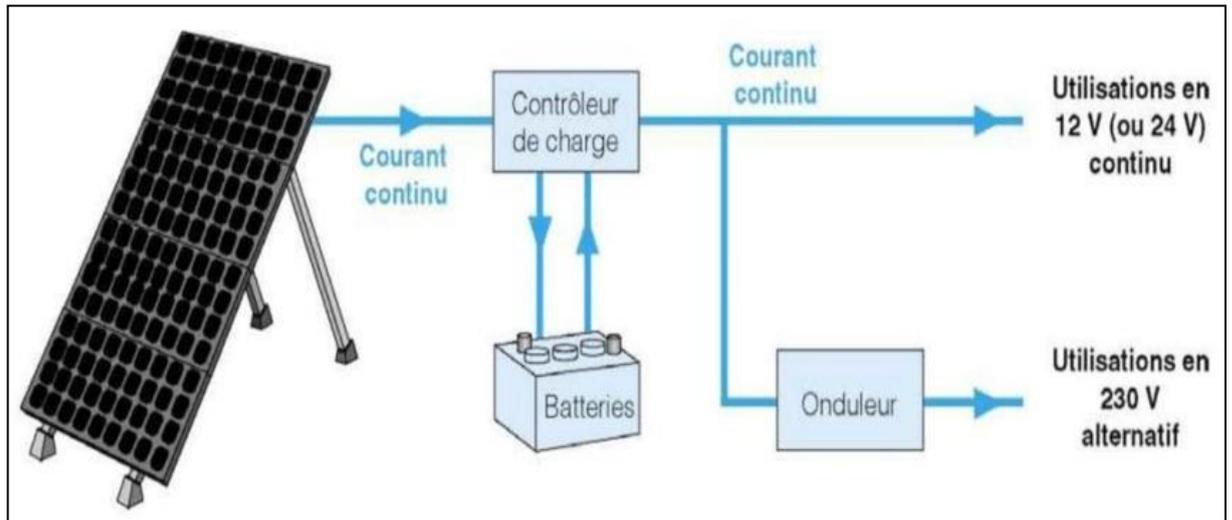


Figure I.5 : système photovoltaïque isolé [4].

I.2.4.2. Système photovoltaïque connecté au réseau de distribution électrique

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau (figure I.6) sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ceux systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau [5].

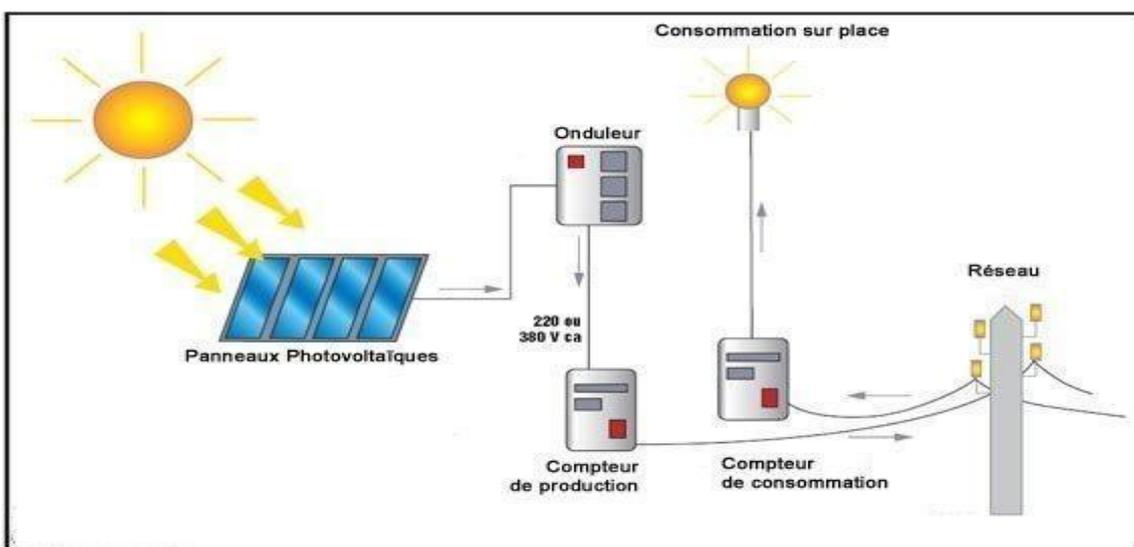


Figure I.6 : système connecté au réseau [5].

I.2.5. Cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), génère de l'électricité. C'est l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu dépend de la lumière incidente. L'électricité produite dépend de l'éclairement, elle produit un courant continu. Les cellules photovoltaïques les plus communes sont constituées de semi-conducteurs, essentiellement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs. Elles se présentent le plus souvent sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté, prises en sandwich entre deux contacts métalliques, pour une épaisseur de l'ordre du millimètre. Les cellules sont fréquemment réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires, selon la puissance recherchée [6].

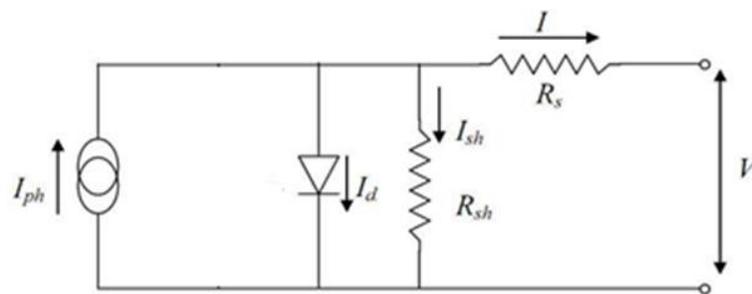


Figure I.7 : schéma équivalent simplifié d'une cellule photovoltaïque [5].

I.2.5.1. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement *dopée de type n* et *dopée de type p*. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau *n* diffusent dans le matériau *p*. La zone initialement dopée *n* devient chargée positivement, et la zone initialement dopée *p* chargée négativement.

Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone *n* et les trous vers la zone *p*. Une jonction (dite *p-n*) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones *n* et *p*, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone *n* rejoignent les trous de la zone *p* via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule [5].

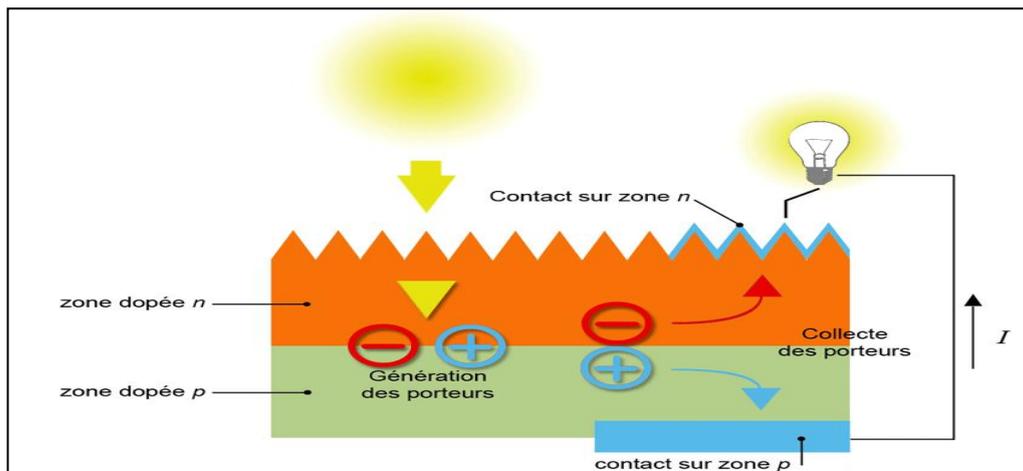


Figure I.8 : Principe de la conversion photovoltaïque [7].

. Dopage de type N

Le dopage de type N consiste à ajouter un atome de phosphore au sein de la structure cristalline du silicium. Le phosphore disposant de cinq électrons de sa couche électronique externe va s'associer avec quatre atomes de silicium, laissant ainsi libre un électron, ce qui a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative [7].

. Dopage de type P

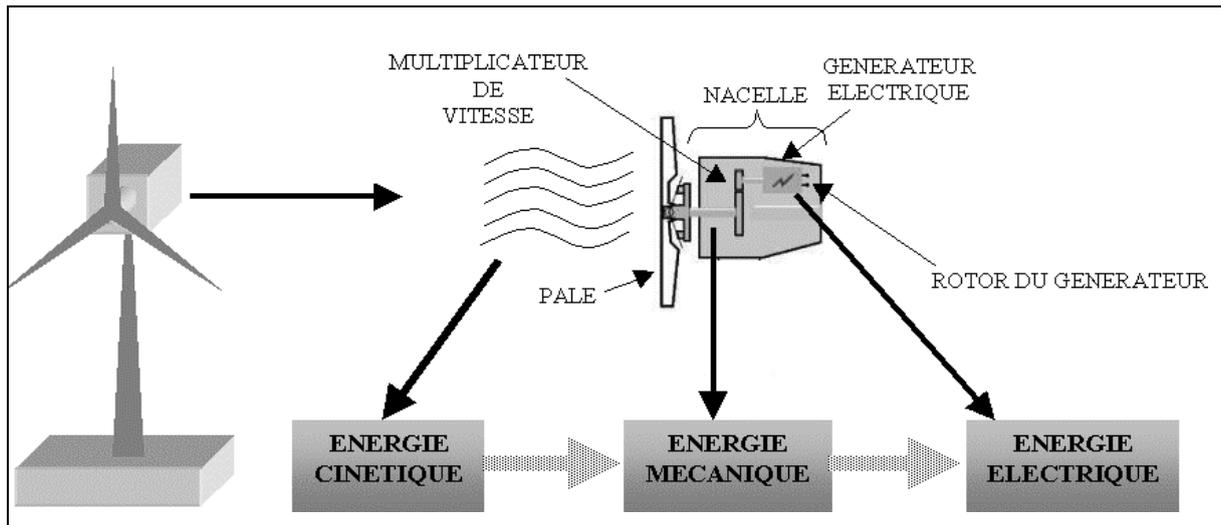
Le dopage de type P consiste à ajouter un atome de bore au sein de la structure cristalline du silicium. Le bore disposant de trois électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec quatre atomes de silicium, laissant ainsi libre un trou, cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale positive [7].

I.3 Energie éolienne

I.3.1 Définition de l'énergie éolienne

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elle est utilisée pour produire l'électricité, appelée énergie éolienne. Les éoliennes produisant de l'électricité sont appelées aérogénérateurs, tandis que les éoliennes qui pompent directement de l'eau sont parfois dénommées éoliennes de pompage ou pompe à vent. Une forme ancienne d'éolienne est le moulin à vent.

Les termes « centrale éolienne », « parc éolien » ou « ferme éolienne » sont utilisés pour décrire les unités de production groupées, installées à terre ou en mer [8].



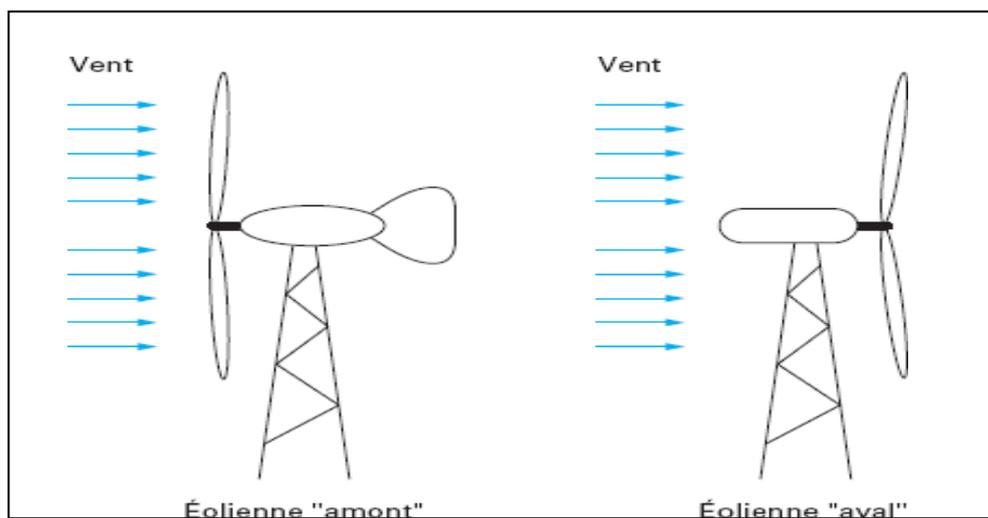
FigureI.9 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [8].

I.3.2 Différent types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles [9]:

a) Eoliennes à axe horizontal

Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent. Dans la majorité des cas, elle fonctionne avec une hélice qui est composée de 2 ou 3 pales (les éoliennes à axe horizontal à 3 pales sont de loin les plus répandues). Toutes les éoliennes commerciales sont construites sur ce modèle.



FigureI.10 : Configuration à axe horizontal [8]

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait que :

- ✓ Leurs rendements élevés est supérieurs à celui de toutes les autres machines.
- ✓ Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multiples pour le pompage de l'eau.
- ✓ Elles sont de conception simple.

b) Eoliennes à axe vertical

Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et Sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent L'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc Elles sont facilement accessibles. Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation. Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : Savonius et Darrieus

- **Aérogénérateur Type Savonius**

L'aérogénérateur de type Savonius, constitués schématiquement de deux ou plusieurs godets demi-cylindriques légèrement désaxés présente un grand nombre d'avantages. Outre son faible encombrement, qui permet d'intégrer l'éolienne aux bâtiments sans en dénaturer l'esthétique, il est peu bruyant. Il démarre à de faibles vitesses de vent et présente un couple élevé quoique variant de façon sinusoïdale au cours de la rotation. Il existe une variante, appelée Savonius hélicoïdal (ou twisted Savonius en anglais), qui permet d'augmenter le rendement en proposant de façon continue une surface d'accroche au vent. Au lieu d'avoir des demi-cylindres verticaux, ceux-ci sont tordus de façon hélicoïdale autour de l'axe de rotation. Du fait de leur faible encombrement au sol, de leur bon rendement et du besoin d'un très faible vent, ils sont utilisés en ville sur les toits des maisons [10].

- **Aérogénérateur de Type Darrieus**

L'aérogénérateur de type Darrieus repose sur l'effet de portance subi par un profil soumis à l'action d'un vent relatif ; effet qui s'exerce sur l'aile d'un avion. Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensités variables selon l'orientation de ce profil. La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif [10].

L'éolienne à axe vertical est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée. S vitesses de vent de l'ordre de 2m/s[9].



Éolienne de type Savonius



Éolienne de type Darrieus.

Figure I.11 : Eolienne de type Darrieus et Savonius [9].

I.3.3. Principe De Fonctionnement

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique .ce conversion se fait en deux étapes:

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée, autour du profil, une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [9].

I.3.4. Eléments constituant un Aérogénérateur (à axe horizontal)

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre du rotor. Cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électrique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou utilisée par des charges isolées [8]

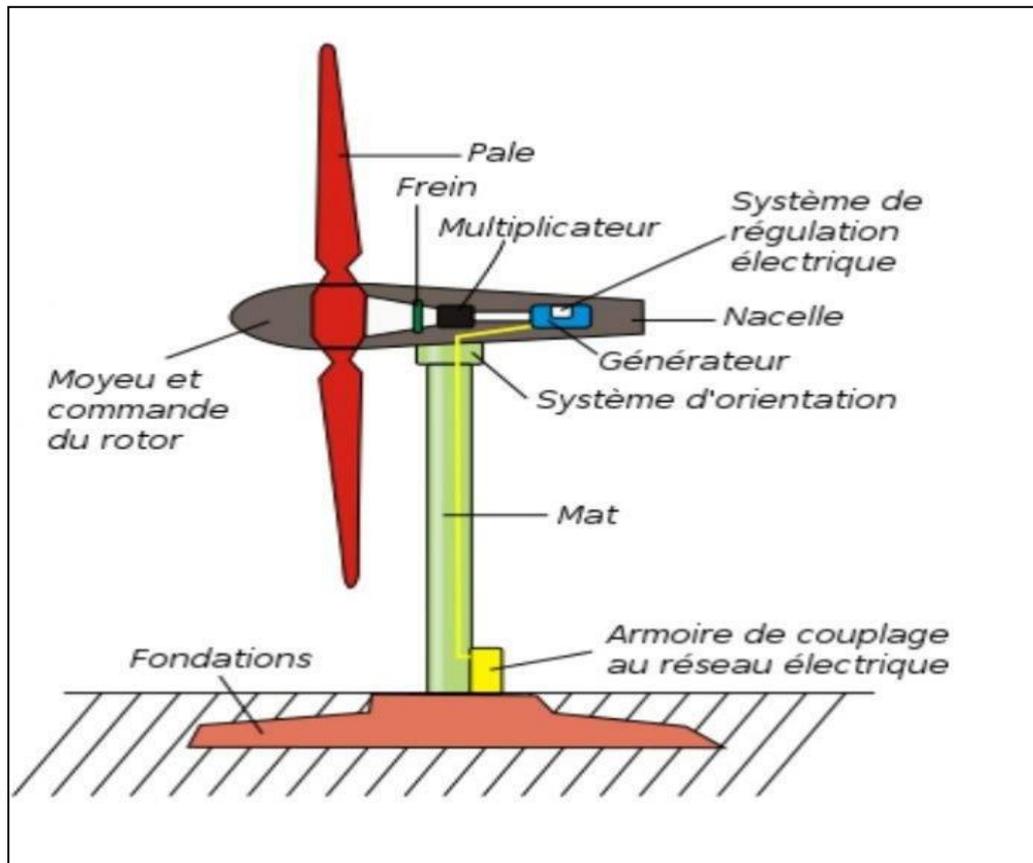


Figure I.12: constitution d'une éolienne à axe vertical [9].

1. **Les pales** : La pale est une partie très importante dans l'éolienne. Son rôle est de capter l'énergie du vent et par son mouvement rotatif transforme cette énergie en énergie cinétique.
2. **Le moyeu** : permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
3. **L'arbre primaire**: relie les pales au multiplicateur.
4. **Multiplicateur** : permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse.
5. **L'arbre secondaire** : transmet l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à dis que mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
6. **Le générateur électrique** : assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
7. **Le mât** : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante où plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales
8. **Système d'orientation de la nacelle** : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de laver rouillé dans l'axe du vent grâce à un frein.

9. **Système de refroidissement** : il peut être de l'air, de l'eau ou de l'huile et il est destiné au multiplicateur et à la génératrice.
10. **Outils de mesure du vent** : c'est une girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.
11. **Système de contrôle électronique** : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.
12. **Transformateur** : se trouve au pied du mât [8].

I.3.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne [11]

a) Les avantages :

- ✓ Forme d'énergie indéfiniment durable et propre ;
- ✓ Ne nécessite aucun carburant;
- ✓ Ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs ;
- ✓ Préserve les ressources hydriques;
- ✓ Ne produit pas d'émissions nocives ;
- ✓ Entièrement renouvelable,
- ✓ Hautement fiable et très efficace ;
- ✓ Qualifiée comme source la plus économique.

b) Les inconvénients:

- ✓ Rendement faible;
- ✓ Fluctuation du vent;
- ✓ Bruit;
- ✓ Dangereux pour les oiseaux.

I.4 Hybridation des ressources éoliennes et solaires

Un système hybride à sources d'énergie renouvelable est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une des sources au moins est renouvelable, c'est-à-dire, associer au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergies classiques, et au moins une source d'énergie renouvelable. L'hybridation, [12].

Le système hybride doit notamment:

- Assurer en tout temps l'énergie suffisante demandée par la charge et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable.
- Compter sur une gestion automatisée des sources d'énergie par rapport aux conditions présentes afin de garantir la stabilité en tout temps [13]

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Ils existent des classifications par rapport:

a) Au régime du fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe on trouve les systèmes hybrides travaillant en parallèle avec le réseau électrique appelé aussi connectés réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays. Le deuxième groupe est les Systèmes hybrides autonomes qui doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique [12].

b) A la structure du système hybride

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système. Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage.

La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectriques ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources [12].

I.4.1 Architecture et composants d'un système hybride

I.4.1.1 Architecture d'un système hybride

a) Configuration bus CC/CA

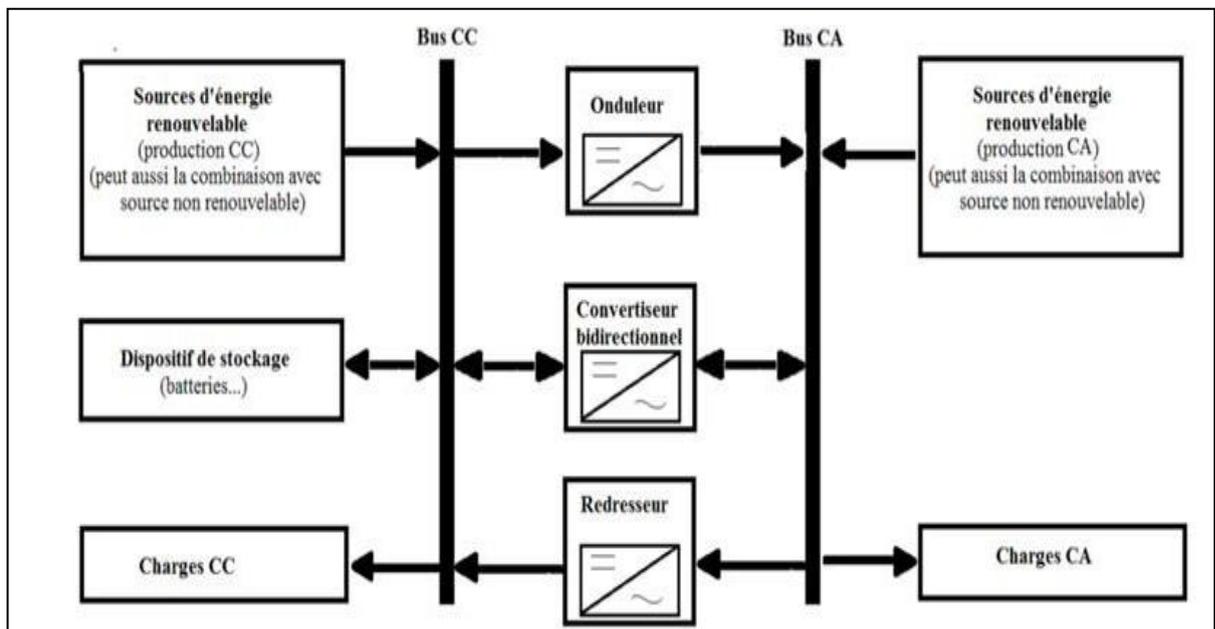


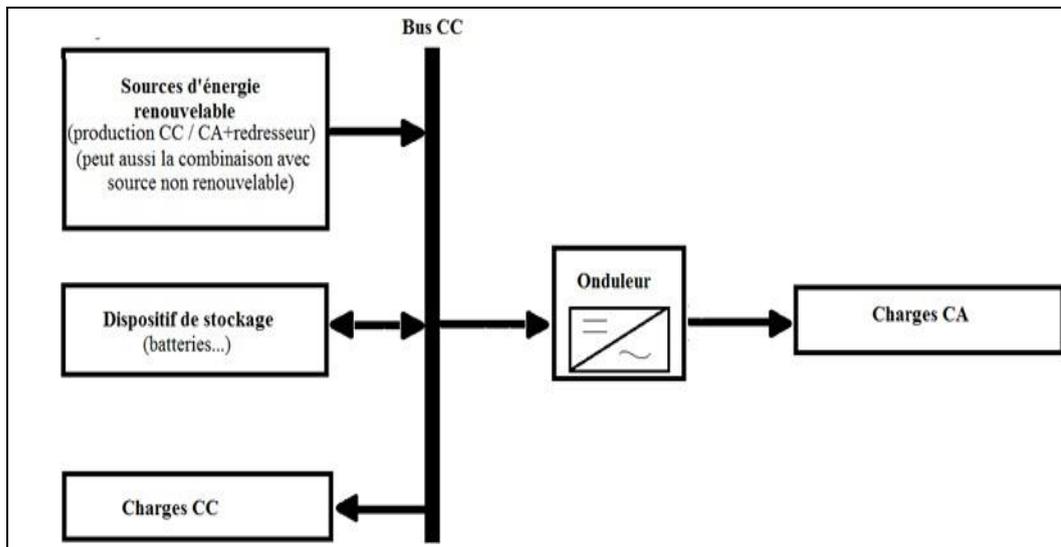
Figure I.13: Architecture d'un système hybride bus CC/CA

Les sources d'énergies renouvelables peuvent être connectées au bus à CA (Courant alternatif) ou à CC (Courant continu) en fonction de l'énergie produite (CA ou CC). L'interconnexion entre les deux bus peut être réalisée par l'intermédiaire de l'électronique de

puissance avec des onduleurs, des redresseurs ou des convertisseurs bidirectionnels pour le dispositif de stockage [13].

b) Configuration bus CC

La puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus CC et les systèmes de conversion d'énergie à CA fournissent d'abord leurs puissances à un redresseur pour être convertie en CC [13].



La puissance est centralisée sur un bus CA, les systèmes à CC fournissent d'abord leurs puissances à un onduleur pour être convertie en CA.

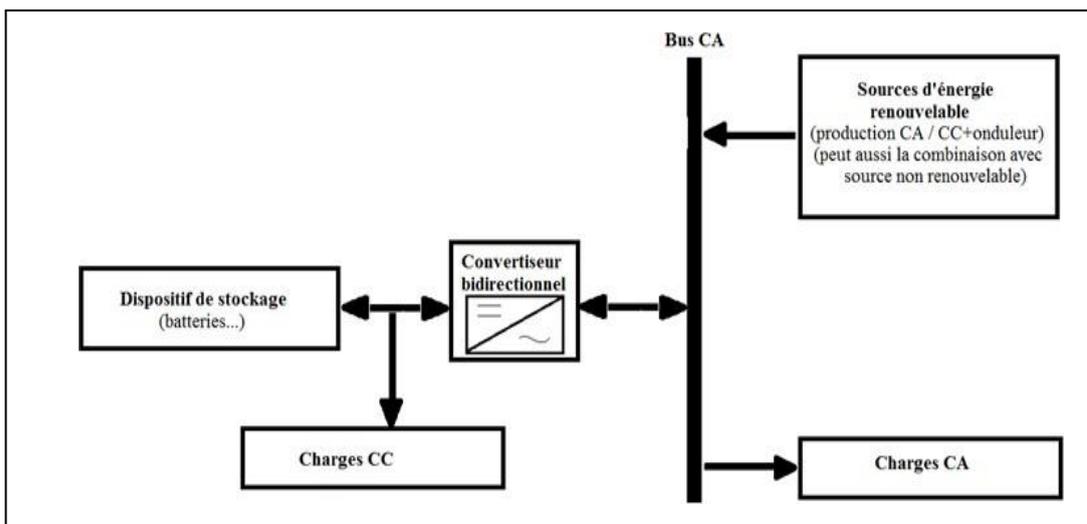


Figure I.15: Architecture d'un système hybride bus CC [8].

I.4.1.2 Composants d'un système hybride

Les principaux composants d'un système hybride sont présentés ci-dessus dans les schémas d'architecture:

a) Sources d'énergies renouvelables

Ces sources peuvent être des éoliennes, du photovoltaïque, de l'énergie hydraulique, de la géothermie, de l'énergie contenue dans l'hydrogène (piles à combustibles) ou une combinaison entre elles ou avec une énergie non renouvelable (fossile).

b) Dispositif de stockage

Généralement, des batteries assurent le stockage de l'énergie électrique, mais il existe d'autres options telles que le stockage inertiel, le stockage sous forme d'air comprimé et le stockage d'hydrogène [13].

c) Charges

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à courant continu CC (ex: moteur à courant continu) et à courant alternatif CA (ex :moteur asynchrone et synchrone).

d) Convertisseurs

Les convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les systèmes hybrides : les redresseurs, les onduleurs, les hacheurs [13].

e) Système de supervision

C'est un composant auxiliaire, mais la plupart des systèmes hybrides utilisent ces systèmes pour la supervision de l'état des différents composants du système.

Le système hybride de production d'énergie électrique est celui qui combine et exploite au moins deux sources d'énergies renouvelable comme (photovoltaïque, éolienne) pour la production de l'énergie [13].

I.5. Structure de notre système étudié

Ce système hybride de production d'énergie électrique est celui qui combine et exploite deux sources d'énergies renouvelables (photovoltaïque, éolienne) pour la production de l'énergie, comme représenté sur la figure suivante

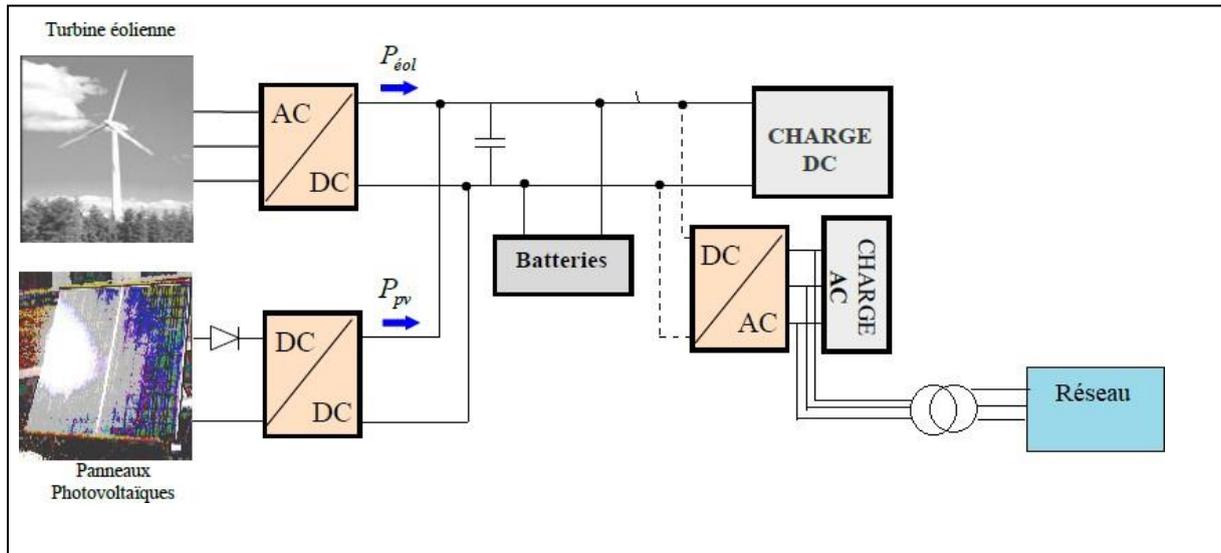


Figure I.16 : Structure de la chaîne hybride (éolienne , photovoltaïque) [11].

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu que les systèmes hybrides sont des systèmes à énergie renouvelable (au moins une source d'énergie renouvelable), où nous avons présenté leur architecture et les deux sources d'énergie renouvelable : solaire photovoltaïque et éolienne présentant leur notion de conception, éléments constitutif et principe de fonctionnement des deux systèmes.

Chapitre II

Modélisation d'un système hybride éolienne-photovoltaïque

Introduction :

Dans le but de comprendre le fonctionnement de notre système hybride (photovoltaïque-éolien), On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de ce dernier.

Nous commençons par présenter le modèle de la chaîne de conversion photovoltaïque rayonnement solaire sur un plan incliné, générateur photovoltaïque.

Ensuite la modélisation la chaîne de conversion éolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation MADA, tels que la turbine éolienne et ses parties mécaniques, puis la MADA.

Tous les modèles ont été développés en vue d'une exploitation par le logiciel Matlab/Simulink, qui permet de mettre en place assez rapidement des modèles ainsi que les lois de commande associées.

II.1. Modélisation d'un système photovoltaïque

II.1.1 Composition d'un système photovoltaïque

Les principaux composants d'un système photovoltaïque sont les cellules photovoltaïques qui en les assemblant forment un module, générateur photovoltaïque, régulateur de charge (DC/DC ou DC/AC tout dépend de la charge) .

II.1.2 Modélisation des cellules photovoltaïques

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant plus ou moins de détails. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque [3].

II.1.2.1 Modèle à une diode

Le modèle à une diode est le modèle le plus cité dans la littérature. Il est défini par le même schéma électrique équivalent de la figure I.7. Ce modèle tient compte non seulement des pertes en tension exprimée par la résistance série R_s mais aussi des fuites de courants exprimées par une résistance parallèle R_{sh} . C'est le modèle sur lequel s'appuient les

constructeurs en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires. Ils sont aussi considérés satisfaisants et même une référence pour les constructeurs pour cataloguer typiquement les modules solaires [3].

Le courant généré par le module est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.1})$$

Avec:

I : Intensité aux bornes du générateur ;

I_d : Le courant de saturation de la diode ;

I_{ph} : Photo courant , proportionnel à l'irradiation G, avec correction selon T ;

I_{sh} : Le courant shunt.

$$I_{ph} = P_1 E_s [1 + P_2 (E_s - E_{sref}) + P_3 (T_j - T_{jref})] \quad (\text{II.2})$$

Avec

$E_{sref} = 1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$: Ensoleillement de référence.

$T_{jref} = 25^\circ\text{C}$: Température de référence.

P1, P2, P3 : Paramètres constants.

$$T_j = T_a + E_s \left(\frac{N_{oct} - 20}{800} \right) \quad (\text{II.3})$$

Avec :

T_a : Température ambiante.

N_{oct} : Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (45°C).

$$I_d = I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q(V + R_s * I)}{N * A * k * T_j} \right) \right] \quad (\text{II.4})$$

Avec :

I_{sat} : Le courant de saturation (A).

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

q : Charge de l'électron = $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$.

N : nombre de cellule.

$$I_{sat} = P_4 T_j^3 \exp \left(\frac{E_g}{K * T_j} \right) \quad (\text{II.5})$$

Avec :

E_g : Energie de gap.

P_4 : Paramètre constant

$$I_{sh} = \frac{V}{R_{sh}} \quad (\text{II.6})$$

Nous pouvons alors écrire l'équation finale

$$I = P_1 E_s \left[1 + P_2 (E_s - E_{sref}) + P_3 (T_j - T_{jref}) \right] - P_4 T_j^3 \exp\left(\frac{E_g}{K \cdot T_j}\right) * \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s * I)}{N \cdot A \cdot k \cdot T_j}\right) - 1 \right] - \frac{V}{R_{sh}} \quad (\text{II.7})$$

II.1.2.2. Modèle à deux diodes

Ce modèle est dit le plus proche du comportement réel de la cellule solaire, du fait qu'il tient compte du mécanisme du transfert des charges à l'intérieur de la cellule, la diode supplémentaire permet de reproduire dans le schéma équivalent les effets chimiques de recombinaison des électrons. Dans une cellule solaire réelle, la recombinaison représente une perte considérable, qui ne peut être adéquatement modélisés en utilisant une seule diode. L'examen de cette perte entraîne un modèle plus précis connu par le modèle a deux diodes. Toutefois, l'inclusion de la diode supplémentaire augmente les paramètres a sept (nouveaux paramètres: I_{d1} , I_{d2}). Le principal défi est maintenant d'estimer les valeurs de tous les paramètres du modèle, tout en maintenant un effort de calcul raisonnable [3].

Le modèle a deux diodes est présenté par la figure ;

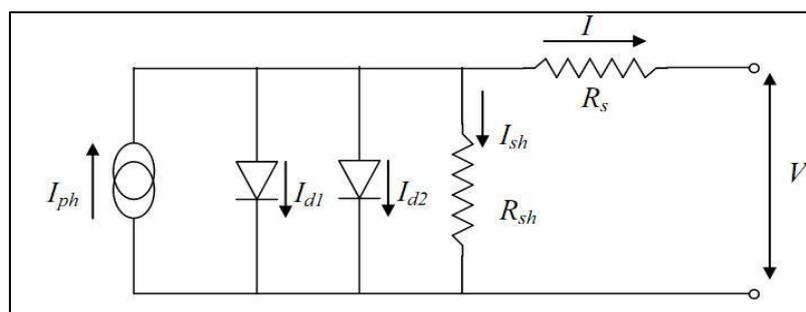


Figure II.1: Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque a deux diodes.

Le courant fourni par la cellule est donne par la relation :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp\left[\frac{q(V + R_s \cdot I)}{A \cdot K \cdot T_j}\right] - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp\left[\frac{q(V + R_s \cdot I)}{2A \cdot K \cdot T_j}\right] - 1 \right] - \frac{(V + R_s \cdot I)}{R_{sh}}$$

Avec :

I_{s1} et I_{s2} : Sont les courants de saturation de la première et la deuxième diode respectivement;

A : Facteur d'idéalité de la diode compris entre 1 et 2 .

II.1.2.3. Module photovoltaïques

Un module solaire photovoltaïque (ou panneau solaire photovoltaïque) est un panneau constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles électriquement par un fins ruban métallique (cuivre étamé).

Voilà un module après la constitution :

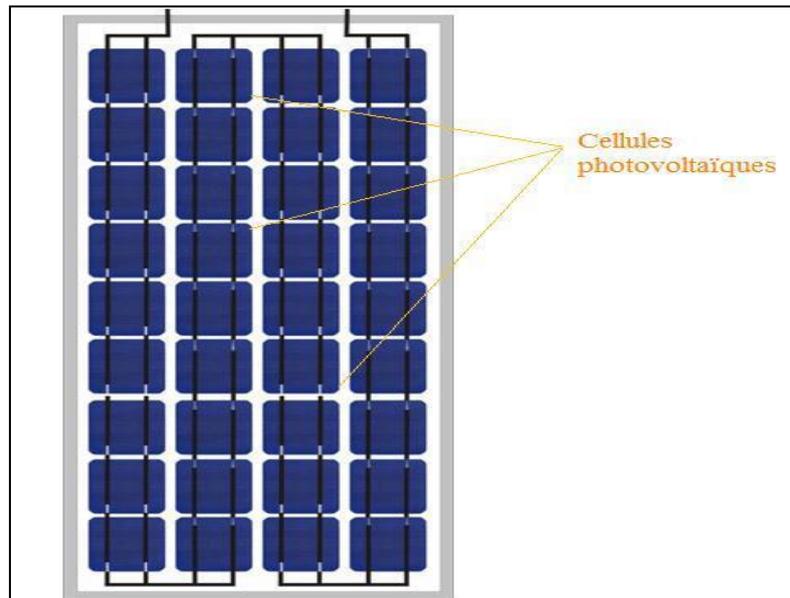


Figure II.2 : module photovoltaïque

II.1.2.4. Générateur photovoltaïque (GPV)

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour N_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes N_p en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par [7]:

$$P = N_s \cdot V_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

N_s : nombre de cellule en série ;

N_p : nombre de cellule en parallèle ;

P : la puissance disponible en sortie du générateur photovoltaïque ;

V_{pv} : la tension a la sortie du générateur photovoltaïque ;

I_{pv} : le courant de sortie du générateur photovoltaïque.

II.1.2.4.1 Association en série

Une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. On peut résumer les caractéristiques électriques d'une association série de N_s cellules par les équations [14]:

$$V_{co}(N_s) = N_s \cdot V_{co} \text{ et } I_{cc}(N_s) = I_{cc} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

V_{co} : la tension du circuit ouvert

Les caractéristiques de cette association sont :

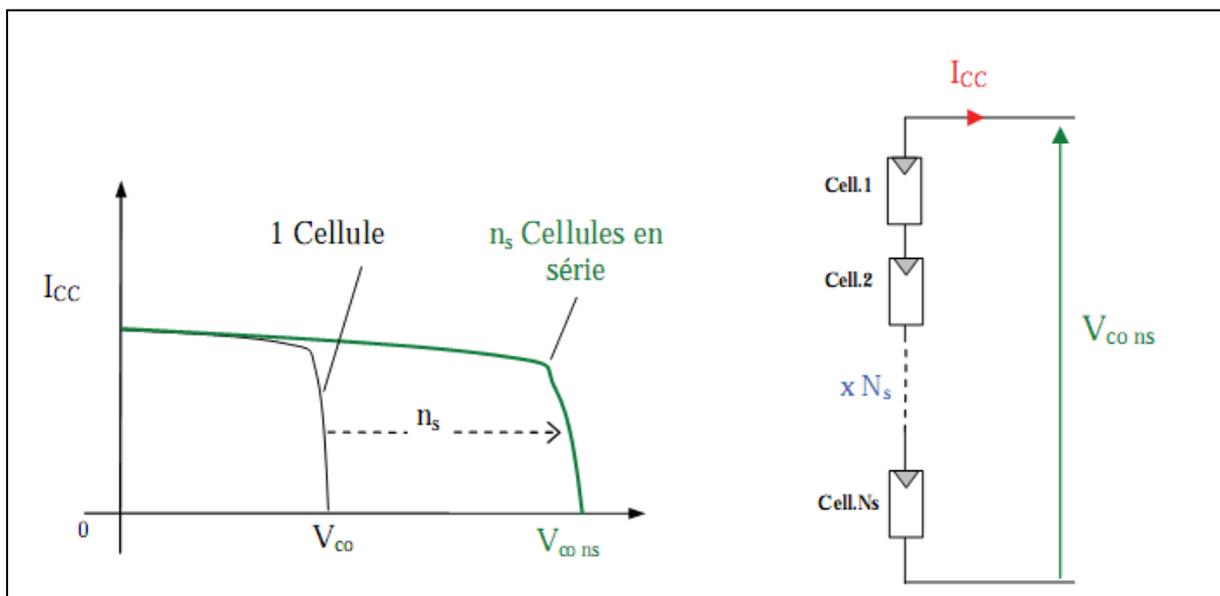


Figure II.3: Caractéristiques résultantes d'un groupement de n_s cellules en série

Les expressions de la tension (V_{mod}) et du courant (I_{mod}) du module sont :

$$V_{mod} = \sum(V_{cel}) \quad (\text{II.11})$$

$$I_{mod} = \sum(I_{cel}) \quad (\text{II.12})$$

Avec:

V_{cel} et I_{cel} sont respectivement la tension et le courant d'une cellule PV.

II.1.2.4.2 Association en parallèle

Une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants, on peut résumer les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules par les équations [15]:

$$I_{cc}(N_p) = N_s \cdot I_{cc} \text{ et } V_{co}(N_p) = V_{co} \quad (\text{II.13})$$

les caractéristiques de cette association sont:

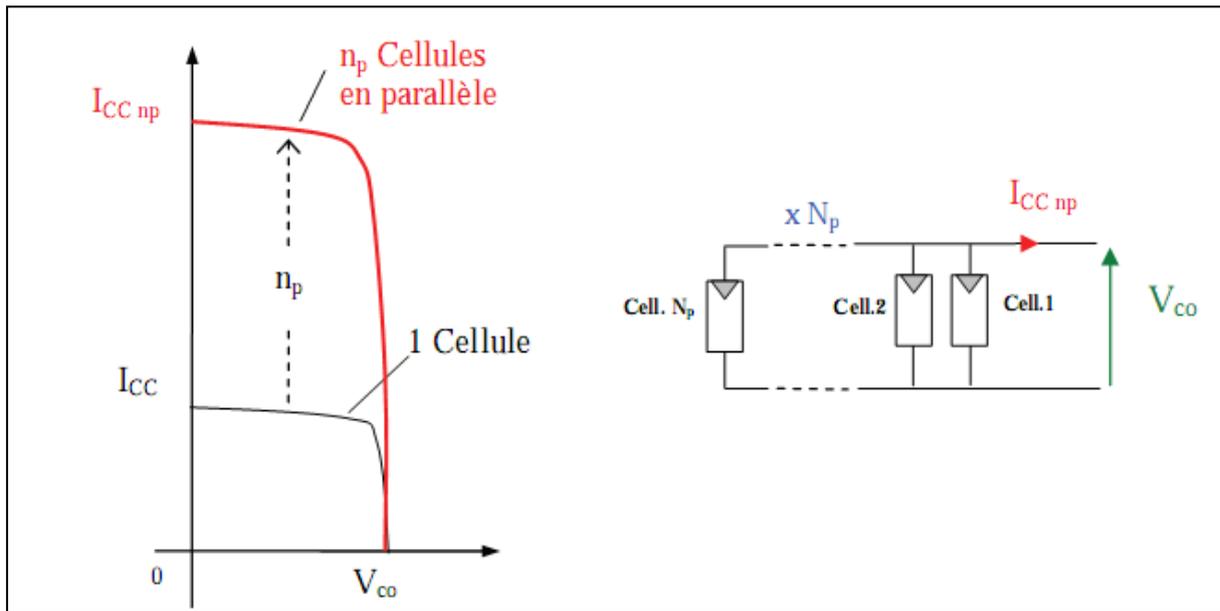


Figure II.4 : caractéristique résultante d'un groupement en parallèle N_p cellules identiques

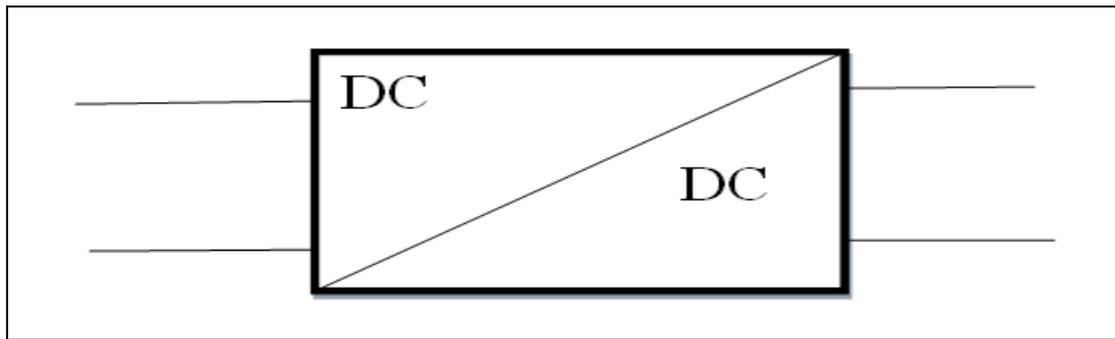
II.1.2.5. Convertisseur

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, à une tension alternative.

II.1.2.5.1. Convertisseur DC/DC

Les convertisseurs DC/DC en général réalisent deux fonctions: transformer la tension des batteries constante en une tension DC réglable et réguler la tension. L'électronique de conversion se trouve à l'interface entre les batteries (la source d'énergie en général) et l'ensemble des blocs constitutifs du système considéré, des circuits électroniques numériques et analogiques, des écrans, des actionneurs, des claviers, etc.

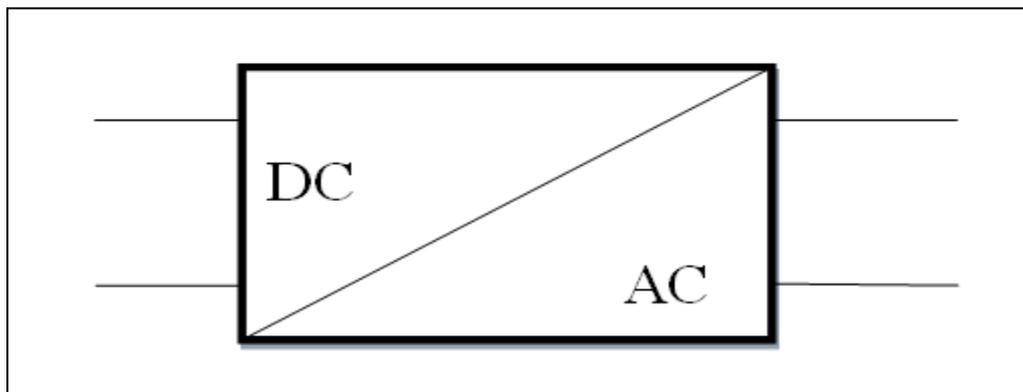
Deux types de convertisseurs DC/DC sont possibles : les convertisseurs « vers le haut » pour augmenter la tension et les convertisseurs « vers le bas » pour abaisser la tension.



FigureII.5 : symbole convertisseur DC/DC

II.1.2.5.2. Convertisseur DC/AC (onduleur)

Un onduleur est un convertisseur de tension continue /alternative. Il est utilisé pour convertir l'énergie électrique photovoltaïque en énergie électrique alternative pour faire fonctionner des charges. Généralement à base de thyristors, selon l'exploitation de cet onduleur peut être monophasé ou triphasé. Le signal alternatif obtenu est ensuite filtré afin d'obtenir un signal alternatif sinusoïdal à la fréquence utilisée par la charge



FigureII.6 : symbole convertisseur DC/AC

II.1.2.6 Paramètres photovoltaïques

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique $I(V)$. La figure représente une caractéristique courant-tension $I(V)$ dans le noir et sous illumination typique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètres physiques caractéristiques du composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (FF) du composant [16].

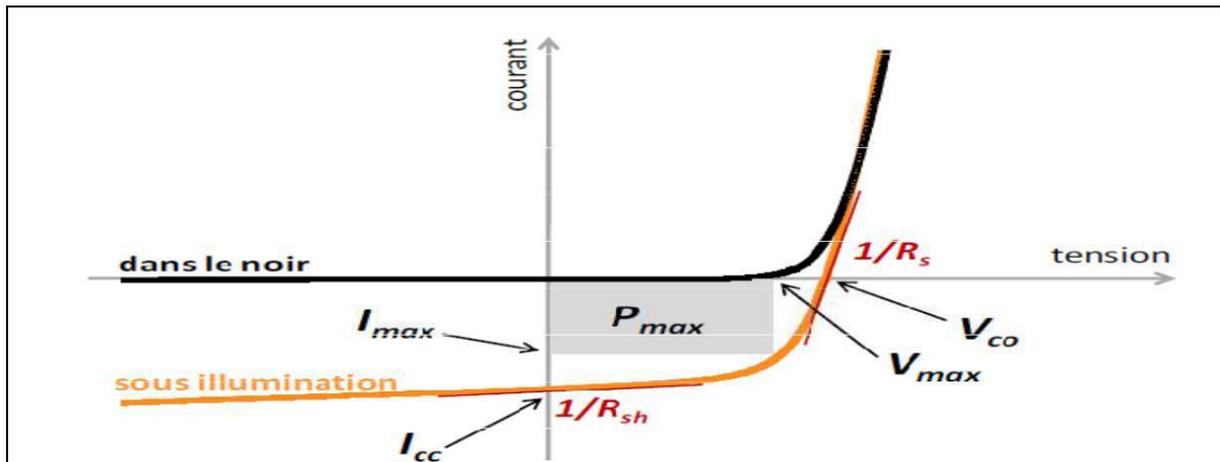


Figure II.7 : Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque [16].

II.1.2.6.1 Courant de court-circuit (I_{cc})

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule, de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue [16].

II.1.2.6.2 Tension de circuit ouvert (V_{co})

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule [16].

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (\text{II.14})$$

Avec :

T_c : température absolue

q : constante de charge d'électron, $1.602 \cdot 10^{-23} \text{C}$

K : constante de Boltzmann, $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ j/k}$

(KT_c/q) : potentiel thermodynamique

I_{ph} : courant photonique

I_s : courant de saturation

II.1.2.6.3. Facteur de forme (FF)

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou "fill factor (FF)". Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} * V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales. Il est défini par la relation suivante[16]:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} * V_{co}} \quad (II.15)$$

II.1.2.6.4. Rendement (η)

Le rendement, η des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF * I_{cc} * V_{co}}{P_{in}} \quad (II.16)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule [16].

Méthode de recherche du point de puissance maximale

Méthode Perturbation et observation

Le principe de la méthode Perturbation consiste à perturber la tension V_{pv} de générateur d'une faible amplitude autour de sa valeur initial et d'analyser le comportement de la puissance P_{pv} qui en résulte.

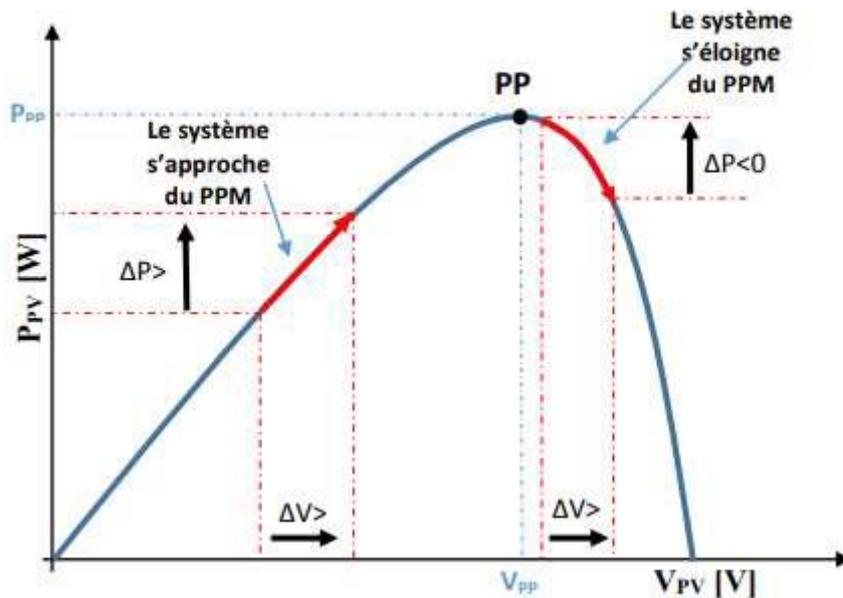
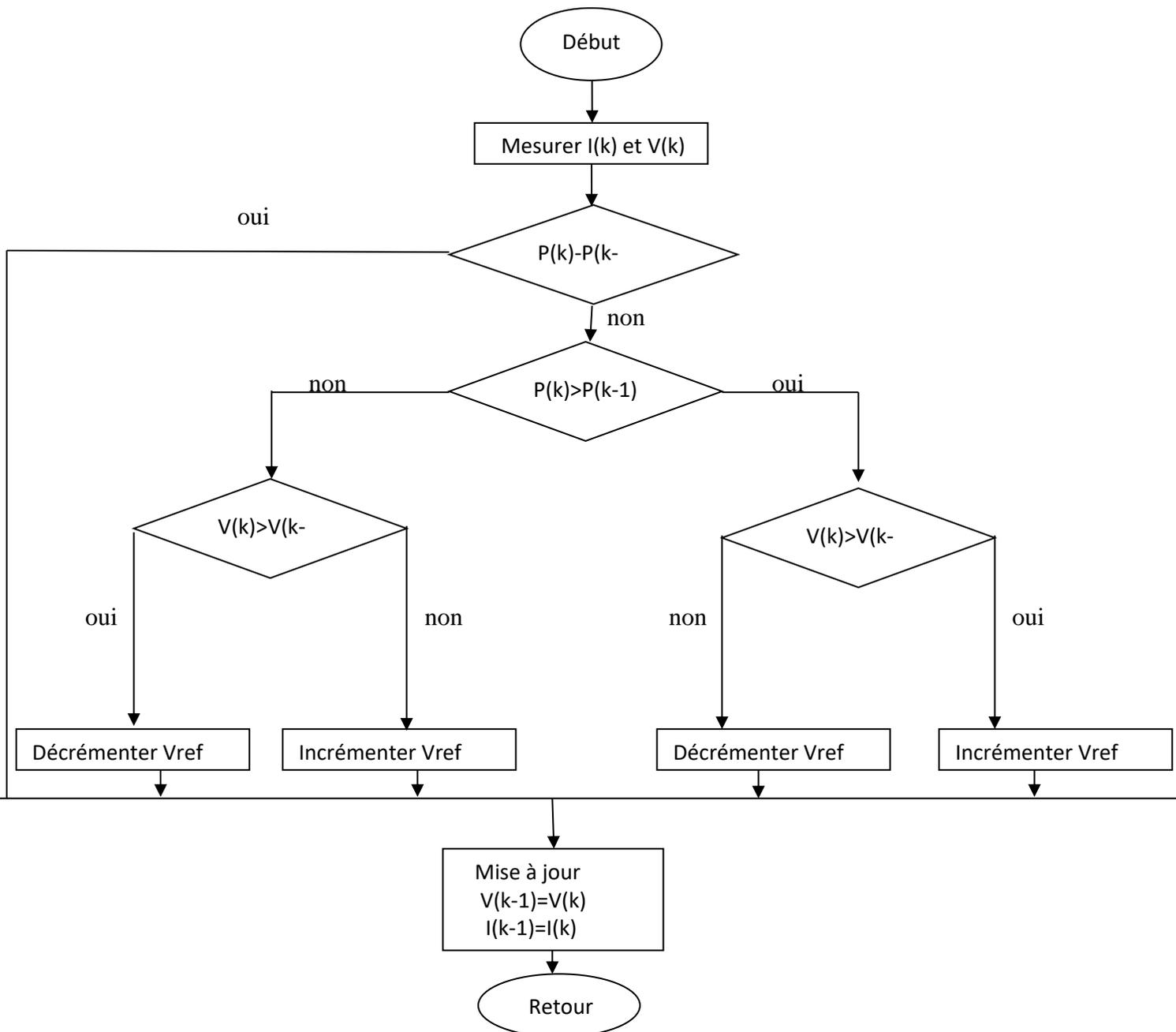


Figure II.8 : Recherche du PPM par la méthode (P&O)

Raisonnement « perturb and observ »

1. Mesures de courant et tension
2. Calcul de la puissance du panneau
3. La puissance trouvée est-elle égale à la précédente :
 - oui : renouvellement de la mesure
 - non : étape suivante
4. La variation de puissance est-elle positive ?
 - Oui : détermination du sens de la pente par observation de la variation de tension
 - positive : incrémentation de la tension de référence.
 - négative : décrémentation celle-ci.
 - Non : détermination du sens de la pente par observation de la variation de tension
 - positive : décrémentation de la tension de référence.
 - négative : incrémentation celle-ci.
5. Mise à jour de la variable puissance photovoltaïque.



II.2 Modélisation Globale de la Chaîne de Conversion de l'Eolienne Basée sur une MADA

II.2.1. Description du système éolien

La chaîne de conversion éolienne sur laquelle sont basés les travaux de cette mémoire est constituée d'une turbine éolienne, un multiplicateur, une machine asynchrone à double alimentation (MADA), un bus continu et deux convertisseurs statiques de puissance. La turbine éolienne entraîne la MADA à une vitesse de rotation variable à travers un multiplicateur de vitesse. Le stator de cette dernière est directement connecté au réseau électrique tandis que le rotor est connecté au réseau via deux convertisseurs statiques

(Onduleur + Redresseur) mis en cascade à travers un bus continu, comme le montre la figure (II.9) [17].

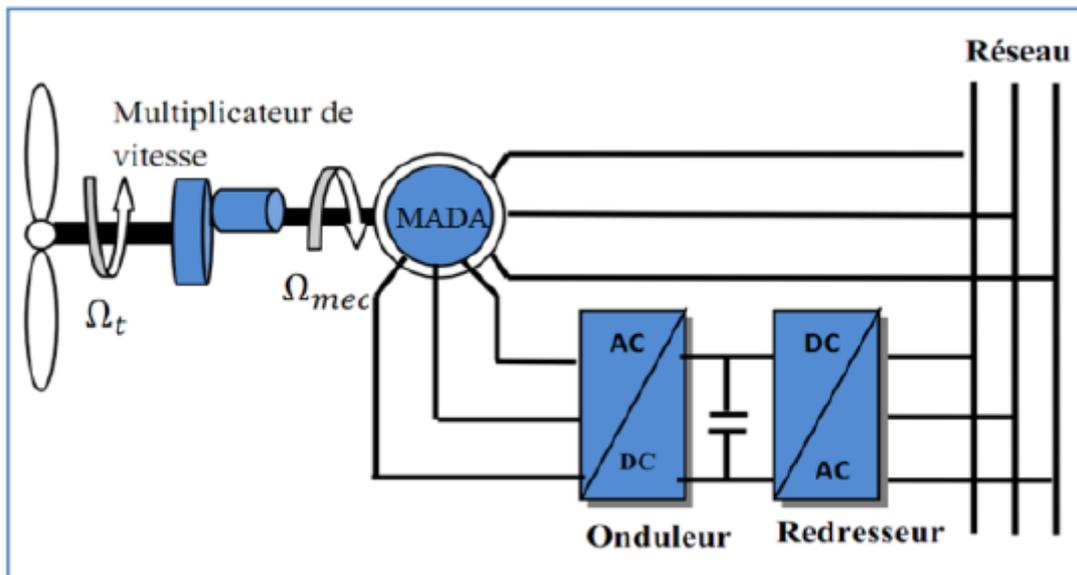


Figure II.9. Système de conversion éolienne à base de la MADA

II.2.2. Modèle de la turbine [17]

II.2.2.1. Modèle aérodynamique

Considérons une turbine éolienne munie de pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (Figure II.10).

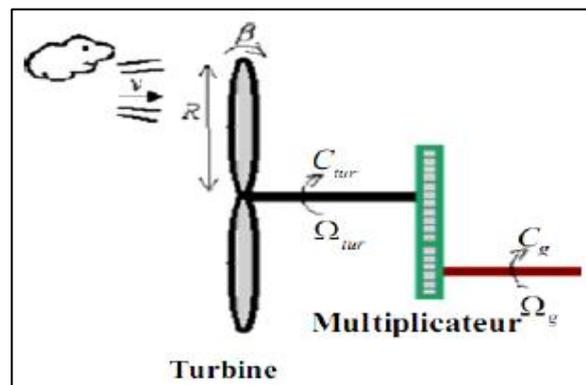


Figure II.10 Schéma explicatif de la turbine éolienne

II.2.2.2. Modèle des pales

En appliquant la théorie de la quantité de mouvement et du théorème de Bernoulli, on peut déterminer la puissance incidente (la puissance théorique), due au vent qui s'exerce sur les pales d'une éolienne par :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (\text{II.17})$$

Où :

ρ : masse volumique de l'air (approximativement 1,225 kg/m³);

S : surface décrite par les pales de l'éolienne en rotation;

v : vitesse du vent (m/s).

Le ratio de vitesse λ est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire de la turbine et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V} \quad (\text{II.18})$$

Ω_t : vitesse de rotation de la turbine (rad/s);

R : rayon de l'aérogénérateur ou la longueur des pales (m).

Dans un système éolien, à cause des différentes pertes, l'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent (P_v). La puissance du vent et la puissance aérodynamique extraite par la turbine (P_{aer}) peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p .

$$P_{aer} = C_p P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi r S V^3 \quad (\text{II.19})$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et il dépend de la caractéristique de la turbine. Ce coefficient présente une limite théorique, appelée limite de Betz, égale à 0,593 et qui n'est jamais atteinte.

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. Dans notre cas (Figure II.3), son évolution en fonction de λ est basée sur l'observation de données. Suite à ces observations, nous avons alors fixé sa valeur maximale à 0,47 et ses variations sont modélisées par l'approximation polynomiale suivante:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) \exp \left(- \frac{C_5}{\lambda_i} \right) + C_6 \lambda \quad (\text{II.20})$$

Avec: $C_1=0.5176, C_2=116, C_3=0.4, C_4=0.4, C_5=21, C_6=0.0068$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (\text{II.21})$$

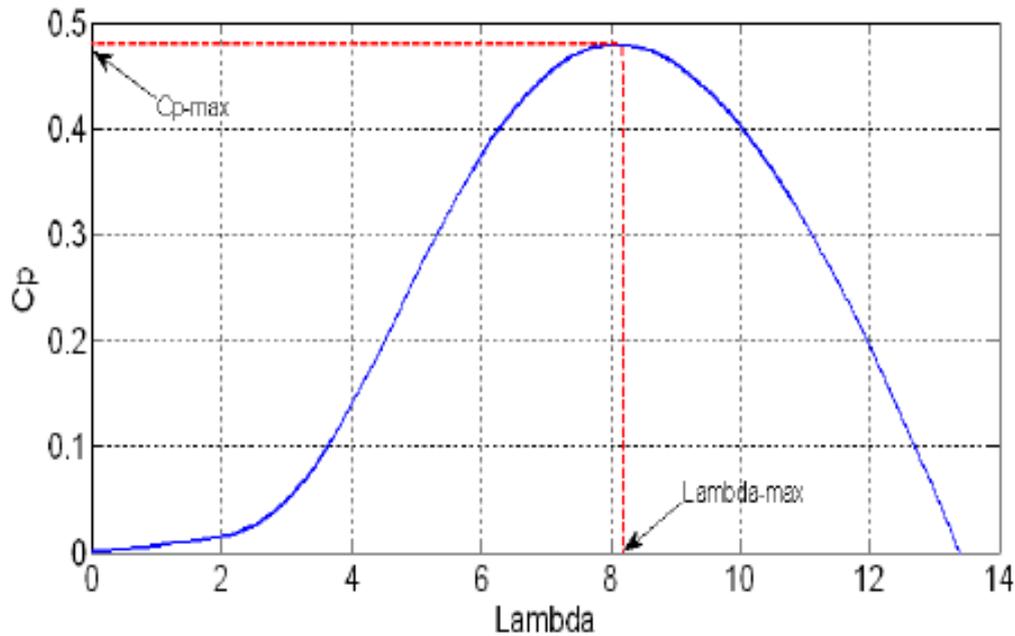


Figure II.11 : Coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative.

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique. Son couple aérodynamique C_t est donné par l'expression suivante:

$$C_t = \frac{P_v}{\Omega_t} = \frac{C_P(\lambda, \beta)\rho S V^2}{2\Omega_t} \quad (\text{II.22})$$

II.2.2.3. Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la MADA (arbre rapide) (Figure II.4).

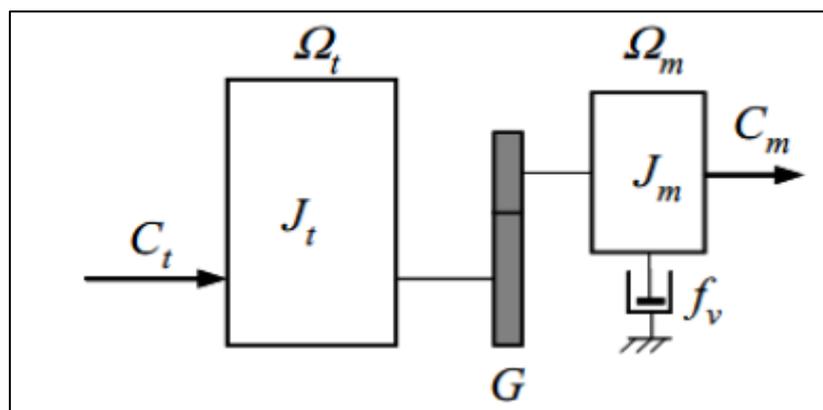


Figure II.12. Modèle mécanique simplifié de la turbine.

Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Il s'agit d'un dispositif très complexe que nous avons modélisé très simplement par les deux équations suivantes :

$$C_{méc} = \frac{C_t}{G} \quad (II.23)$$

$$\Omega_m = \Omega_t G \quad (II.24)$$

Avec :

J_t : Moment d'inertie de la turbine (Kg.m²);

J_m : Moment d'inertie de la MADA (Kg.m²);

f_v : Coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA (N.m/rad/s);

C_m : Couple mécanique sur l'arbre de la MADA (N.m);

Ω_m : Vitesse de rotation de la MADA (rad/s).

II.2.2.4. Modèle de l'arbre mécanique

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_t et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_{méc} \quad (II.25)$$

Avec :

J_t : inertie de la turbine.

J_m : inertie de la génératrice.

nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la MADA par :

$$\left(\frac{J_t}{G^2} + J_m \right) \frac{d\Omega_m}{dt} = C_m - C_{em} \quad (II.26)$$

C_m : le couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne ;

C_{em} : couple électromagnétique de la MADA.

II.2.3. Technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT)

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Plusieurs dispositifs de commande peuvent être imaginés. Dans cette section nous présenterons la stratégie de commande MPPT sans mesure de vitesse du vent. Pour extraire le maximum de la puissance produite par le générateur éolien, nous devons fixer le ratio de vitesse à la valeur optimale λ_{optim} qui correspond au maximum du coefficient de puissance $C_{p_{max}}$, la mesure de la vitesse du vent est difficile, une estimation de sa valeur pouvons être obtenus:

$$V_{est} = \frac{\Omega_t R}{\lambda_{optim}} \quad (II.27)$$

La puissance aérodynamique de référence est donc donnée par :

$$P_{aer_ref} = \frac{1}{2} C_{P_max} \pi \rho S V_{est}^3 \quad (II.28)$$

Le couple électromagnétique de référence peut s'exprimer comme suit :

$$C_{em_ref} = \frac{P_{aer_ref}}{\Omega_t} = \frac{1}{2} C_{P_max} \pi \rho \frac{\Omega_t^5 R^2}{\lambda_{optim}^3} \quad (II.29)$$

II.2.4. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II.2.4.1. Constitution de la MADA:

La génératrice se situe dans la nacelle de l'éolienne. Elle est entraînée par un arbre mécanique. La machine asynchrone à double alimentation est un générateur à induction à rotor bobiné. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé (figure.....). Les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant: la puissance traversant ces convertisseurs peut alors être absorbée ou produite par la machine, selon le point de fonctionnement. Le condensateur entre ces deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution [18].

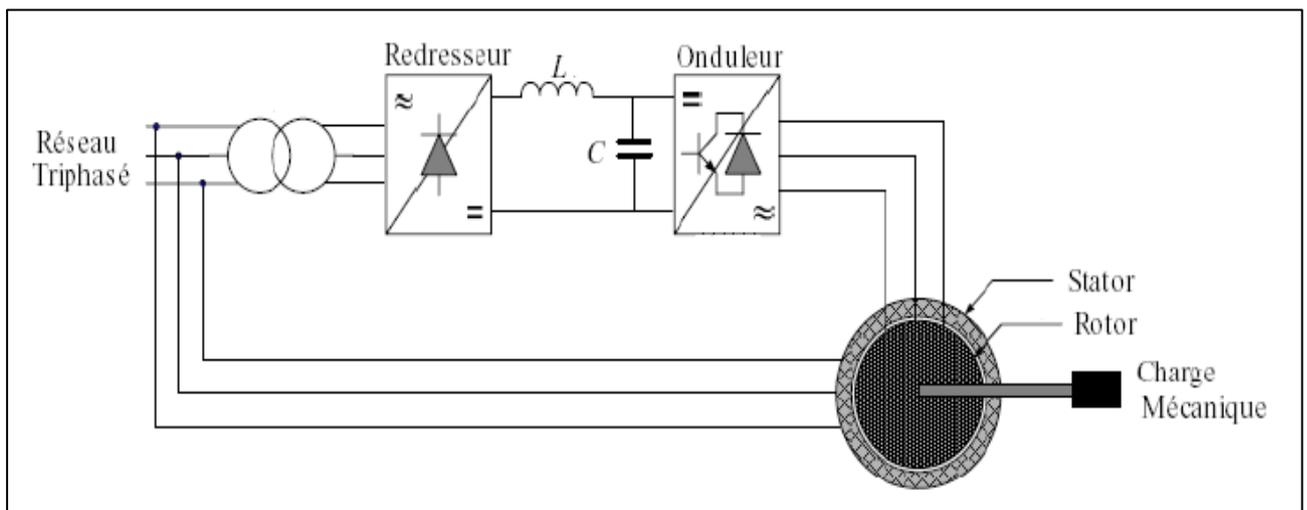


Figure (II.13): Schéma général d'un système utilisant une MADA alimenté par un seul convertisseur statique

II.2.4.2 Fonctionnement de la MADA:

La MADA présente un stator triphasé identique à celui d'une machine asynchrone classique dite à cage d'écureuil et un rotor constitué d'un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants (balais). Sa robustesse est légèrement diminuée par rapport à une machine asynchrone classique à cause de ce système bagues/balais. Une fois le stator de la machine connecté au réseau électrique, un flux magnétique apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et

du courant statorique. Lors de la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des forces électromotrices (fem) dans les enroulements rotoriques [19].

II.2.4.3 Avantages et inconvénients de la MADA :

Comme les autres machines, la MADA présente quelques avantages et inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs, sa structure, sa stratégie de commande et ses applications.

a. Avantages de la MADA

Comme avantages de la MADA, on peut citer :

- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance.
- La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme. De plus, l'application de la commande vectorielle associée à une technique de commande moderne permet d'obtenir un couple nominal sur une grande plage de vitesse.
- L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques.

Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.

- En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [18].

b. Inconvénients de la MADA :

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone ; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants :

- Le marché traditionnel est conquis par la MAS à cage, très étudiée et très connue, la nouveauté peut effrayer.
- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect multi-convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix. Nous utilisons un nombre des convertisseurs (parfois on utilise deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (toujours un redresseur et un onduleur).
- Un autre inconvénient apparaît lors de l'étude de cette machine, ce dernier est la stabilité notamment en boucle ouverte. En effet, dans le cas de la machine asynchrone conventionnelle celle-ci est garantie par la relation fondamentale de l'autopilotage réalisant l'asservissement de la vitesse par la fréquence du stator. Par conséquent, les deux forces magnétomotrices du stator et du rotor deviennent synchronisées. Mais dans le cas de la machine asynchrone à

double alimentation, la rotation des forces magnétomotrices devient fonction des fréquences s'imposées par les deux sources d'alimentation externes. De ce fait une certaine synchronisation entre elles est exigée afin de garantir une stabilité à la machine [18].

-Avant d'aborder la commande vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA), il faut réaliser sa modélisation. Cette dernière va nous permettre de comprendre ses principes de fonctionnement physique et d'établir un modèle d'action conduisant au calcul des correcteurs pour réaliser sa commande vectorielle ainsi que sa simulation en régimes dynamique et permanent[17].

II.2.4.4.Hypothèses

La machine asynchrone, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, il est alors nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrice. Elles sont indispensables pour une réalisation technologique de la commande, mais elles écartent le modèle obtenu de la réalité du processus à représenter :

- On suppose les circuits magnétiques non saturés, et suffisamment feuilletés pour que les pertes fer soient négligeables. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordres linéaires.
- On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est donc négligé.
- Le phénomène d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la f.m.m est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures.
- On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor. L'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant), les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.
- On considère que la machine fonctionne en régime équilibré [18].

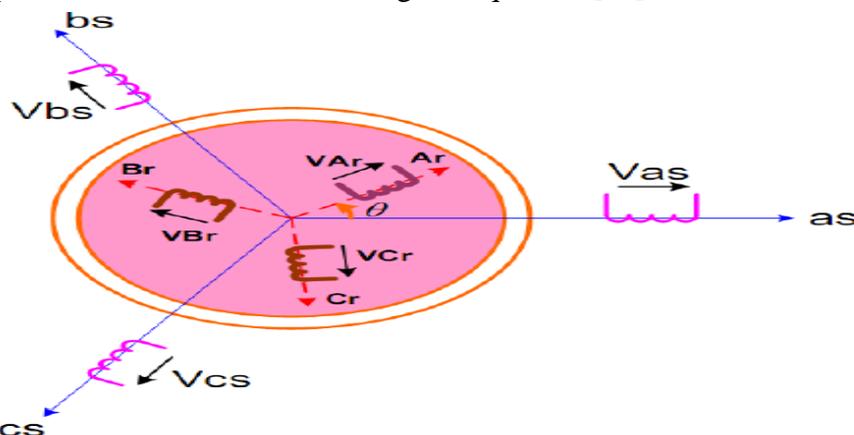


Figure II.4 : Représentation spatiale de la machine asynchrone dans le repère triphasé [17].

.En utilisant l'approche des circuits couplés magnétiquement, la loi d'Ohm et la loi de Faraday et en tenant compte des hypothèses cités ci-dessus, le comportement dynamique de la MADA peut être décrit par le système d'équations différentielles suivant.

II.2.4.5. Equations des tensions

Les équations des tensions statoriques, peuvent être exprimées, en utilisant la notation matricielle, par [17] :

$$\begin{aligned} [V_s] &= [R_s][I_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \\ [V_r] &= [R_r][I_r] + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \end{aligned} \quad (\text{II.30})$$

avec

$$V_s = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}, V_r = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}, I_s = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}, I_r = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}, \varphi_s = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}, \varphi_r = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}$$

$$R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, \quad R_r = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

II.2.4.6. Equations des flux

De la même manière on peut écrire les équations des flux sous la forme suivante[17] :

$$\begin{aligned} [\varphi_s] &= [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\varphi_r] &= [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{sr}]^t \cdot [I_s] \end{aligned} \quad (\text{II.31})$$

Tel que :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] = M_{max} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

En remplaçant les relations (II.31) dans, respectivement les relations (II.13) et (II.14), nous obtenons les deux expressions suivantes

$$\begin{aligned} [V_s] &= [R_s][I_s] + [L_{ss}] \frac{d[I_s]}{dt} + \frac{d([I_s] \cdot [M_{sr}])}{dt} \\ [V_r] &= [R_r][I_r] + [L_{rr}] \frac{d[I_r]}{dt} + \frac{d([I_s] \cdot [M_{sr}]^t)}{dt} \end{aligned} \quad (\text{II.32})$$

II.2.4.7. Equation mécanique

D'après la loi fondamentale de la dynamique nous pouvons écrire[17] :

$$C_{em} = C_m + f_v \Omega_m + J_m \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (\text{II.33})$$

Où :

C_m : Couple moteur appliqué sur la MADA [N.m].

J_m : Moment d'inertie total de la MADA [Kg.m²].

f_v : Coefficient de frottement visqueux de la MADA [N.m/rad/s].

II.2.4.8. Modèle de la MADA dans le référentiel de Park :

En utilisant la transformée de Park modifiée pour la conservation de puissance sur les flux et les tension des équations de la génératrice asynchrone à double alimentation, nous obtenons le modèle diphasé de cette génératrice dans le référentiel d-q lié au champ tournant que nous comptons utiliser par la suite pour la commande de la MADA .les courants sont en signe (-) pour avoir un fonctionnement génératrice de la MADA d'après [17] :

$$[P(\theta_s)] \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

Il est noté par θ_s (resp. par θ_r) l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (resp. rotoriques) (Figure II.14), La transformation de Park aboutit à une relation liant les angles θ_s et θ_r , celle-ci s'exprime par:

$$\theta + \theta_r = \theta_s \quad (\text{II.35})$$

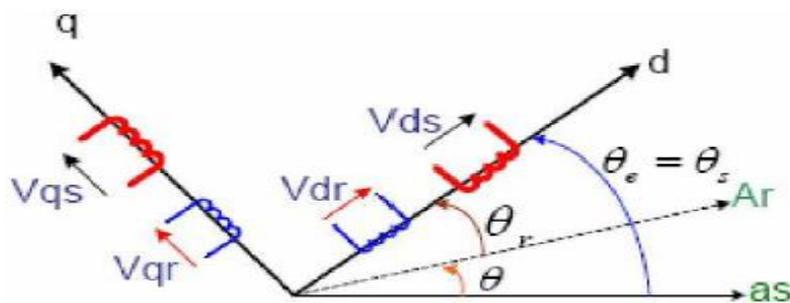


Figure II.15 : Représentation de la machine dans le repère biphasé [17].

II.2.4.9. Equations des tensions

Appliquons la transformation de Park à l'expression (II.30) et en multipliant les deux membres de l'égalité par $[P(\theta_s)]$ et en simplifiant, nous trouvons :

$$[V_{sdq}] = [R_s] \cdot [I_{sdq}] + \frac{d[\varphi_{sdq}]}{dt} + [P(\theta_s)] \frac{d[P^{-1}(\theta_s)]}{dt} \cdot [\varphi_{sdq}] \quad (\text{II.36})$$

L'expression (II.37) devient alors

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

De manière similaire, et en suivant les mêmes étapes, nous obtenons pour le rotor l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{d\theta_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

II.2.4.10. Equation des flux [17]

Appliquons la transformation de Park à l'expression (II.31) :

$$[\varphi_{sdq}] = [P(\theta_s)][L_{ss}] \cdot [P^{-1}(\theta_s)][I_{sdq}] + P[(\theta_s)][M_{sr}][P^{-1}(\theta_r)][I_{sdq}] \quad (\text{II.39})$$

En introduisant les inductances cycliques :

$$\begin{aligned} L_s &= l_s - M_s \\ M &= \frac{3}{2} M_{sr} \end{aligned} \quad (\text{II.40})$$

L'expression (II.39) devient alors :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.41})$$

De la même manière, en appliquant la transformation de Park à l'équation du flux rotorique, et en introduisant l'inductance cyclique

$$L_s = l_s - M_s \quad (\text{II.42})$$

On aura :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

II.2.4.11. Equation du couple électromagnétique]

L'expression générale du couple électromagnétique est donnée par [17] :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} (\varphi_{ds} I_{qr} - \varphi_{qs} I_{dr}) \quad (\text{II.44})$$

II.3. Modèle du convertisseur électronique de puissance

On peut considérer que la chaîne de conversion électronique est composée de deux onduleurs couplés sur un bus continu commun. Un modèle générique de l'onduleur est d'abord présenté puis adapté aux notations des deux onduleurs. De manière générale, l'onduleur permet la conversion de courants triphasés alternatifs en un courant continu et d'une tension continue en tensions triphasées de signe alternatif. L'onduleur étudié est bidirectionnel en courant et classiquement composé de trois cellules de commutation. Chacune est composée de deux transistors IGBT qui sont connectés à deux diodes en antiparallèle. Il sera supposé être contrôlé par modulation de largeur d'impulsion [17].

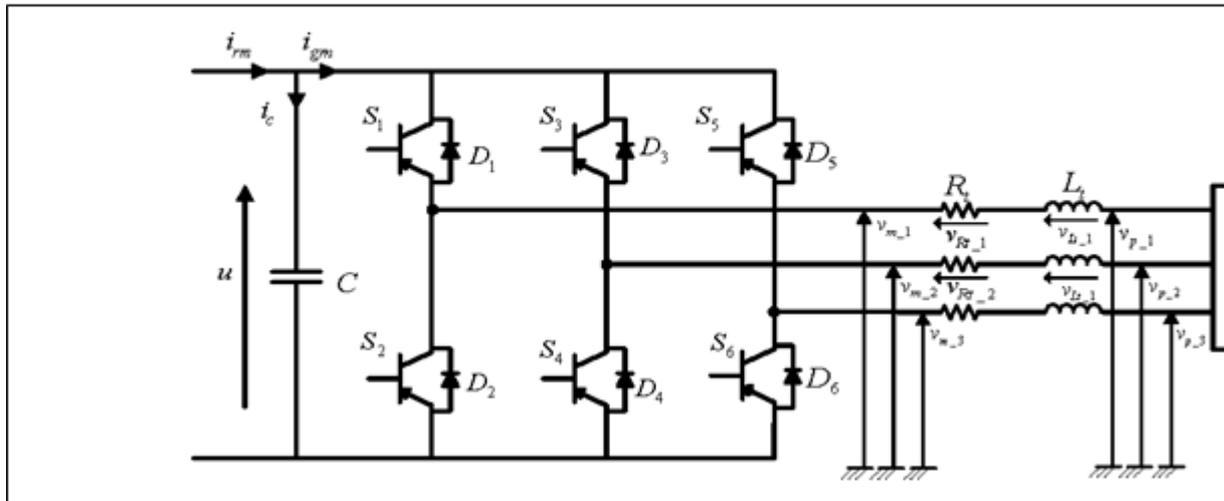


Figure II.16. Schéma d'un redresseur MLI [17].

La matrice de connexion du redresseur est donnée par l'équation matricielle suivante:

$$\begin{pmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{pmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{pmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{pmatrix} \quad (\text{II.45})$$

II.4. Élément de stockage

Il existe différents types de stockages, le stockage électrochimique, le stockage hybride...etc. Dans les systèmes de stockage par batteries électrochimiques, les assemblages de batteries sont conçus pour fournir la puissance et la capacité en fonction des usages.

II.4.1. Batteries

Les batteries sont souvent intégrées au générateur photovoltaïque, elles permettent le stockage de l'électricité, et restitue la nuit ou les journées nuageuse cette électricité accumulée durant la journée. Il existe différents types de batteries, on peut citer [20] :

- La batterie plomb acide
- La batterie nickel cadmium
- La batterie sodium chlorure de nickel

- La batterie lithium-ion
- La batterie zinc air.

II.4.2. Principe de fonctionnement des batteries

Le principe de fonctionnement d'un générateur électrochimique est essentiellement basé sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. Toute réaction chimique d'oxydoréduction, pourvu qu'elle soit spontanée, c'est-à-dire accompagnée d'une diminution d'énergie libre, est en effet susceptible de donner naissance à un courant électrique lorsqu'elle a lieu dans des conditions appropriées. Pour cela, il faut que l'échange des électrons de valence s'effectue par le canal d'un circuit extérieur au système. Ainsi la combustion libre de l'hydrogène produisant de l'eau et de l'énergie calorifique ne peut donner naissance à un courant électrique car l'échange électronique s'accomplit directement, en quelque sorte par un court-circuitage moléculaire.

II.4.3. Model de la batterie

Le modèle de batterie reçoit comme donnée d'entrée le courant demandé à la batterie .Si la batterie est totalement rechargée initialement, la condition $U_{SOci}(t = 0) = 60\%$ est imposée. On a alors :

$$U_{SOC} = U_{SOci} - \frac{1}{C_{bat}} \int_0^t I_{Cbat} dt \quad (II.46)$$

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les modèles mathématiques de chaque élément des chaines de conversions photovoltaïque et éolienne.

Chapitre III

Gestion du système hybride photovoltaïque-éolien

III.1. Introduction

Pour faciliter la compréhension de notre système de gestion de l'énergie hybride étudié nous avons dans ce chapitre réalisé sa simulation sous le logiciel Simulink de Matlab.

III.2. Les différents cas

1^{er} cas:

Si notre source satisfait exactement la consommation demandée par la charge ($P_{hyb} = P_{ch}$), donc l'alimentation de la charge sera directement de la source et les batteries seront déconnectées.

2^{ème} cas:

Si notre source satisfait pleinement la consommation de la charge ($P_{hyb} > P_{ch}$), et que ($EDC > EDC_{max}$), donc le surplus de puissance fournie par la source est injecté au réseau, et les batteries sont déconnectées de la charge.

3^{ème} cas:

Si notre source satisfait pleinement la consommation de la charge ($P_{hyb} > P_{ch}$), et que ($EDC < EDC_{max}$), donc le surplus de puissance fournie par la source est injecté dans les batteries.

4^{ème} cas:

Il représente la situation où la puissance fournie par la source est inférieure à celle demandée par la charge ($P_{hyb} < P_{ch}$), et que ($EDC > EDC_{min}$), donc le manque sera compensé par les batteries.

5^{ème} cas:

Il représente la situation où la puissance fournie par la source est inférieure à celle demandée par la charge ($P_{hyb} < P_{ch}$), et que ($EDC < EDC_{min}$), donc le manque sera compensé par le réseau.

Les schémas suivants représentent un résumé de notre algorithme de gestion sous forme d'organigramme:

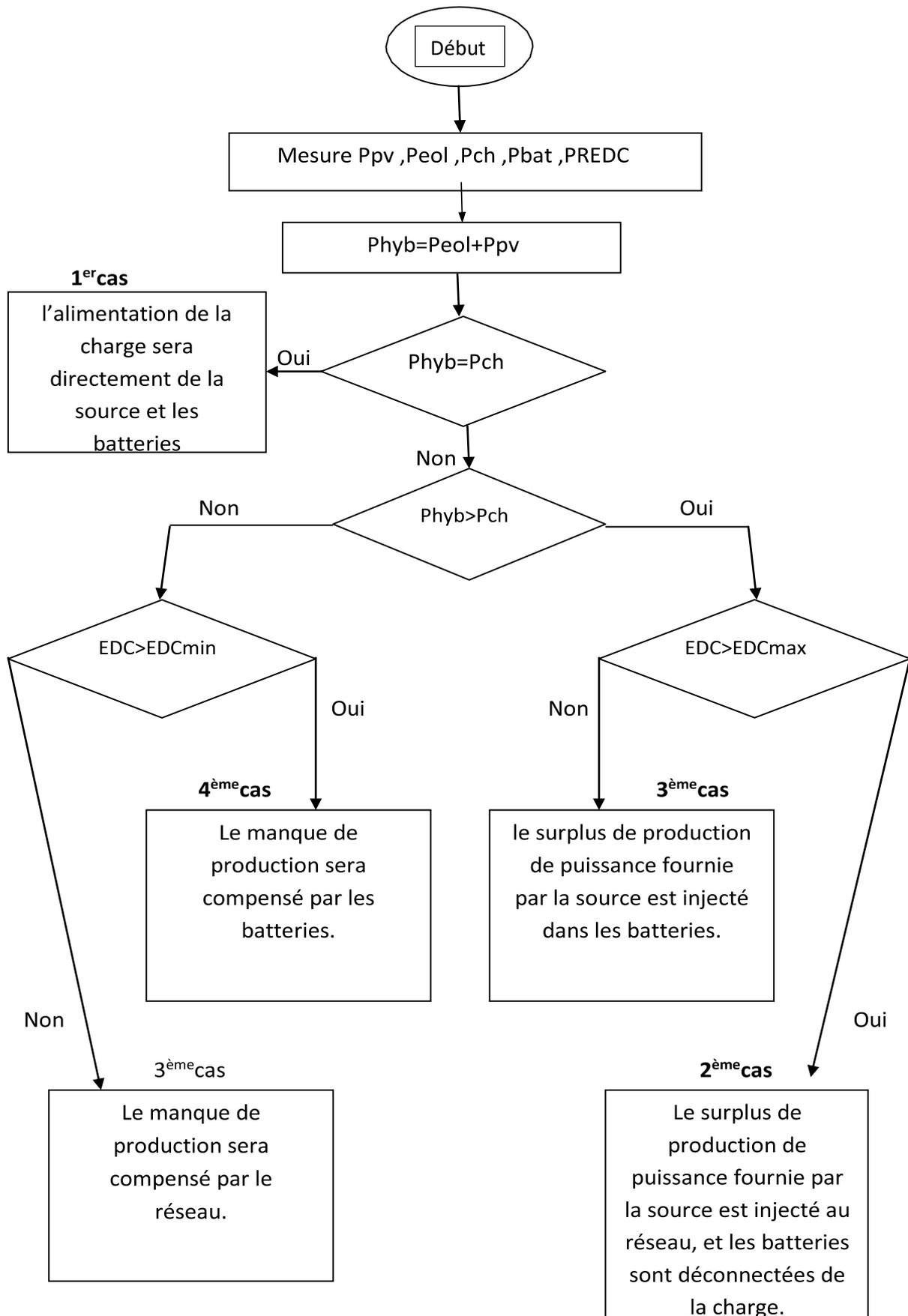


Figure III.1: Organigramme d'algorithme de gestion

III.3.Simulation

Le schéma suivant représente la simulation de notre système de gestion avec notre source hybride photovoltaïque-éolienne et les deux batteries de stockage.

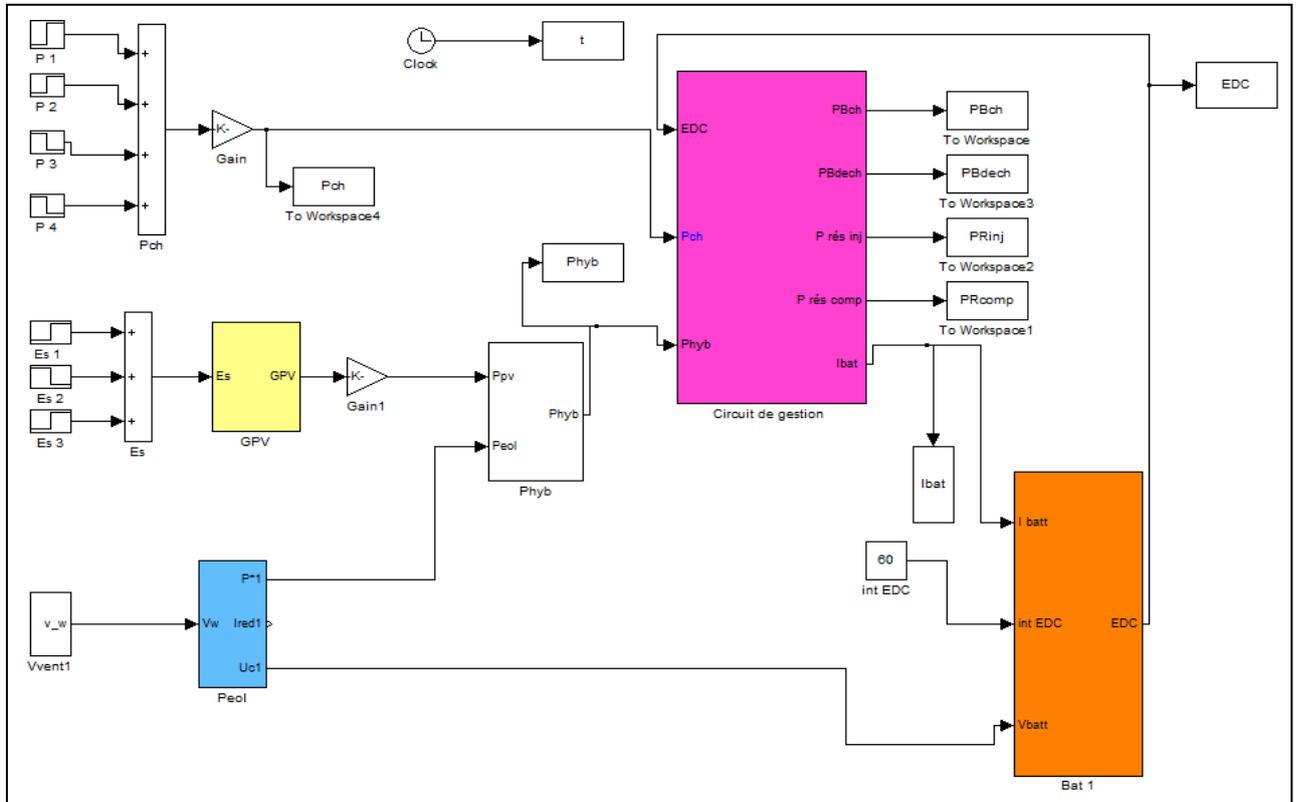


Figure III.2: schémasimulinkdelasimulation

- **EDC**: Etat de charge de la batterie
- **Int EDC** : Etat de charge initiale de la batterie
- **Ppv** La puissance du système photovoltaïque
- **Peol**: La puissance du système éolien
- **Pch**:La puissance demandée par la charge
- **Présinj**:La puissance injectée au réseau
- **Préscomp**:La puissance compensée par le réseau

III.3.1. Circuit de gestion

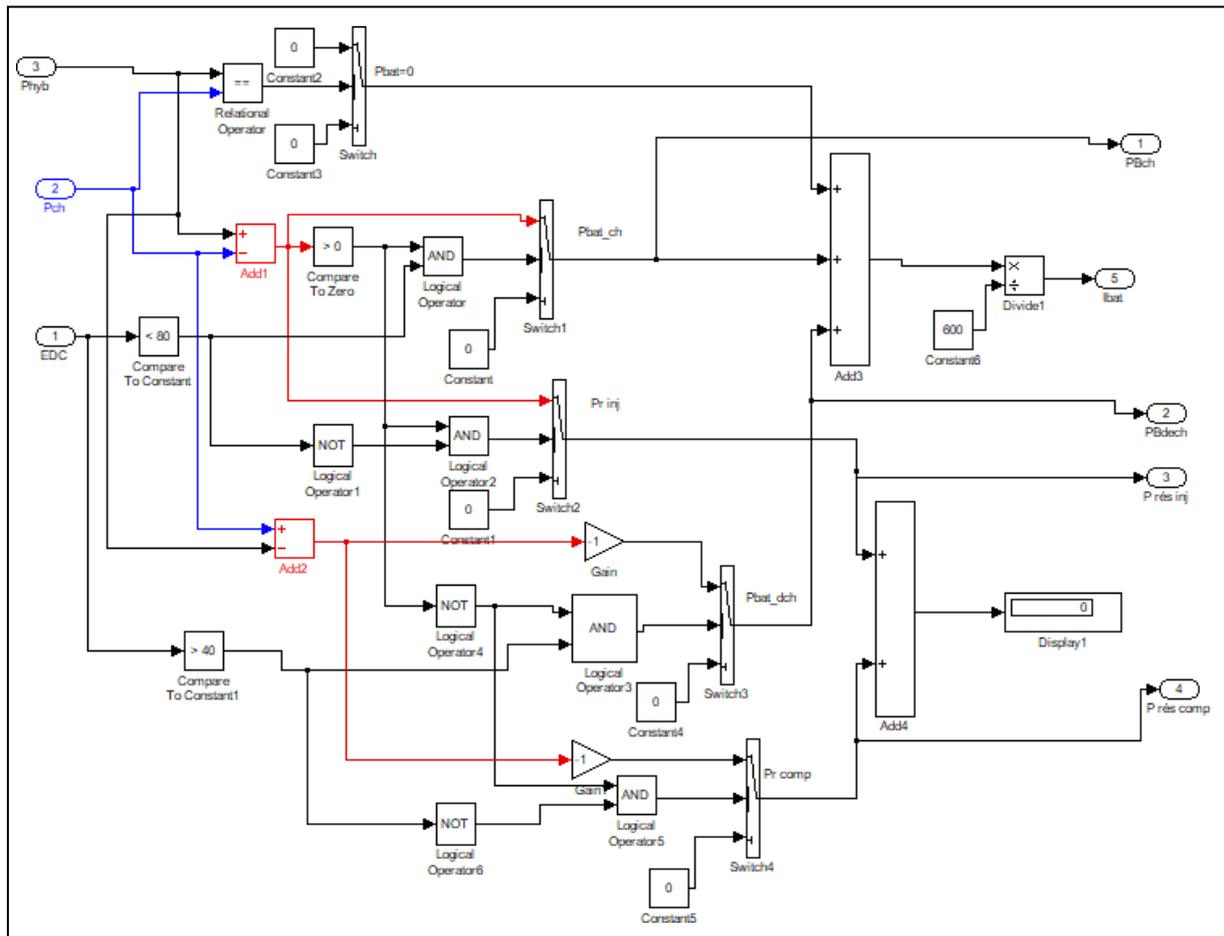


Figure III.3: schéma simulink du circuit de gestion.

III.3.2. Résultat de simulation et discussion

Après le réglage des paramètres des différents sous-systèmes et ceux de la simulation, nous avons lancé la simulation pour savoir si notre circuit de gestion fonctionne ou pas en sachant que notre source d'alimentation hybride éolienne-photovoltaïque et la variation de la charge sont connectés à notre système de gestion.

Après 10 secondes de simulations nous avons obtenu les résultats suivants:

- La figure III.3 suivante représente la variation de la charge, donc la puissance demandée par la charge



Figure III.4 : Puissance demandée par la charge

- La figure III.4 et III.5 suivante représente les deux puissances fournies séparément par le système photovoltaïque et éolien

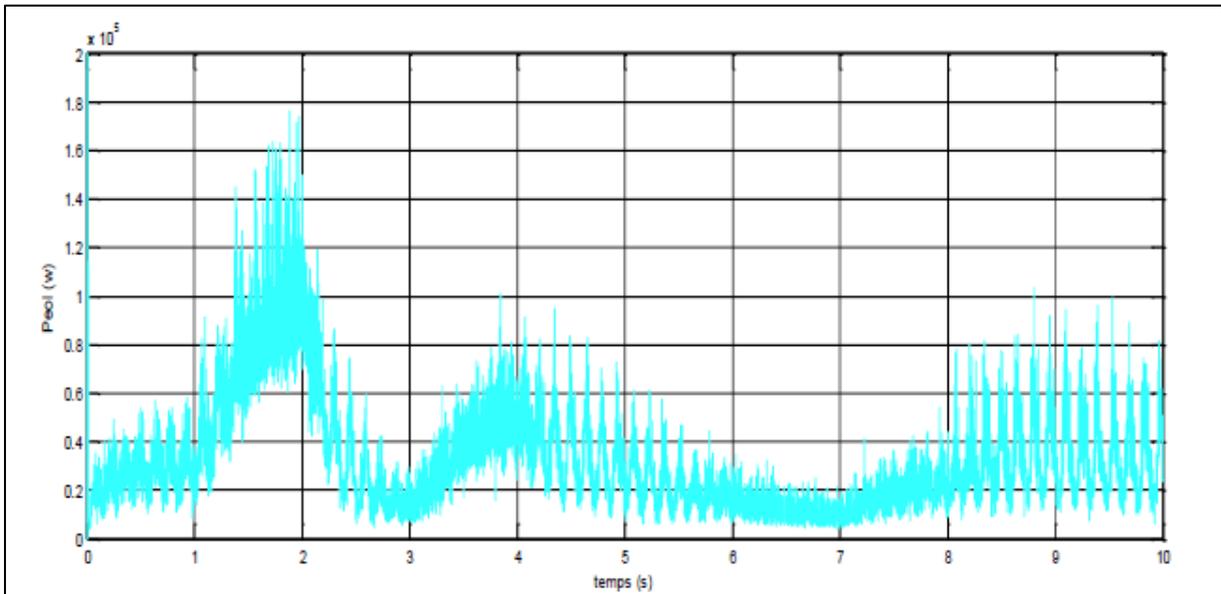


Figure III.5 : puissance fournie par le système éolien

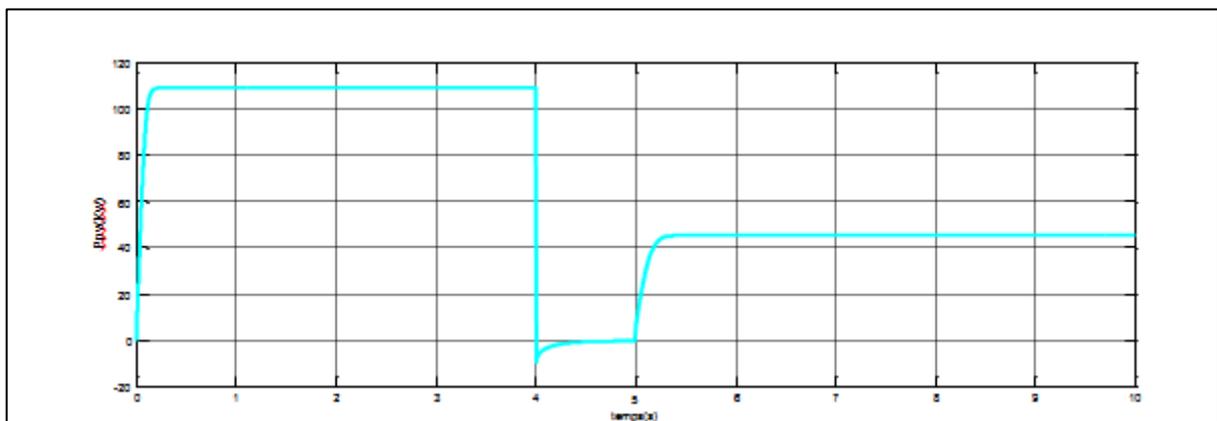


Figure III.6: Puissance fournie par le système photovoltaïque

- La figure III.6 suivante représente l'évolution de l'état de charge de notre batterie en sachant que $EDC_{max}=80\%$ et $EDC_{min}=40\%$

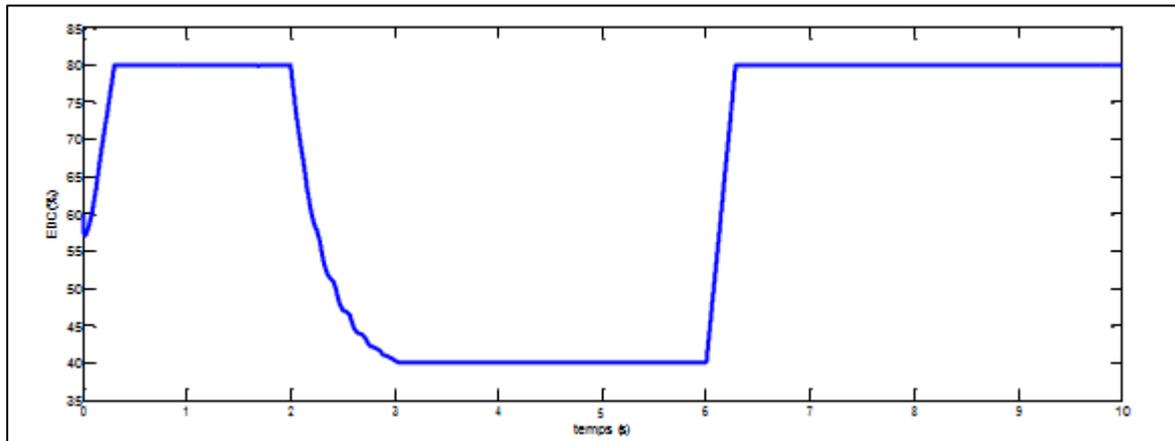


Figure III.7 : Etat de charge de la batterie

- La figure III.7 représente l'allure de la puissance hybride fournie par les deux systèmes photovoltaïque et éolien

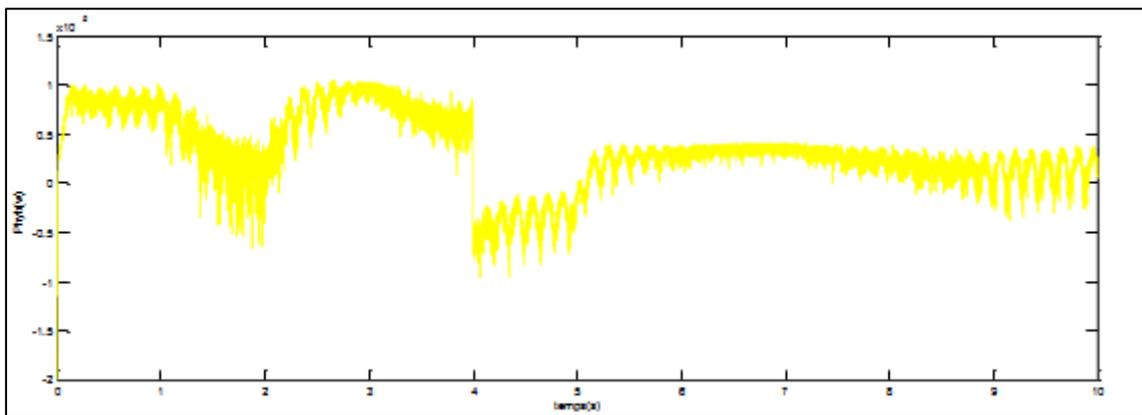


Figure III.8 : La puissance hybride fournie

- La figure III.8 suivante représente les différentes puissances qui sont à la sorties de notre système de gestion

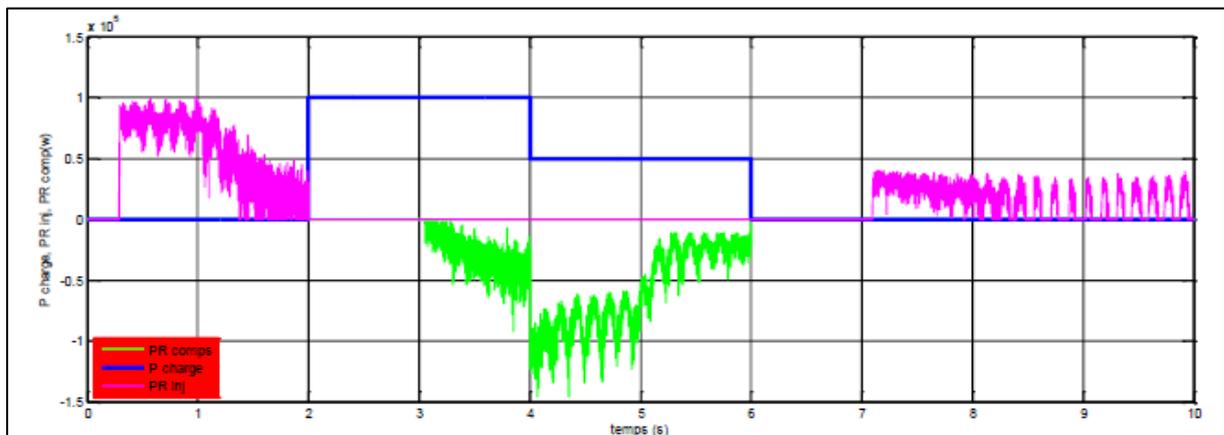


Figure III.9: Allures des Puissance

D'après les trois dernières allures précédentes on peut déduire le fonctionnement de notre système de gestion:

1) nous distinguons la première partie entre (0s-0.4s) où la puissance fournie hybride fournie est supérieure à celle demandée par la charge ($P_{hyb} > P_{ch}$) et que l'état de charge de la batterie $EDC < EDC_{max}$, donc le surplus de puissance fournie par la source est injecté dans les batteries. Et nous pouvons aussi voir cela sur la figure III.9 qui représente l'allure de la puissance de charge de la batterie:

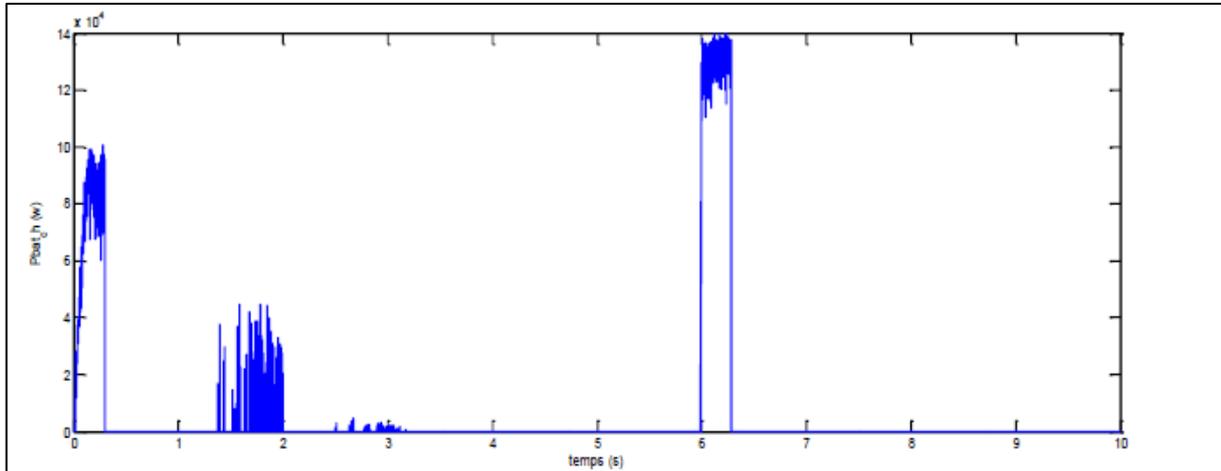


Figure III.10 : Allure de la puissance de charge de la batterie

Alors nous pouvons dire que cette partie représente le 3^{ème} cas énuméré précédemment.

2) Nous distinguons à la deuxième partie de (0.4s-2s) que la puissance fournie est supérieure à celle demandée par la charge ($P_{hyb} > P_{ch}$) et ($EDC = EDC_{max}$), donc le surplus de puissance fournie par la source est injecté dans le réseau et l'allure de 'PR inj' de la figure III.8 nous confirme ce ci.

Alors nous pouvons dire que cette partie représente le 2^{ème} cas énuméré précédemment.

3) Pour la troisième partie de (2s-3s) on a observé que la puissance de la charge dépasse celle fournie par le système hybride ($P_{hyb} < P_{ch}$) et que ($EDC > EDC_{min}$), donc la batterie se décharge pour compenser le manque de puissance. Et nous pouvons aussi voir cela sur la figure III.10 qui représente l'allure de la puissance de décharge de la batterie:

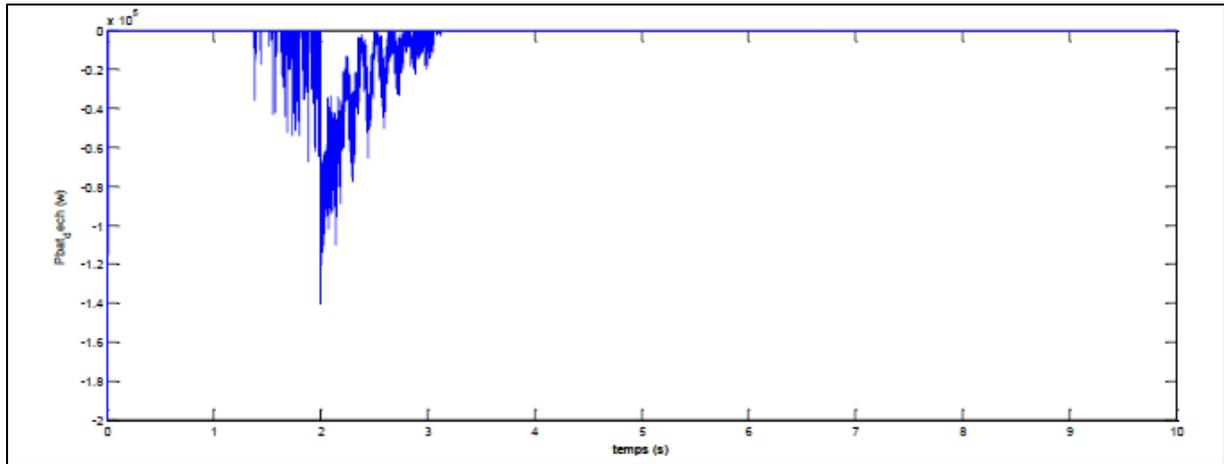


Figure III.11: Allure de la puissance de décharge de la batterie

C'est un moyen plus économique par rapport à la compensation de l'énergie du réseau directement.

Alors nous pouvons dire que cette partie représente le 4^{ème} cas énumérer précédemment.

4) Pour la quatrième partie (3s-6s) nous voyons que la puissance hybride fournie est inférieure à celle demandée par la charge ($P_{hyb} < P_{ch}$) et que ($EDC = EDC_{min}$), donc le manque sera compensé par le réseau l'allure de 'PRcomp' de la figure III.8 nous confirme ceci.

Alors nous pouvons dire que cette partie représente le 5^{ème} cas énumérer précédemment.

5) Pour la dernière partie (6s-7s) nous voyons que la puissance fournie est supérieure à celle demandé par la charge ($P_{hyb} > P_{ch}$) et ($EDC < EDC_{max}$), donc la batterie se recharge, ensuite de (7s - 10s) ($P_{hyb} > P_{ch}$) et ($EDC = EDC_{max}$) donc le surplus de puissance est injectée dans le réseau.

III.4. Conclusion

Pour une gestion rigoureuse de l'énergie une stratégie de contrôle et de supervision du système hybride (photovoltaïque/éolien) a été établie. Le gestionnaire détermine les puissances de références à partir de la puissance totale demandée (puissance de charge et puissance nécessaire pour charger les batteries) et de la puissance disponible fournie par le générateur photovoltaïque et la turbine éolienne.

Le gestionnaire développé fournit un cadre souple pour contrôler et coordonner le fonctionnement des sous-systèmes qui constituent le système hybride pour déterminer ainsi le mode de fonctionnement adéquat.

Nous avons présenté les résultats de la simulation de gestion de l'énergie hybride avec la Batterie de stockage en utilisant les modèles que nous avons obtenu dans la modélisation.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est consacré à l'étude de la problématique de la gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides. Le système hybride étudié est constitué d'un générateur photovoltaïque, d'une éolienne connectés au réseau et des batteries de stockage.

Pour bénéficier au maximum des richesses gratuites dont la terre nous offre, le recours à un système hybride composé d'une source photovoltaïque et d'une éolienne peut se compléter mutuellement pour satisfaire la demande en consommation de l'énergie électrique dans le monde.

Le problème de gestion de l'énergie dans les systèmes hybride est cruciale, cependant, il faut à chaque instant connaître les puissances fournies par les sources (photovoltaïque et éolienne), celle demandé par la charge et l'état de charges des éléments de stockage. Ensuite il faut que l'algorithme de gestion prenne une décision adéquate pour le bon fonctionnement du système.

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à la description des deux énergies renouvelables et du système hybride étudié, nous avons aussi présenté le fonctionnement des différentes parties de notre chaine de conversion dont le générateur photovoltaïque et l'éolienne.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la modélisation des différents éléments de la chaine de conversion photovoltaïque avec la batteries et la chaine de conversion éolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation MADA, tels que la turbine éolienne et ses parties mécaniques, puis la MADA.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté et simulé un système de gestion de l'énergie hybride étudiée, et nous avons montré le bon déroulement de ce système grâce à l'interprétation des résultats obtenu.

Ce travail nous a permis de constater à quel point la gestion de l'énergie est complexe , mais importante et indispensable.

Références bibliographiques

- [1] DP_Monika_Kokrdova<<L'énergie solaire>>UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI FILOZOFICK Á FAKULTA
- [2] K. Djarmouni,«Centrale thermique», Cours de production d'énergie,2016.
- [3] MISSOUMMOHAMMED<<Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie>>UNIVERSITE HASSIBA BEN BOUALIDE CHLEF 2011
- [4] Christian Matulu<<Etude et dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome pour une alimentation permanente >>Université de Lubumbashi-Graduat en sciences appliquées 2010.
- [5] S.BelaidLalouni,«CoursEnergieSolairePhotovoltaïque»,UniversitédeBejaia,2015.
- [6] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Cellule-photovoltaique.html>
- [7] SAHI Choumaissa , SMIEL Saraet SELLAM Yousra <<Énergie solaire>> Université A.MIRA-BEJAIA,2018
- [8] HASSINI née BELGHITRIHOUDA ,«modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque», université Abou-bakrbelkaid de Tlemcen,2010.
- [9] BOUNACEURAMIN, «Étude et conception d'un système hybride de Production d'énergie» université KASDIMARBA H.OURAGLA ,2015
- [10] AdnaneZaimi. Optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents .Energie électrique.2014.
- [11] <http://http://developpementdurable-lag.blogspot.com/2010/02/avantages-et-inconvenients-de-lenergie.html>.
- [12] LUDMILSTOYANOV,«Etudededifférentesstructuresdesystèmeshybridesàsourcesd'énergie Renouvelables »,Thèse de Doctorat ,Université technique de sofia.
- [13] Hussein Ibrahim ,Adrian ILINCA ,Jean PERRON ,«investigation des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés», rapport interne laboratoire de recherche en énergie éolienne LREE-3–septembre 2008 université du Québec à Rimouski.
- [14] Z.Meziani,«Modélisation d'un module photovoltaïque» ,Mémoire magister ,Université de Batna, 2012.

- [16] MEKLA Saïd, MOUDER Hamza <<Améliorations des Performances d'un Panneau Photovoltaïque>>, MEMOIREDEFIN D'ETUDES, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI De TIZI-OUZOU
- [15] Petibon Stéphane «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie Pour les applications photovoltaïques». Thèse de doctorat, Université de Toulouse,2009.
- [17] BOUAMEUR Meriem «Modélisation et dispositif de commande d'un système éolien à base de machine asynchrone à double alimentation», UNIVERSITE BADJI-MOKHTAR-ANNABA, 2018
- [18] Mme Kelkoul Bahia «Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation »,Université de TLEMCEN.2011
- [19] Arnaud Gaillard. Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service. Autre. Université Henri Poincaré - Nancy 1,2010.Français
- [20] Dirk Uwe Sauer ,«Electrochemical Storage for Photovoltaic», Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany, 2004.