



Mémoire de Master

Présenté par :

- BOUNAB Imad
- BIAD Anis

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electromécanique

Thème :

Gestion de puissance d'un système multi-sources (photovoltaïque-éolien)

Soutenu le : 22/09/2021

Devant le jury composé de :

Nom & Prénom	Qualité
TAMALOUZT Salah	Président
DJERMOUNI Kamel	Examineur
RAHRAH Karima	Encadreur

Remerciements

Nous remercions tout d'abord Dieu le tout puissant de nous avoir donné la force et la volonté pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à remercier vivement Mme RAHRAH Karima, qui a accepté de nous encadrer dans ce projet passionnant et intéressant et à qui nous exprimons notre profonde gratitude pour son suivi constant, sa confiance et son encouragement.

Nous remercions vivement tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger notre travail.

Nous tenons à remercier tous les enseignants, qui ont assuré notre formation durant notre cycle universitaire.

Nos remerciements s'adressent à l'ensemble de nos camarades de la promotion.

Finalement, il nous est particulièrement agréable d'exprimer ici notre reconnaissance envers nos familles respectives dont le soutien a été essentiel tout au long de nos études ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

La mémoire de mon père, qu'Allah lui accorde sa miséricorde et l'accueille dans son vaste paradis ;

Ma chère mère, merci maman du fond du cœur pour ton éducation, ton sacrifice, ton assistance et pour ce tu m'as fait et qui m'a permis d'arriver à cette réussite et à ce bonheur ;

Mes chers frères et sœurs ;

Ma bien aimée Yasmine;

Mes chers cousins et cousines ;

Tous mes amis (es) ;

Mes camarades de « Master » ;

Mon bras droit Karim HAMANE et ces enfants (Dihya et Amine) ;

Mes collègues de travail au Cap carbon.

BOUNAB IMAD

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents,

Ma mère qui a œuvré pour ma réussite, par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils pour toute son assistance et sa présence dans ma vie ;

Mon père qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie ;

Puisse dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit, merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Ma femme Hanane ;

Mon cher frère Amine et ma chère sœur Amel ;

Mon cher ami et binôme Imad ;

Mes chers (es) amis (es).

SYMBOLES

Chapitre I : Généralités sur les systèmes hybrides

P_V : Puissance du vent [W].

P_t : Puissance de la turbine [W].

C_p : Coefficient aérodynamique de puissance de la turbine.

C_{pma} : Coefficient de puissance maximale de la turbine éolienne.

ρ : La densité de l'air [Kg/m³].

π : Constante d'Archimède ($\pi=3.1416$).

V_v : La vitesse instantanée du vent [m/s].

R_t : Le rayon de la surface balayée [m].

V_v : La vitesse instantanée du vent [m/s].

λ : Le rapport entre la vitesse périphérique en bout de pales et la vitesse du vent.

λ_{opt} : Vitesse spécifique optimale de la turbine éolienne.

Ω_t : La vitesse angulaire de rotation de la turbine [rad/s].

P_{pv} : Puissance photovoltaïque [W].

P_n : Puissance nominale de la turbine [W].

V_{vn} : Vitesse de vent nominale [m/s].

V_{vd} : La vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie [m/s].

V_{vM} : La vitesse maximale du vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée [m/s].

I_{ph} : Le photo-courant [A].

R_s : Résistance série [Ω].

R_p : Résistance parallèle [Ω].

P_c : Puissance de crête [W].

V_{co} : La tension à vide [V].

I_{cc} : Le courant de court-circuit [A].

P_{opt} : Puissance au point de puissance maximale [W].

V_{opt} : Tension au point de puissance maximale [V].

I_{opt} : Courant au point de puissance maximale [A].

FF : Facteur de forme.

Chapitre II: Modélisation et simulation du système hybride (photovoltaïque-éolien)

P_{eol} : Puissance éolienne [W].

S : Surface balayé par les pales de la turbine [m²].

T_t : Le couple développé par la turbine éolienne [N.m].

β : L'angle d'orientation des pâles.

Symboles et abréviations

G : Le gain du multiplicateur.

C_{em} : Le couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone [N.m].

Ω_m : La vitesse mécanique de la génératrice [rad/s]

J : Inertie totale de l'arbre de transmission [kg.m²].

F : Le coefficient de frottement dynamique [m. s/rad].

$V_{sa, sb, sc}$: Tensions statoriques [V].

$V_{ra, rb, rc}$: Tensions rotoriques [V].

$I_{sa, sb, sc}$: Courants statoriques [A].

$I_{ra, rb, rc}$: Courants rotoriques [A].

$\Phi_{sa, sb, sc}$: Flux statorique [Wb].

$\Phi_{ra, rb, rc}$: Flux rotorique [Wb].

R_s : Résistance statorique [Ω].

R_r : Résistance rotorique [Ω].

$L_s L_r$: Inductances propre du stator et du rotor.

$[M_{sr}]$: La matrice des inductances stator-rotor.

M_s : L'inductance mutuelle entre les phases statoriques.

M_r : L'inductance mutuelle entre les phases rotoriques [H].

M_{sr} : L'inductance mutuelle entre phase statorique et phase rotorique [H].

M_{max} : Maximum de la mutuelle inductance stator rotor quand leur axes coïncident [H].

θ : La position absolue entre deux axes magnétiques [degré°].

θ_s : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « a » du stator [degré°].

θ_r : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « a » du rotor [degré°].

P : Nombre de paires de pôles.

d, q : Indices des axes direct et en quadrature du référentiel lié au champ tournant.

Φ_{ds} : Flux statorique d'axe direct [Wb].

Φ_{qs} : Flux statorique d'axe quadratique [Wb].

Φ_{dr} : Flux rotorique d'axe direct [Wb].

Φ_{qr} : Flux rotorique d'axe quadratique [Wb].

I_{sd}, I_{rd} et I_{sq}, I_{rq} : Courants d'axes d et q statorique et rotorique [A].

V_{sd}, V_{rd} et V_{sq}, V_{rq} : Tension d'axes d et q statorique et rotorique [V].

I_s : Inductance de fuite statorique [H].

I_r : Inductance de fuite rotorique [H].

M : Inductance mutuelle cyclique [H].

V_{dc} : La tension redressée [V].

I_{dc} : Le courant modulé par le redresseur [A].

Symboles et abréviations

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

I_{ond} : Le courant ondulé par l'onduleur [A].

ω_s, ω_r : Pulsation statorique, rotorique [rad/s].

T_r : Constante de temps rotorique.

I_{pv} : Le courant fournit par la cellule photovoltaïque [A].

V_{pv} : La tension continue donnée par la cellule photovoltaïque [V].

I_D, I_{D1}, I_{D2} : Le courant traversant les diodes [A].

V_{pv} : La tension continue donnée par la cellule photovoltaïque [V].

I_p : Le courant traversant la résistance parallèle [A].

E_s : L'ensoleillement [W/m^2].

E_{sref} : L'ensoleillement de référence [W/m^2].

T_j : La température de jonction de la cellule [$^{\circ}\text{C}$].

T_{jref} : La température de jonction de référence [$^{\circ}\text{C}$].

T_a : La température ambiante [$^{\circ}\text{C}$].

N_{oc} : La température nominale de fonctionnement de la cellule ou du module solaire [$^{\circ}\text{C}$].

P_1, P_2, P_3, P_4 : Paramètres constants.

I_{Od} : Courant de saturation de la diode [A].

q : Charge élémentaire [$1.6 \cdot 10^{-19}\text{C}$].

K : Constante de Boltzman [$1.39 \cdot 10^{-23}$ (SI)].

A : Coefficient d'idéalité de la cellule.

n_s : Nombre total de cellules connectées en séries et/ou en parallèles.

E_g : Energie de gap [$1.76 \cdot 10^{-19}$].

C, C' : Condensateur.

D : Diode.

L : Inductance.

V_e : La tension d'entrée [V]. V_s : La tension de sortie [V].

V_L : La tension aux bornes de l'inductance L [V].

I_R : Le courant traversant à charge [A].

I_L : Le courant traversant l'inductance L [A].

I_c : Le courant traversant le condensateur C [A].

R : La résistance de la charge [Ω].

T : La période de hachage [S].

α : Le rapport cyclique

Chapitre III : Gestion de l'énergie du système hybride (photovoltaïque-éolien)

P_{hyb} : Puissance hybride [W].

P_{dem} : Puissance qui est demandé par la charge [W].

I_{pv} : Courant fourni par le générateur photovoltaïque [A].

I_{eol} : Courant fourni par le système éolien [A].

I_c : Courant qui traverse la capacité [A].

I_{hyb} : Courant produit par le système hybride PV-Eol [A].

I_s : Courant de délestage [A].

I_{bat} : Le courant traversant la batterie.

E_b : La force électromotrice.

R_b : La résistance interne de la batterie.

C_{bat} : La capacité nominale de la batterie.

V_{bat} : La tension aux bornes de la batterie.

V_{dc} : Tension de sortie du bus continu [V].

ABREVIATIONS

AC : Courant alternatif.

DC : Courant continue.

EDC : Etat de charge de la batterie.

Eol : Eolien.

GADA : Génératrices asynchrones à double alimentation.

GPV : Générateur photovoltaïque.

HAWT : Horizontal axis wind turbine.

Hyb : Hybride.

MRV : Machine à reluctance variable.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

PI : Proportionnel intégrale.

PPM : Point de puissance maximal.

PV : Photovoltaïque.

P&O : Méthode de perturbation et observation.

SEH : Système d'énergie hybride.

STC : Conditions de fonctionnement standard (Standard conditions).

VAWT : Vertical axis wind turbine.

Wc : Watt crête.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Généralités sur les systèmes hybrides

I.1. Introduction.....	3
I.2. Généralités sur les systèmes d'énergies hybrides(S.E.H).....	3
I.2.1. Définition du système d'énergie hybride (S.E.H).....	3
I.2.2. Configuration du bus dans les systèmes hybrides.....	3
I.3. Présentation du (S.E.H) étudié.....	5
I.4. Avantages et inconvénients des systèmes hybrides.....	6
I.4.1. Avantages et inconvénients des générateurs photovoltaïques.....	6
I.4.2. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	6
I.5. Description de la chaîne de production photovoltaïque.....	7
I.5.1. Energie solaire.....	7
I.5.2. Rayonnement solaire sur un plan incliné.....	7
I.5.3. La cellule photovoltaïque.....	7
I.5.3.1. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	7
I.5.3.2. Caractéristique de la cellule photovoltaïque.....	8
I.5.4. Générateur photovoltaïque.....	9
I.5.4.1. Mise en série/parallèle.....	9
I.5.4.2. Protection du générateur photovoltaïque.....	10
I.6. Les convertisseurs statique.....	11
I.6.1. Les convertisseur DC/DC (HACHEUR).....	11
I.6.2. Les convertisseur DC/AC (ONDULEUR).....	11
I.6.3. Les convertisseur AC/DC (REDRESSEUR).....	11
I.7. Description de la chaîne de production éolienne.....	12
I.7.1. Energie éolienne.....	12
I.7.2. Origine du vent.....	12
I.7.3. Type d'aérogénérateur.....	12
I.7.4. Principaux composants d'un aérogénérateur.....	14
I.7.5. Fonctionnement d'une éolienne.....	15
I.7.6. Caractéristique de turbine éolienne.....	15
I.7.7. Machines électriques dans les aérogénérateurs.....	16
I.7.7.1. Machine synchrone.....	16

SOMMAIRE

I.7.7.2. Machines à courant continu.....	16
I.7.7.3. La machine asynchrone.....	17
I.8. Conclusion.....	17

Chapitre II: Modélisation et simulation du système hybride (photovoltaïque-éolien)

II.1. Introduction.....	18
II.2. Modélisation de la chaîne de production photovoltaïque.....	18
II.2.1. Modélisation du panneau photovoltaïque.....	19
II.2.1.1. Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque.....	23
II.2.1.1.1. Caractéristique Courant-Tension.....	23
II.2.1.1.2. Caractéristique puissance –tension.....	24
II.2.1.2. Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV.....	25
II.2.1.2.1. Influence de la température.....	25
II.2.1.2.2. Influence de l'intensité du rayonnement.....	26
II.3. Optimisation de la puissance des modules PV.....	27
II.4. Le convertisseur DC-DC (hacheur).....	30
II.4.1. Modèle d'un hacheur survolteur (BOOST).....	30
II.5. Simulation et interprétation de la chaîne de conversion photovoltaïque.....	32
II.6. Résultats de simulation.....	33
II.7. Modélisation de la chaîne de production éolienne.....	35
II.7.1. Modélisation de la vitesse du vent.....	36
II.7.2. Modélisation de la turbine.....	36
II.7.3. Modèle des pâles.....	37
II.7.4. Le multiplicateur de vitesse.....	38
II.7.5. Equation dynamique de l'arbre de transmission.....	38
II.8. Modélisation de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil.....	39
II.8.1. Modèle mathématique de la génératrice asynchrone.....	39
II.8.2. Equation générale de la machine asynchrone.....	40
II.8.3. Choix de repère (dq).....	44
II.9. Modélisation des convertisseurs statiques.....	45
II.9.1. Modélisation du redresseur.....	45
II.9.2. Modélisation de l'onduleur.....	46
II.9.3. Commande vectorielle de la génératrice asynchrone.....	47
II.10. Simulation de la chaîne de conversion éolienne.....	50
II.10.1. Simulation et Interprétation des résultats.....	50

SOMMAIRE

II.11. Conclusion.....	53
-------------------------------	-----------

Chapitre III : Gestion de l'énergie du système hybride (photovoltaïque-éolien)

III.1. Introduction.....	54
---------------------------------	-----------

III.2. Modèle du bus continu.....	54
--	-----------

III.3. Gestion d'énergie du système hybride étudié.....	55
--	-----------

III.3.1. Organigramme de gestion d'énergie.....	55
---	----

III.3.2. Explication du déroulement du programme de gestion.....	56
--	----

III.3.3. Les différentes possibilités.....	56
--	----

III.3.4. Profil de charge variable.....	57
---	----

III.4. Schéma bloc du système global.....	57
--	-----------

III.5. Simulation et interprétation des résultats.....	58
---	-----------

III.6. Conclusion.....	61
-------------------------------	-----------

Conclusion générale.....	62
---------------------------------	-----------

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les systèmes hybrides

Figure I.1 : Schéma d'un système de puissance avec bus alternatif.....	4
Figure I.2 : Schéma d'un système de puissance avec bus continu.....	4
Figure I.3 : Schéma d'un système de puissance en couplage mixte, avec un bus continu et un bus Alternatif.....	5
Figure I.4 : Schéma du système hybride étudié.....	5
Figure I.5 : Radiation solaire globale sur un plan incliné.....	7
Figure I.6: Coupe transversale d'une cellule PV typique.....	8
Figure I.7 : Caractéristique $I_c (V_c)$ d'une cellule photovoltaïque.....	9
Figure I.8 : De cellule au module au générateur photovoltaïque.....	9
Figure I.9 : Mise en série/parallèle d'une cellule photovoltaïque.....	10
Figure I.10 : Panneau photovoltaïque.....	10
Figure I.11 : Schéma de principe d'un hacheur.....	11
Figure I.12 : Schéma de principe d'un onduleur.....	11
Figure I.13 : Schéma de principe d'un redresseur.....	11
Figure I.14 : Convection naturelle responsable des différences de densités.....	12
Figure I.15 : Eoliennes a axe verticale : Darrieus type 1, Darrieus type 2, Savonius.....	13
Figure I.16 : Eolienne a axe horizontal, Mono-pale, Bipales, Tripales, Multi-pales.....	13
Figure I.17 : Les composants de l'aérogénérateur.....	14
Figure I.18 : Principe de fonctionnement d'un aérogénérateur.....	15
Figure I.19 : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine λ	15

Chapitre II: Modélisation et simulation du système hybride (photovoltaïque-éolien)

Figure II.1 : Système photovoltaïque avec convertisseur d'adaptation.....	18
---	----

Liste des figures

Figure II.2 : Modèle électrique idéal d'une cellule PV.....	19
Figure II.3 : Modèle électrique a une diode sans résistance parallèle.....	20
Figure II.4 : Model électrique à deux diodes sans résistance parallèle d'une cellule PV.....	20
Figure II.5 : Schéma équivalent d'un model implicite de la cellule PV.....	21
Figure II.6 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode.....	21
Figure II.7 : Schéma bloc du GPV.....	21
Figure II.8 : Caractéristique $I_{PV}=f(V_{PV})$ d'un module photovoltaïque.....	24
Figure II.9 : Courbe $P_{PV}=f(V_{PV})$ d'un module photovoltaïque.....	24
Figure II.10 : Caractéristique courant-tension pour différentes températures.....	25
Figure II.11 : Caractéristique puissance-tension pour différentes températures.....	25
Figure II.12 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$	26
Figure II.13 : Caractéristique puissance- tension pour différents ensoleillements.....	27
Figure II.14 : Schéma de converge vers le PPM par P&O.....	28
Figure II.15 : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O).....	29
Figure II.16 : Circuit électrique du convertisseur DC-DC.....	31
Figure II.17 : Schéma d'un Hacheur survolteur à $t \in [0, \alpha T]$	31
Figure II.18 : Schéma d'un Hacheur survolteur à $t \in [\alpha T, T]$	31
Figure II.19 : Schéma Bloc du système photovoltaïque.....	32
Figure II.20 : Allure du courant photovoltaïque.....	33
Figure II.21 : Allure de la tension photovoltaïque.....	33
Figure II.22 : Allure de la puissance photovoltaïque.....	34
Figure II.23 : ensoleillement variable.....	34
Figure II.24 : Puissance générer pour un ensoleillement variable.	35

Liste des figures

Figure II.25: Schéma synoptique de l'aérogénérateur.....	35
Figure II.26: Système de la turbine à modéliser.....	36
Figure II.27 : Courbe $C_p(\lambda)$	37
Figure II.28 : Schéma bloc d'une turbine éolienne.....	39
Figure II.29 : Les différents systèmes d'axes utilisés.....	42
Figure II.30 : Schéma du redresseur.....	45
Figure II.31: Schéma de l'onduleur.....	46
Figure II.32 : Schéma de principe de la commande vectorielle.....	49
Figure II.33 : Schéma Bloc du système éolien.....	50
Figure II.34 : Profile de vent appliqué [Km/h].....	50
Figure II.35 : Allure du coefficient de puissance C_p	51
Figure II.36 : Vitesse mécanique de la turbine [rad/h].....	51
Figure II.37 : Puissance générée par l'éolienne.....	52
Figure II.38 : Allure du couple électromagnétique développé et sa référence.....	52
Figure II.39 : Le flux rotorique.....	53

Chapitre III : Gestion de l'énergie du système hybride (photovoltaïque-éolien)

Figure III.1 : Schéma du bus continu.....	54
Figure III.2 : Organigramme de la gestion de puissance du système hybride (photovoltaïque éolien).....	55
Figure III.3 : Profil de charge variable.....	57
Figure III.4 : Schéma bloc du système hybride avec bloc de gestion.....	58
Figure III.5 : Allure des Puissances du système.....	58
Figure III.6 : Puissance de charge de la batterie.....	59

Liste des figures

Figure III.7: Puissance de la batterie supplémentaire.....	59
Figure III.8 : Puissance de décharge de la batterie.....	59
Figure III.9 : Puissance de groupe diesel.....	60
Figure III .10 : Puissance de chargement des batteries principale et supplémentaire.....	60
Figure III.13 : Etat de charge de la batterie (EDC).....	60

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Aujourd'hui, il est évident que les besoins mondiaux en énergie sont comblés en grande partie par des énergies fossiles. Or, il a été prouvé que la consommation massive de ces types d'énergies a un effet néfaste sur la planète (le réchauffement climatique). Un des inconvénients du réchauffement climatique 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 renouvelables (SER) [1].

Pour cela les énergies renouvelables apparaissent à nos jours et à long terme comme la solution adéquate qui couvre ce besoin énergétique en diminuant l'inconvénient majeur émis par les énergies fossiles et fissiles : le gaz à effet de serre.

Le soleil, le vent, les chutes d'eau et la biomasse sont des ressources naturelles accessibles et exploitées pour générer de l'énergie électrique. Elles sont devenues une forme d'énergie indispensable par leur souplesse, la simplicité d'utilisation et la multiplicité des domaines d'activités où elles sont appelées à jouer un rôle. Ces modes de production ainsi que les moyens de distribution associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies [2].

Cependant, la production d'électricité à partir seulement d'une des deux sources d'énergie citées ci-dessus, (du vent ou du rayonnement solaire). Les variations de la production d'énergie sont causées par la nature stochastique des ressources renouvelables. C'est pourquoi on propose ici un système hybride composé de ces deux sources d'énergie.

Par cette étude, nous voulons faire la gestion d'énergie d'un système hybride photovoltaïque-éolien. C'est dans ce contexte que vient s'insérer notre étude qui consiste à l'étude et la gestion d'un système d'énergie hybride (éolien – photovoltaïque).

Afin d'accomplir au mieux cette étude, notre mémoire est structure en trois chapitres en plus de l'introduction et de de la conclusion générale :

- Le premier chapitre, sera consacré à des généralités sur les systèmes hybrides où nous allons décrire plus particulièrement le principe de fonctionnement de nos deux sources d'énergies (éolienne et photovoltaïque).

Introduction générale

- Dans le second chapitre, on procédera à une modélisation mathématique des différentes parties constituant le système à étudier, ainsi que la simulation de leur fonctionnement.
- Dans le dernier chapitre nous établirons une approche de gestion pour notre système.

Chapitre I : Généralités sur les systèmes hybrides

I.1. Introduction

La solution des énergies dites renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement en électricité, largement disponible, tout en respectant l'environnement c'est le cas du solaire photovoltaïque, de l'éolien, de la géothermie, de la biomasse ...etc.

Cependant le caractère aléatoire de ces sources (solaire et éolienne), l'inconstance du vent et du soleil nous impose d'utiliser un système pour les exploiter au mieux, on propose ici un système hybride composé de ces deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles.

Dans ce chapitre, il sera exposé la description et le principe de fonctionnement de différents composants du système hybride éolien-photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur et les convertisseurs de puissance seront présentés.

I.2. Généralités sur les systèmes d'énergies hybrides(S.E.H)

I.2.1. Définition du système d'énergie hybride (S.E.H)

De façon générale, un système hybride d'énergie est un système qui combine différents systèmes de production. D'après [1], de nos jours, les systèmes hybrides d'énergie associent au moins deux sources d'énergie, ils peuvent être connecté au réseau ou fonctionner en régime isolé (mode autonome). On rencontre différentes sources d'énergie telles que : l'éolien, le solaire PV, la micro hydroélectricité, les générateurs Diesel, le réseau électrique, différents systèmes de stockage comme les volants d'inertie, le super condensateur, les batteries d'accumulateurs. Par exemple, la combinaison éolien-photovoltaïque est un système hybride d'énergie.

Le but d'un système d'énergie hybride est de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable pour satisfaire la demande de la charge.

I.2.2. Configuration du bus dans les systèmes hybrides

Différentes classifications des configurations de systèmes hybrides sont rencontrées dans la littérature. Dans la plupart des cas les générateurs photovoltaïques et éoliens dans un système hybride peuvent être connectés en trois configurations possibles, architecture à bus continu, architecture à bus alternatif et architecture à bus mixte.

A. Le couplage CA

La puissance fournie par chaque composant de production d'électricité est centralisée sur un bus à courant alternatif (CA). Les générateurs éoliens et les autres sources de production alternative peuvent être directement connectés sur le bus CA, ou avoir besoin d'un convertisseur CA/CA. Cette configuration offre une flexibilité pour que les sources d'énergie puissent satisfaire la demande de la charge [2].

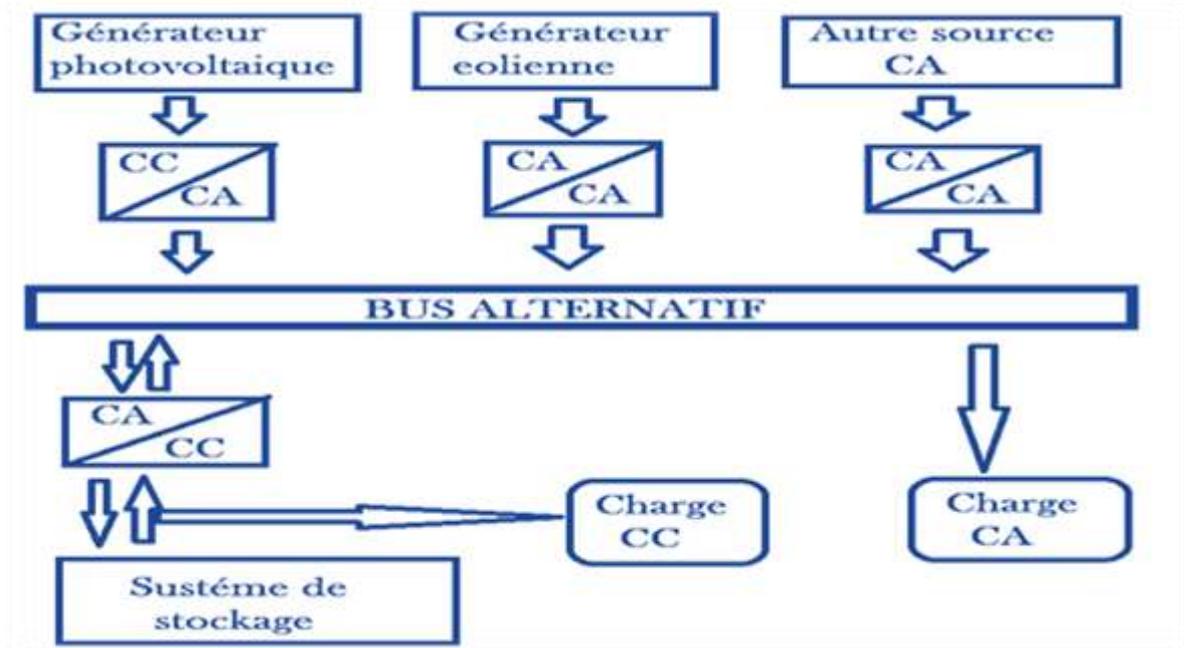


Figure I.1. Schéma d'un système de puissance avec bus alternatif.

B. Le couplage CC

La puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Le système de stockage est connecté au bus CC, l'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu. L'avantage de cette combinaison et sa simplicité, ce qui permet de simplifier le système de commande.

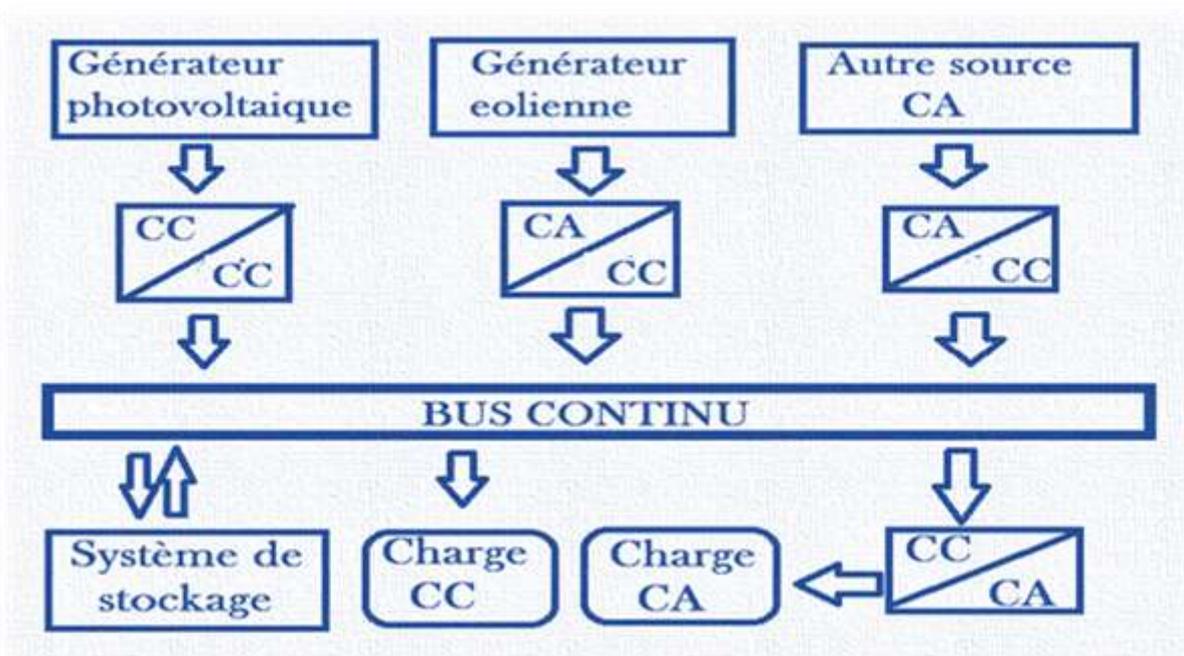


Figure I.2. Schéma d'un système de puissance avec bus continu.

C. Le couplage mixte CC/CA

Dans la configuration à deux bus, les sources d'énergie renouvelable peuvent alimenter une partie de la charge en CA et l'autre partie en CC. Les deux bus doivent être reliés par un convertisseur bidirectionnel.

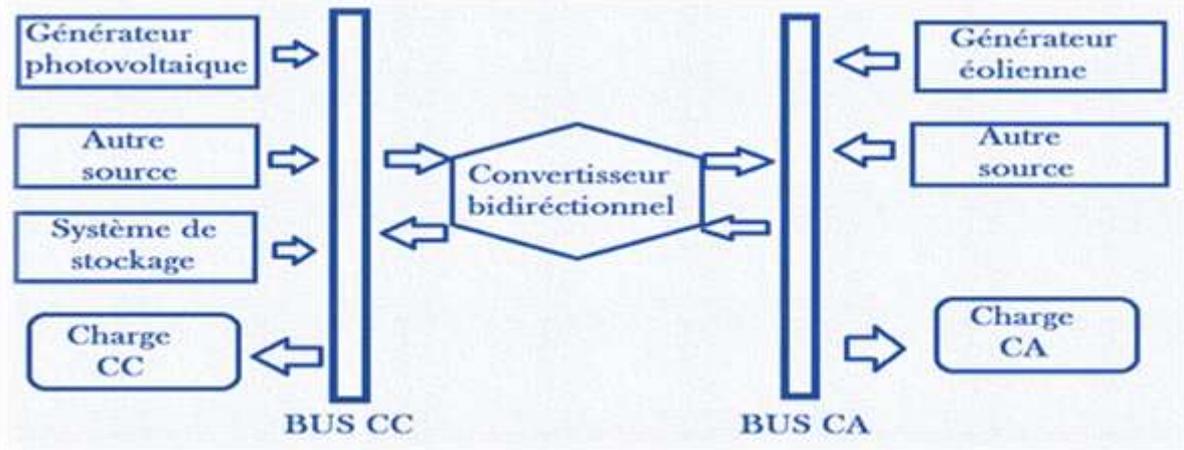


Figure I.3. Schéma d'un système de puissance en couplage mixte, avec un bus continu et un bus alternatif.

I.3. Présentation du (S.E.H) étudié

Dans notre étude, nous intéressons principalement aux systèmes hybrides formés par deux sources renouvelables de type photovoltaïque connectés au bus continu à travers des convertisseurs DC/DC à pilotage MPPT, et éolien a basse d'une machine asynchrone à cage, les configurations hybrides étudiées sont caractérisées par la présence d'un bus à courant continu (Bus CC) qui est adapté pour les micro-réseaux et à charges continues.

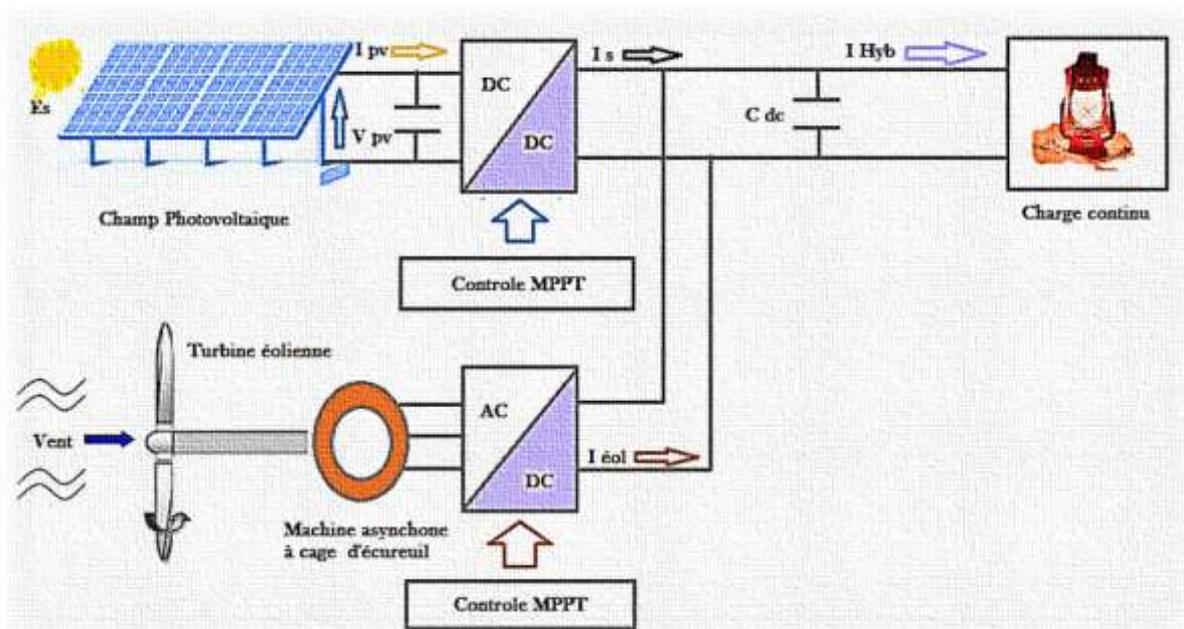


Figure I.4. Schéma de système hybride étudié

I.4. Avantages et inconvénients des systèmes hybrides

I.4.1. Avantages et inconvénients des générateurs photovoltaïques

➤ Avantages

- ✓ La production de cette électricité renouvelable est propre, n'est pas toxique ;
- ✓ Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables ;
- ✓ L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains pour sa petite relative taille, et son opération silencieuse ;
- ✓ La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montage dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville [3].

➤ Inconvénients

- ✓ La production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, est toujours variable ;
- ✓ Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques et des capteurs est élevé ;
- ✓ S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente ;
- ✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible [3].

I.4.2. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne [4]

➤ Avantages

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels ;
- ✓ L'énergie éolienne produit de l'électricité sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux, sans polluer les sols ;
- ✓ L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant ;
- ✓ C'est une source d'énergie locale, permettant de minimiser les pertes en lignes transporteuses vers les lieux généralement très proches ;
- ✓ Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

➤ Inconvénients

- ✓ C'est une source onéreuse et coûteuse ;
- ✓ Faible rendement dans les sites moins ventés ;
- ✓ La qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production ;
- ✓ Les éoliennes sont parfois bruyantes et modifient le paysage d'une région et l'impact sur les parcours migratoires des oiseaux.

I.5. Description de la chaîne de production photovoltaïque

I.5.1. Energie solaire

L'énergie solaire est l'énergie produite par le soleil. Le soleil est l'étoile qui fournit à la terre de la lumière et de la chaleur. L'énergie solaire est totalement renouvelable puisqu'elle est fournie par le soleil. C'est l'énergie que l'on retrouve en plus grande quantité sur la terre, il suffirait d'une heure de la totalité de l'énergie captée par la terre pour alimenter la consommation mondiale annuelle des sociétés humaines.

I.5.2. Rayonnement solaire sur un plan incliné

Bien que le rayonnement de la surface du soleil soit constant, au moment où il atteint la surface de la terre il devient fortement variable, et cela est dû à son absorption et à sa dispersion dans l'atmosphère terrestre. On distingue quatre types de rayonnement [5] :

- **Le rayonnement direct** : est le rayonnement reçu directement du soleil.
- **Le rayonnement diffus** : est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. 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.
- **Le rayonnement solaire réfléchi** ou l'albédo du sol : est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- **Le rayonnement global** : est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le Rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface.

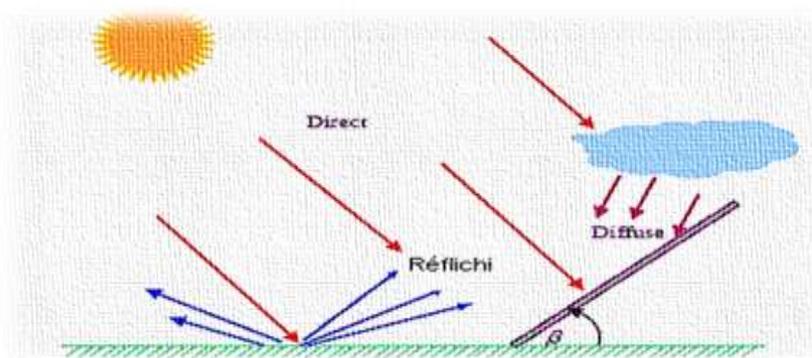


Figure I.5. Radiation solaire globale sur un plan incliné.

I.5.3. La cellule photovoltaïque

I.5.3.1. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule PV est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur d'habitude du silicium absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique continu sous l'effet photovoltaïque.

Elle est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction P-N avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction P-N de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches [6].

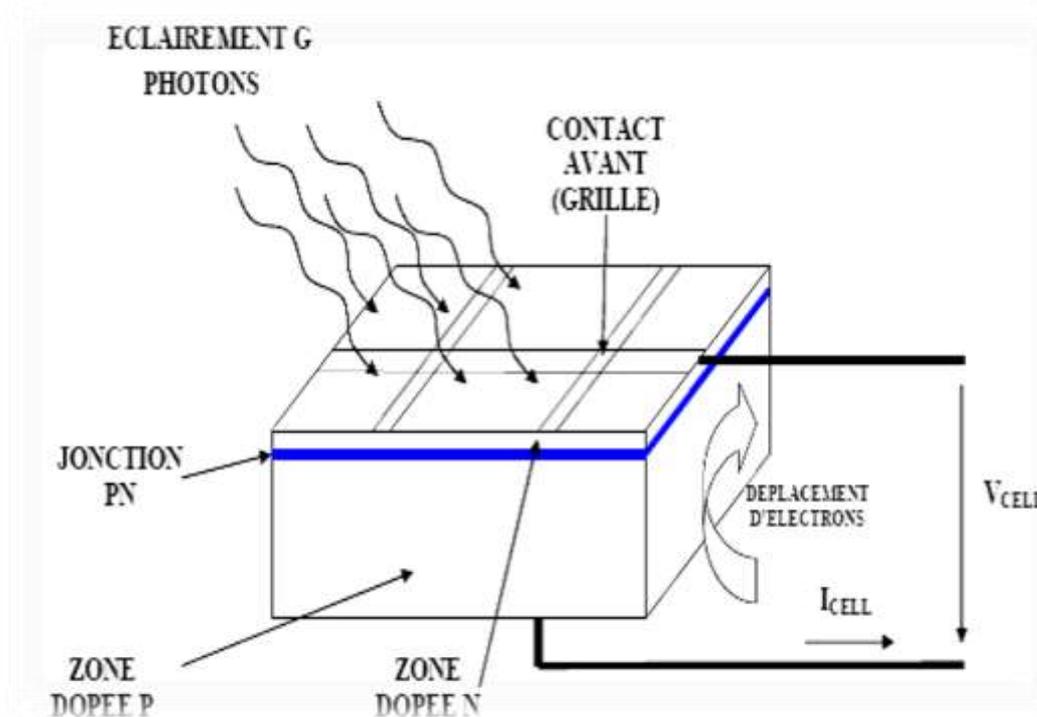


Figure I.6. Coupe transversale d'une cellule PV typique.

I.5.3.2. Caractéristique de la cellule photovoltaïque

La Figure I.7 montre la caractéristique courant-tension (I_c, V_c) pour une cellule photovoltaïque. La cellule étant chargée par une résistance R variable. Pour une charge résistive, la courbe de charge est une droite avec la pente $1/R$. Si la résistance R est petite, le point de fonctionnement est situé dans la région AB de la courbe.

Le courant I_c varie peu en fonction de la tension (il est presque égal au courant de court-circuit). La cellule se comporte comme un générateur de courant DC. D'autre part, si la résistance R est grande, la cellule fonctionne dans la région CD . Dans cette zone, la tension de la cellule varie peu en fonction de la tension V_{co} : la cellule se comporte comme une source de tension qui est presque égale à la tension de fonctionnement à vide. Dans la région BC sur la courbe, la cellule PV ne peut être caractérisée ni par une source de courant, ni par une source de tension. C'est dans cette zone que se trouve le point pour lequel la puissance fournie est maximale dans des conditions fixées d'éclairement et de température [7].

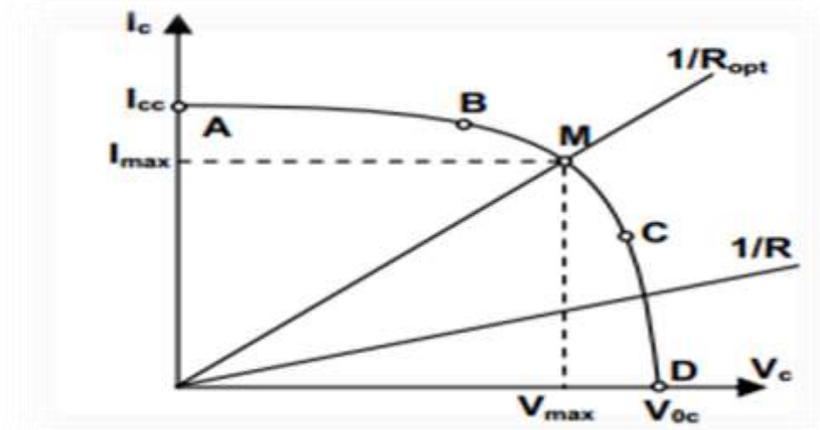


Figure I.7. Caractéristique $I_c(V_c)$ d'une cellule photovoltaïque.

I.5.4. Générateur photovoltaïque

I.5.4.1. Mise en série/parallèle

Pour produire davantage de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module photovoltaïque. Un générateur PV ou champ PV, résulte de l'association de modules PV montés en série et parallèle [8].



Figure I.8. De cellule au module au générateur photovoltaïque

On distingue trois types de montage : branchements en série, parallèle et mixte [8].

- **Le montage en série** : une association de N_s cellule en série permet d'augmenter la tension de (GPV), les cellules sont alors traversées par le même courant, donc les voltages s'additionnent et l'ampérage reste identique C'est le type de montage le plus fréquent pour les systèmes en 48V.
- **Le montage en parallèle** : Une association parallèle de N_p cellules permet d'accroître le courant de sortes de générateur photovoltaïque, donc Le voltage reste identique et les ampérages s'additionnent. C'est le type de montage fréquent pour les systèmes en 12V.
- Il est également possible de combiner **un montage en série et en parallèle**. C'est le type de montage le plus fréquent pour les systèmes en 24V.

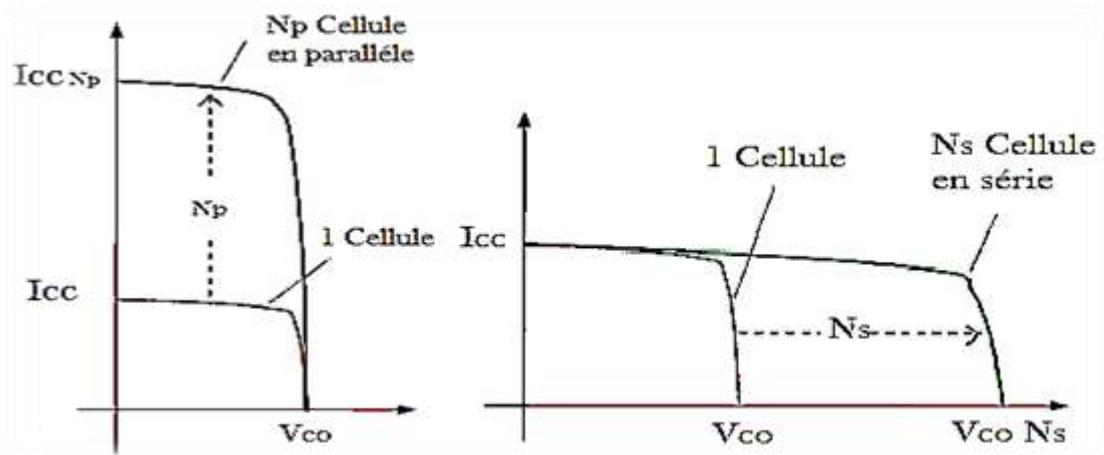


Figure I.9. Mise en série/parallèle d'une cellule photovoltaïque.

I.5.4.2. Protection du générateur photovoltaïque

Pour garantir la durée de vie d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules PV afin d'éviter des pannes. Deux types de protection sont généralement indispensables au bon fonctionnement d'un module photovoltaïque [8] :

- La protection par **diodes parallèles** (ou by-pass) a pour but de protéger une série de cellules dans le cas d'un déséquilibre lié à la défectuosité d'une ou plusieurs des cellules de cette série ou d'un ombrage sur certaines cellules parallèle.
- **La diode série** placée entre le module et la batterie empêche pendant l'obscurité le retour de courant vers le module. Elle est dans ce cas appelée encore diode anti-retour.

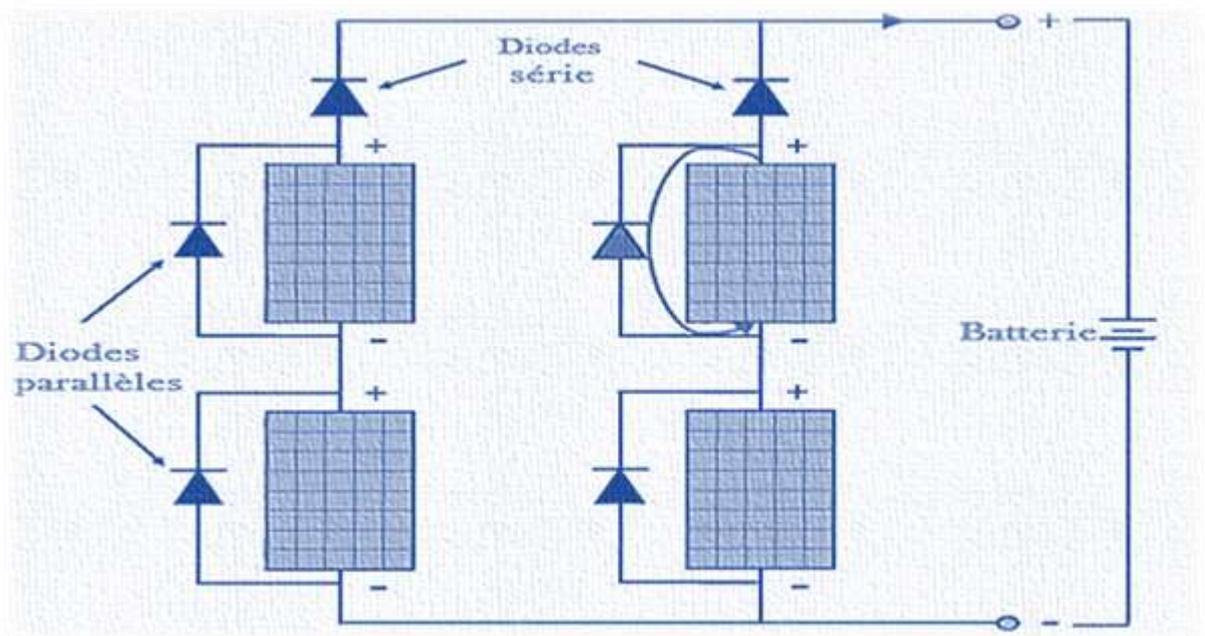


Figure I.10. Panneau photovoltaïque.

I.6. Les convertisseurs statiques

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa, est de maximiser la production de puissance des sources.

Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs [9].

I.6.1. Les convertisseur DC/DC (HACHEUR)

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue [9].

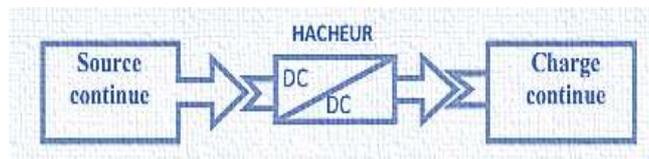


Figure I.11. Schéma de principe d'un hacheur.

I.6.2. Les convertisseur DC/AC (ONDULEUR)

L'onduleur est un montage électronique permettant de transformer une tension continue en une tension alternative (sinusoïdale). Ils sont utilisés généralement pour la production de tensions alternatives, et aussi pour commander les machines à courant alternatif.

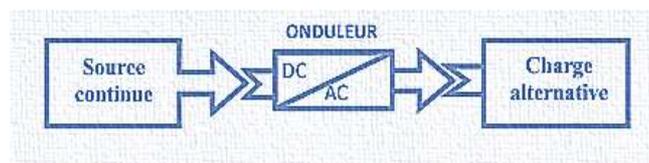


Figure I.12. Schéma de principe d'un onduleur.

I.6.3. Les convertisseur AC/DC (REDRESSEUR)

Les redresseurs permettent de convertir une alimentation alternative en continue. La tension et la puissance de sortie peuvent être contrôlées par les composants de puissance utilisés : les diodes et les thyristors.

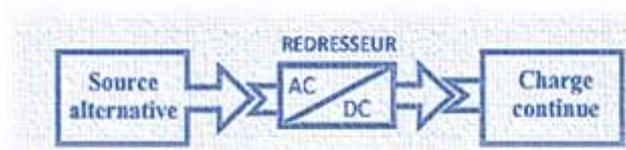


Figure I.13 . Schéma de principe d'un redresseur.

I.7. Description de la chaîne de production éolienne

I.7.1. Energie éolienne

L'énergie éolienne désigne l'énergie cinétique véhiculée par les masses d'air, c'est-à-dire par les vents, autour de notre planète. Il s'agit d'une énergie renouvelable de plus en plus utilisée pour produire une électricité verte à grande échelle.

I.7.2. Origine du vent

La source première de l'énergie éolienne est le vent. Le vent naît sous l'effet des différences de températures et de pression. Il est défini comme étant le déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Cette énergie est tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent [10].

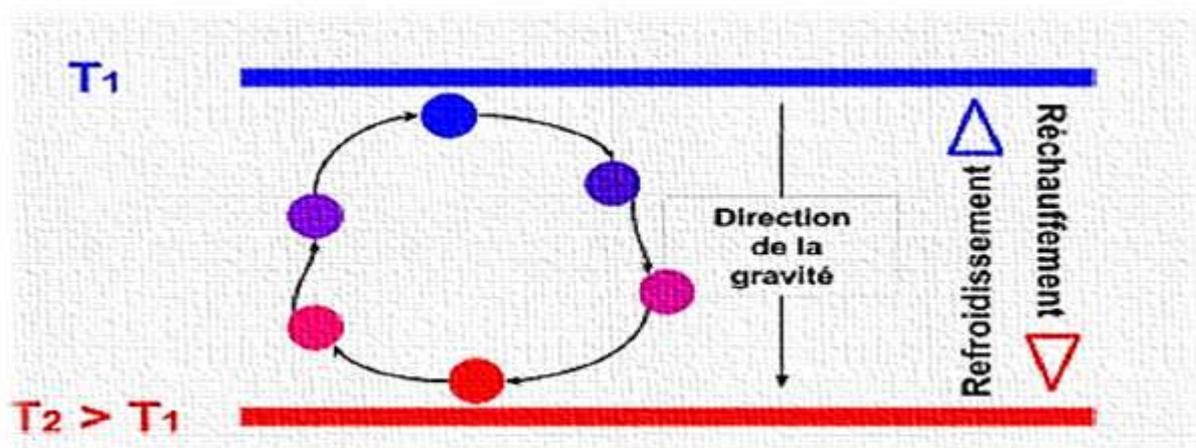


Figure I.14. Convection naturelle responsable des différences de densités.

I.7.3. Type d'aérogénérateur

Il existe deux familles d'éoliennes selon la technologie du turbine utilisé : les éoliennes à axe vertical (VAWT : Vertical Axis Wind Turbine) et les éoliennes à axe horizontal (HAWT : Horizontal Axis Wind Turbine).

❖ Eoliennes à axe vertical

Bien que les éoliennes à axe vertical aient été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles peuvent avoir un intérêt dans certains secteurs d'application étant donné qu'elles sont bien adaptées aux zones de vent perturbées par les habitations, elles sont d'une conception très simple, deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation [10], à savoir : les éoliennes de type Savonius et les éoliennes de type Darrieus.

Le fonctionnement des éoliennes de type Savonius (voire Figure I.15) est basé sur le principe de la traînée différentielle et celui de type Darrieus repose sur le principe de la variation cyclique d'incidence.

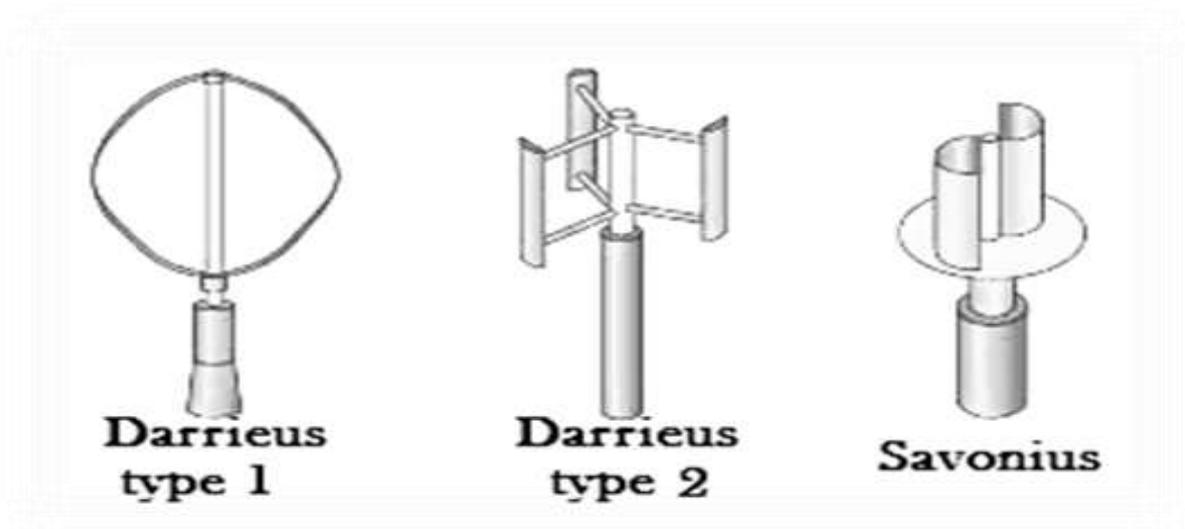


Figure I.15. Eoliennes a axe verticale : Darrieus type 1, Darrieus type 2, Savonius.

L'avantage principal de la topologie à axe vertical réside dans la possibilité de placer au sol tout l'équipement mécanique et électrique qui constitue la chaîne de conversion électromécanique, nécessite pas l'orientation de rotor dans la direction du vent. Par contre, ces éoliennes présentent certains inconvénients, à savoir :

- Les vents sont plus faibles à proximité de la surface du sol.
- Démarrage difficile pour le Darrieus, et masse non négligeable pour le Savonius.

❖ Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal (HAWT) sont de loin les plus utilisées, cette topologie offre la possibilité de varier l'angle de calage pour contrôler la puissance produite et la vitesse de l'éolienne, est aussi utilisée pour protéger la turbine contre les survitesses lors des tempêtes. Elle présente aussi un rendement aérodynamique élevé par rapport aux topologies à axes vertical. Les éoliennes de type horizontal peuvent être classifiées selon le nombre de pales qu'elles utilisent, une, deux, trois ou plus. Les structures à trois pales sont les plus répandues pour l'application éolienne [10].

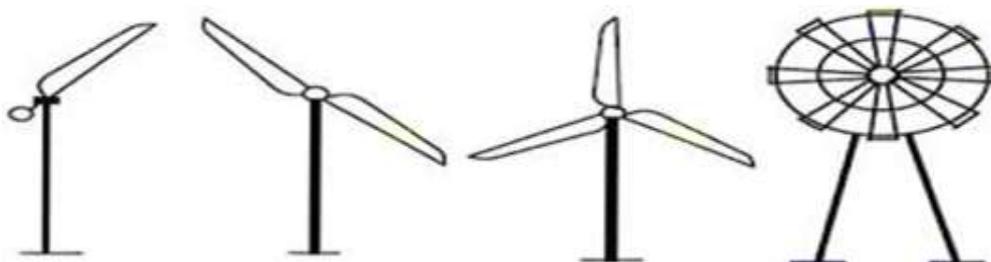


Figure I.16. Eolienne à axe horizontal, Mono-pale, Bipales, Tripales, Multi-pales.

I.7.4. Principaux composants d'un aérogénérateur

Une éolienne classique est généralement constituée de trois éléments principaux ; La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu.

- **La tour** : C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation des puissances nominales des éoliennes, le mat devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol mais aussi permettre l'utilisation de pales plus longues. La tour a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle.
- **La nacelle** : Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique. Elle comprend les éléments suivants : arbre ; multiplicateur ; roulements ; le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, Le générateur qui est dans le cas de ce travail est une MADA, Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle (la surface balayée par l'aérogénérateur doit être perpendiculaire à la direction du vent).
- **Les pales** : Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.
- **Le moyeu** : C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent.

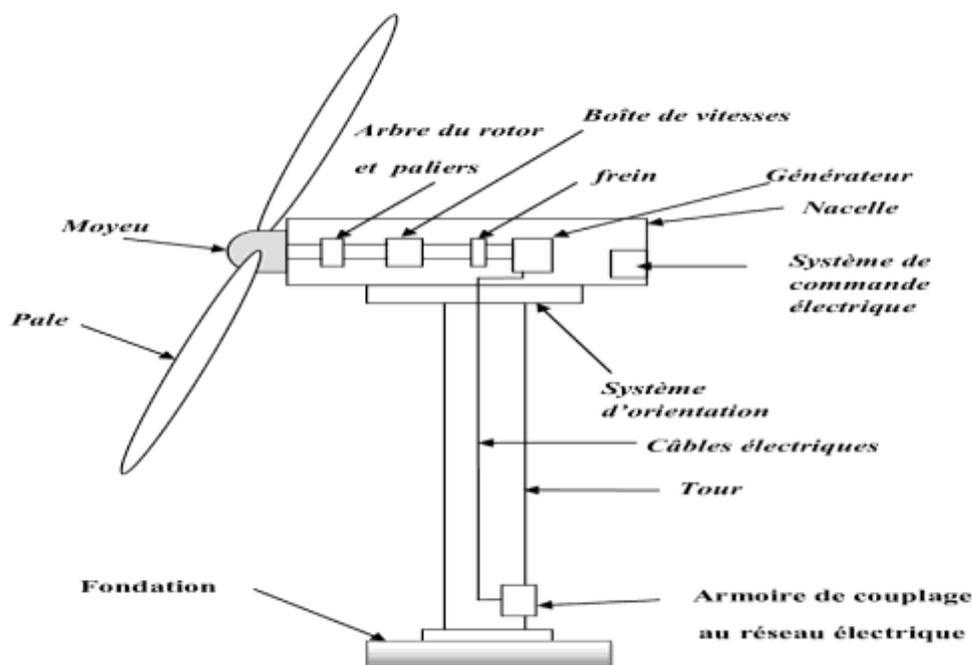


Figure I.17. Les composants de l'aérogénérateur.

I.7.5. Fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent captée par les pales, en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission. La transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique est assurée par un générateur de type synchrone ou asynchrone [11].

Le principe de fonctionnement d'un aérogénérateur peut être illustré par le schéma synoptique présenté dans la Figure (I.18).

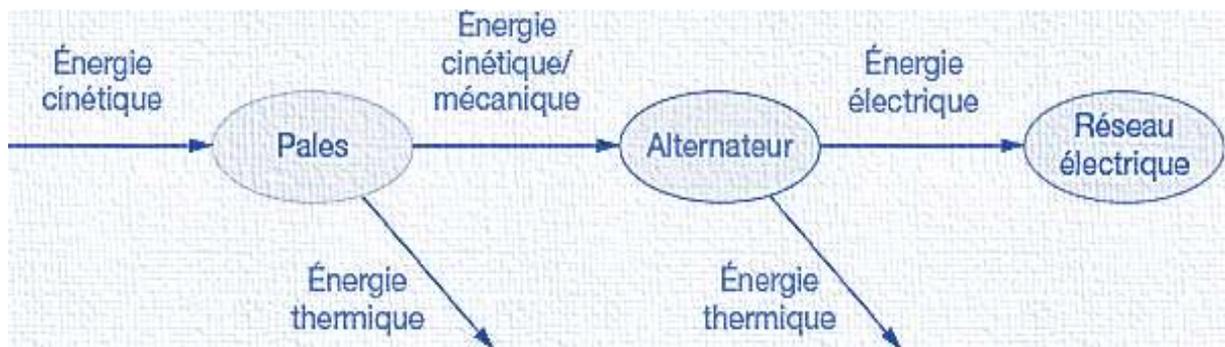


Figure I.18. Principe de fonctionnement d'un aérogénérateur.

I.7.6. Caractéristique d'une turbine éolienne

Les courbes caractérisant les turbines éoliennes sont décrites par les coefficients de puissance C_p qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine, il dépend de l'angle d'inclinaison des pales β , et de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

La figure (I.19) illustre l'évolution de coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β . D'après la figure, on peut remarquer que le coefficient de puissance $C_p=0,44$ passe par un maximum, pour une valeur de l'angle de calage $\beta=0$, et une valeur particulière de la vitesse spécifique $\lambda=8,5$. Pour optimiser la capture de l'énergie contenue dans le vent, la commande de l'éolienne doit se faire de sorte que la vitesse de rotation s'adapte avec la vitesse de vent afin que la vitesse spécifique soit optimale [12].

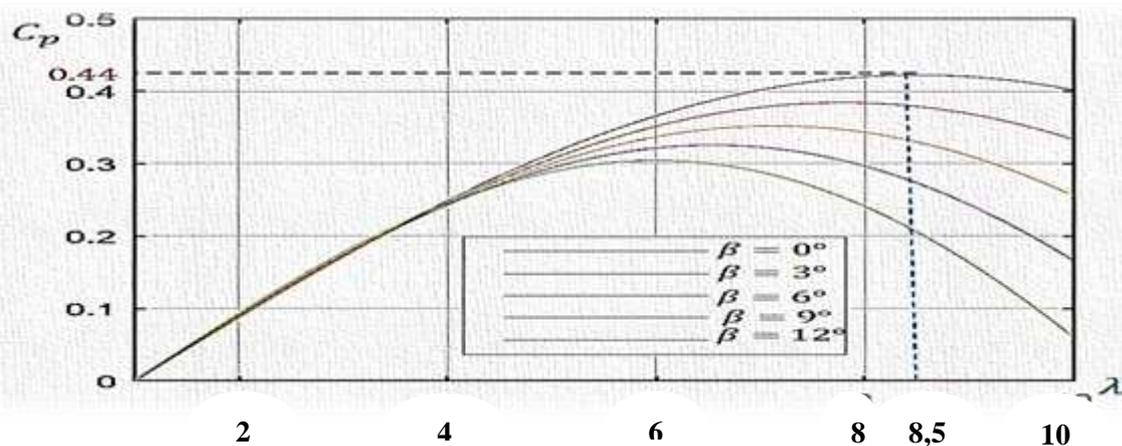


Figure I.19. Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine λ .

I.7.7. Machines électriques dans les aérogénérateurs

Il existe plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur. On citera quelques-unes d'entre elles et on s'intéressera d'avantage à la machine asynchrone à cage d'écurie.

I.7.7.1. Machine synchrone

- **Machine synchrone à rotor bobiné**

La connexion directe au réseau de puissance implique que le générateur synchrone tourne à vitesse constante, laquelle est fixée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine. L'excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système brushless avec un redresseur tournant. Toutefois, cette solution implique l'utilisation d'un générateur surdimensionné et d'un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance totale du système [13].

- **Machines synchrones à aimants permanents**

La caractéristique d'auto excitation du générateur synchrone à aimants permanents lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne. En fait, dans la catégorie des petites turbines, sa robustesse et son couple massique élevé en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en fait le moins compétitif [13].

- **Machine à reluctance variable (MRV)**

La machine à reluctance variable, est une machine synchrone à pôles saillants, démunie de bobinage d'excitation et fonctionnant exclusivement sur le couple de reluctance. Cette machine permet de supprimer totalement ou partiellement le multiplicateur de vitesse. Suite à la diversité des applications des MRV, ces dernières se divisent en deux catégories : machine à stator lisse et machine à double denture [14].

I.7.7.2. Machines à courant continu

Les machines à courant continu sont utilisées sur les éoliennes de faible puissance. Ce type de machine comporte un stator portant le circuit inducteur (bobine ou à aimants permanents), et un rotor constituant le circuit induit connecté aux bornes de sortie, via le système balais collecteurs.

I.7.7.3. La machine asynchrone

- **Génératrices asynchrones à double alimentation (GADA)**

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone : le stator (ou le rotor) est connecté à tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence (plus ou moins élaboré). Si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) peut être réduit. Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant [14].

- **Machine asynchrone à cage d'écureuil**

C'est dans les grandes puissances (au-delà de 100 kW) que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant "au fil du vent". Au départ, le faible coût et la standardisation des machines asynchrones a conduit à une très large domination des génératrices asynchrones à cage directement couplées au réseau (sans interface électronique de puissance) jusqu'à des puissances dépassant le mégawatt. Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateur de compensation de la puissance réactive, et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau. Dans le cas des aérogénérateurs de dimensions importantes (puissance, rayon des pales), la vitesse de rotation est peu élevée, ce que nécessite d'insérer un multiplicateur mécanique de vitesse [15].

I.8. Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons présentés des généralités sur les systèmes hybrides ainsi que les deux sources utilisées dans notre système en question pour la gestion de puissance. Il s'agit de combiner entre deux sources d'énergie entièrement renouvelable qui sont l'énergie solaire et l'énergie éolienne, nous avons expliqués leurs provenances, leurs caractéristiques et leurs composants.

Dans le prochain chapitre nous présenterons, la modélisation des deux sources constituant notre système hybride et on fera appel à MATLAB Simulink pour avoir les différentes caractéristiques voulues.

Chapitre II : Modélisation et simulation du système hybride (photovoltaïque-éolien)

II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons modéliser les deux chaînes de conversion (photovoltaïque-éolienne).

La modélisation est un moyen destiné à représenter par une forme mathématique une fonction ou un processus technologique.

Dans la première partie, nous allons modéliser la chaîne de production photovoltaïque en commençant par le modèle du panneau photovoltaïque utilisé (le modèle à une diode), suivi par le hacheur survolteur et la commande de maximisation de puissance utilisée qui est la méthode de perturbation et d'observation. Après nous allons tracer les caractéristiques $I_{pv}=f(P_{pv})$ et $P_{pv}=f(V_{pv})$ d'un panneau photovoltaïque à l'aide du logiciel de simulation Matlab dans les conditions STC puis en faisant varier l'ensoleillement puis la température.

Dans la deuxième partie, nous allons modéliser une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable, qui intègre une turbine, un multiplicateur, une génératrice asynchrone à cage d'écureuil et un redresseur.

II.2. Modélisation de la chaîne de production photovoltaïque

L'élément de base d'un système photovoltaïque est la cellule photovoltaïque. La cellule photovoltaïque (dispositif semi-conducteur) est un composant optoélectronique qui transforme directement la lumière du soleil en électricité.

La chaîne de conversion photovoltaïque, constituée d'un générateur PV et l'ensemble : hacheur survolteur et son système de commande, permettant d'extraire la puissance maximale [16].

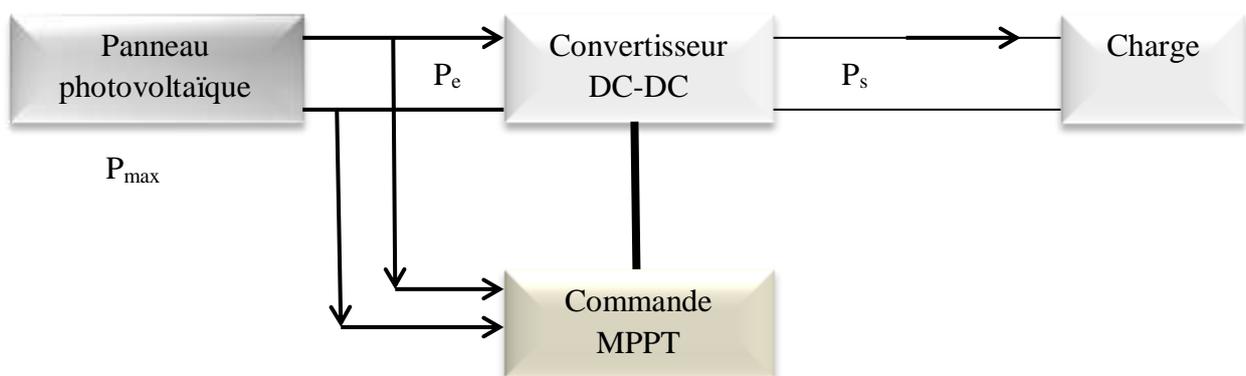


Figure II.1. Système photovoltaïque avec convertisseur d'adaptation.

II.2.1. Modélisation du panneau photovoltaïque

De nombreux modèles mathématiques du générateur photovoltaïque, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par la procédure et le nombre des paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant final [17].

Parmi tous ces modèles, nous avons utilisé le modèle le plus simple qui est le modèle à une seule diode. Dans ce qui suit nous allons citer les différents modèles existant et nous intéresser particulièrement au modèle standard à une seule diode.

A. Model idéal

La photopile est un composant semi-conducteur qui délivre un courant en excitant ce dernier par des photons donc en première approximation on a une source de courant qui est court-circuitée par une diode [18].

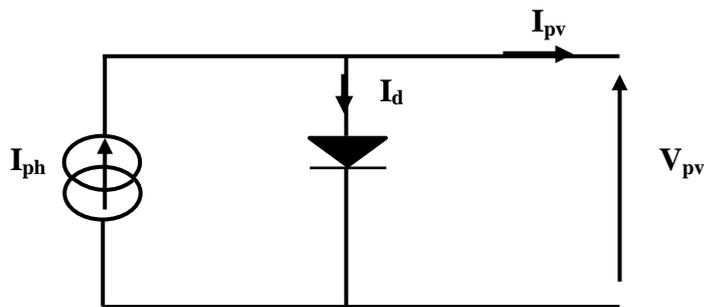


Figure II.2. Modèle électrique idéal d'une cellule PV.

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_d \quad (II.1)$$

Où :

I_{pv} : est le courant délivré par le module PV ;

I_{ph} : est le photo-courant ;

I_d : est le courant de la diode.

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique courant-tension est donnée par la relation suivante :

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_{pv}}{v_t}} - 1 \right) \quad (II.2)$$

Où :

I_0 : est le courant de saturation de diode ;

v_{pv} : est la tension délivrée par le module PV ;

$v_t = \frac{KT}{q}$ est la tension thermique ; T est la température absolue en K et I_{ph} est le photo-courant.

Donc, la relation (II.1) sera :

$$I_{pv} = I_{Ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{pv}}{KT}} - 1 \right) \quad (II.3)$$

B. Modèle à une diode sans résistance parallèle

Dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite, alors le modèle photovoltaïque précédent ne prend pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série R_s [18].

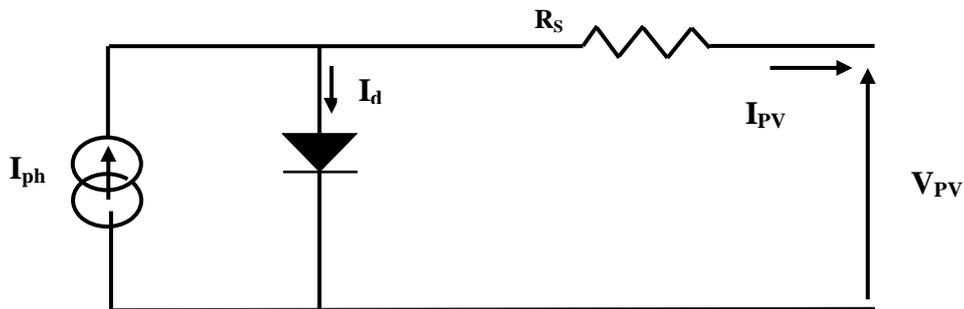


Figure II.3. Modèle électrique à une diode sans résistance parallèle.

C. Modèle à deux diodes sans résistance parallèle

Ce modèle a deux diodes attachées en parallèle à la source de courant et sans résistance parallèle cette deuxième diode est utilisée pour améliorer la précision des caractéristiques de la cellule PV. Ce modèle est représenté sur la figure (II.4)

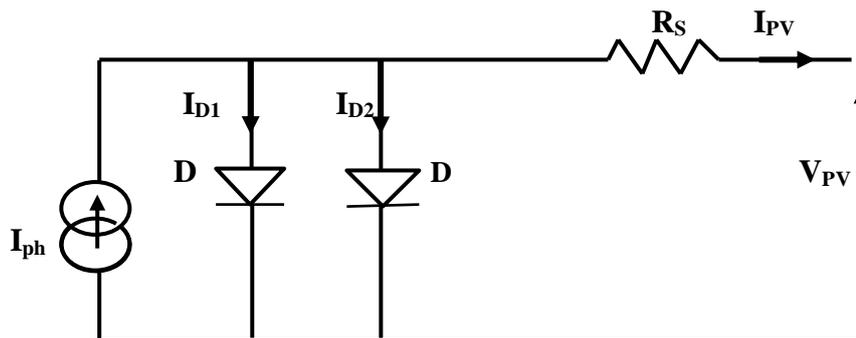


Figure II.4. Modèle électrique à deux diodes sans résistance parallèle d'une cellule PV.

D. Modèle à deux diodes (à deux exponentielles)

Un des modèles proposés dans la littérature est celui à deux diodes. Dans ce modèle ces deux diodes sont connectées en parallèle, le circuit équivalent correspondant est donné sur la figure II.5).

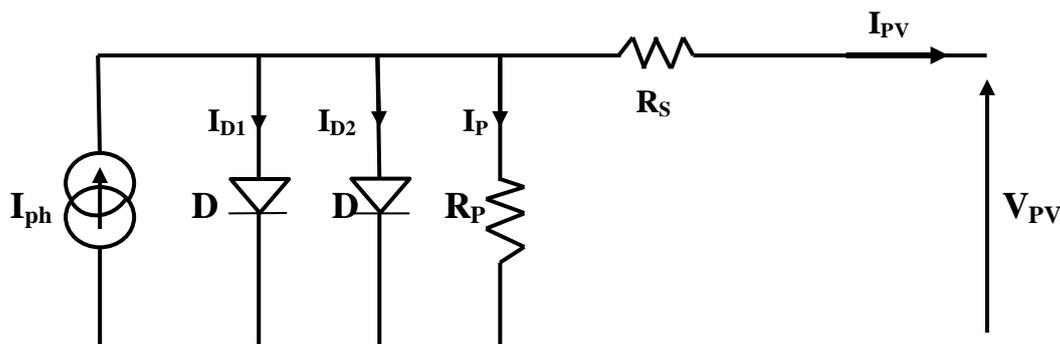


Figure II.5. Schéma équivalent d'un model implicite de la cellule PV.

E. Modèle à une diode

Le modèle à une diode est le modèle le plus classique de la littérature. Il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, deux résistances (R_s , R_p) pour les pertes, le modèle D'une cellule est celui de la figure (II.6) [19].

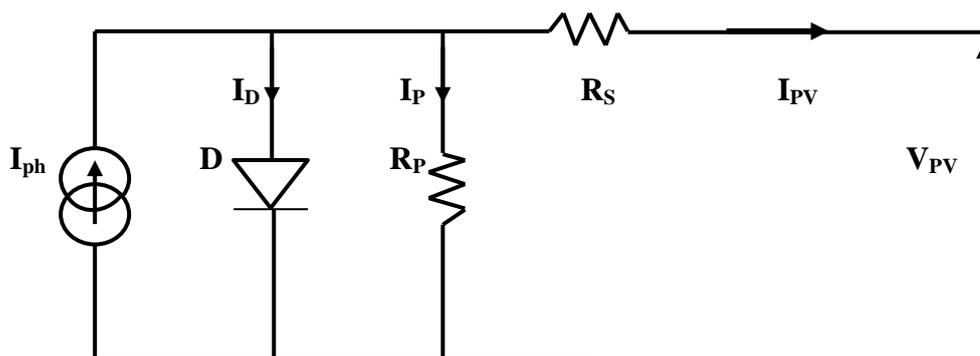


Figure II.6. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode.

Ce modèle comporte quatre variables. Les deux variables d'entrée sont : E_s -ensoleillement dans le plan des modules [W/m^2] et T_j température de jonction de la cellule [k]. Les deux variables de sortie sont : I_{pv} courant fourni par le groupe de modules [A] et V_{pv} la tension aux bornes du groupe de module [V].



Figure II.7. Schéma bloc du GPV.

A partir de la figure (II.6) la loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_p \quad (II.4)$$

- Le courant dans la résistance R_p est donné par :

$$I_p = \frac{V_{pv}}{R_p} \quad (II.5)$$

- Le photo-courant I_{ph} est donné par :

$$I_{ph} = P_1 E_s \left(1 + P_2 (E_s - E_{sréf}) + P_3 (T_j - T_{jréf}) \right) \quad (II.6)$$

Avec :

$E_{sréf}$: L'ensoleillement de référence [W/m^2] ;

T_j : La température de jonction de la cellule [k] ;

$T_{jréf}$: La température de jonction de référence [k] ;

P_1, P_2, P_3 : Paramètres constants.

- La température de jonction est donnée par :

$$T_j = T_a + E_s \left(\frac{N_{oct} - 20}{800} \right) \quad (II.7)$$

Avec :

T_a : La température ambiante [k] ;

N_{oct} : La température nominale de fonctionnement de la cellule ou du module solaire [k] ;

Le courant dans la diode est donnée par :

$$I_D = I_{od} \left[\exp\left(\frac{q}{K.A.n_s.T_j} (V_{pv} + R_s I_{pv}) \right) - 1 \right] \quad (II.8)$$

Avec :

I_{od} : Courant de saturation de la diode [A] ;

q : Charge élémentaire [$1.6.10^{-19}C$] ;

K : Constante de Boltzman [$1.39.10^{-23}$ (SI)] ;

A : Coefficient d'idéalité de la cellule ;

n_s : Nombre total de cellules connectées en séries et/ou en parallèles ;

R_s : La résistance série de la cellule [Ω] ;

V_{pv} : La tension de cellule [V] ;

I_{pv} : Le courant de cellule [A].

Le courant de saturation dans la diode est donné par :

$$I_{0d} = P_4 T_j^3 \exp\left(\frac{E_g}{kT_j}\right) \quad (\text{II.9})$$

Avec :

E_g : Energie de gap [$1.76.10^{-19}$] ;

P_4 : Paramètres constant.

On obtiendra alors l'équation globale modélisant le générateur PV :

$$I_{pv} = P_1 E_s \left(1 + P_2 (E_s - E_{sréf}) + P_3 (T_j - T_{jréf}) \right) - P_4 T_j^3 \exp\left(\frac{E_g}{kT_j}\right) * \left[\exp\left(\frac{q}{K.A.n_s T_j} (V + R_s I_{pv})\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_p} \quad (\text{II.10})$$

II.2.1.1. Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque

Dans notre travail nous avons utilisé le panneau de type SIEMENS [$110 W_c$ -24 V].

II.2.1.1.1. Caractéristique Courant-Tension

Les Caractéristique courant- tension à température et éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards (STC) ($E = 1000 W/m^2$ et $T = 298k$) et illustrée sur la figures (II.8)

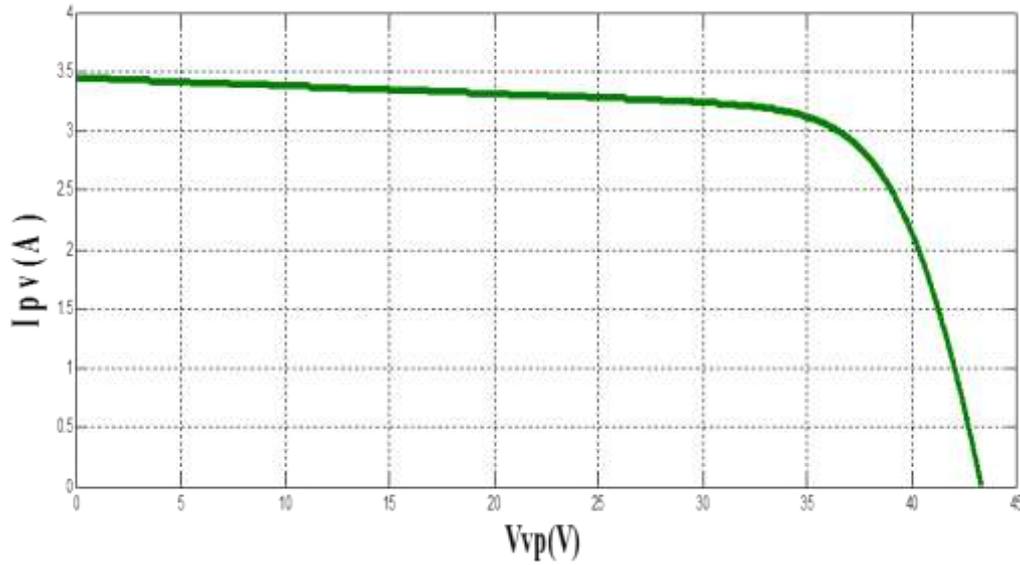


Figure II.8. Caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ d'un module photovoltaïque.

II.2.1.1.2. Caractéristique puissance –tension

Caractéristique ($P_{pv} = f(V_{pv})$) : À température et éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards (STC) ($E = 1000 \text{ W/m}^2$ $T = 298\text{k}$). La caractéristique ($P_{pv}=f(V_{pv})$) est donnée par la figure (II.9).

La puissance électrique P_{pv} d'un panneau photovoltaïque est égale au produit du courant photovoltaïque fourni I_{pv} par la tension à ces bornes donnée V_{pv} .

Puissance délivrée par le module a pour expression :

$$P_{pv} = V_{pv} * I_{pv} \quad (\text{II.11})$$

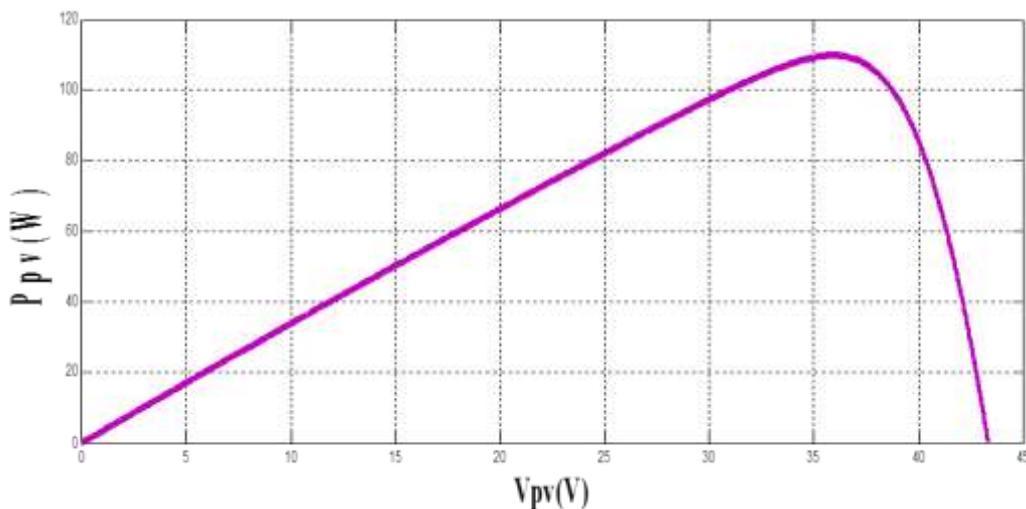


Figure II.9. Courbe $P_{pv} = f(V_{pv})$ d'un module photovoltaïque.

Cette courbe passe par un maximum de puissance $P_{opt}=110W$, à cette puissance correspond une tension $V_{opt}=36v$ et un courant $I_{opt}=3.05A$.

II.2.1.2. Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV

II.2.1.2.1. Influence de la température

On fait varier la température de 273k à 348k et on garde le niveau de l'éclairement constant ($E = 1000W/m^2$). La courbe des caractéristiques va présenter quatre allures différentes selon la température voir les figures (10) et (11).

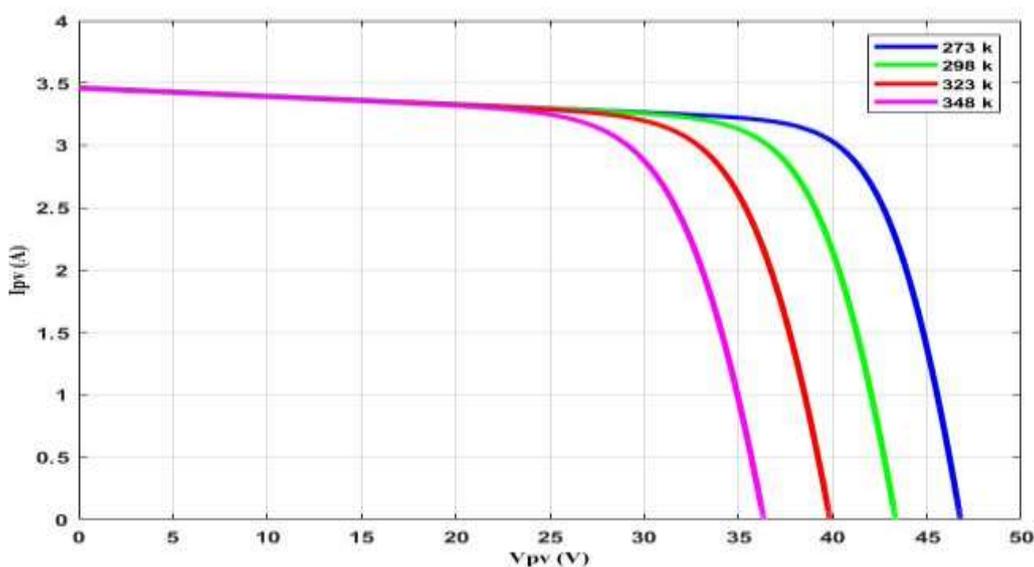


Figure II.10. Caractéristique courant-tension pour différentes températures.

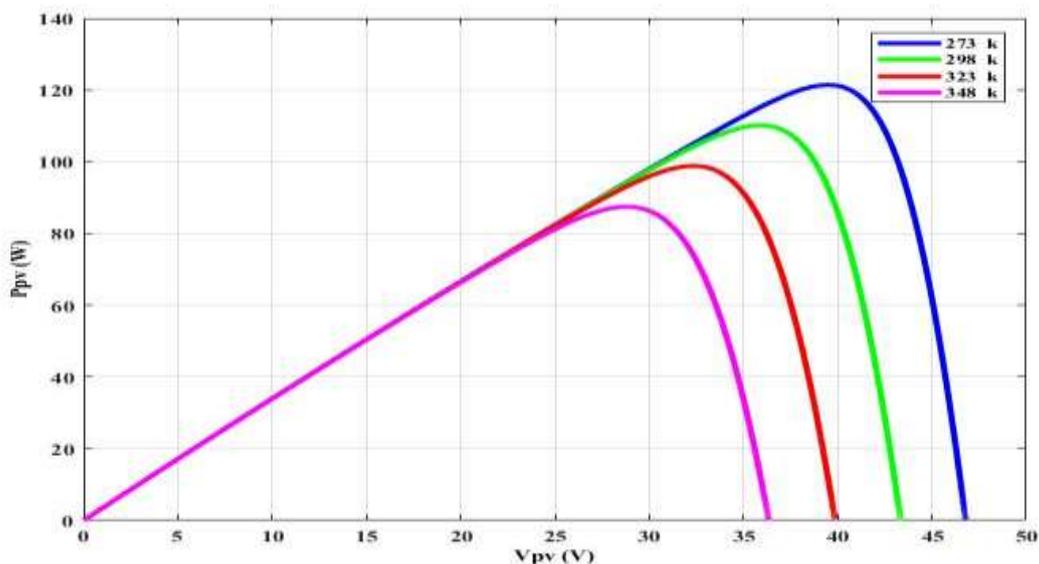


Figure II.11. Caractéristique puissance-tension pour différentes températures.

D'après la figure (II.10) nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement avec l'augmentation de la température, on constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale subit une diminution lorsque la température augmente figure (II.11).

II.2.1.2.2. Influence de l'intensité du rayonnement

Les figures (II.12), (II.13) présentent des courbes pour différents niveaux de rayonnement de (200,400, 600, 800 et 1000W/m²) avec une température constante de (273k), pour voir les caractéristiques courant-tension ($I_{pv}=f(V_{pv})$), et puissance-tension ($P_{pv}=V_{pv}$).

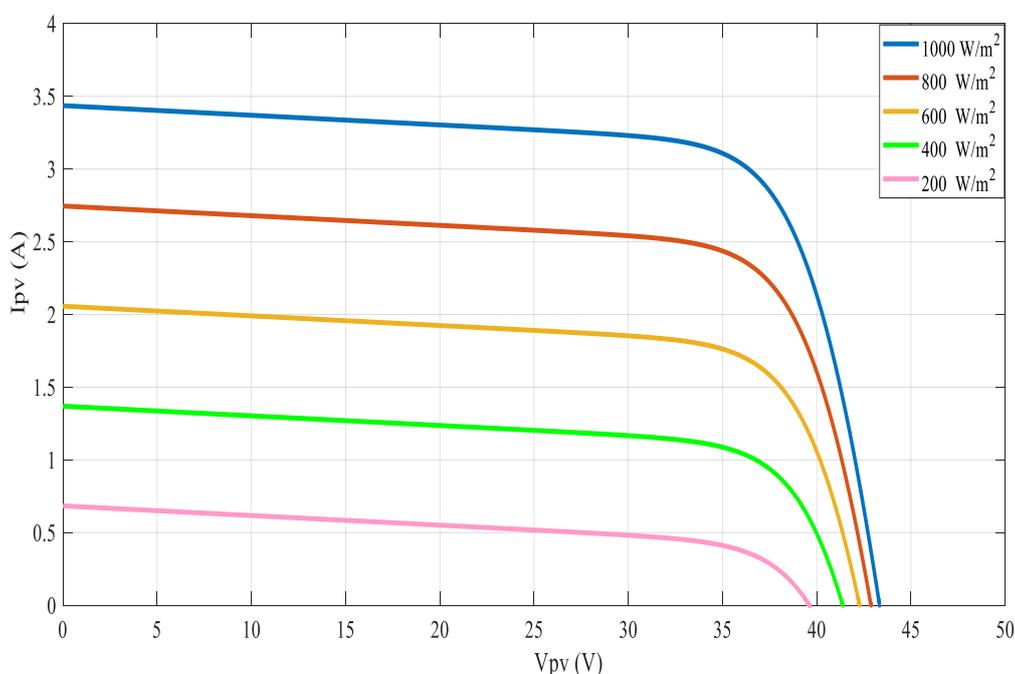


Figure II.12. L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$.

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans la même proportion, elle reste quasiment identique même à faible éclairement. L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité de rayonnement de 1000W/m² à une température de 25°C [21].

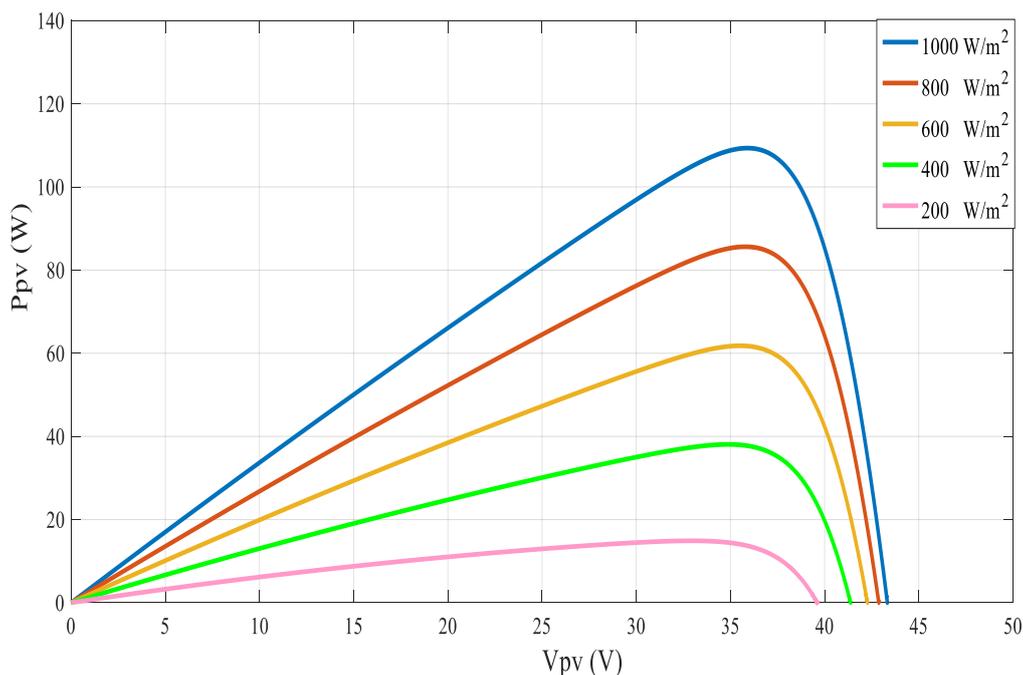


Figure II.13. Caractéristique puissance- tension pour différents ensoleillements.

La Figure II.13 illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement [22].

Ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule P_{Opt} est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

II.3. Optimisation de la puissance des modules PV

Le régulateur MPPT est un dispositif indispensable et essentiel pour les installations PV, il est utilisé pour extraire la puissance maximale depuis le générateur PV. Ce dispositif est combiné avec un hacheur d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, quelque-soit les conditions météorologiques (température, irradiation). Cette commande place ainsi le système au point de fonctionnement maximum (V_{opt}, I_{opt}) [23].

De nombreuses méthodes de poursuite de point de puissance maximale (MPPT) ont été développées pour permettre au système d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque, telle que :

- La méthode d'ajustement de courbe ;
- La méthode «look-up table» ;
- La méthode de la tension du circuit ouvert du générateur ;
- La méthode du court-circuit ;
- La méthode perturbation et d'observation (P&O) ;
- La méthode d'incrément de conductance ;
- Les méthodes avancées (logique floue, réseaux de neurones).

❖ Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} du générateur PV d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte.

Ainsi, comme l'illustre la figure (II.14) on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM, un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît.

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande.

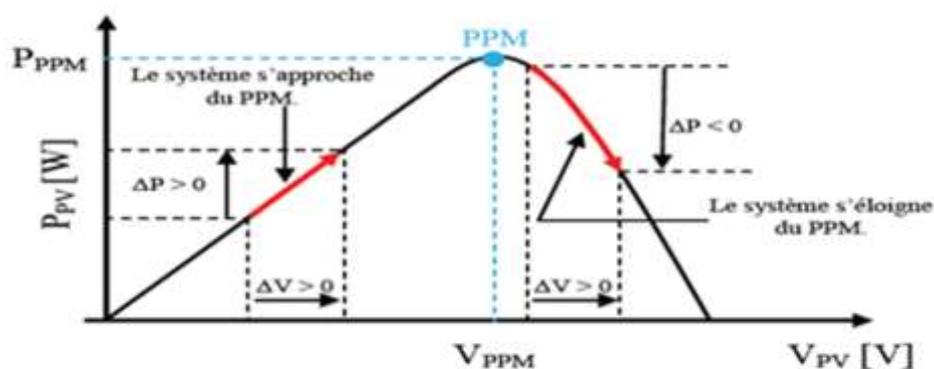


Figure II.14. Schéma de convergence vers le PPM par P&O.

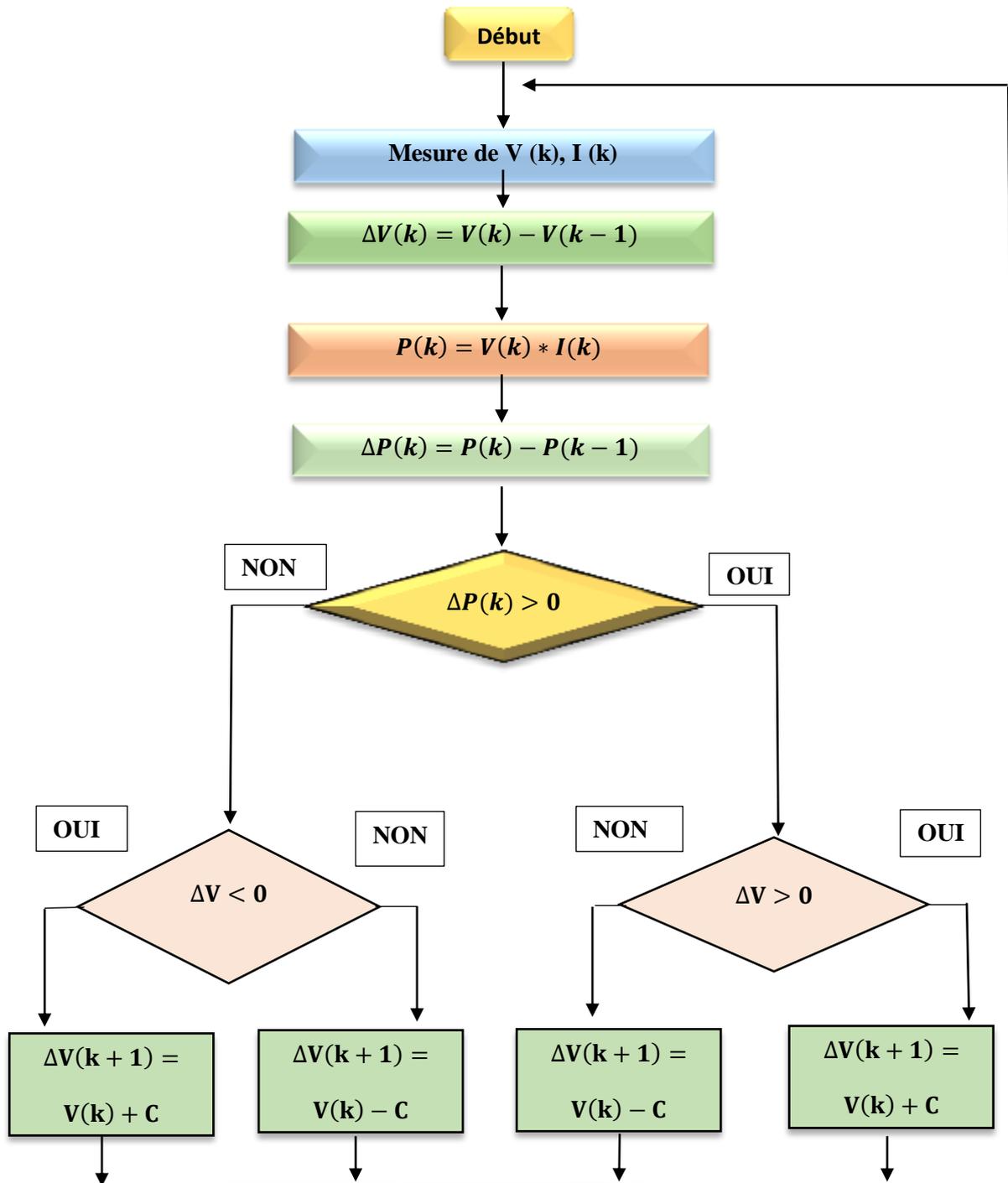


Figure II.15. Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O).

Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

$P_{pv}(n - 1)$: L'enceint puissance dans le temps (n-1)

$$\Delta V = V_{pv}(n) - V_{pv}(n - 1) \quad (\text{II.12})$$

$$\Delta P = P_{pv}(n) - P_{pv}(n - 1) \quad (\text{II.13})$$

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

II.4. Le convertisseur DC-DC (hacheur)

Le hacheur est un convertisseur continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Le hacheur compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [24].

II.4.1. Modèle d'un hacheur survolteur (BOOST)

Le hacheur BOOST (élévateur, Survolteur ou step-Up) est un convertisseur DC-DC à liaison directe entre une source d'entrée en tension (générateur) et une source de sortie en courant (récepteur) [25].

Il comporte deux interrupteurs complémentaires positionnés de façon à former un commutateur bi-positionnel « power-pole »:

- Le premier est un interrupteur commandable en tension ou en courant à l'amorçage comme au blocage placé en parallèle avec la source d'alimentation et l'inductance. Cet interrupteur peut être de type transistor bipolaire, transistor à effet de champ MOSFET ou transistor bipolaire à grille isolée IGBT, thyristor SCR, thyristor à grille bloquante GTO, ...etc.
- Le deuxième est un interrupteur unidirectionnel spontanément amorçable et blocable, Placé en antiparallèle avec la branche alimentation-interrupteur commandable.

- Des éléments passifs L et C placés en ordre servant à accumulateurs inductif et capacitif de l'entrée vers la sortie et formant un filtre pour le courant et la tension respectivement [26].

La figure (Figure II.16) suivante représente le schéma de principe d'un hacheur BOOST :

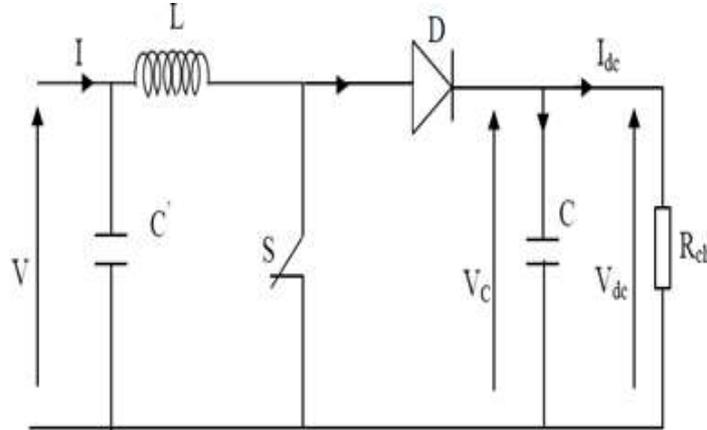


Figure II.16. Circuit électrique du convertisseur DC-DC.

Les figures (II.17), (II.18) montrent le cycle de fonctionnement, de période de hachage T, qui comporte deux étapes. Lors de la première, on rend l'interrupteur passant et la diode polarisée en inverse, donc bloquée. Cette phase dure de 0 à αT (α rapport cyclique, est compris entre 0 et 1).

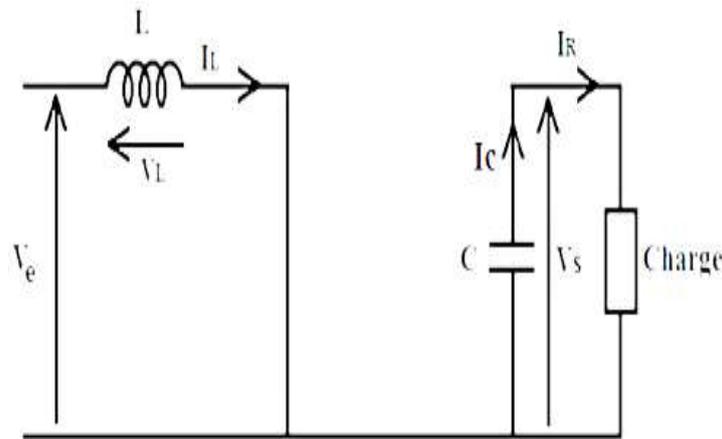


Figure II.17. Schéma d'un hacheur survolteur à $t \in [0, \alpha.T]$.

Le condensateur C est supposé initialement chargé, fournit de l'énergie à la charge et un courant I_R circule dans cette dernière.

$$\begin{cases} V_L = -V_e = L \frac{dI_L}{dt} \\ V_S = R \cdot I_{Rch} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Lors de la seconde période, on bloque l'interrupteur. La diode devient passante. Cette phase dure de $\alpha.T$ à T.

Avec : $I_C = I_R$.

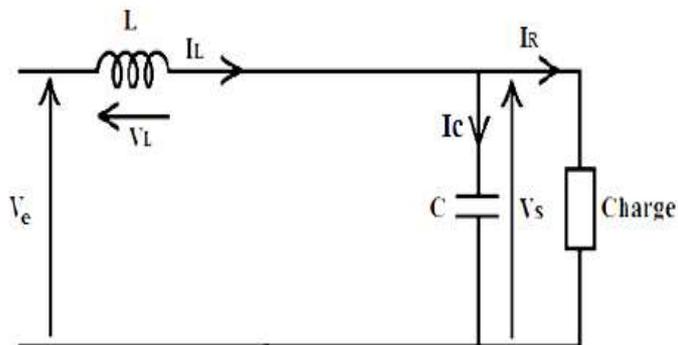


Figure II.18. Schéma d'un hacheur survolteur à $t \in [\alpha T, T]$.

$$\begin{cases} V_L = V_e - V_s \\ I_C = I_L - I_R \end{cases} \quad (II.15)$$

On en déduit facilement la tension et l'intensité dans la charge par les équations suivantes:

$$\begin{cases} V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_e \\ I_R = (1-\alpha) I_L \end{cases} \quad (II.16)$$

II.5. Simulation et interprétation de la chaîne de conversion photovoltaïque

Le schéma bloc qui est représenté dans la figure (II.19) représente le générateur photovoltaïque étudié, le hacheur BOOST et la commande MPPT qu'on a appliqué au générateur sous MATLAB.

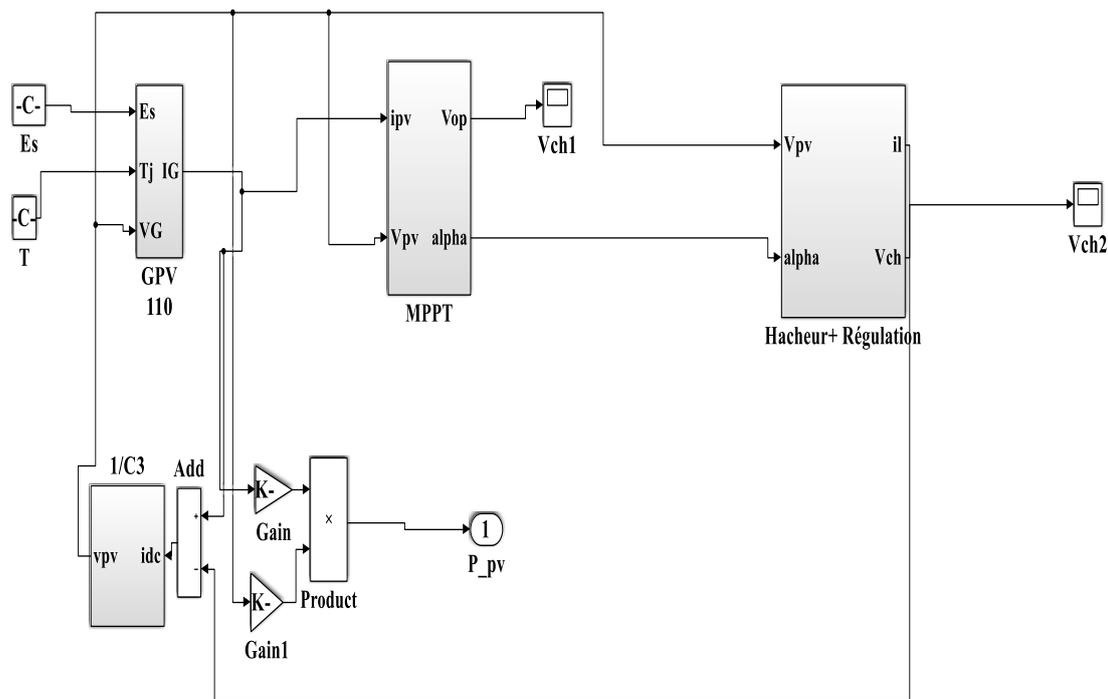


Figure II.19. Schéma Bloc du système photovoltaïque.

II.6. Résultats de simulation

Les résultats de simulation sont obtenus dans les conditions STC (un ensoleillement $E_s = 1000 \text{ W/m}^2$ et une température de $T = 298\text{k}$). Les caractéristiques présentées sont obtenus à partir de 40 panneaux photovoltaïques de 110Wc . Pour le montage des panneaux on dispose de 20 panneaux en série connecté en parallèle avec 20 autres panneaux.

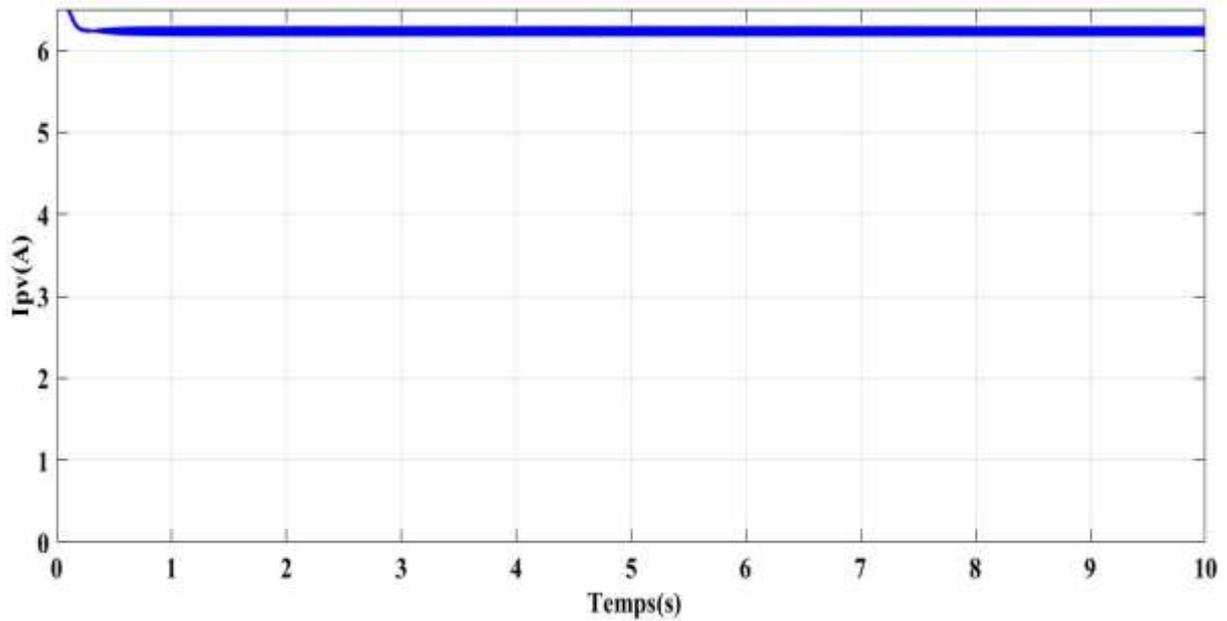


Figure II.20. Allure du courant photovoltaïque.

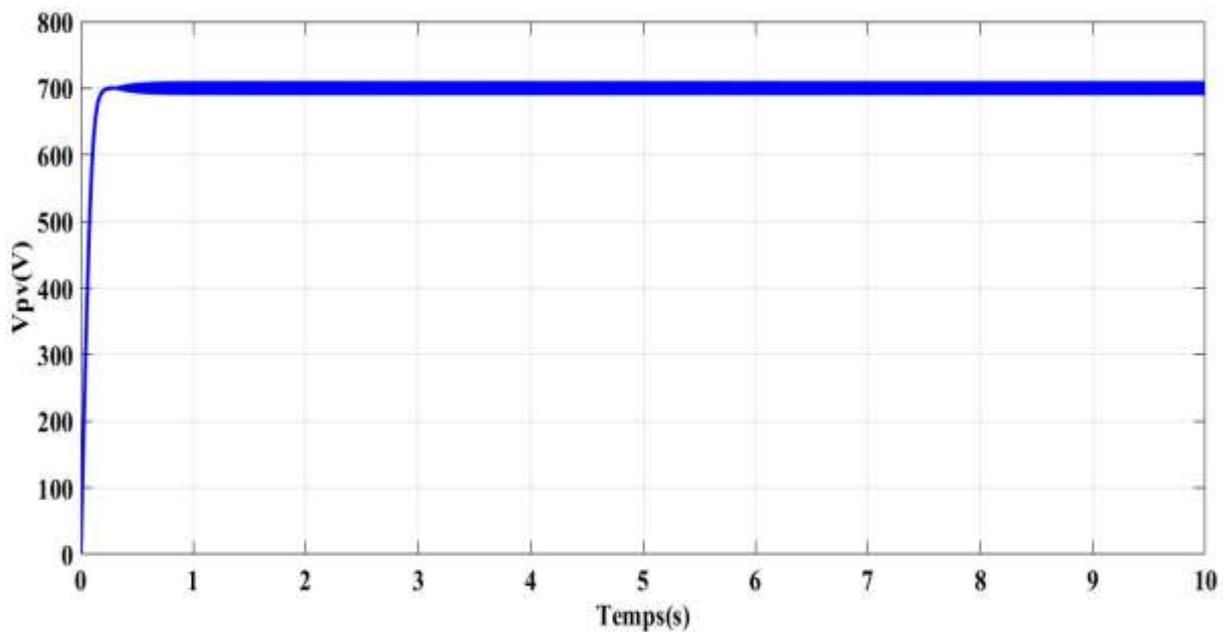


Figure II.21. Allure de la tension photovoltaïque.

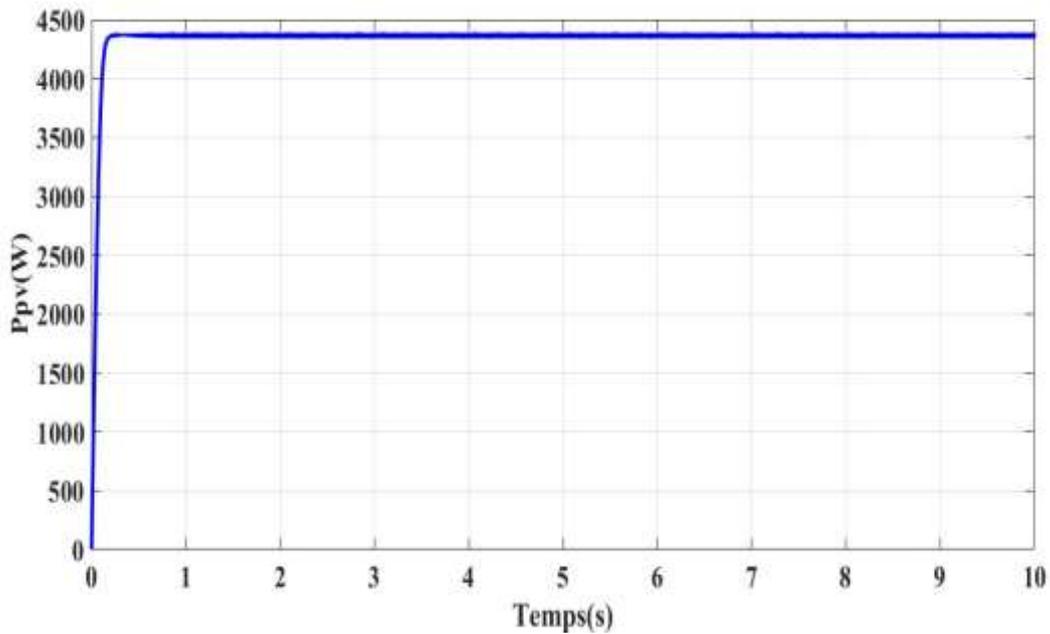


Figure II.22. Allure de la puissance photovoltaïque.

D'après les figures (II.20), (II.21) et (II.22) on constate que les variations en fonction du temps respectivement du courant I_{pv} , de la tension V_{pv} et de la puissance photovoltaïque sont nulles au fil du temps.

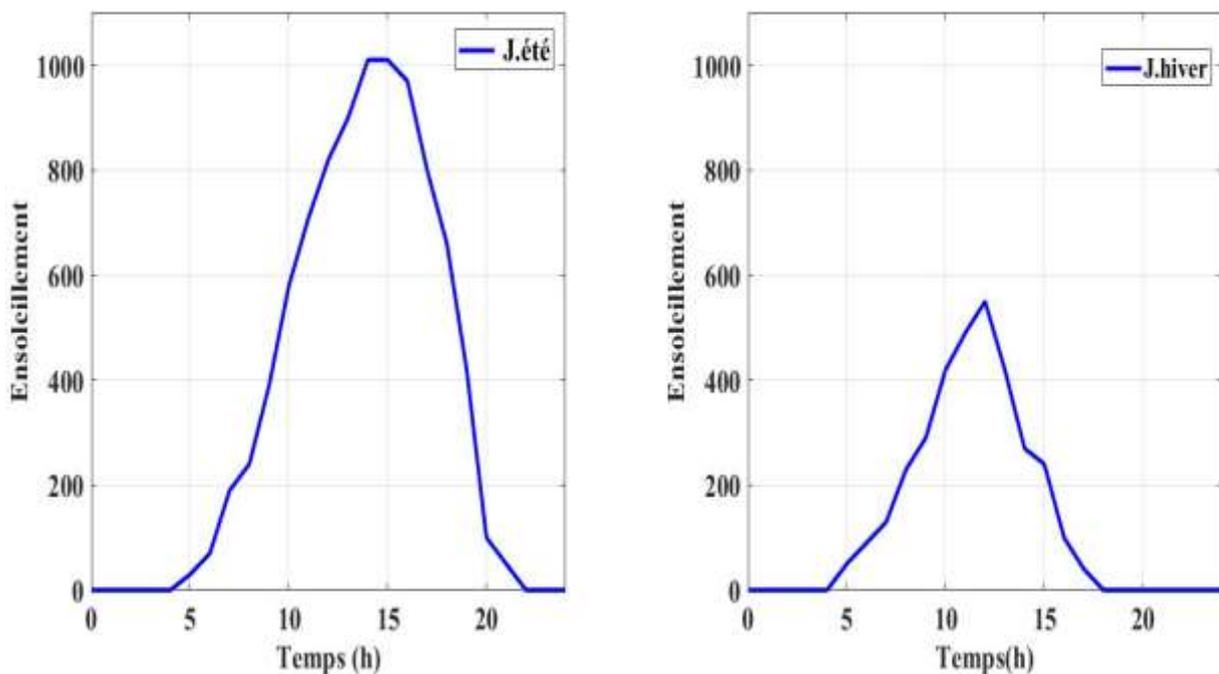


Figure II.23. Ensoleillement variable.

La figure (II.24), montre la puissance générée par les 40 panneaux photovoltaïques pour un ensoleillement variable.

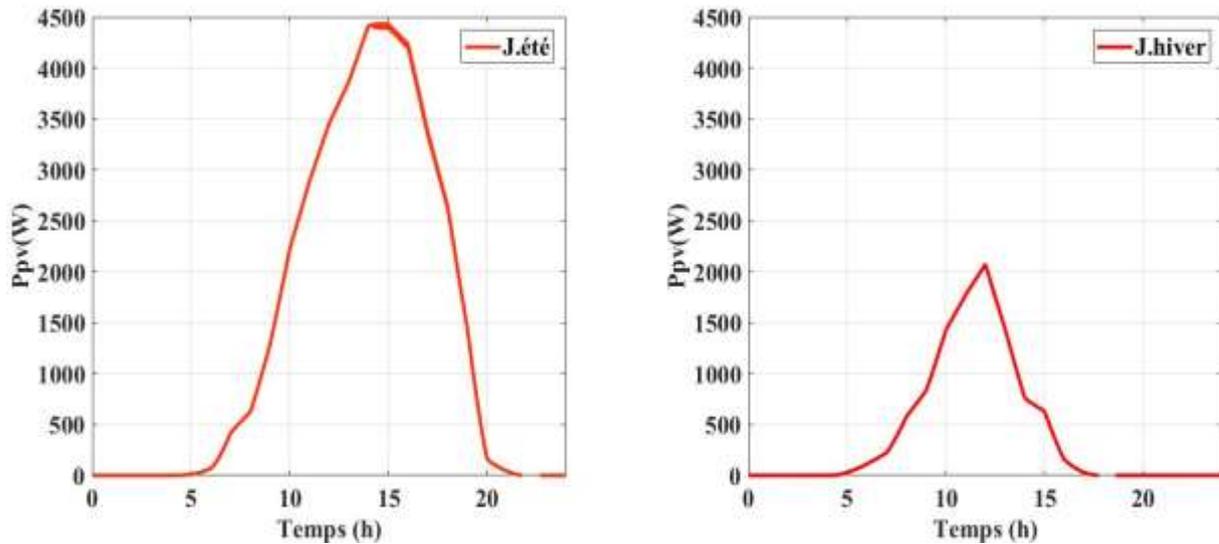


Figure II.24. Puissance générée pour un ensoleillement variable.

D'après les deux figures (II.23) et (II.24) On constate que l'ensoleillement et la puissance varie proportionnellement.

II.7. Modélisation de la chaîne de production éolienne

Le système éolien est représenté sur la figure (II.25), la turbine transmet l'énergie cinétique de vent en énergie mécanique par les pâles du rotor de la turbine éolienne qui captent une partie de l'énergie contenue dans le vent et la transfèrent au moyeu qui est fixé sur l'arbre de l'éolienne. Celui-ci transmet ensuite l'énergie mécanique au générateur électrique. La transmission de puissance entre le moyeu et le générateur électrique est réalisée à travers un multiplicateur de vitesse de rotation. On place un convertisseur de puissance entre le générateur électrique et la charge. Le convertisseur adapte la forme de l'énergie électrique fournie par le générateur à celle exigée par la charge.

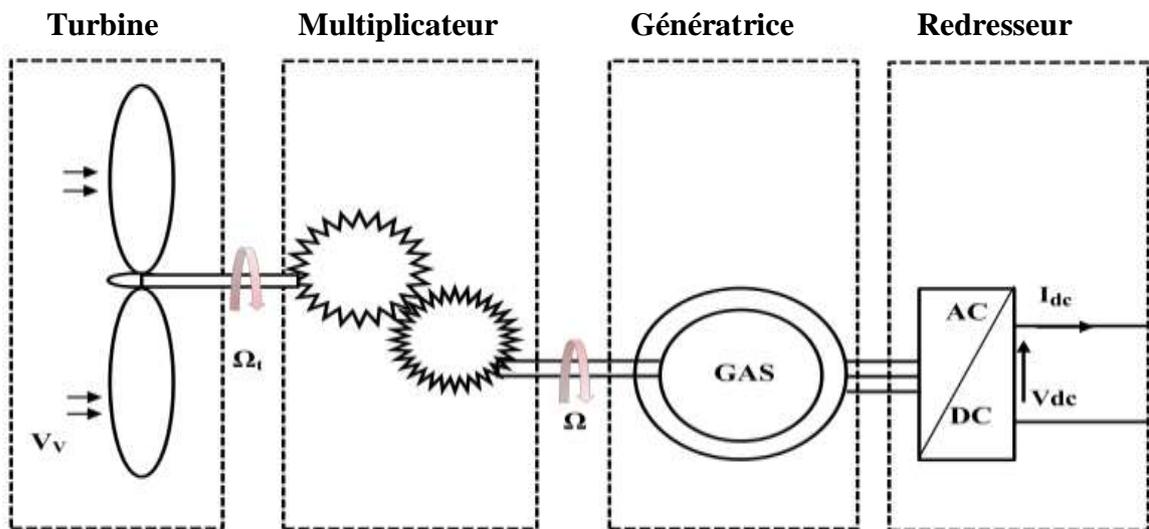


Figure II.25. Schéma synoptique de l'aérogénérateur.

II.7.1. Modélisation de la vitesse du vent

La vitesse du vent est la grandeur d'entrée d'un système de conversion éolienne. Elle est souvent représentée sous forme d'une fonction scalaire temporelle : $V_v = f(t)$

Les vents les plus intéressants qui donnent le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10 m/s.

La puissance du vent ou puissance éolienne est définie de la manière suivante :

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

Avec :

ρ : Est la densité d'air ($\text{Kg} \cdot \text{m}^3$) ;

$S = \pi R^2$: Est la surface circulaire balayée par la turbine ;

V_v : Est la vitesse du vent (m/s).

II.7.2. Modélisation de la turbine

Un système éolien transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique de la turbine, Présenté sur la figure (II.26).

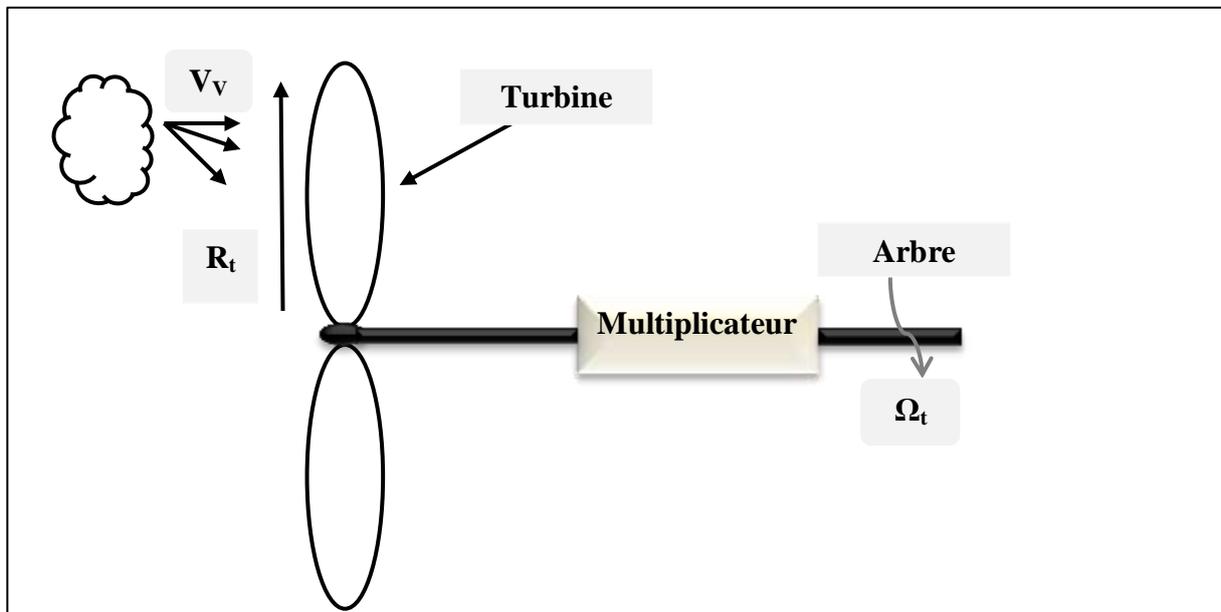


Figure II.26. Système de la turbine à modéliser.

Pour simuler la turbine, on utilise le couple associée à la caractéristique $C_p(\lambda)$, le couple de la turbine est alors déterminé par la relation suivante:

$$T_t = \frac{1}{2\Omega_t} C_p \rho S V_V^3 \quad (\text{II.18})$$

Avec : $S = \pi R_t^2$

Généralement l'expression du coefficient de puissance de la turbine est décrite par un polynôme, issu de l'interpolation des points en provenance des mesures, figure(II.27).

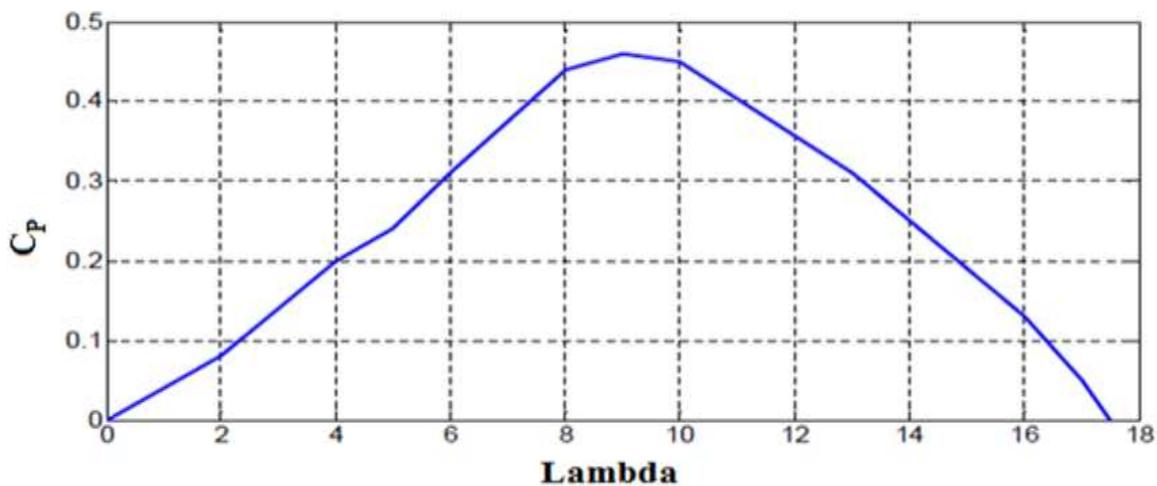


Figure II.27. Courbe $C_p(\lambda)$.

II.7.3. Modèle des pâles

La puissance cinétique du vent est donnée par :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (\text{II.19})$$

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique.

Son couple aérodynamique T_t est donné par l'expression suivante :

$$T_t = \frac{1}{2 \cdot \Omega_t} C_p \cdot S \cdot \rho \cdot V_v^3 \quad (\text{II.20})$$

La puissance aérodynamique P_t apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit comme suit:

$$P_t = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (\text{II.21})$$

Ω_t : La vitesse de la turbine ;

ρ : La densité de l'air ;

S : L'aire balayée par la turbine ;

V_v : Vitesse du vent ;

C_p : Le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine. Il dépend des dimensions de la pale, le ratio de la vitesse (λ) et l'angle d'orientation de la pale β .

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

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_v} \quad (\text{II.22})$$

II.7.4. Le multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse adapte la vitesse de rotation de la turbine à celle de la génératrice, donc la puissance captée par la turbine est transmise à la génératrice [27]. La vitesse mécanique de la turbine et celle de la génératrice sont liées par la relation suivante :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_m}{G} \quad (\text{II.23})$$

Le couple sur l'arbre lent et celui sur l'arbre rapide sont exprimés par la relation suivante :

$$T_{em} = \frac{T_t}{G} \quad (\text{II.24})$$

Avec :

G : Le gain du multiplicateur ;

T_{em} : Le couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone ;

T_t : Le couple développé par la turbine sous l'action du vent ;

Ω_m : La vitesse mécanique de la génératrice ;

Ω_t : La vitesse de la turbine.

II.7.5. Equation dynamique de l'arbre de transmission

On utilise le multiplicateur pour trouver les équations dynamiques de l'arbre :

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} + F\Omega_m = T_{em} - T_t \rightarrow (J + F)\Omega_m = T_{em} - T_t \quad (\text{II.25})$$

Avec :

J : Inertie totale de l'arbre de transmission ;

F : Le coefficient de frottement dynamique .

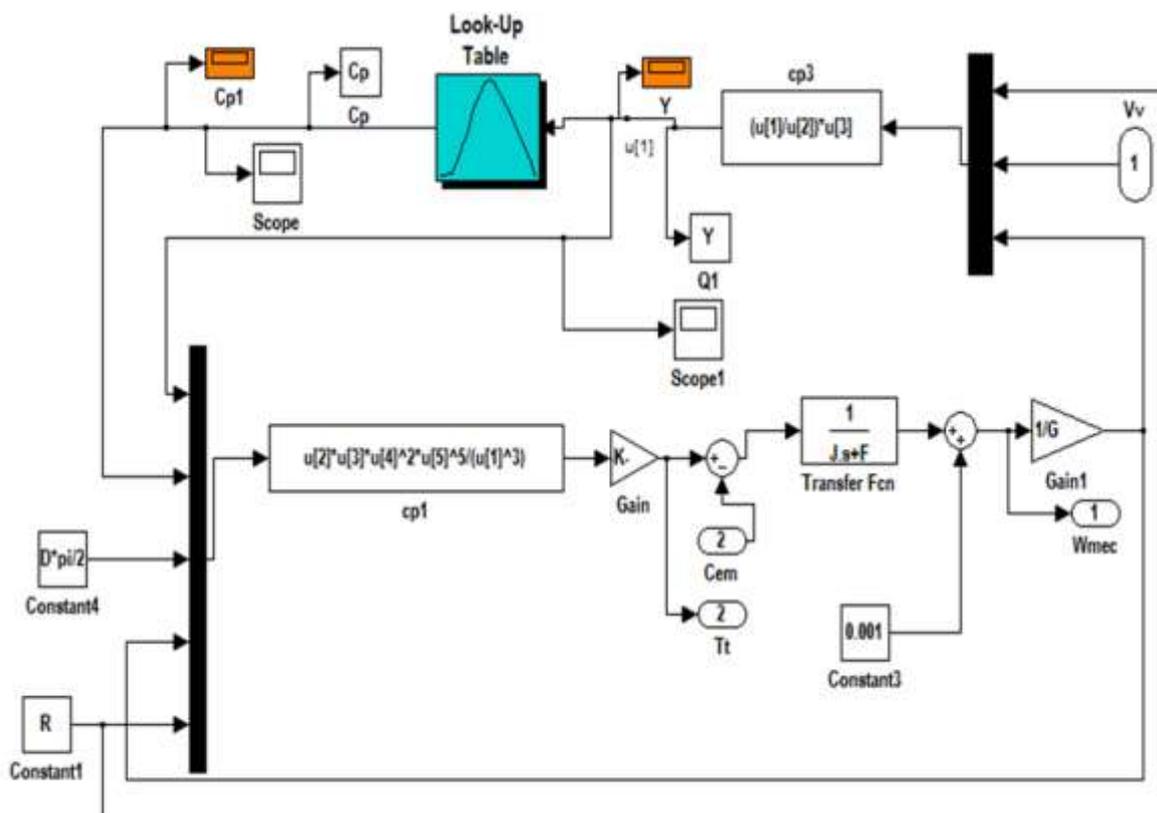


Figure II.28. Schéma bloc d'une turbine éolienne.

II.8. Modélisation de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances [28].

Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien la génératrice asynchrone à cage devient intéressante pour être couplée à une turbine éolienne.

Dans le cadre de notre travail, on dispose d'une génératrice asynchrone à cage, une éolienne à axe horizontal, à vitesse variable à pales fixes.

II.8.1. Modèle mathématique de la génératrice asynchrone

La génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde, grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques (robustesse, maintenance, prix).

La majorité destinées à un fonctionnement en moteur utilisent la machine asynchrone, par la variation du glissement que produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteur ou de contacts glissants sur des bagues.

La machine est modélisée à entrefer constant, le stator porte un enroulement triphasé symétrique et le rotor est en court-circuit.

II.8.2. Equation générale de la machine asynchrone

Les équations générales de la machine à cage d'écureuil dans un repère triphasé s'écrivent :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] \quad (\text{II.26})$$

$$[V_{rabc}] = 0 = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] \quad (\text{II.27})$$

On spécifie respectivement les vecteurs ou paramètres statoriques par l'indice 's' et rotoriques par l'indice 'r'. Les indices 'abc' indique le triphasé. Les paramètres R_s et R_r représentent respectivement les résistances statoriques et rotoriques par phase.

Les vecteur $[V]$, $[I]$ et $[\Phi]$ sont les vecteur tensions, courants et flux de chacune des armatures.

Avec :

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des tensions statoriques et rotoriques.

$$[I_{sabc}] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[I_{rabc}] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

$$[\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[\phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

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

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques.

Sachant que les différents flux de la machine s'expriment en fonction des inductances de la manière suivante :

$$[\phi_{sabc}] = [L_s] \cdot [I_{sabc}] + [M_{rs}(\theta)][I_{rabc}] \quad (\text{II.28})$$

$$[\phi_{rabc}] = [L_r] \cdot [I_{rabc}] + [M_{sr}(\theta)][I_{sabc}] \quad (\text{II.29})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}, [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

L_s, L_r : Inductances propre stator et du rotor ;

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

$[M_{sr}]$: La matrice des inductances stator-rotor ;

θ : La position absolue entre deux axes magnétiques(dq) ;

M_{\max} : Représente la valeur maximale d'inductance mutuelle stator-rotor obtenue lorsque les bobinages sont en regard l'un de l'autre.

La modélisation de la MAS passe par la transformation d'un système triphasé au système biphasé et inversement. Et pour des raisons de simplicité, il est classique d'exprimer les différentes équations de la machine asynchrone dans un repère biphasé tournant « dqo ».

Dans ce cas, on utilise la transformation de Park. Cette dernière, normée, assure l'invariance de la puissance instantanée entre les repères triphasés et biphasé « dqo ».

En choisissant un repère dqo biphasé, l'axe d peut être repéré par :

θ_s : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « a » du stator ;

θ_r : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « a » du rotor.

Les deux angles sont liés par la relation suivante :

$$\theta = \theta_s - \theta_r = P \cdot \Theta \quad (\text{II.30})$$

Où :

P : Nombre de paires de pôles ;

Θ : est la position mécanique de l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique.

Les différents axes sont illustrés sur la figure (II.29) :

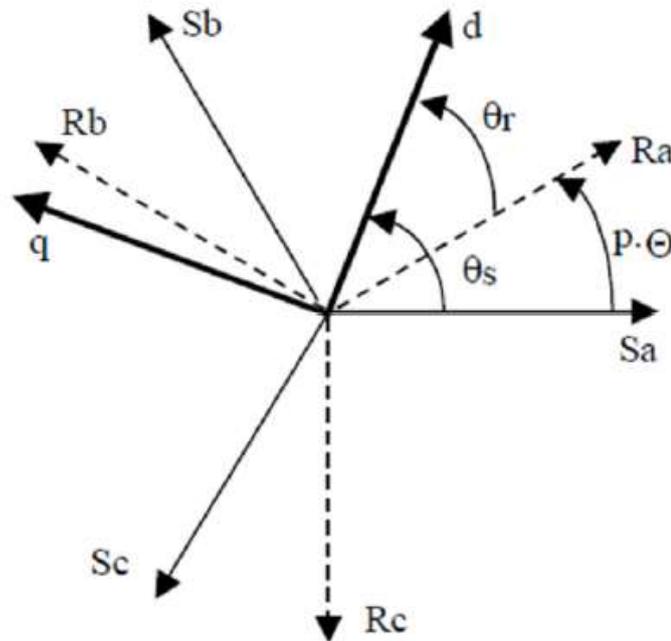


Figure II.29. Les différents systèmes d'axes utilisés.

En appliquant alors la transformation de Park aux équations statoriques avec un angle de rotation θ_s , on aboutit aux expressions suivantes dans le repère dq:

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{sq} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} \quad (\text{II.31})$$

$$V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{sd} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \quad (\text{II.32})$$

$$V_{so} = R_s \cdot I_{so} + \frac{d\varphi_{so}}{dt} \quad (\text{II.33})$$

De même, en l'appliquant aux équations rotoriques avec un angle de θ_r , on obtient les équations rotoriques dans le repère dq:

$$V_{rd} = 0 = R_r \cdot I_{rd} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{rq} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} \quad (\text{II.34})$$

$$V_{sd} = 0 = R_r \cdot I_{rq} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{rd} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \quad (\text{II.35})$$

$$V_{ro} = R_r \cdot I_{ro} + \frac{d\varphi_{ro}}{dt} \quad (\text{II.36})$$

En supposant le système parfaitement équilibré, les équations (II.33) et (II.36) qui correspondent aux composantes homopolaires, sont identiquement nulles.

Suite à l'hypothèse de linéarité des matériaux, les flux statoriques et rotoriques s'expriment dans le repère de PARK, en fonction des courants, par la relation matricielle suivante.

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

Avec :

$L_s = l_s + M$: Inductance cyclique statorique ;

$L_r = l_r + M$: Inductance cyclique rotorique ;

l_s : Inductance de fuite statorique ;

l_r : Inductance de fuite rotorique ;

$M_{rs} = M_{rs} = \frac{3}{2} + M_0$: Inductance mutuelle cyclique stator rotor.

L'expression du couple électromagnétique dans le repère de PARK est donnée par :

$$\begin{cases} T_{em} = P \cdot M_{sr}(I_{sq}I_{rd} - I_{sd}I_{rq}) \\ T_{em} = P(\varphi_{sd}I_{sq} - \varphi_{sq}I_{sd}) \end{cases} \quad (II.38)$$

II.8.3. Choix de repère (dq)

En pratique, il existe trois types de référentiel, le choix du référentiel se fait selon le problème à étudier.

$\omega = 0$: Correspond au référentiel stator ;

$\omega = \omega_r$: Correspond au référentiel lié au rotor ;

$\omega = \omega_s$: Correspond au référentiel lié au champ tournant.

Dans notre travail on utilise le référentiel lié au stator :

$\omega = 0$, on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{sd} + \omega_r \varphi_{rq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} = 0 \\ V_{rq} = R_r I_{rq} - \omega_r \varphi_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_{rq} = 0 \end{cases} \quad (II.39)$$

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq} \end{cases} \quad (II.40)$$

En remplaçant les flux par leurs expression en fonction des courants statoriques et rotoriques équation (II.32) on aura le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & \omega_r M & R_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r M & 0 & -\omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dI_{sd}}{dt} \\ \frac{dI_{sq}}{dt} \\ \frac{dI_{rd}}{dt} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (II.41)$$

$M = M_{sr} = M_{rs}$: Inductance mutuelle cyclique stator rotor.

Après la résolution de ce système d'équations matricielles, on obtient les expressions des courants statoriques et rotoriques suivants :

$$\begin{cases} \frac{dI_{sd}}{dt} = \frac{1}{L_s} \left[V_{sd} - M \frac{dI_{rd}}{dt} - R_s \cdot I_{sd} \right] \\ \frac{dI_{sq}}{dt} = \frac{1}{L_s} \left[V_{sq} - M \frac{dI_{rq}}{dt} - R_s \cdot I_{sq} \right] \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

$$\begin{cases} \frac{dI_{rd}}{dt} = \frac{1}{L_r} \left[R_r \cdot I_{rd} - M \frac{dI_{sd}}{dt} - \omega_r (L_r \cdot I_{rq} + M \cdot I_{sq}) \right] \\ \frac{dI_{rq}}{dt} = \frac{1}{L_r} \left[R_r \cdot I_{rq} - M \frac{dI_{sq}}{dt} + \omega_r (L_r \cdot I_{rd} + M \cdot I_{sd}) \right] \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

II.9. Modélisation des convertisseurs statiques

La génératrice fournit de l'énergie électrique à fréquence variable et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre celle-ci et la charge. Cette interface est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue.

II.9.1. Modélisation du redresseur

Les redresseurs font parti de la famille des convertisseurs statiques qui convertir l'énergie d'une source alternative en énergie continu, comme le montre le schéma ci-dessous :

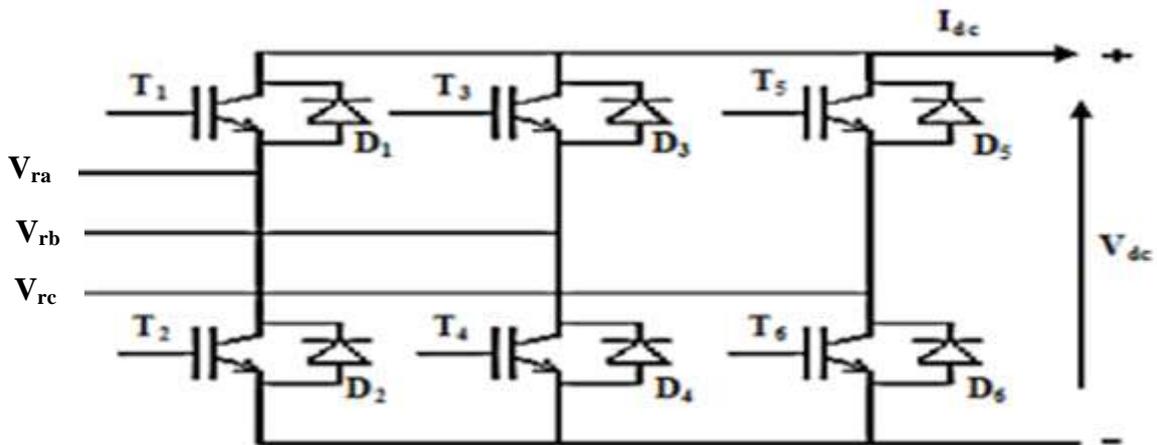


Figure II.30. Schéma du redresseur.

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

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.44})$$

$$I_{dc} = S_a I_a + S_b I_b + S_c I_c \quad (II.45)$$

Avec :

- V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : Tensions statoriques [V] ;
- V_{dc} : Est la tension redressée ;
- I_{dc} : le courant modulé par le redresseur ;
- S_a, S_b, S_c : Ce sont des fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur (égale à 1 si l'interrupteur est fermé ou égale à 0 dans le cas contraire).

II.9.2. Modélisation de l'onduleur

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de délivrer des tensions et courants alternatifs à partir d'une source délivrant un courant continu ,constitué de cellules de commutation généralement à transistors. Il est constitué de trois bras, de deux interrupteurs pour chacun. Pour assurer la continuité en courant, chaque interrupteur est monté en antiparallèle avec une diode de récupération comme le montre le schéma ci-dessous :

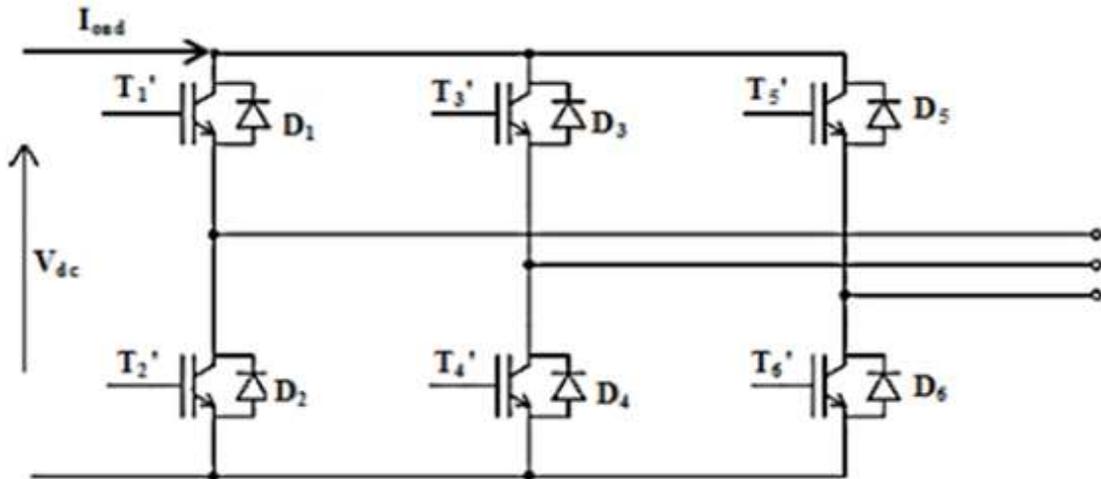


Figure II.31. Schéma de l'onduleur.

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

$$\begin{bmatrix} V_{cha} \\ V_{chb} \\ V_{chc} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S'_a \\ S'_b \\ S'_c \end{bmatrix} \quad (II.46)$$

$$I_{ond} = S'_a i_{cha} + S'_b i_{chb} + S'_c i_{chc} \quad (II.47)$$

Avec :

I_{ond} : le courant ondulé par l'onduleur ;

S'_a, S'_b, S'_c : Sont des fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur (égale à 1 si l'interrupteur est fermé ou égale à 0 dans le cas contraire).

II.9.3. Commande vectorielle de la génératrice asynchrone

La commande vectorielle aussi appelée la commande de flux orienté son fonctionnement dans les machines asynchrones est de réguler la vitesse du couple elle utilise des réglages du flux et du couple à l'intérieur de la machine afin de régler le problème de découplage des réglages du flux et du couple à l'intérieur de la machine.

On choisit l'orientation du repère :

$$\varphi_{rd} = \varphi_r \text{ et } \varphi_{rq} = 0 \quad (\text{II.48})$$

Lorsque le champ rotorique est orienté, le comportement de la machine asynchrone est décrit par les équations suivantes :

$$T_{em} = P \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \varphi_r \cdot I_{sq} \quad (\text{II.49})$$

$$0 = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_r}{dt} \quad (\text{II.50})$$

$$0 = R_r \cdot I_{rq} + \omega_r \varphi_r \quad (\text{II.51})$$

$$\varphi_r = M \cdot I_{sd} + L_r \cdot I_{rd} \quad (\text{II.52})$$

$$0 = M \cdot I_{sq} + L_r \cdot I_{rq} \quad (\text{II.53})$$

A partir de l'équation (II.45), on obtient :

$$\frac{d\varphi_r}{dt} = -R_r \cdot I_{rd} \quad (\text{II.54})$$

Le flux s'exprime en fonction du courant et de la pulsation rotorique à partir de l'équation (II.46) sous la forme suivante :

$$\varphi_r = -\frac{R_r}{\omega_r} \cdot I_{rq} \quad (\text{II.55})$$

Pour mettre en œuvre la stratégie de commande, il faut pouvoir estimer φ_r et ω_r . On peut, à partir de l'équation (II.52), exprimer le courant i_{rd} comme suit :

$$I_{rd} = \frac{\varphi_r - M \cdot I_{sd}}{L_r} \quad (\text{II.56})$$

Par ailleurs, l'équation (II.53) peut s'écrire de la manière suivante :

$$I_{rq} = -\frac{M}{L_r} \cdot I_{sq} \quad (\text{II.57})$$

Dans l'équation (II.53), on remplace I_{rq} par sa valeur exprimé en équation (II.51), il advient que :

$$\varphi_r = \frac{M \cdot I_{sd}}{1 + T_r \cdot S} \quad (\text{II.58})$$

Avec :

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} : \text{Constante de temps rotorique ;}$$

S : Opérateur de Laplace.

Dans l'équation (II.55) on remplace I_{rq} par sa valeur donnée en équation (II.58) on trouve :

$$\omega_r = \frac{M \cdot I_{sq}}{T_r \cdot \varphi_r} \quad (\text{II.59})$$

On obtient finalement

$$\omega_s = \frac{M \cdot I_{sq}}{T_r \cdot \varphi_r} + p \cdot \Omega \quad (\text{II.60})$$

La dernière relation représente un autopilotage de la machine asynchrone. Cette relation qui force à zéro la grandeur de sortie, et permet le découplage entre les deux grandeurs restantes dans l'expression du couple.

La figure (II.32) représente le schéma de la commande vectorielle de la génératrice asynchrone [28] :

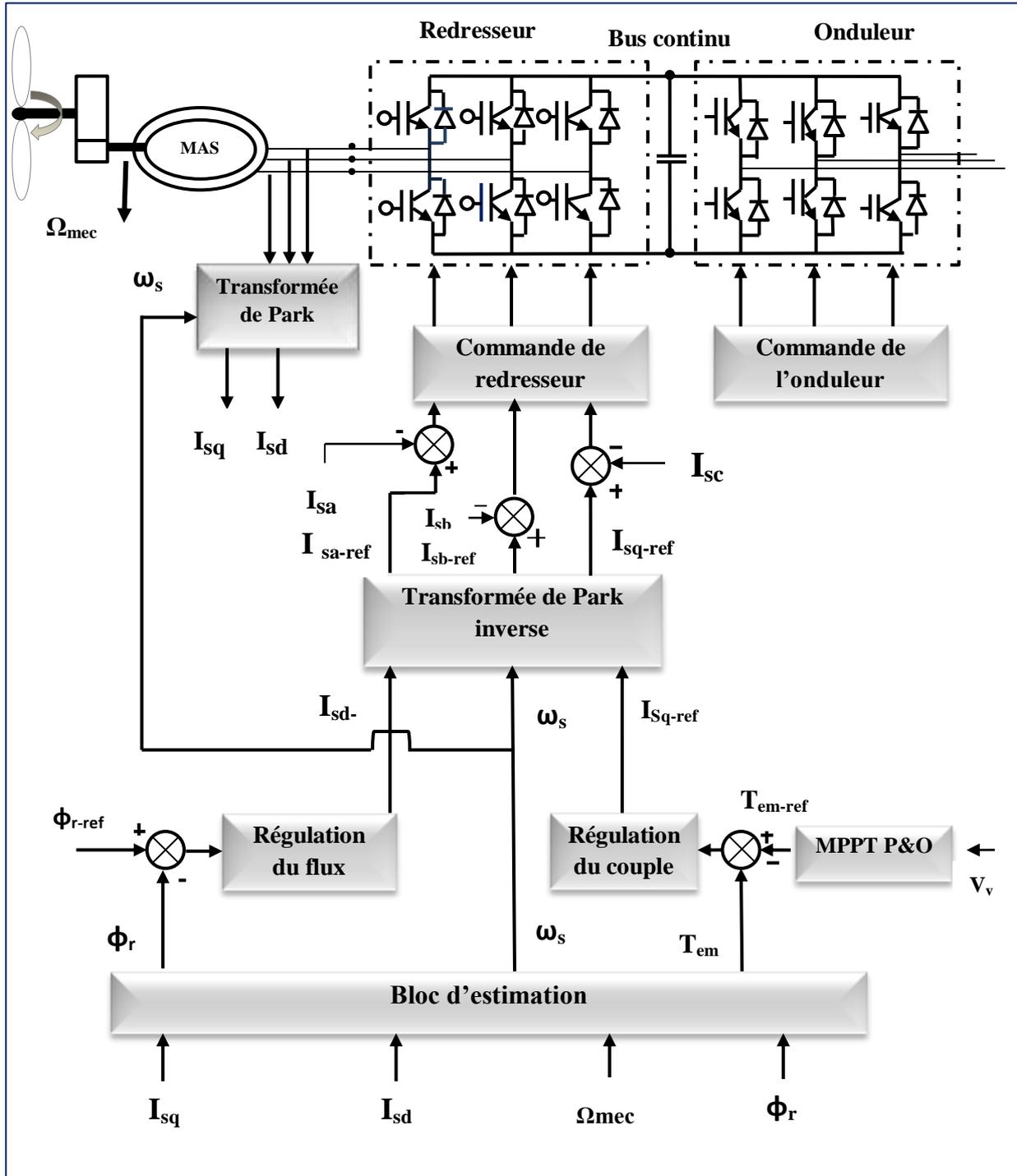


Figure II.32. Schéma de principe de la commande vectorielle

II.10. Simulation de la chaîne de conversion éolienne

Pour simuler le modèle complet de la chaîne de conversion éolienne, on a la fait pour une vitesse de vent variable représentée sur la figure (II.33).

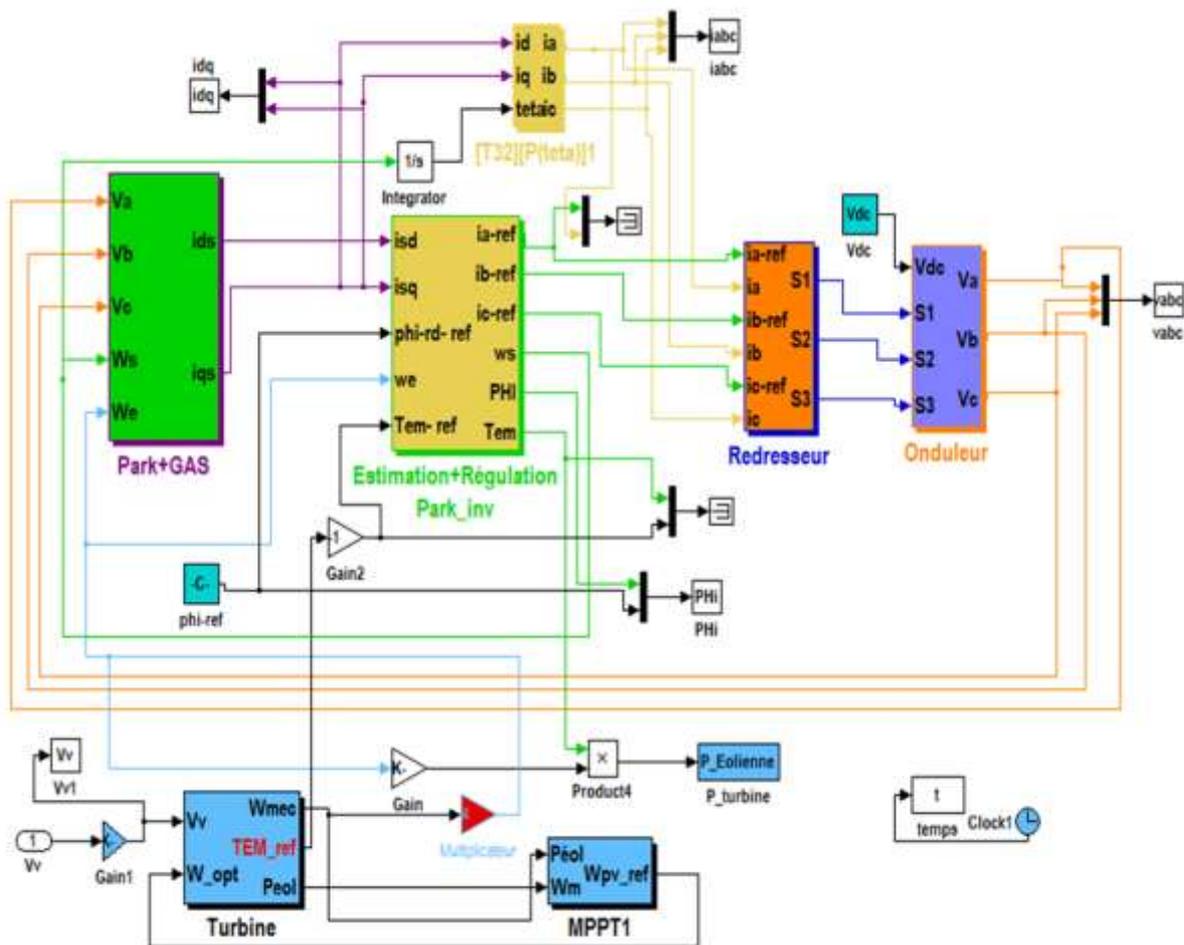


Figure II.33. Schéma Bloc du système éolien.

II.10.1. Simulation et Interprétation des résultats

Le but de ce système est de fournir la puissance demandée par la charge.

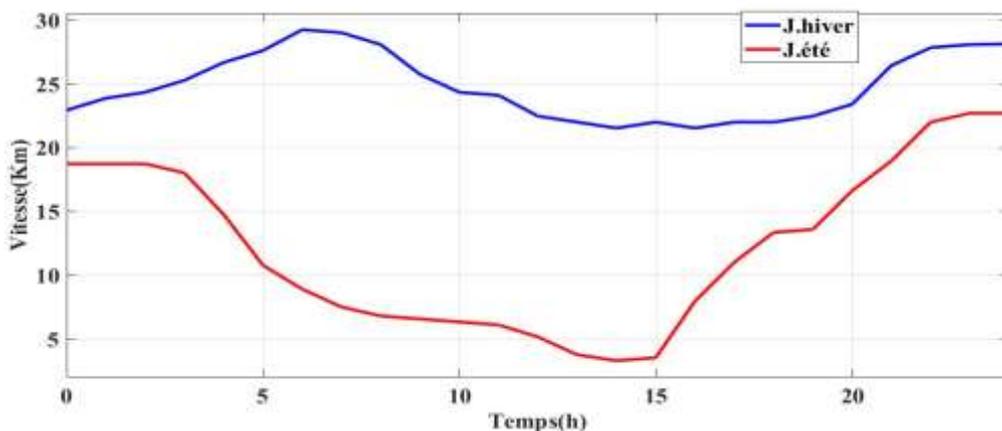


Figure II.34. Profile de vent appliqué [km/h].

La figure (II.34) montre la variation de la vitesse du vent en fonction du temps. On constate que la vitesse de vent est supérieure dans la journée d'hiver il atteint une vitesse maximale 29km/h.

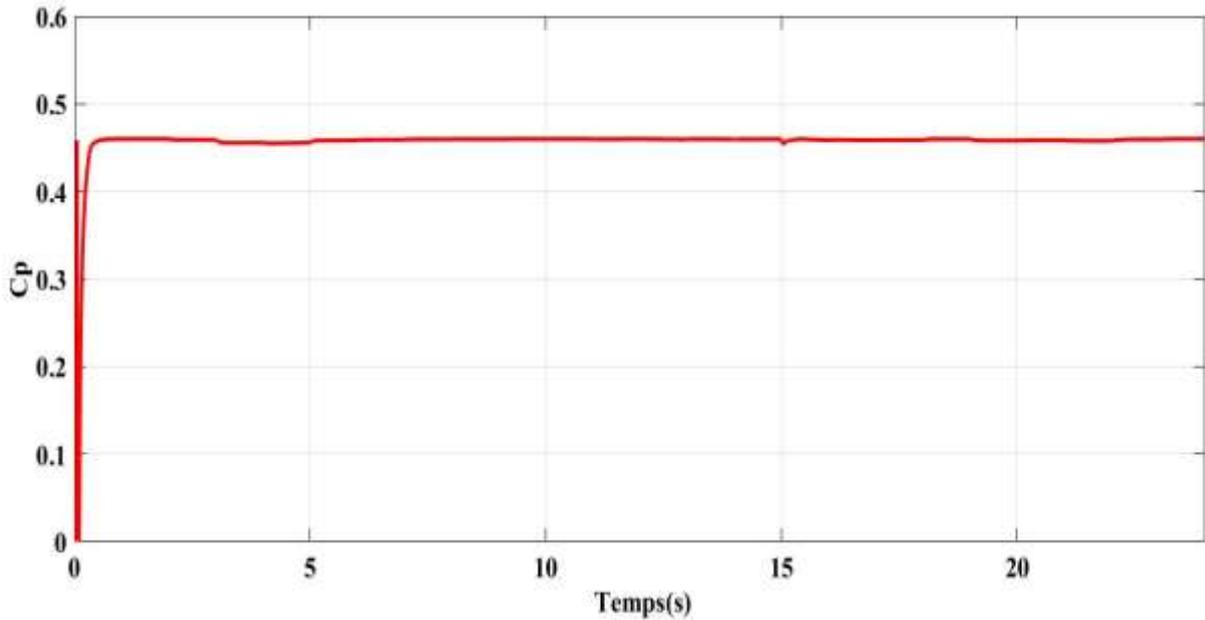


Figure II.35. Allure du coefficient de puissance C_p .

La figure (II.35) représente le coefficient de puissance de la turbine. On constate bien qu'il prend sa valeur théorique maximale ($C_{pmax}=0.45$) quel que soit la vitesse du vent appliquée.

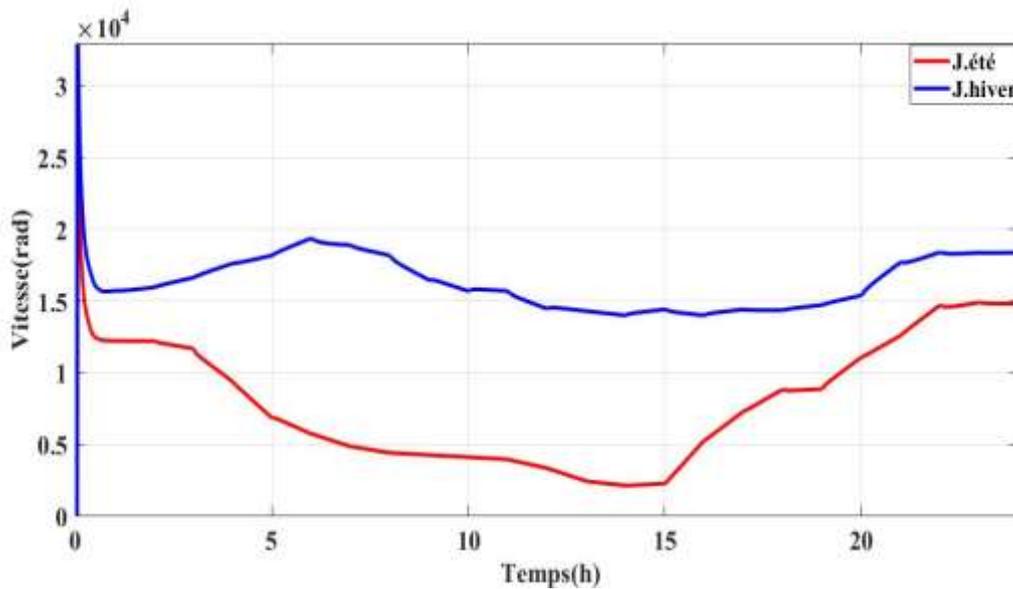


Figure II.36. Vitesse mécanique de la turbine [rad/h].

La figure (II.36), représente la vitesse mécanique la turbine. Elle varie proportionnellement avec la vitesse du vent.

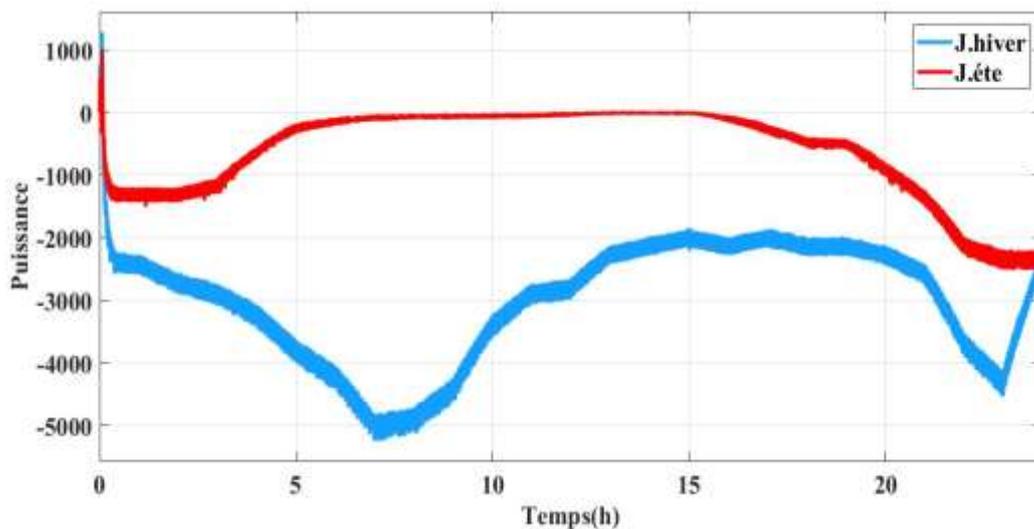


Figure II.37. Puissance générée par l'éolienne.

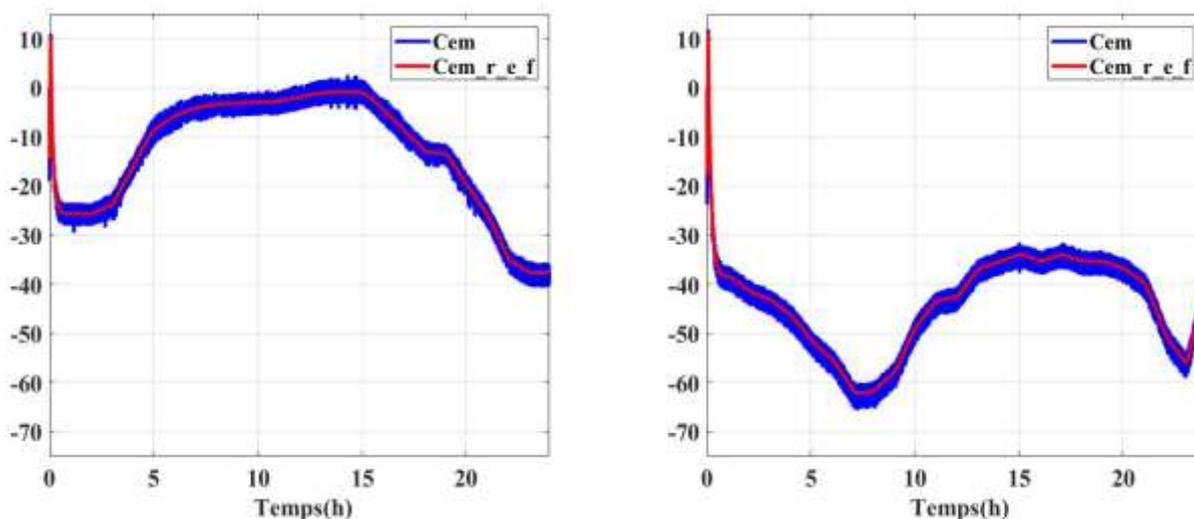


Figure II.38. Allure du couple électromagnétique développé et sa référence.

La figure (II.37) montre l'allure de la puissance fournie par l'éolienne. On trouve que l'allure de la puissance fournie par l'éolienne est la même que celle du couple électromagnétique (figure (II.38)).

La figure (II.38), représente le couple électromagnétique de la génératrice asynchrone. Le couple électromagnétique étant négatif indique le fonctionnement en mode génératrice. On remarque que la valeur du couple suit sa référence et s'adapte avec les variations de la vitesse selon la puissance fournie .

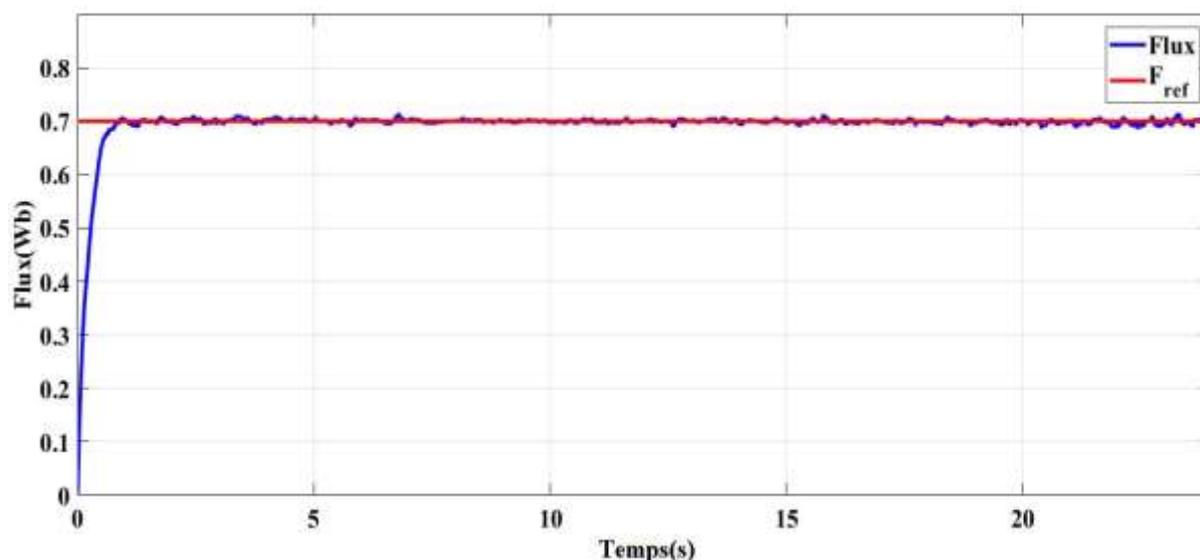


Figure II.39 . Le flux rotorique.

La figure (II.39) montre l'allure temporelle de la réponse du flux rotorique suite la consigne du flux rotorique de 0.7 Wb. On voit que la dynamique désirée est respectée.

II.11. Conclusion

Dans la première partie nous avons présenté la modélisation du module photovoltaïque et étudié les différents effets sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension telle que, l'influence de l'éclairement et la température.

On a représenté la structure de la commande MPPT numérique « perturbation et observation ». Cette commande MPPT numérique utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

Dans la deuxième partie, on a présenté la modélisation de la turbine éolienne, par la suite nous l'avons associé à un système de conversion d'énergie constitué d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et de convertisseur de puissance après nous l'avons simulé, les résultats de simulation ont été présentés puis commentés.

Chapitre III : Gestion de l'énergie du système hybride (photovoltaïque-éolien)

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous proposons la gestion de l'énergie pour un système hybride constitué de deux sources d'énergie, photovoltaïque et éolienne qui sont reliées au bus CC.

L'objectif principal de notre étude est la gestion de l'énergie du système hybride photovoltaïque-éolien.

III.2. Modèle du bus continu

Le bus continu de la figure (III.1) est composé d'une capacité, qui a pour but le lissage de la tension.

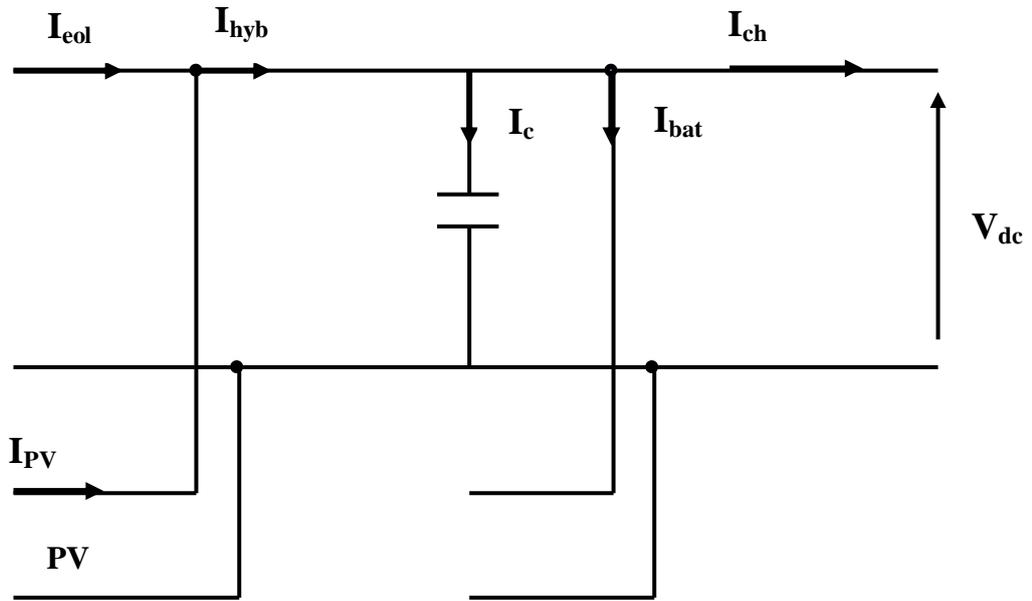


Figure III.1. Schéma du bus continu.

D'après la figure (III.1), on a :

$$I_{hyb} = I_{eol} + I_{pv} \quad (III.1)$$

$$I_{ch} = I_{hyb} - I_c - I_s \quad (III.2)$$

Avec :

$$I_c = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (III.3)$$

Donc la tension du bus continu est égale à :

$$V_{dc} = \int \frac{1}{C} \cdot I_c dt \quad (III.4)$$

I_{pv} : Courant fourni par le générateur photovoltaïque [A] ;

I_{eol} : Courant fourni par le système éolien après redressement [A] ;

I_c : Courant qui traverse la capacité [A] ;

I_{hyb} : Courant produit par le système hybride éolien-PV [A] ;

I_{bat} : Courant de batterie [A].

Il est important de fixer la tension du bus continu V_{dc} pour assurer le fonctionnement correcte des organes qui lui sont attachés.

III.3. Gestion d'énergie du système hybride étudié

On propose la gestion de l'énergie du système hybride constitué d'une éolienne de 5kW et de 40 panneaux photovoltaïques de 110W_c. Afin de faire un algorithme de gestion qu'on a exécuté sous MATLAB-Simulink qui traite les différentes situations possible aux quelles nous sommes appelés à être confrontés.

III.3.1. Organigramme de gestion d'énergie

La figure (III.2) représente l'organigramme de gestion de puissance de notre système pour parvenir à fournir la puissance qui est demandée par notre charge.

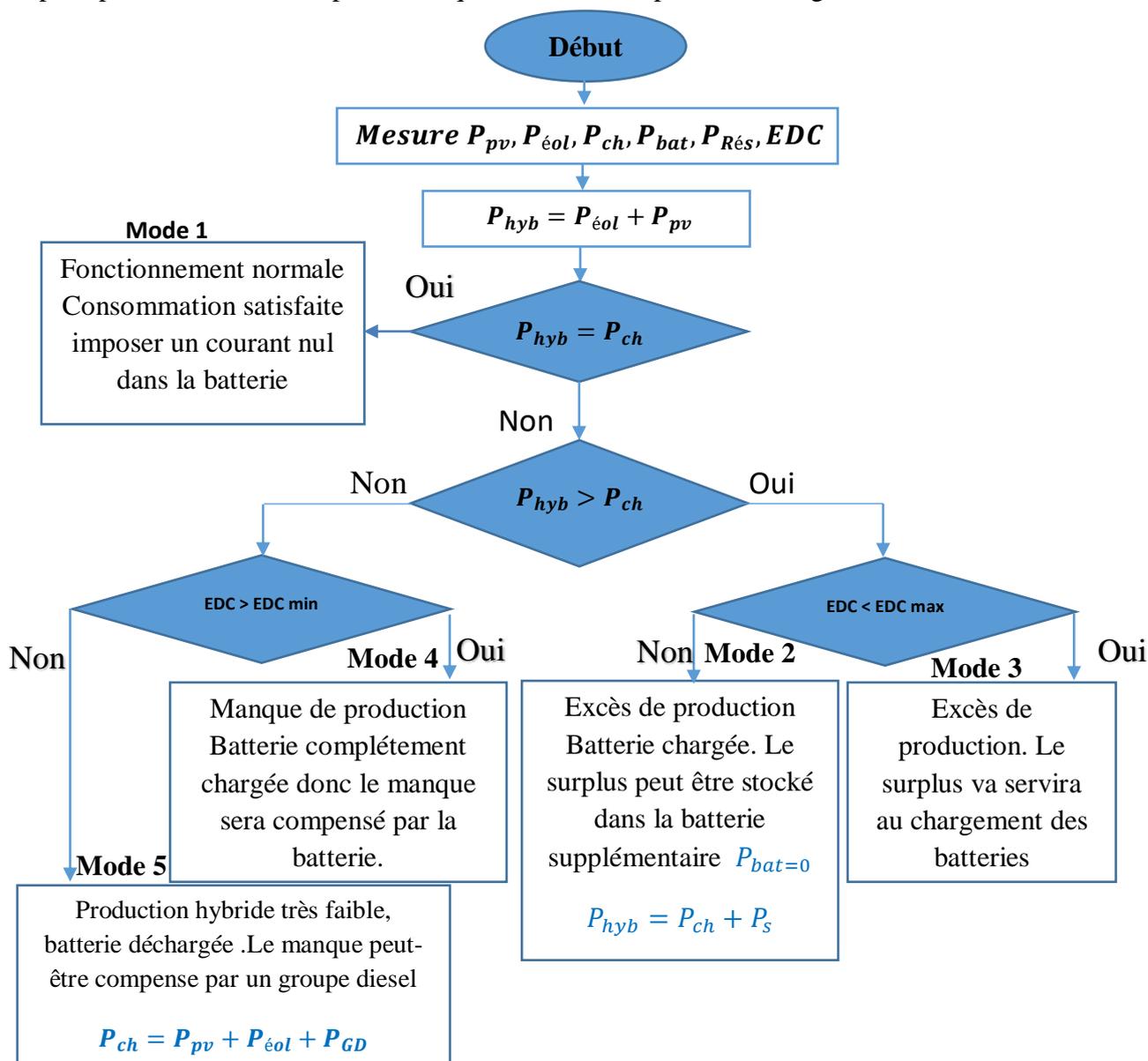


Figure III.2. Organigramme de la gestion de puissance du système hybride (photovoltaïque-éolien).

Avec :

- Es : Profile d'ensoleillement variable ;
- P_{dem} : Puissance demandée par la charge ;
- $P_{éol}$: Puissance générée par le système éolien ;
- P_{pv} : Puissance de système photovoltaïque ;
- EDC : Etat de charge de la batterie ;
- Vbat : Tension de la batterie ;
- Ibat : Courant dans la batterie ;
- P_{GD} : Puissance d'un groupe diesel ;
- Int EDC : Etat de charge initiale de la batterie.

III.3.2. Explication du déroulement du programme de gestion

Tout d'abord on fait un test sur la puissance fournie par le système hybride car c'est elle qui alimente la charge d'une manière directe, si cette puissance disponible est supérieure à la puissance demandée par la charge, alors on doit évacuer le surplus de puissance qui peut être stocké dans la batterie supplémentaire. Dans le cas contraire, si la puissance générée par le système hybride est inférieur à celle demandée par la charge, nous devons appeler un courant de compensation de la batterie, mais seulement après avoir vérifié qu'elle est apte à fournir ce courant, c'est-à-dire que son état de charge est supérieur au EDC_{min} . Et si la puissance hybride générée est inférieur à celle demandée par la charge, et si l'état de charge de la batterie est inférieur au EDC_{min} , Dans ce cas le manque peut-être compensé par un groupe diesel.

III.3.3. Les différentes possibilités

➤ Mode 1

Si la puissance générée par le système hybride est égale à celle demandée par la charge. Dans ce cas la charge va être alimentée et la batterie est déconnectée de la charge.

➤ Mode 2

Si la puissance générée par le système hybride est supérieure à celle demandée par la charge, et si $EDC > EDC_{max}$ (batterie complètement chargé). Dans ce cas le surplus de puissance peut être stocké dans la batterie supplémentaire.

➤ Mode 3

Si la puissance générée par le système hybride est supérieure à celle demandée par la charge, et si $EDC < EDC_{max}$ (batterie déchargé). Dans ce cas le surplus de puissance est injecté dans la batterie.

➤ Mode 4

Si la puissance générée par le système hybride est inférieure à celle demandée par la charge, et si $EDC > EDC_{min}$ (batterie complètement chargée). Dans ce cas le manque sera compensé par la batterie.

➤ Mode 5

Si la puissance générée par le système hybride est inférieure à celle demandée par la charge. Dans ce cas le manque peut-être compensé par un groupe diesel.

III.3.4. Profil de charge variable

Pour notre essai la demande de charge est variable comme illustré sur la figure (III.3).

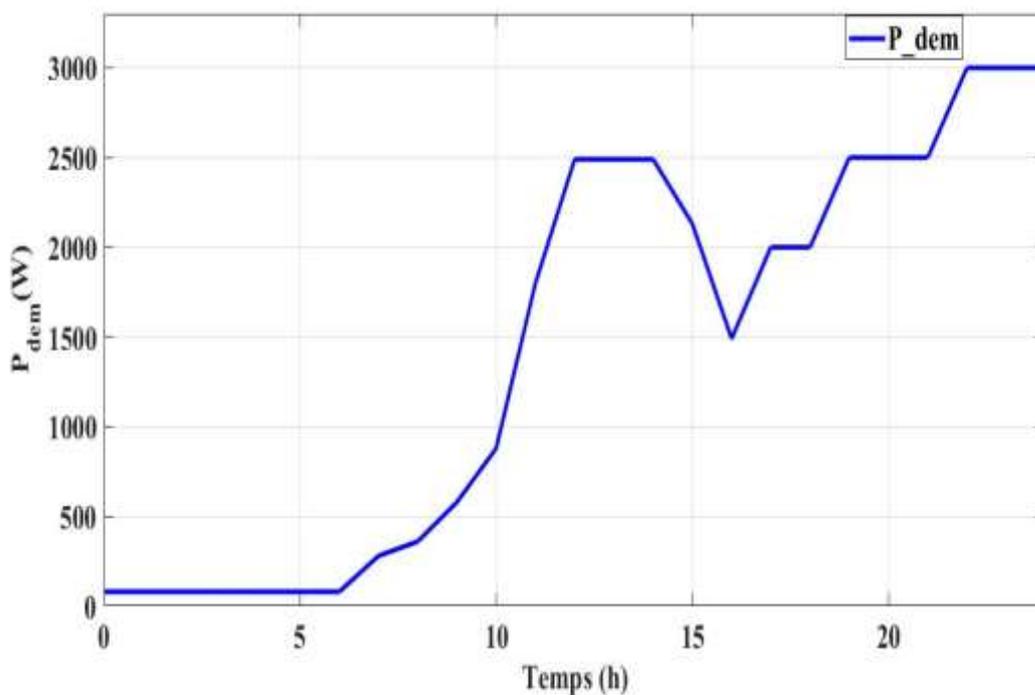


Figure III.3. Profil de charge variable.

III.4. Schéma bloc de simulation global

La figure (III.4) représente le système global étudié sous MATLAB-Simulink, il assemble les deux générateurs photovoltaïque et éolien, ainsi que le bloc de gestion puissance.

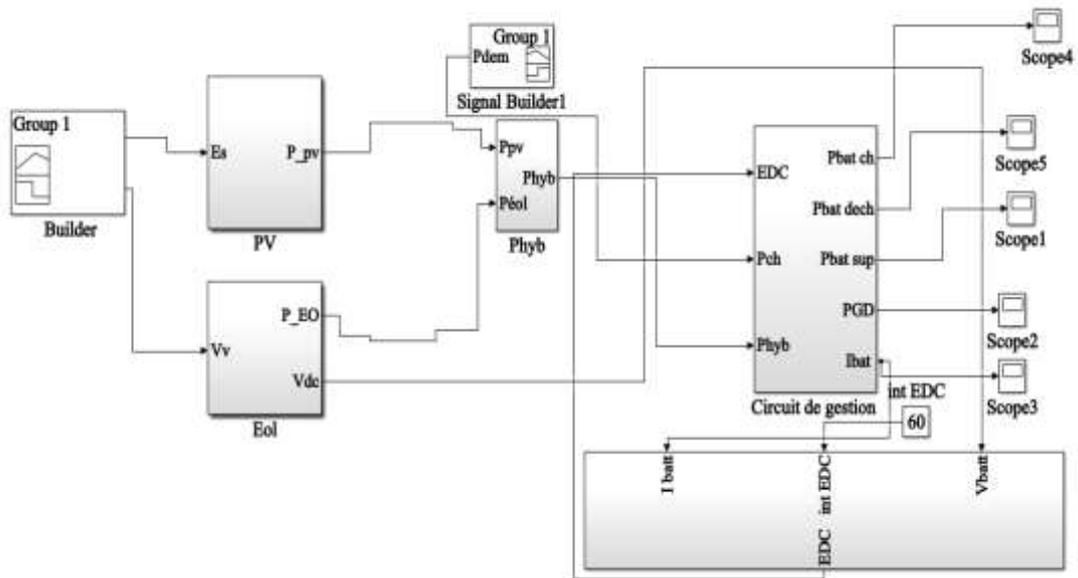


Figure III.4. Schéma bloc du système hybride avec bloc de gestion.

III.5. Simulation et interprétation des résultats

Les résultats de simulation effectuée pour tester l'efficacité de l'algorithme de gestion dans les différents cas possible sont représentés dans les figures suivantes :

La figure (III.5), représente les puissances totales fournies par le système hybride, la puissance demandée par la charge, puissance de batterie supplémentaire, la puissance de groupe diesel et la puissance de la batterie de charge et décharge.

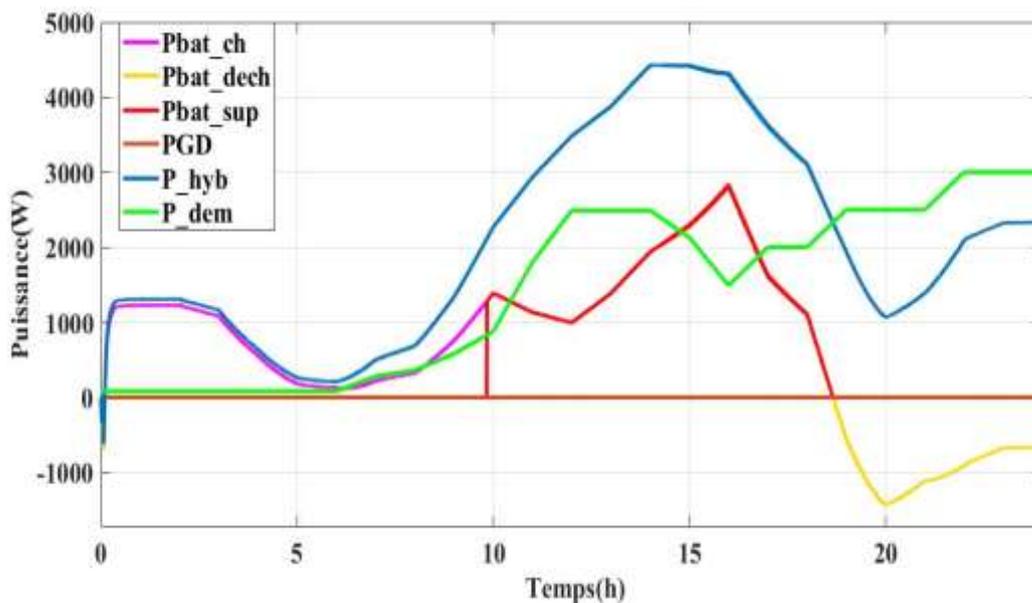


Figure III .5. Allure des Puissances du système.

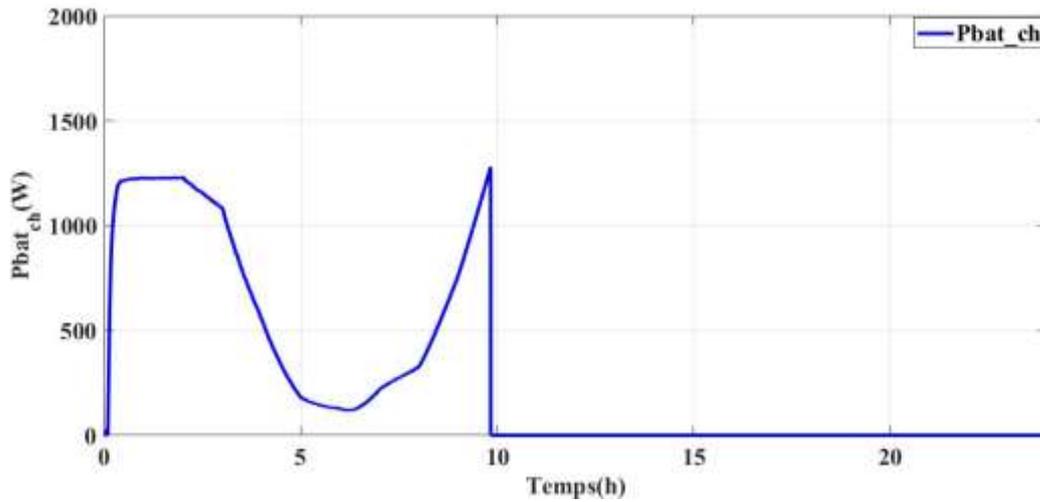


Figure III.6. Puissance de charge de la batterie.

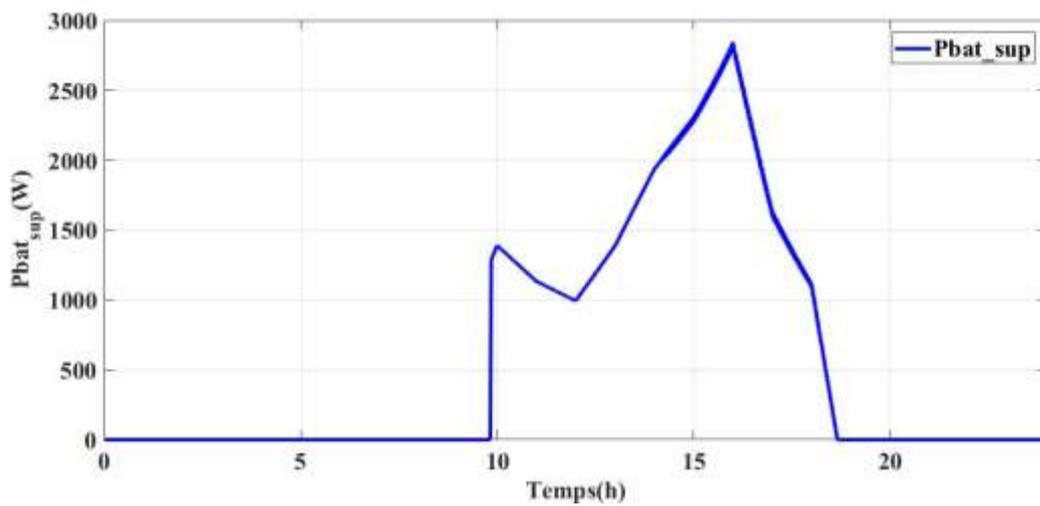


Figure III.7. Puissance de la batterie supplémentaire.

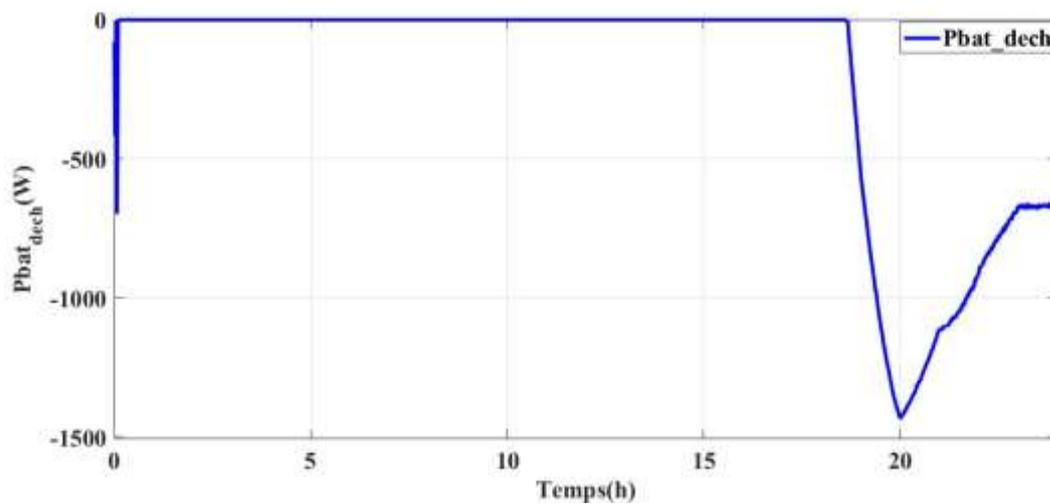


Figure III.8. Puissance de décharge de la batterie.

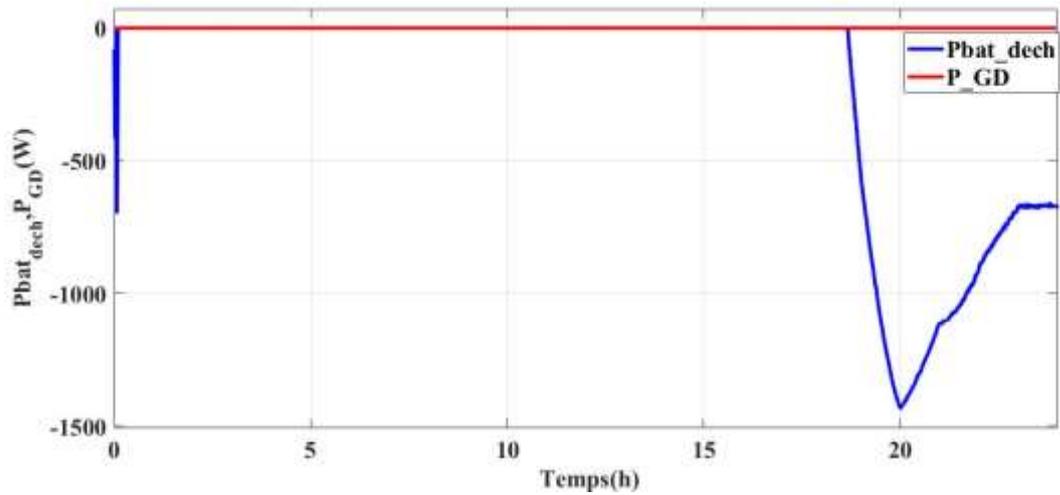


Figure III.9. Puissance de groupe diesel.

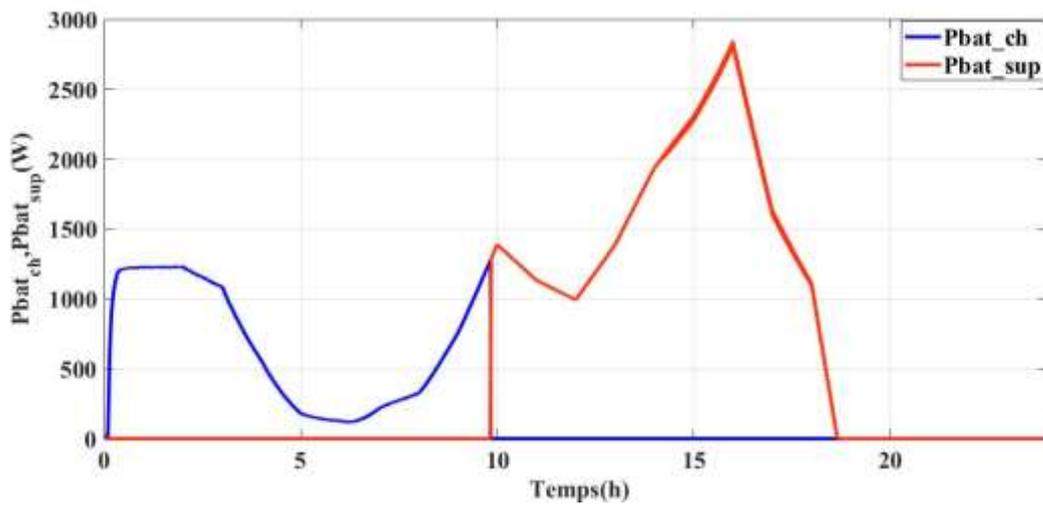


Figure III.10. Puissance de chargement des batteries principale et supplémentaire.

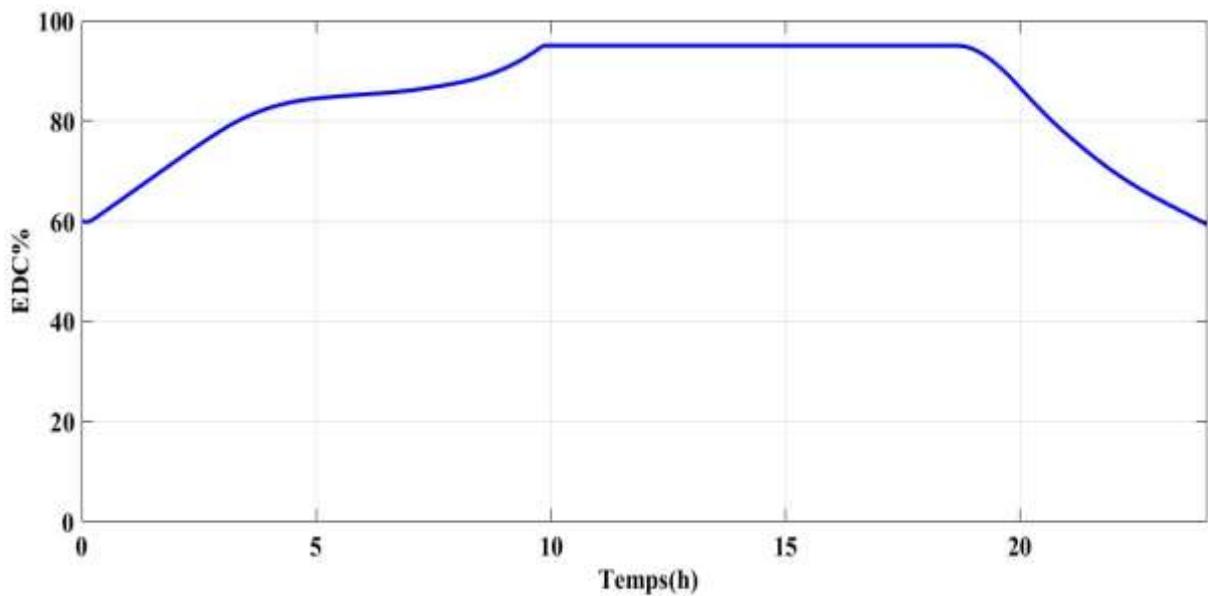


Figure III.11. Etat de charge de la batterie (EDC).

A partir des figures (III.5 jusqu'à III.11) on remarque que :

- Durant l'intervalle ($t=0-9.8h$) la puissance fournie par le système hybride est supérieure à la puissance demandée par la charge et initialement $EDC = 60\%$ figure (III.6) donc on alimente la charge et le surplus sera envoyé vers les batteries, $EDC < EDC_{max}(95\%)$.
- Une fois que la batterie est complètement chargée ($9.5-9.8h$) $EDC = EDC_{max}$, et la puissance fournie par le système hybride est supérieure à la puissance demandée par la charge donc le surplus doit être injecté dans la batterie supplémentaire (figure III.7).
- Durant l'intervalle ($t=19.5-24h$) la puissance de la charge est supérieure à la puissance produite par le système hybride (Pv-Eol) et comme le EDC supérieure à EDC_{min} (35%), Donc la batterie va se décharger afin de récompenser le défaisait de puissance par la charge (figure III.8).
- Dans la figure (III.9), la puissance fournie par le système hybride est inférieure à la puissance demandée par la charge, et la batterie se décharge et le groupe diesel n'a pas intervenu car le système (bat+Pv+Eol) a satisfait la charge.
- Pour prolonger la durée de vie de la batterie on limite la charge et la décharge de la batterie, entre 35% et 95%.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini un algorithme destiné à la gestion de l'énergie dans le système hybride étudié (bat+Pv+Eol+GD). Cet algorithme est basé sur l'analyse des cas de figures (situations) possible lors du fonctionnement de ce système et qui font que cette gestion soit primordiale.

L'algorithme présenté est programmé puis simulé sous Matlab/Simulink afin de vérifier son comportement dans le système étudié. Les résultats de simulations ont montré le bon fonctionnement du système étudié, ces résultats sont d'une grande importance pour la gestion de ce type d'installation.

CONCLUSION

Conclusion générale

L'objectif de ce travail présenté dans ce mémoire est la gestion de puissance d'un système hybride.

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

Le chapitre I de ce mémoire est consacré à la description du système hybride étudié. Ensuite, une étude sera aussi consacrée au fonctionnement de la turbine, de la génératrice asynchrone.

Nous avons présenté dans le deuxième chapitre la modélisation des différents éléments des deux chaînes de conversion. Ainsi des lois de commande MPPT appliqué au système hybride, et le contrôle vectorielle de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté et simulé un algorithme de gestion optimale des flux d'énergie dans les systèmes hybrides d'énergies renouvelables a été effectuée afin de déterminer le bon déroulement de cette algorithme en expliquant les cas au quel nous serons éventuellement confrontes.

Perspectives

Ce travail offre quelques perspectives que nous présentons ci-après :

- Améliorer le système global en utilisant le système de stockage comme les batteries, voir même un système de stockage hybride (batteries/ super-condensateur), pour faire absorber les dynamiques rapides des variations d'énergies par les super-condensateurs (l'absorption des pics de puissance) et laisser que les lentes aux batteries.
- Tester d'autres méthodes de maximisation de puissances (MPPT) et introduire les techniques de commande intelligentes dans la gestion de puissance (logique floue, mode glissant...).
- Réaliser un banc d'essai à partir des résultats de simulation pour valider le travail et pourquoi pas le concrétiser.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

- [1] S. PETIBON « Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques. » Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2009.
- [2] A. TRAORÉ « gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles » mémoire présenté à l'université du Québec à Trois-Rivières 2016.
- [3] L.LAZARI, N.MEBARKI, «Etude d'un système photovoltaïque », Mémoire Master2, de l'université de Bejaia, 2014.
- [4] A. Miricki, « Etude comparative de chaine de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance ». Thèse de doctorat de l'institut national de polytechnique de Toulouse France, 2005.
- [5] B. ZAKARIA « Contribution à l'Optimisation d'un Système de Conversion Éolien Photovoltaïque : Application pour un Site Isolé » UNIVERSITÉ ABOU-BEKR BELKAID-TLEMCEN thèse LMD 2016.
- [6] F. BOUMEDIENE « système hybride photovoltaïque éolien, de production d'électricité. « Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah » UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID -TLEMCEN Mémoire de Magister 2012.
- [7] I. VECHIU. « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome » thèse doctorat. Université du Havre, 2005. Français.
- [8] M. MLADJAO Mohammad Al anfaf « contribution à la modélisation et a l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multi-charges » thèse doctorat. Université de lorraine.
- [9] S. MEZZAI, k. TADJINE « Etude d'un système hybride (Eolien – Photovoltaïque) » mémoire Master en Electrotechnique. Université Abderrahmane Mira-Bejaia 2015.
- [10] A. ABERBOUR « Contribution à l'Amélioration des Performances d'une Chaîne de Conversion Éolienne Autonome » thèse doctorat. Université A.MIRA-BEJAIA 2016.
- [11] N. HAMDI « Modélisation et commande des génératrices éoliennes » mémoire Magistère. Université MENTOURI de CONSTANTINE 2008.

Références Bibliographiques

- [12] R. BABOURI « Amélioration des performances des convertisseurs électromécaniques basés sur les machines asynchrones doublement alimentées » thèse doctorat. Université A.MIRA-BEJAIA 2016.
- [13] L. Miguel, « Contribution à L'optimisation d'un system de conversion éolienne pour une unité de production isolée ». Thèse de Doctorat, Université de Paris, France, 2012.
- [14] L. Aloui, « Etude par simulation d'une éolienne basée sur une machine Asynchrone à double alimentation alimentée par convertisseur matriciel ». Mémoire de Magister en électrotechnique à l'Université de Bejaia, Algérie 2006.
- [15] A. Abdelli, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive ». Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, France 2007.
- [16] N. ACHAÏBOU « Introduction à l'Etude du Système de Stockage dans un Système Photovoltaïque » Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger.
- [17] A.MAHAMMEDI «Etude et optimisation d'un système hybride éolien- photovoltaïque», Mémoire Magistère. Université UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF 2014.
- [18] D. Rekioua, O. Amrani « Etude et identification des différents modèles électriques photovoltaïques ». Conférence sur les énergies renouvelables, l'université de Bejaia, Algérie 2007.
- [19] R. Touahir, M. A. K. Ben Zahia, « Contrôleur Neuronal Pour La Poursuite Du Point De Puissance Maximale D'un Système Photovoltaïque », Mémoire Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 2015.
- [20] F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA». Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [21] V. Salas, E. Olias, A. Barrado et A. Lazaro, « Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic system ». Solar Energy Materials & Solar Cells n°90, pp. 1555–1578, 2006.
- [22] B. Fellah, « Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité ». Application aux Sites de Tlemcen et de Bouzareah, Mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen 2012.

Références Bibliographiques

- [23] S. Issaadi, « Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2006.
- [24] M.N.Mchalikh et CH.Hmada''Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau '' Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013.
- [25] K.Sobaihi '' étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction '' Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique 10, Avenue Hassen Badi El –Harrach Alger.
- [26] A. Ould Mohamed Yahya1, A. Ould Mahmoud et I. Youm, Etude Et Modélisation D'un Générateur Photovoltaïque, Article, Revue De Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 473 – 483, Université de Nouakchott, Mauritanie, Septembre 2011, Mauritanie.
- [27] T.GHENNAM « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation » Thèse de doctorat de l'école Centrale de Lille, France, 2011.
- [28] A. TAMAARAT « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA » thèse Doctorat en sciences en Electrotechnique. Université Mohamed Khider – Biskra 2015.

➤ **Paramètres d'un panneau photovoltaïque SIEMENS de 110W_c-24 V**

Paramètres	Valeurs
Puissance max du panneau P_m	110 W
Puissance nominale P_n	110 W
Courant au point de puissance max I_m	3.15 A
Tension au point de puissance max V_m	35 V
Courant de court-circuit I_{cc}	3.45A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	43.5V
Coefficient d'incrémentation du courant $I_{cc}(\alpha_{cc})$	1.4 mA/°C
Coefficient d'incrémentation de la tension $V_{oc}(\beta_{oc})$	-152 mV/°C

➤ **Paramètres de la turbine**

- La puissance nominale : $P_t = 5$ kW.
- Rayon : $R=3.24$.
- La vitesse nominale : $\Omega_t = 215$ tr/min.
- La vitesse moyenne de vent : $V_V = 7$ m/s.
- Le gain de multiplicateur : $G= 3.53$.

➤ **Paramètres de la machine asynchrone**

Les paramètres électriques :

- Rotor de type de cage d'écureuil.
- 4 paires de pôles.
- 230/400 - 23.8/13.7 - 5.5 kW - 50 Hz - 690 tr/min.
- $R_s = 1.07131 \Omega$.
- $R_r = 1.29511 \Omega$.
- $L_s = 0.1137$ H.
- $L_r = 0.1096$ H.
- $M = 0.10474$ H.

Les paramètres mécaniques :

- $J = 0.230$ kg. m².
- $F = 0.0025$ N.m/rad. s⁻¹ .

➤ **Valeur de la capacité du bus continu**

- $C = 600$ µf.

➤ **Redresseur MLI**

- Amplitude de la porteuse: $V_P = 300$ V.
- Fréquence de la porteuse $f_p = 2000$ Hz.

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution à la gestion d'énergie hybride, en utilisant des panneaux photovoltaïques et une éolienne. Pour adapter la production des sources renouvelables au besoin de la charge, nous intéresser en premier lieu à ces sources d'énergies, prendre connaissance de leurs caractéristiques et comprendre leur fonctionnement et ensuite on a implanté un algorithme de gestion pour gérer le flux d'énergie entre les différentes sources constituant le système global.

Mots clés : système d'énergie hybride, éolien, photovoltaïque, gestion d'énergie.

Abstract: the work presented in this thesis is a contribution to the management of hybrid energy, using photovoltaic panels and a wind turbine. To adapt the production of renewable sources to the needs of the load, we first take an interest in these energy sources, learn about their characteristics and understand their operation and then we have implemented a management algorithm to manage the energy flow between the different sources constituting the global system.

Keywords: hybrid energy system, wind, photovoltaic, energy management.