République Algérienne démocratique Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Dr Yahia Farés de Médéa

Faculté de la Technologie

Département de Génie électrique



Mémoire de Master Académique

Spécialité : Energies renouvelables en électrotechnique

Thème :

Etude d'un système hybride photovoltaïque-éolien raccordé à un réseau à courant continu

Présenté par :

RAIS Taki Eddine

SEBTI Fatima

Encadré par :

Dr. N. Henini

Soutenu en mai 2018

Année universitaire : ***2017/2018***

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à

Mes chère parents symbole de tendresse profonde et permanente, de sacrifice et d'amour éternel, que dieu les protègent pour moi et leur accordent une bonne santé et une longue vie.

Mes chers frères ;

Ma chère sœur et sa fillette ALAE ;

Ma grand-mère ;

Mon fiancé YOUNES ;

Ma deuxième famille (HARABI) ;

Mes enseignants depuis mon enfance ;

Mes amis (es) et mes collègues ;

A tous ceux qui m'ont aidé à réaliser de près ou de loin ce mémoire ;

A ceux qui me sont chère et ceux que j'ai aimé du fond de mon cœur.

Fatima

Remerciements

Avant tout, Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail dans des meilleures conditions.

Je remercie vivement en premier lieu mon binôme (Taki Eddine) pour leur aide et leur disponibilité sans limite.

Mes remerciements vont également à Dr.N. HENINI professeur à l'université de Médéa et mon directeur de mémoire de master, qui par sa compétence, ses encouragements, ses critiques constructives et son soutien moral a su m'informer, me conseiller, et me rendre de plus en plus autonome pour bien réaliser ce travail.

Je voudrais remercie aussi les membres de jury pour la pertinence de leurs remarques avisées, qui vont permettre l'amélioration de la qualité du manuscrit et l'essor vers de nouvelle perspectives.

Je remercie également tous les enseignants de département de génie électrique de l'université Dr Yahia Farés de Médéa qui ont participé à ma formation pendant tout le cycle universitaire.

En fin, je ne peux pas oublier de remercie ma famille pour sa soutien au cours de ces années et sans laquelle je n'en serais pas là aujourd'hui.

Fatima

ملخص

عرف استخدام الموارد المتجددة نموا كبيرا في البلدان الصناعية، وحتى في بعض الدول السائرة في طريق النمو. دور نظام هجين (ريحي-كهروضوئي) لإنتاج الكهرباء دون انقطاع في المناطق النائية ليس فقط تحقيق "قدرة" طاقوية "، ولكن أداة للتنمية الاجتماعية والاقتصادية للمناطق الريفية.

تطرقنا في هذا العمل الى دراسة نظام لتوليد الطاقة الكهربائية عن طريق نظام هجين(ريحي-كهروضوئي) مرتبط بشبكة كهربائية ذات تيار مستمر. وهذا بالاعتماد على التكامل الموجود بين الطاقتين الشمسية والريحية انطلاقا من تغيراتهما الموسمية

الكلمات المفتاحية : النظام الكهروضوئي- النظام الريحي -النظام الهجين الريحي -كهر وضوئي -شبكة كهربائية ذات تيار كهربائي مستمر-محاكاة .

Résumé :

L'exploitation des ressources renouvelables connaît un grand essor dans les pays industrialisés et même dans quelques pays sous-développés. Le rôle d'un système hybride (éolien - photovoltaïque) de production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'apporter « une puissance énergétique », mais un outil de développement social et économique des zones rurales.

Ce travail constitue une contribution à l'étude des systèmes de conversion d'énergie électrique hybrides associés à un réseau électrique à courant continu. La démarche retenue exploite une méthodologie d'analyse de la complémentarité qui existe entre les deux énergies solaire et éolienne à partir de leurs variations saisonnières respectives.

Mots clés: Système Photovoltaïque –Système éolien - Système hybride photovoltaïque- éolien – réseau électrique à courant continu - simulation.

Abstract:

The exploitation of renewable resources has been a great rise in industrialized countries and even in some underdeveloped countries. The role of a hybrid power uninterrupted generation (wind – PV) in remote areas is not only to bring "energy power", but a tool for social and economic development of rural areas.

This work is a contribution to the study of systems for converting electrical energy associated with a hybrid system connected to DC network. The approach adopted uses a methodology of analysis of the complementarity between both solar and wind power from their respective seasonal variations.

Keywords: Photovoltaic System -Wind System - Hybrid photovoltaic-wind- DC network - simulation.

Sommaire

Introduction Générale 2

Chapitre I : généralité sur les énergies renouvelables: solaire et éolienne.

I.1. Introduction : 5

I.2. Evaluation des énergies renouvelables en Algérie : 5

I.3. Energie solaire 6

I.3.1. Généralités sur le soleil 6

I.3.2. Définition : 7

I.4. Energie solaire photovoltaïque 10

I.4.1. Définition : 10

I.4.2. Bref historique : 10

I.4.3. Électricité solaire par effet photovoltaïque 11

I.4.3.1. Principe de fonctionnement 11

I.4.3.2. Cellules photovoltaïques 13

I.4.3.3. Fonctionnement des cellules photovoltaïques 14

I.4.4. Différents types des cellules photovoltaïques 14

I.4.4.1 Cellules monocristallines 15

I.4.4.2. Cellules polycristallines: 16

I.4.4.3. Cellules amorphes 16

I.4.5. Modules (ou panneaux) 17

I.4.6. Générateur photovoltaïque : 18

I.4.7. Conversion de l'énergie solaire photovoltaïque 21

I.4.8. Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque 22

I.4.8.1. Avantages 22

I.4.8.2 Inconvénients 23

I.5. Energie éolienne 23

I.5.1. Introduction 23

I.5.2 Historique de l'éolien 24

I.6. Définition de l'énergie éolienne 25

I.7. Architecture d'une éolienne 26

I.7.1. Rotor 26

I.7.2. Nacelle 26

I.7.3. Tour 28

I.8. Fonctionnement d'une éolienne 28

I.9. Caractéristiques des éoliennes 29

I.9.1. Eolienne à axe horizontal 30

I.9.2. Eolienne à axe vertical 31

I.10. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne 31

I.11. Notions théoriques sur l'éolien 32

I.11.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique 32

I.11.2 Loi de Betz 33
I.12.3. Vitesse spécifique ou normalisée 35
I.12.4. Coefficient de puissance 35
I.12 .5. Coefficient de couple 36
I.12.6. Distribution de Weibull 37
I.13. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne 37
I.13.1. Avantages 37
I.13.2. Inconvénients 38
I.14. Conclusion 38
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 39
WEBOGRAPHIE 42

Chapitre II : système hybride photovoltaïque-éolien.

II.1. INTRODUCTION 45
II.2. Position du problème 45
II.3. Définition du système d'énergie hybride (S.E.H) 45
II.4. Etat de l'art 48
II.5. Présentation du système hybride photovoltaïque-éolien 51
II.6. Principaux composantes du Système d'énergie hybride photovoltaïque -éolien 51
II.7. Descriptions des composantes du système hybride photovoltaïque-éolien 52
II.7.1. Générateurs photovoltaïques 52
II.7.2. Modèle d'une cellule solaire photovoltaïque 52
II.7.3. Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque 53
II.7.4. Présentation du modèle mathématique 53
II.7.5. Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque 55
II.7.6. Influence des résistances série et shunt 57
II.7.6.1. Influence de la résistance série RS 57
II.7.6.2. Influence de la résistance parallèle 58
II.7.7. Influence de l'éclairement 58
II.7.8. Influence de la température 59
II.8. Générateur éolien 60
II.8.1. Introduction 60
II.8.2. Types d'aérogénérateur dans les systèmes éoliens 60
II.8.3. Différentes classes d'un système éolien 65
II.9. Systèmes de stockage 66
II.10. Convertisseurs 67
II.11. Charges 67
II.12. Conclusion 68
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 70
WEBOGRAPHIE : 73

Chapitre III : simulation et discussion

III.1. Introduction : 75

III.2. L’outil Matlab/Simulink : 75
III.3. Système photovoltaïque proposée : 76
III.4. Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque : 77
III.4.1. Modélisation du GPV : 77
III.4.2. Simulation du générateur PV : 80
III.4.3. Modélisation du système éolien : 83
III.4.4. Simulation d’un hacheur survolteur 84
III.4.5. Simulation du hacheur survolteur : 85
III.4.6. Simulation d’un system hybride (panneau solaire avec turbine éolienne connecter a une charge R : 85
III.5. Conclusion : 86
Conclusion générale 88

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur les énergies renouvelables solaire et éolienne	
Figure I. 1 : carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle sur un plan horizontal.	7
FigureI.2 : les deux types d'énergie solaire.	7
Figure I.3 : normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM. .	8
Figure I. 4 : spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM. Source NREL solar Spectrum	9
Figure I.5 : définition des cordonnées terrestres d'un lieu donné.	9
Figure I.6 : système photovoltaïque.	10
Figure I.7 : effet photovoltaïque.	11
Figure I.8 : diagramme de bandes d'énergie de la jonction	12
Figure I.9 : coupe transversale d'une cellule PV typique.	13
Figure I. 10 : cellule photovoltaïque (monocristalline).	15
Figure I. 11 : cellule photovoltaïque (poly cristalline)	16
Figure I.12 : cellules, module et panneau photovoltaïque.	17
Figure I.13 : caractéristiques résultants d'un groupement de ns cellules en série.	18
Figure I.14 : caractéristiques résultantes d'un groupement de n_p cellules en parallèle.	19
Figure I. 15 : installation photovoltaïque autonome.	20
Figure I.16 : installation photovoltaïque couplée au réseau.	21
Figure I.17 : capacité mondiale totale installée en (MW).	22
Figure I.18 : composants d'une éolienne.	24
Figure I.19 : élément d'une nacelle.	26
Figure I.20 : principe de fonctionnement d'une éolienne.	27
Figure I.21 : éoliennes à axes horizontal.	28
Figure I.22 : éoliennes à axes horizontal.	30
Figure I.23 : éoliennes à axes vertical.	30
Figure I.24 : diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.	31
Figure I.25 : colonne d'air animée d'une vitesse V	32
Figure I.26 : théorie de Betz : schéma de principe	32
Figure I.27 : vitesse de vent (V) et vitesse tangentielle de l'aubage $\Omega_t R_t$	34
Chapitre II : Système hybride photovoltaïque-éolien	35
Figure II.1 : système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien.	45

Figure II.2 : position du parafoudre dans le système d'énergie hybride.	46
Figure II.3 : architecture d'un système d'énergie hybride.	49
Figure II.4 : circuit équivalent de la cellule solaire.	51
Figure II.5 : caractéristiques I = f (V) sous obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque.	52
Figure II.6 : caractéristique d'une cellule solaire photovoltaïque.	53
Figure II.7 : notion de facteur de forme FF pour une cellule photovoltaïque.	55
Figure II.8: influence de $R_s$sure la caractéristique I = f (V).	56
Figure II.9 : influence de R_P sur la caractéristique I = f (V).	57
Figure II.10 : influence de l'éclairement sur la caractéristique I = f (V)	58
Figure II.11 : influence de la température sur la caractéristique I = f (V).	58
Figure II.12 : schéma électrique équivalent d'une génératrice à courant continu à excitation séparée.	62
Chapitre III : Simulation et discussion	
Figure III.1 : Bibliothèque SIMULINK	73
Figure III.2: schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) sur charge (DC)	75
Figure III.2: schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) sur charge (DC)	75
Figure III.4 : Schéma bloc du générateur photovoltaïque	77
Figure III.5 : Schéma de générateur PV en MATLAB-SIMULINK	78
Figure III.6 :Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension, pour différentes températures	79
Figure III.7 :Résultats de simulation des caractéristiques de Tension Vpv(t).	79
Figure III.8 :Résultats de simulation des caractéristiques de Courant Ipv(t).	80
Figure III.9: Résultats de simulation des caractéristiques de puissance Ppv(t).	80
Figure III.10: Schéma de block d'un convertisseur survolteur Boost	81
Figure III.11 : Caractéristique P = f (t) à la sortie du hacheur Boost.	82
Figure III.12: Modèle de la voilure.	83
Figure III.13: Schéma de block d'un générateur éolien	84
Figure III.14 :la puissance de la turbine éolienne Pet Q	84
Figure III.15: vitesse de rotation de la turbine éolienne w_r	85
Figure III.16 : schéma block d'un system hybride (PV-éolienne-charge R)	86
Figure III.17 : signal de la tension d'un système hybride	86

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur les énergies renouvelables solaire et éolienne	
Figure I. 1 : carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle sur un plan horizontal.	7
FigureI.2 : les deux types d'énergie solaire.	7
Figure I.3 : normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM. .	8
Figure I. 4 : spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM. Source NREL solar Spectrum	9
Figure I.5 : définition des cordonnées terrestres d'un lieu donné.	9
Figure I.6 : système photovoltaïque.	10
Figure I.7 : effet photovoltaïque.	11
Figure I.8 : diagramme de bandes d'énergie de la jonction	12
Figure I.9 : coupe transversale d'une cellule PV typique.	13
Figure I. 10 : cellule photovoltaïque (monocristalline).	15
Figure I. 11 : cellule photovoltaïque (poly cristalline)	16
Figure I.12 : cellules, module et panneau photovoltaïque.	17
Figure I.13 : caractéristiques résultants d'un groupement de ns cellules en série.	18
Figure I.14 : caractéristiques résultantes d'un groupement de n_p cellules en parallèle.	19
Figure I. 15 : installation photovoltaïque autonome.	20
Figure I.16 : installation photovoltaïque couplée au réseau.	21
Figure I.17 : capacité mondiale totale installée en (MW).	22
Figure I.18 : composants d'une éolienne.	24
Figure I.19 : élément d'une nacelle.	26
Figure I.20 : principe de fonctionnement d'une éolienne.	27
Figure I.21 : éoliennes à axes horizontal.	28
Figure I.22 : éoliennes à axes horizontal.	30
Figure I.23 : éoliennes à axes vertical.	30
Figure I.24 : diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.	31
Figure I.25 : colonne d'air animée d'une vitesse V	32
Figure I.26 : théorie de Betz : schéma de principe	32
Figure I.27 : vitesse de vent (V) et vitesse tangentielle de l'aubage $\Omega_t R_t$	34
Chapitre II : Système hybride photovoltaïque-éolien	35
Figure II.1 : système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien.	45

Figure II.2 : position du parafoudre dans le système d'énergie hybride.	46
Figure II.3 : architecture d'un système d'énergie hybride.	49
Figure II.4 : circuit équivalent de la cellule solaire.	51
Figure II.5 : caractéristiques I = f (V) sous obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque.	52
Figure II.6 : caractéristique d'une cellule solaire photovoltaïque.	53
Figure II.7 : notion de facteur de forme FF pour une cellule photovoltaïque.	55
Figure II.8: influence de $R_s$sure la caractéristique I = f (V).	56
Figure II.9 : influence de R_P sur la caractéristique I = f (V).	57
Figure II.10 : influence de l'éclairement sur la caractéristique I = f (V)	58
Figure II.11 : influence de la température sur la caractéristique I = f (V).	58
Figure II.12 : schéma électrique équivalent d'une génératrice à courant continu à excitation séparée.	62
Chapitre III : Simulation et discussion	
Figure III.1 : Bibliothèque SIMULINK	73
Figure III.2: schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) sur charge (DC)	75
Figure III.2: schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) sur charge (DC)	75
Figure III.4 : Schéma bloc du générateur photovoltaïque	77
Figure III.5 : Schéma de générateur PV en MATLAB-SIMULINK	78
Figure III.6 :Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension, pour différentes températures	79
Figure III.7 :Résultats de simulation des caractéristiques de Tension Vpv(t).	79
Figure III.8 :Résultats de simulation des caractéristiques de Courant Ipv(t).	80
Figure III.9: Résultats de simulation des caractéristiques de puissance Ppv(t).	80
Figure III.10: Schéma de block d'un convertisseur survolteur Boost	81
Figure III.11 : Caractéristique P = f (t) à la sortie du hacheur Boost.	82
Figure III.12: Modèle de la voilure.	83
Figure III.13: Schéma de block d'un générateur éolien	84
Figure III.14 :la puissance de la turbine éolienne Pet Q	84
Figure III.15: vitesse de rotation de la turbine éolienne w_r	85
Figure III.16 : schéma block d'un system hybride (PV-éolienne-charge R)	86
Figure III.17 : signal de la tension d'un système hybride	86

Liste des tableaux :

Titre	Page
Tableau I.1 : répartition de la puissance installée par application. [3]	06
Tableau II.1 : classification des S.E.H par gamme de puissance. [7]	50
Tableau III.1 : caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau MSX60 Dans les conditions standards «CST».	76

Nomenclatures :

$\lambda_\circ$	Longueur d'onde	m
h	Constante de Planck	$\boldsymbol{J.\ s}$
c	Vitesse de la lumière	$\boldsymbol{m.s^{-1}}$
Φ	Latitude du lieu	◦
λ	Longitude du lieu	◦
δ	Déclinaison du soleil	◦
H	L'angle horaire du soleil	◦
E_g	L'énergie de gap de semi-conducteur	$\boldsymbol{J}$
E_C	L'énergie de la bande de conduction	$\boldsymbol{J}$
E_v	L'énergie de la bande de valence	$\boldsymbol{J}$
E_c	L'énergie cinétique du vent	$\boldsymbol{J}$
M	Masse d'air qui traverse l'éolienne	$\boldsymbol{Kg}$
P_{aer}	Puissance aérodynamique de l'éolienne	$\boldsymbol{w}$
F	Force de l'air sur l'éolienne	$\boldsymbol{N}$
V_1	Vitesse d'air en amont de l'éolienne	$\boldsymbol{m.s^{-1}}$
V_2	Vitesse d'air en aval l'éolienne	$\boldsymbol{m.s^{-1}}$
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne	**--**
λ_n	Vitesse spécifique ou normalisée	$\boldsymbol{m.s^{-1}}$
R_t	Rayon de la surface balayée	$\boldsymbol{M}$
C_m	Coefficient de couple de l'éolienne	**--**
P_m	Puissance mécanique disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur	$\boldsymbol{W}$
T_t	Couple de la turbine éolienne	$\boldsymbol{N.m}$
C	Facteur d'échelle de Weibull	$\boldsymbol{m.s^{-1}}$
K	Facteur de forme de Weibull	**--**
$I(v)$	Courant délivré sur une charge par une cellule PV éclairée	$\boldsymbol{A}$
I_{ph}	Photo-courant de cellule	$\boldsymbol{A}$
I_d	Courant de jonction Id (courant traversant la diode)	$\boldsymbol{A}$
I_r	Courant dérivé par la résistance shunt	$\boldsymbol{A}$
I_{cc}	Courant de court-circuit d'une cellule photovoltaïque	$\boldsymbol{A}$
I	Courant de cellule	$\boldsymbol{A}$

V	Tension de cellule	$\boldsymbol{V}$
T	Température de la jonction	$\boldsymbol{^0K}$
q	Charge de l'électron ($1.6\cdot10^{-19}$c)	$\boldsymbol{C}$
I_0	Courant de saturation inverse de la diode	$\boldsymbol{A}$
v	Tension de seuil de diode ($1,1V$)	$\boldsymbol{V}$
n	Facteur d'idéalité de la photopile	**--**
R_s	Résistance série de la cellule	$\boldsymbol{\Omega}$
R_{sh}	Résistance parallèle ou Shunt de la cellule	$\boldsymbol{\Omega}$
V_{co}	Tension en circuit ouvert	$\boldsymbol{V}$
E	Force électromotrice F.E.M	$\boldsymbol{V}$
φ	Flux par pôle	$\boldsymbol{Wb}$
U	Tension extraite de la génératrice	$\boldsymbol{V}$
R_a	Résistance de l'induit	$\boldsymbol{\Omega}$
La	L'inductance de l'induit	$\boldsymbol{H}$
I	Courant extrait de la génératrice	$\boldsymbol{A}$
P_{em}	Puissance électromagnétique	$\boldsymbol{W}$
R_t	Rayon de la turbine	$\boldsymbol{m}$
Ω_t	Vitesse angulaire de la turbine	$\boldsymbol{rad\ .\ s^{-1}}$
V, Vx	Vitesse du vent	$\boldsymbol{m.s^{-1}}$
β	Angle de calage des pales	◦
Tt	Couple développé par la turbine	$\boldsymbol{N\ .m}$
P	Masse volumique de l'air [=1,225 $kg\cdot m^{-3}$]	$\boldsymbol{kg\ .m^{-3}}$
G_{inc}	L'irradiation solaire sur plan incliné	$\boldsymbol{KWh/m^2}$
T_a	Température ambiante moyenne journalière	$\boldsymbol{\circ C}$
T_C	Température cellule moyenne journalière	$\boldsymbol{\circ C}$
$NOCT$	Température nominale de fonctionnement de la cellule	$\boldsymbol{\circ C}$
θ_i	Angle d'incidence	◦
E_s	Ensoleillement dans le plan des modules	$\boldsymbol{W/m^2}$
T_j	Température de jonction de la cellule	$\boldsymbol{\circ C}$
I_G	Courant fourni par le groupe de modules	$\boldsymbol{A}$
V_G	Tension aux bornes du groupe de modules	$\boldsymbol{V}$
K	Constante de Boltzmann ($1,38\cdot10^{-23}J/K$)	$\boldsymbol{J/K}$

Introduction générale

Introduction Générale

Depuis le début du siècle, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part, quels que soient les cas de figures envisagés. 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. 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. Disponibles en quantité supérieure aux besoins énergétiques actuels de l'humanité, les ressources d'énergie renouvelable représentent par ailleurs une chance pour plus de deux milliards de personnes, habitant des régions isolées, d'accéder à l'électricité. Ces atouts, alliés à des filières de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables

Cependant, la production d'électricité à partir seulement d'une source d'énergie est un objectif très souvent limité par le prix de revient final du KWh électrique produit, en raison de l'irrégularité du vent et de la discontinuité dans le temps du rayonnement solaire qui posent le problème du stockage d'énergie.

Considérant leurs caractéristiques saisonnières respectives, ces deux énergies ne se concurrencent pas mais au contraire peuvent se valoriser mutuellement. C'est pourquoi on propose ici un système hybride composé de ces deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles.

L'objectif de notre travail est de maintenir un meilleur rendement avec un coût minimal du système hybride photovoltaïque – éolien. Cela permettra de mettre en évidence les stratégies de contrôles disponibles et d'évaluer les techniques d'optimisations.

Pour atteindre cet objectif, nous avons scindé notre mémoire en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente et expose les deux sources d'énergies renouvelables, que sont l'énergie solaire et éolien, ainsi que le principe de fonctionnement des systèmes qui les entrainent.
- Le deuxième chapitre est consacré à une étude qui décrit et justifie les différentes composantes du système hybride photovoltaïque-éolien proposée.
- Le troisième chapitre présente une analyse des résultats de l'optimisation et de la simulation numérique du système hybride traitée à l'aide du logiciel MATLAB.

Enfin, nous conclurons ce modeste travail par une synthèse des travaux réalisés et des perspectives d'amélioration.

Chapitre I

Généralité sur les énergies renouvelables :

Solaire et éolienne

I.1. Introduction :

On appelle énergie renouvelable un ensemble de sources d'énergie qui sont inépuisable à l'échelle humaine, largement disponible, essentiellement gratuites et sont compatibles avec un certain respect environnemental [1]. Elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur. La cogénération d'électricité et de chaleur est possible dans le cas de la géothermie, de la biomasse et de l'énergie solaire [2].

- Le solaire est une utilisation directe des rayons du soleil pour produire chaleur ou électricité.
- La biomasse regroupe l'ensemble des énergies provenant de la dégradation de la matière organique. C'est de l'énergie solaire transformée par les plantes chlorophylliennes qui sont utilisées soit directement (bois de chauffage) soit après de nouvelles transformations chimiques (biogaz, biocarburant).
- L'éolienne utilise l'énergie du vent de manière mécanique.
- La géothermie est l'utilisation directe des gradients des températures terrestre ou de sources chaudes [1].

  Dans ce premier chapitre, nous allons décrire les différents caractéristiques des deux énergies renouvelables étudiée dans ce mémoire : le solaire et l'éolien.

I.2. Evaluation des énergies renouvelables en Algérie :

Le potentiel des énergies renouvelables en Algérie est le plus important d'Afrique du Nord. Le marché des énergies renouvelables est prometteur et leur promotion constitue l'un des axes de la politique énergétique et environnementale du pays [3]. Parmi les objectifs affichés par les pouvoirs publics, le marché local doit atteindre 600MW en 2015, amenant la part de l'électricité produite par les énergies renouvelables à 6% de l'électricité totale produite.

Application	Puissance installée (KW)	Pourcentage
Electrification	1353	58%
Télécommunication	498	21%
Pompage	288	12%
Eclairage public	48	2%
Autres	166	7%

Tableau I.1 : *répartition de la puissance installé par application.* [3]

I.3. Energie solaire :

I.3.1. Généralités sur le soleil :

Le soleil est une sphère avec une matière extrêmement chaude et gazeuse avec un diamètre de $1{,}39 \cdot 10^{9} m$, et est à distance moyenne de $1{,}49 \cdot 10^{11} m$ de la terre. Comme vu de la terre, le soleil tourne autour de son axe une fois toutes les quatre semaines, cependant il ne tourne pas comme un corps solide; une rotation est faite en 27 jours à l'équateur et en 30 jours aux régions polaires [4]. Il est considéré comme un corps noir avec une température effective de$5777°K$, et rayonne principalement dans le visible et le proche infrarouge (de $300nm$ à $1200nm$) avec un maximum aux environs de$500nm$. Cette énergie est produite par les réactions de fusion dans le soleil et est filtrée par l'atmosphère. Le rayonnement solaire apporte sur terre une énergie de 2000 à 2500 KWh/m^2 par an, ce qui est supérieur à la totalité des ressources fossiles jamais découvertes (Voir Figure I.1). La quantité d'énergie exploitable de ces ressources malheureusement "non renouvelables" ne représente que 0,5 % de ce que nous recevons chaque année par rayonnement solaire [1].

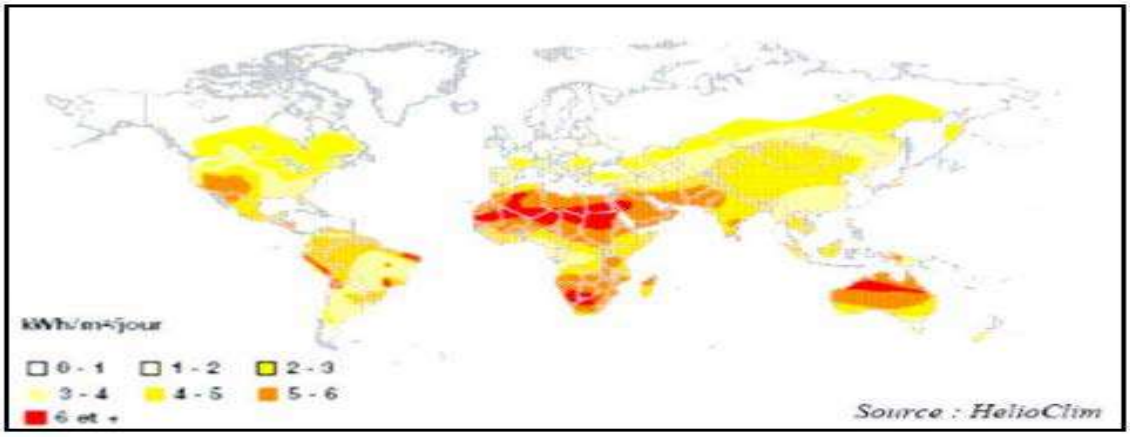
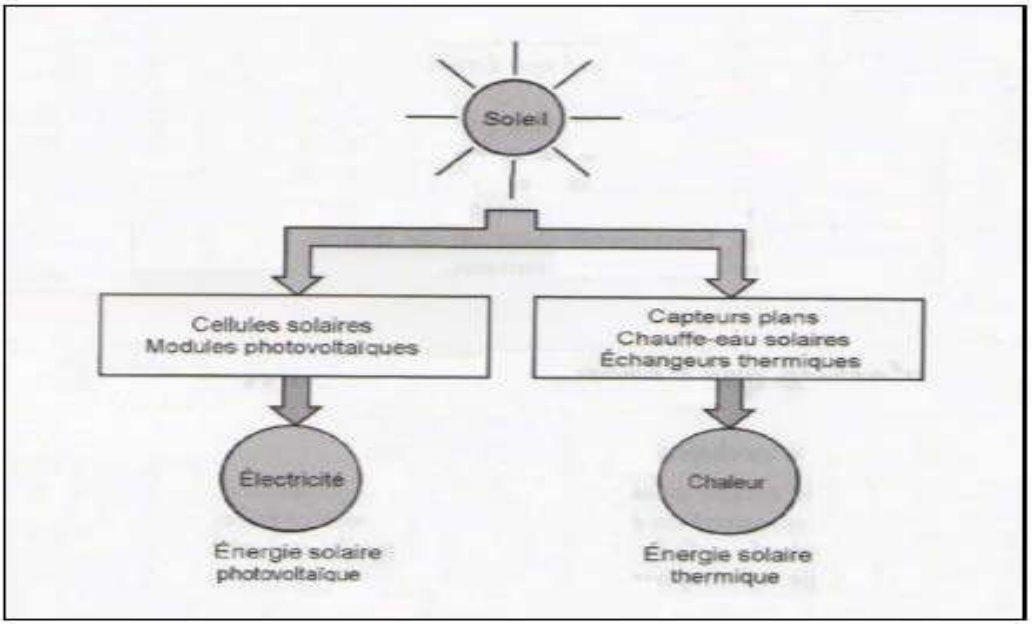


Figure I. 1 : carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle sur un plan horizontal.

I.3.2. Définition :

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables, mais elle est très atténuée. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique [1] (Voir Figure I.2).



FigureI.2 : les deux types d'énergie solaire.

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($2{,}5\mu m$) à l'infrarouge lointain ($2{,}5\mu m$), et transportant chacun une énergie E_{ph}.

L'énergie transportée par un photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde, c'-a-d plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise [7]. L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350W/m² (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre (Voir Figure. I.3).

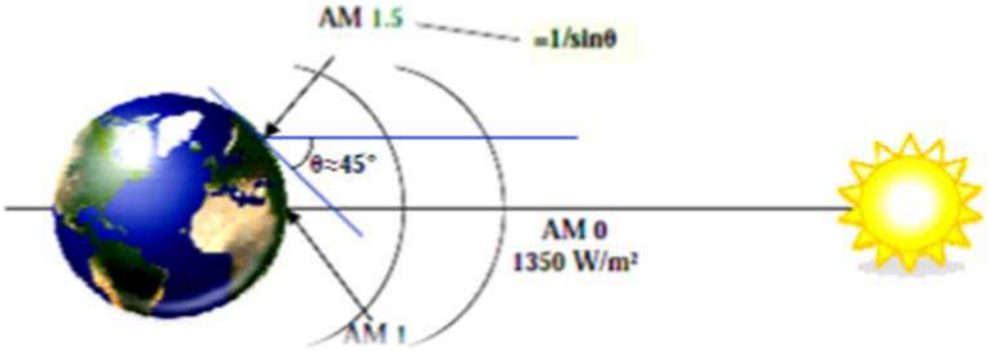


Figure I.3 : normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM. . [7]

Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé. Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint 1000 W/m² du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration θ est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de 48° avoisine les 833 W/m² (AM1.5).

Pour connaître le rayonnement global reçu au sol, il faut ajouter à ce dernier le rayonnement diffus. Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de 1000W/m², la Figure I.4 correspondant à nos latitudes.

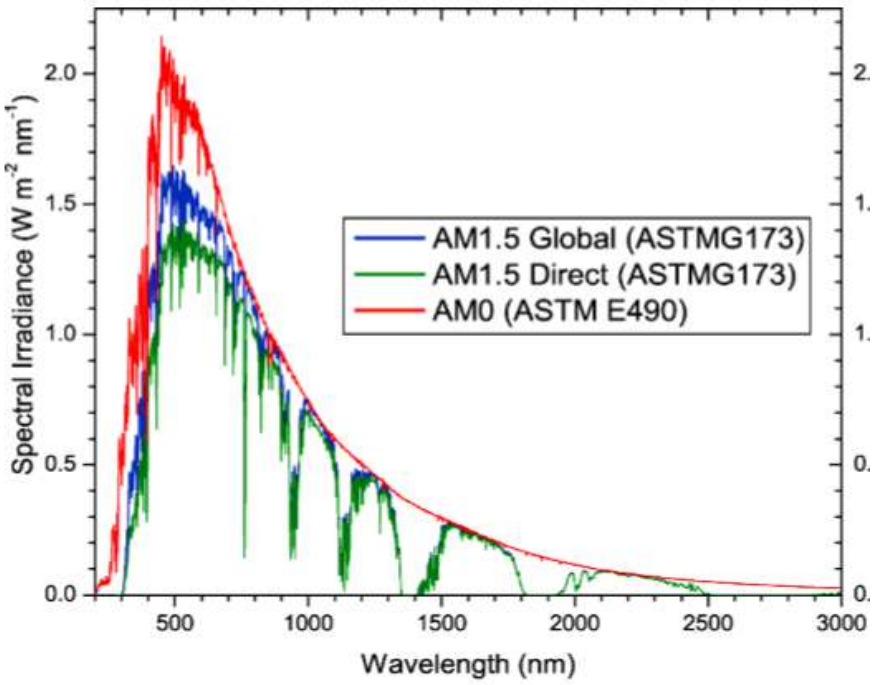


Figure I. 4 : spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM. Source NREL *solar Spectrum*

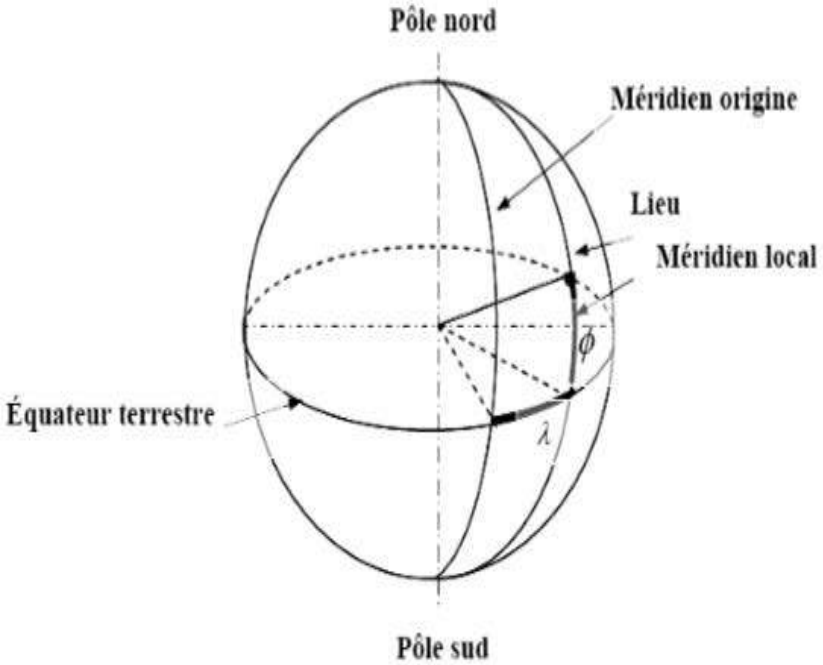


Figure I.5 : *définition des cordonnées terrestres d'un lieu donné.* [9]

I.4. Energie solaire photovoltaïque :

I.4.1. Définition :

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui réalisent cette transformation d'énergie [5].

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension I(V) non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [14].

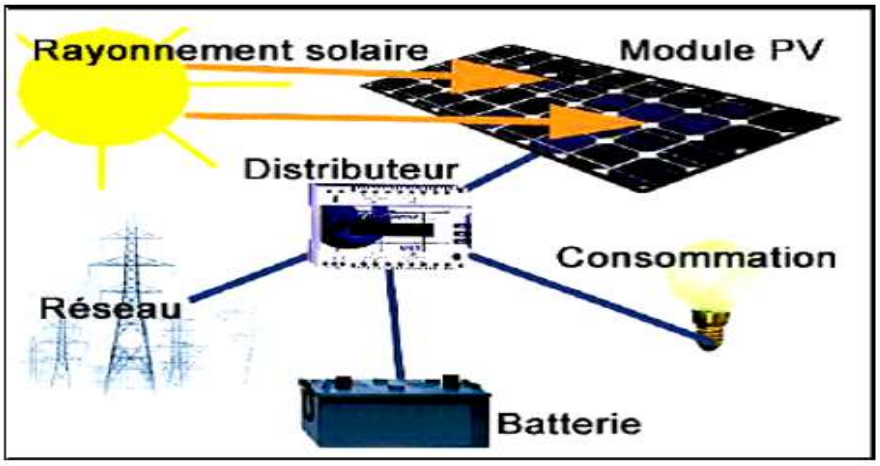


Figure I.6 : *système photovoltaïque.* [15]

I.4.2. Bref historique :

L'hélio électricité, qui traite de la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique, est apparue en 1930 avec les cellules à oxydes cuivreux puis au sélénium, mais ce n'est qu'en 1954, avec la réalisation de premières cellules photovoltaïques au sélénium dans les laboratoires de la compagnie Bell téléphonent, que l'on entrevoit la possibilité de fournir de l'énergie. Très rapidement utilisées pour l'alimentation des véhicules spatiaux, leur développement et de rapides progrès ont été motivés par la conquête de l'espace. Au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre à progresser régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelque mégawatt, et même devenue familière des

consommateurs à travers de nombreux produits de faibles puissances y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologique, pompes et réfrigérateurs solaires. Des évènements tels que les courses de véhicules solaires offrant une image de haute technologie futuristes et écologique y ont également contribué [15].

I.4.3. Électricité solaire par effet photovoltaïque :

I.4.3.1. Principe de fonctionnement :

Découvert par le physicien français A. BECQUEREL dès 1839, l'effet photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires (photon) en électricité (Volt), par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.

Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p [5].

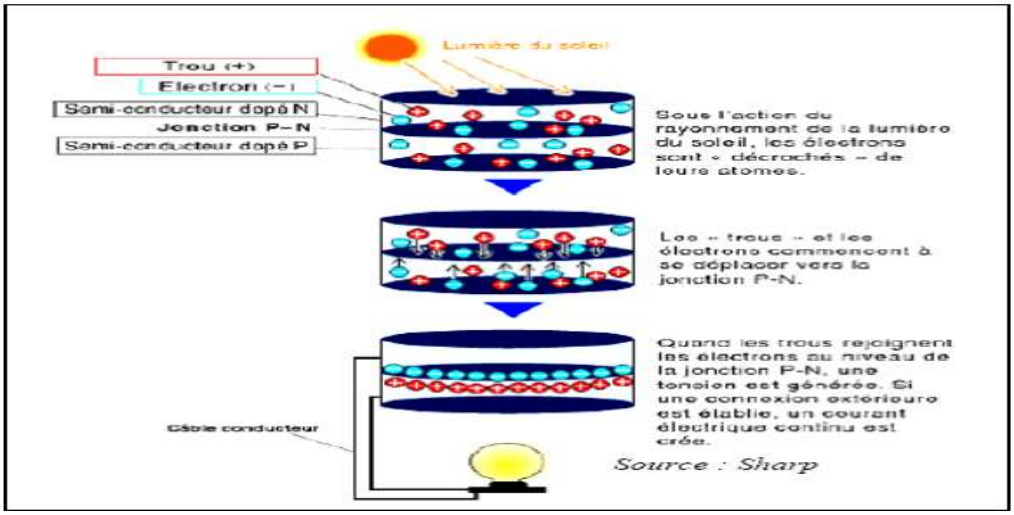


Figure I.7 : effet photovoltaïque.

Donc ce principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie ($h\upsilon$).

- Si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de ce semi-conducteur ($E_g = E_c - E_v$), l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron- trou dans différents points de la jonction. Donc toute particule minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement le passage des porteurs majoritaires. (Voir Figure I.8). Si les photons ont une énergie très supérieure à E_g, ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de photons réseau cristallin puis perdue en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction.
- Si les photons ont une énergie inférieure à E_g, ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque [16].

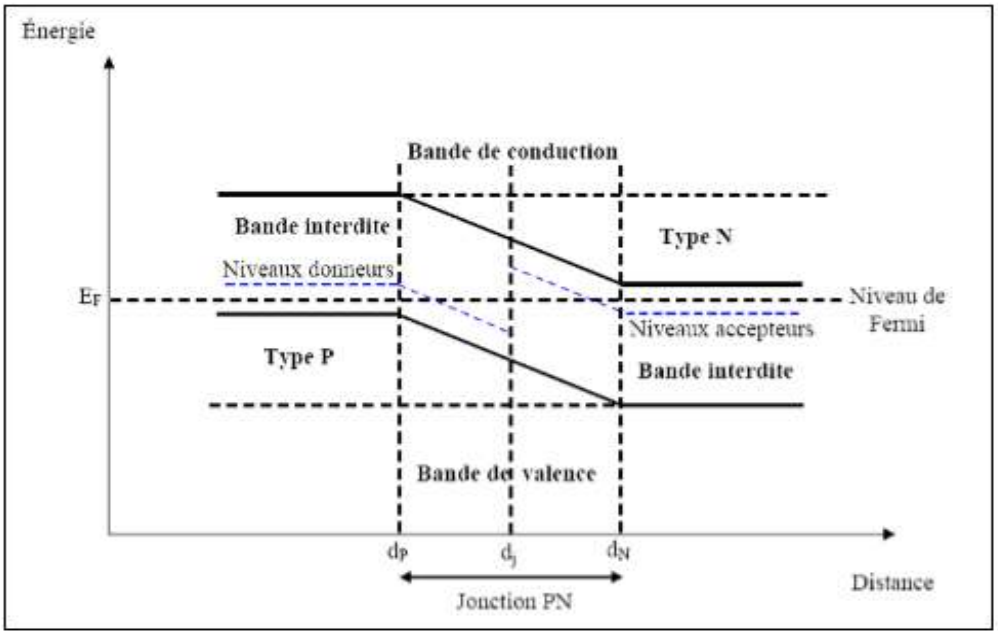


Figure I.8 : *diagramme de bandes d'énergie de la jonction* [16]

I.4.3.2. Cellules photovoltaïques :

La cellule photovoltaïque est un moyen de conversion de la lumière en énergie électrique par le processus « effet photovoltaïque ». Elle est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) 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. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ $0{,}6v$ pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{oc}), (Voir Figure I.9). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{cc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement [14].

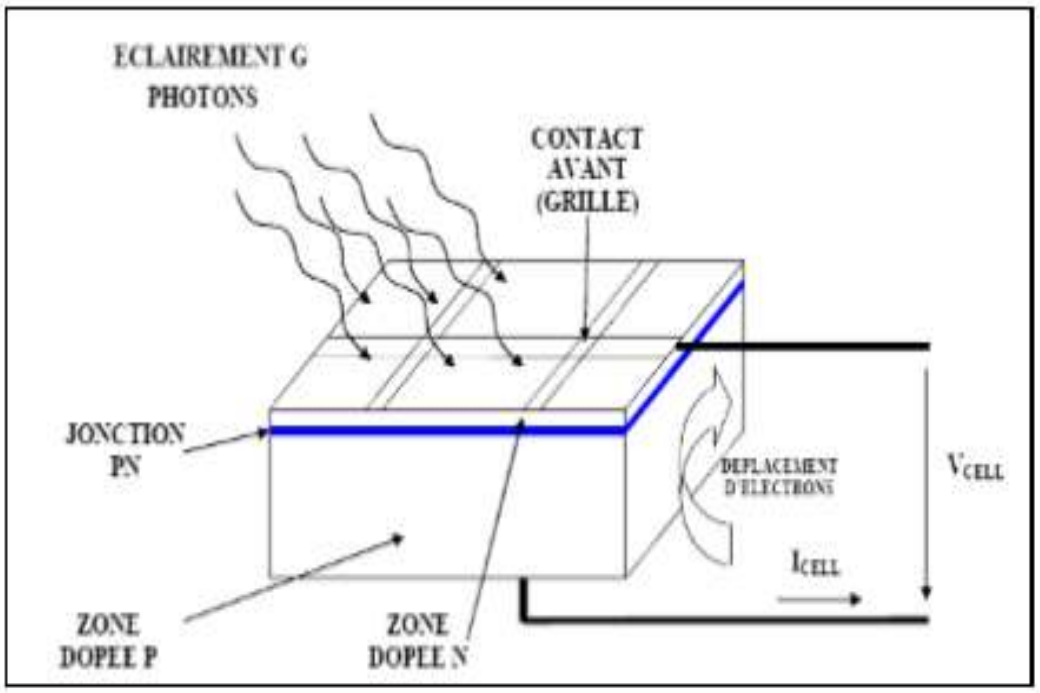


Figure I.9 : *coupe transversale d'une cellule PV typique.* [14]

I.4.3.3. Fonctionnement des cellules photovoltaïques :

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le régime photovoltaïque est un régime où aucun potentiel n'est appliqué, mais où un courant circule à travers une charge. Le système développe donc une puissance électrique. Le principe de fonctionnement de la cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs. La conversion de photons en électrons dans un matériau pouvant produire un courant électrique nécessite :

- Absorption des photons par le matériau (absorption optique) et la génération des porteurs de charges.
- Collecte des porteurs excités avant qu'ils ne reprennent leur énergie initiale (relaxation).

Une cellule photovoltaïque produit une tension de $0{,}5v$ en circuit ouvert. L'intensité du Courant fourni par cette cellule dépend des conditions environnantes et en fonction de la charge [17].

I.4.4. Différents types des cellules photovoltaïques :

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par a un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [18]:

I.4.4.1 Cellules monocristallines :

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal (Voir Figure I.10).

Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly-cristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal.

Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs), le Wafer devient cellule.

Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de15 à 22 %, mais la méthode de production est laborieuse [5].



Figure I. 10 : *cellule photovoltaïque (monocristalline).* [15]

I.4.4.2. Cellules poly cristallines:

Les cellules poly cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes), (Voir Figure I.11).

Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines.

Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication.

Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure Poly-cristalline. Durée de vie estimée : 30 ans [5].



Figure I. 11 : *cellule photovoltaïque (poly cristalline)*

I.4.4.3. Cellules amorphes :

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies Poly-cristallines ou monocristallines.

Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première [5].

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium monocristallin	12 à 18% *(24,7% en laboratoire)*	20 à 30 ans	* Très performant * Stabilité de production. * Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades,…
Silicium poly-cristallin	11 à 15% *(19,8% en laboratoire)*	20 à 30 ans	* Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production, Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs…
Amorphe	5 à 8% *(13% en laboratoire)*		* Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. * Fonctionnement si faible luminosité. * Fonctionnement par temps couvert. * Fonctionnement si ombrage partiel * La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrices…), intégration dans le bâtiment

Tableau I.2 *: comparatif de différentes technologies* [5]

I.4.5. Modules (ou panneaux) :

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5 Volt. Alors Pour produire plus de puissance les cellules sont assemblées pour former un module. Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque (Voir Figure I.12). [19].

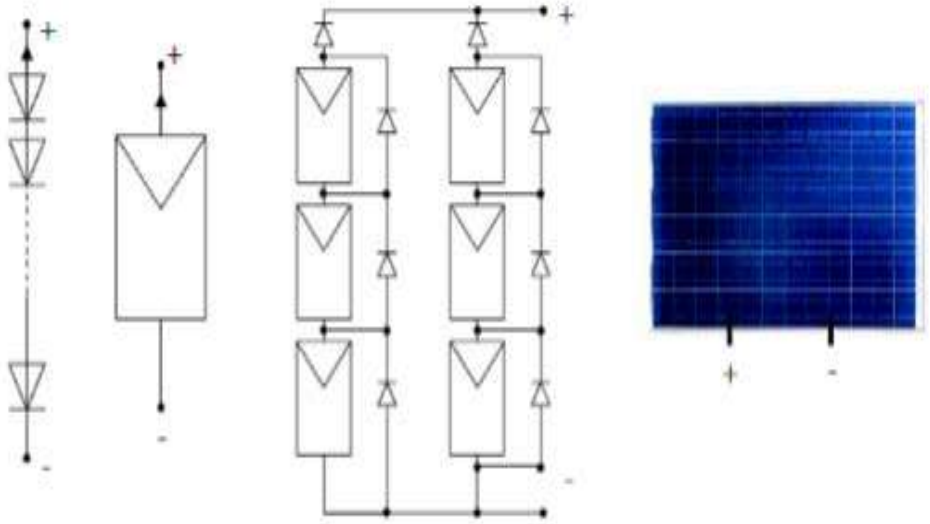


Figure I.12 : *cellules, module et panneau photovoltaïque.* [20]

Un module photovoltaïque se compose généralement d'un circuit de 36 cellules en série, protégées de l'humidité par un capsulage de verre et de plastique. L'ensemble est ensuite muni d'un cadre et d'une boîte de jonction électrique [20].

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée [19].

Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité [20].

I.4.6. Générateur photovoltaïque :

Dans des conditions d'ensoleillement standard (1000W/m² ; 25°C ; AM1.5), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de 150 cm² est d'environ 2.3Wc sous une tension de 0.5V.

Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires [6].

$$V_{co\ (ns)} = ns \cdot V_{co} \qquad \text{avec : } I_{cc} = I_{cc\ (ns)} \qquad (I.14)$$

Une association de ns cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, (Voir Figure I.13). L'équation (I.13) résume les caractéristiques électriques d'une association série de ns cellules.

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série

($V_{cons} = 0{,}6 \times 36 = 21{,}6V$) afin d'obtenir une tension optimale du panneau Vopt proche de celle d'une tension de batterie de 12V.

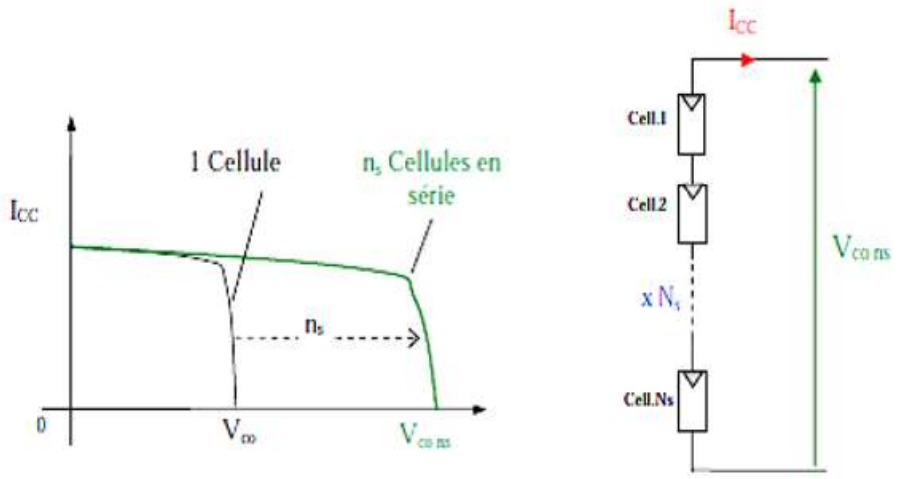


Figure I.13 : *caractéristiques résultants d'un groupement de ns cellules en série.* [7]

D'autre part, une association parallèle de *n*p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, (Voir Figure I.14). L'équation (I.14) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de *nnpp* cellules.

$$I_{sc\ (np)} = n_p \times I_{sc} \qquad \text{avec : } V_{co\ (np)} = V_{co} \tag{I.15}$$

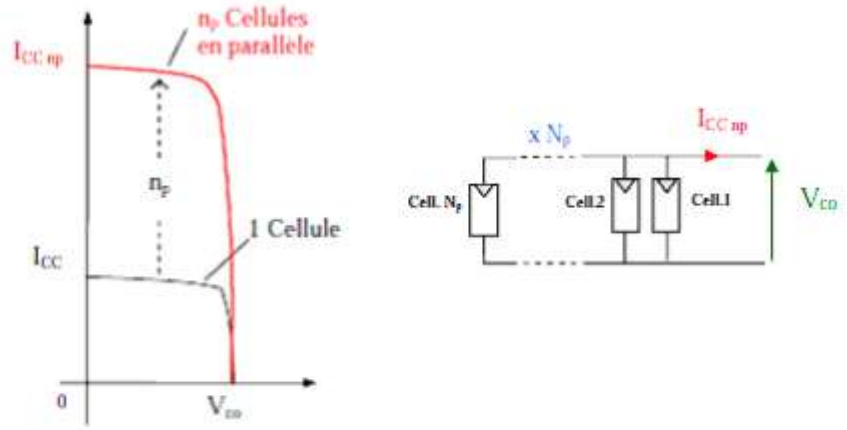


Figure I.14 : *caractéristiques résultants d'un groupement de n_p cellules en parallèle.* [7]

Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités.

Ainsi, pour n_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes n_p en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

$$P_{pv} = n_s V_{pv} \cdot n_p I_{pv}$$

Si l'on désire avoir un générateur PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, soit associer en parallèle plusieurs modules PV de caractéristiques similaires. Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les (n_s, n_p) cellules se comportent toutes de façon identique. Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, du même

lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (éclairement, température, vieillissement et inclinaison).

La puissance du générateur PV sera optimale si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale notée P_{max}. Cette puissance est le maximum d'une caractéristique P(V) du générateur, et correspond au produit d'une tension optimale notée T_{opt} et d'un courant optimal noté I_{opt} [15]. Cette caractéristique dépend fortement de l'éclairement auquel est soumis le générateur et de sa température.

I.4.7. Conversion de l'énergie solaire photovoltaïque :

Dans le cas d'installations autonomes, l'énergie produite par les panneaux solaires photovoltaïques est utilisée immédiatement (pompage, ventilation, etc.…) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée (Voir Figure I.15). Le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est transformé en 230 Volts alternatif [19].

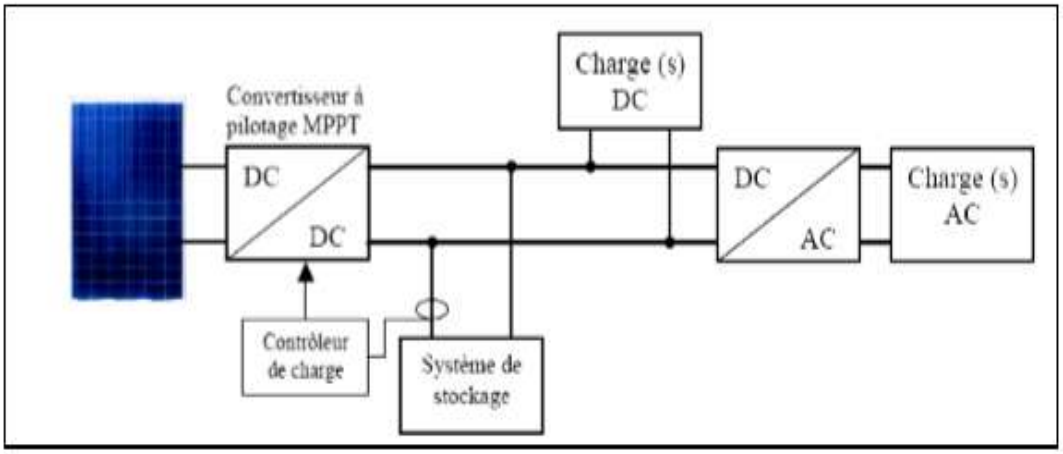


Figure I. 15 : *installation photovoltaïque autonome.* [19]

Le système peut également être connecté au réseau. L'avantage du raccordement est de se dispenser du coûteux et problématique stockage de l'électricité. Dans ses versions les plus économiques l'onduleur ne peut fonctionner qu'en présence du réseau, une éventuelle panne de ce dernier rend inopérationnel le système de production d'origine renouvelable. Un onduleur réversible est nécessaire si on a une charge à courant continu (Voir Figure I.16). Si la consommation locale est supérieure à la production de la centrale, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs voisins [19].

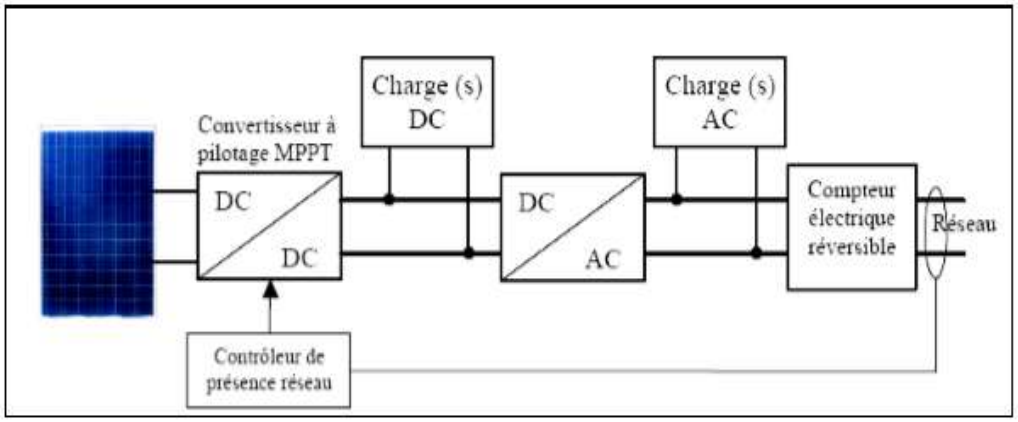


Figure I.16 : installation photovoltaïque couplée au réseau. [19]

I.4.8. Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque :

I.4.8.1. Avantages :

- Haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du Milliwatt au Mégawatt.
- Coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant (électricité propre), silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.
- Fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales.
- Flexibilités et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre à vos besoins en matière d'électricité.
- Temps de réalisation d'une centrale PV minimum.
- Longue durée de vie.
- Elimination des frais des risques de transport associé des énergies fossiles [21].

I.4.8.2 Inconvénients :

- Fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des Investissements d'un coût élevé.
- Rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%.
- Générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage (< 30V), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.
- Stockage de l'énergie électrique dans des accumulateurs qui sont les plus souvent des batteries au Plomb. Sachant que les batteries ne doivent pas se décharger à plus de 60% (70% maximum) de leur capacité maximale. En outre, les batteries ont une faible durée de vie (3 à 5ans), ce qui entraîne un surcoût au fonctionnement [21].

I.5. Energie éolienne :

I.5.1. Introduction :

La ressource éolienne provient du 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 [22, 23]. Cette énergie est tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent (Voir Figure I.17).

Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent qui est dû notamment aux premiers chocs pétroliers. A l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an [23, 24].

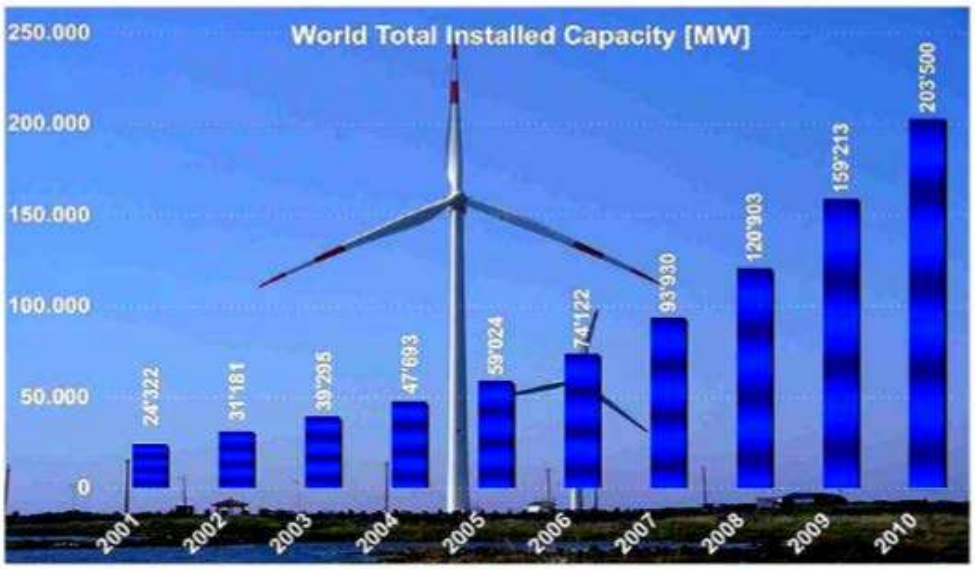


Figure I.17 : *capacité mondiale totale installée en (MW).*

I.5.2 Historique de l'éolien :

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J.-C environ [25].

La Première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, ce n'est qu''au VIIème siècle que l'on voit apparaître les premiers moulins à vent. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés [25].

A l'arrivée de l'électricité donne l'idée au britannique Lord Kelvin en 1802 de songé pour la première fois à transformer l'énergie éolienne en énergie électrique. En effet il essaya d'associer une génératrice d'électricité à un moteur éolien, mais en fait il faudra attendre 1850 et l'avènement de la dynamo pour qu'on puisse voir ce que l'on appellera les « aérogénérateurs ». Cette nouvelle application de l'énergie éolienne a connu un certain succès, et l'on comptait en 1920 jusqu'à 300 constructeurs d'aérogénérateurs. « Malheureusement », à cette époque, le faible coût du pétrole avait mis le kilowatt fourni par l'énergie thermique à un niveau de compétitivité inaccessible à l'énergie éolienne [24.25].

Dès 1973, le processus inverse a, petit à petit, relancé les programmes d'études et de réalisation d'aérogénérateurs. Mais les budgets de recherche et de développement, ainsi que les aides gouvernementales fluctuent avec le prix du baril de pétrole, et les aides accordées aux autres énergies (photovoltaïque en particulier). Toutefois au court des dernières années se dessine une nette tendance au développement de « fermes éoliennes » ou « parcs éoliens » raccordés aux réseaux de distribution avec les machines de 300KW à 1.5MW [25]. Ces éoliennes servent aujourd'hui à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur nucléaire, un barrage hydro-électrique ou une centrale thermique au charbon. Cependant, les puissances générées et les impacts sur l'environnement ne sont pas les mêmes.

I.6. Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie en provenance du vent traverse la turbine éolienne qui est un élément d'interface entre le domaine de la mécanique des fluides et de la mécanique traditionnelle. L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présentée dans le vent et la transformée en énergie mécanique de rotation, Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières [25] :

- Soit Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.
- Soit Transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie [24].

I.7. Architecture d'une éolienne :

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour, (Voir Figure (I.18)) [23] :

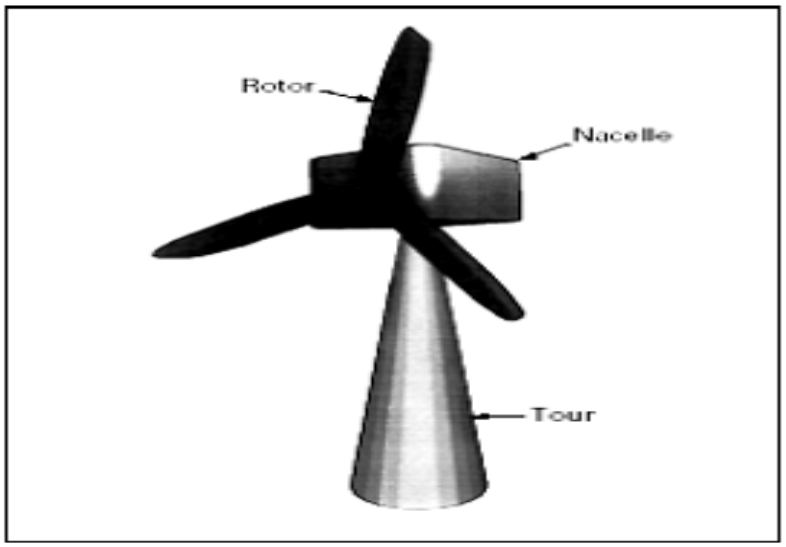


Figure I.18 : *composants d'une éolienne.* [23]

I.7.1. Rotor :

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué de pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variables, freinage du rotor…) [25, 26].

I.7.2. Nacelle :

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine. La figure (1.19) présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants :

- Multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques.
- L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine [23, 26].
- Génératrice : Différents types de génératrices peuvent être rencontrés.

- Contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor, nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts instationnaires sur l'installation. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir [23].
- Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau, ou d'huile.
- Dispositif d'orientation de la nacelle : Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée ; cela évite de solliciter constamment les moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance [23, 26].

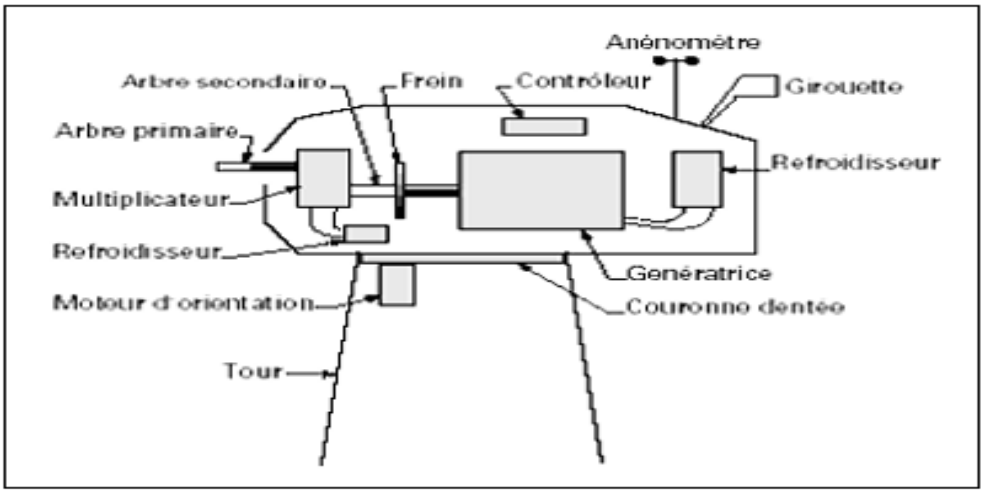


Figure I.19 : *élément d'une nacelle.* [23]

I.7.3. Tour :

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor, nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi le captage de l'énergie.

Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble (rotor, nacelle) (Voir Figure I.20), de manière à s'adapter au mieux aux différents sites d'implantation [23].

I.8. Fonctionnement d'une éolienne :

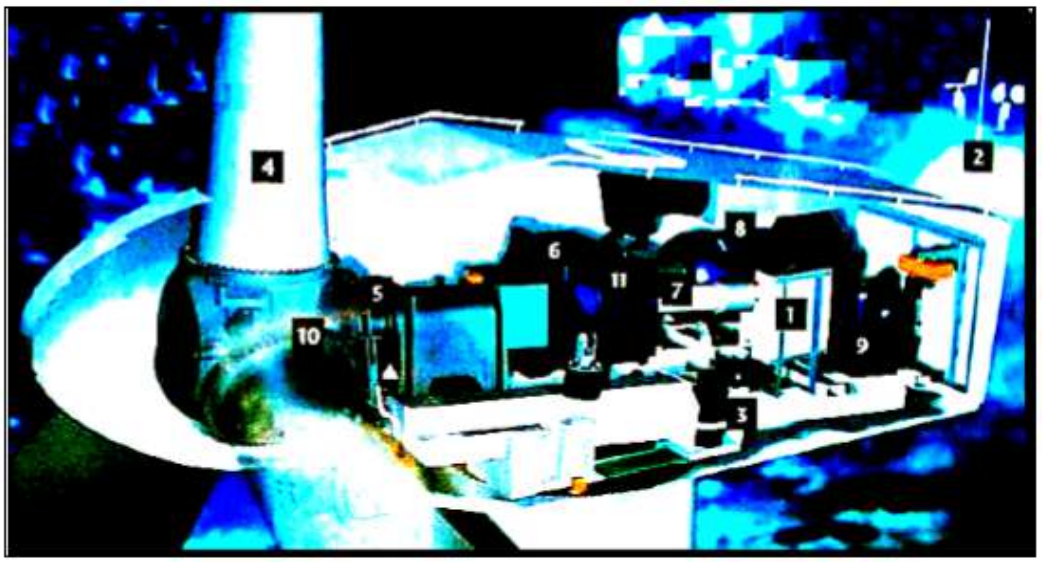


Figure I.20 : *principe de fonctionnement d'une éolienne.* [27]

Quand le vent se lève, l'automate (1), grâce à sa girouette (2) située à l'arrière de la nacelle commande un moteur d'orientation (3) de placer l'éolienne face au vent. Les trois pales (4) sont mises en mouvement par la seule force du vent. Elles entrainent avec elles l'axe lent (5), le multiplicateur (6), l'arbre rapide (7), et la génératrice (8).

Lorsque le vent est suffisant (4 m/s soit 14.5 km/h), l'éolienne peut-être couplée au réseau électrique. Le rotor tourne alors à sa vitesse nominale aux environs de 30 tr/min et la génératrice à 1500 tr/min. Ces vitesses de rotation vont rester constantes tout au long de la période de production. La génératrice délivre alors un courant électrique alternatif à la tension de 690V et dont l'intensité varie en fonction de la vitesse du vent. Ainsi, lorsque la vitesse du vent croit, la portance s'exerçant sur le rotor augmente et la puissance délivrée par la génératrice s'accroit [27].

Quand le vent atteint 50 km/h, l'éolienne fournie sa puissance nominale. Cette puissance est alors maintenue constante en réduisant progressivement la portance des pales. L'unité

hydraulique (9) régule la portance en modifiant l'angle de calage des pales qui pivotent sur leurs roulements (10).

Lorsque le vent dépasse 90 km/h, les pales sont mises en drapeau et leur portance devient quasiment nulle, l'éolienne ne produit pas d'électricité. Tant que la vitesse du vent reste supérieure à 90 km/h, le rotor tourne en roue libre et la génératrice est déconnectée du réseau. Dès que la vitesse du vent diminue, l'éolienne se remet en mode de production. Toutes ces opérations sont automatiques et entièrement gérées par ordinateur. En cas d'arrêt d'urgence, un frein à disque (11) place sur l'axe rapide permet de mettre la machine en sécurité [27].

I.9. Caractéristiques des éoliennes :

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux types de turbines éoliennes [23] :

- Eolienne à axe horizontal;
- Eolienne à axe vertical.

I.9.1. Eolienne à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent (Voir Figure I.21). Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [28].



Figure I.21 : *éoliennes à axes horizontal.* [28]

On peut distinguer des éoliennes dont l'hélice est en amont par rapport au vent, « hélice au vent » Voir Figure (I.22.a), et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent, « hélice sous le vent » (Voir figure (I.22.b) [29].

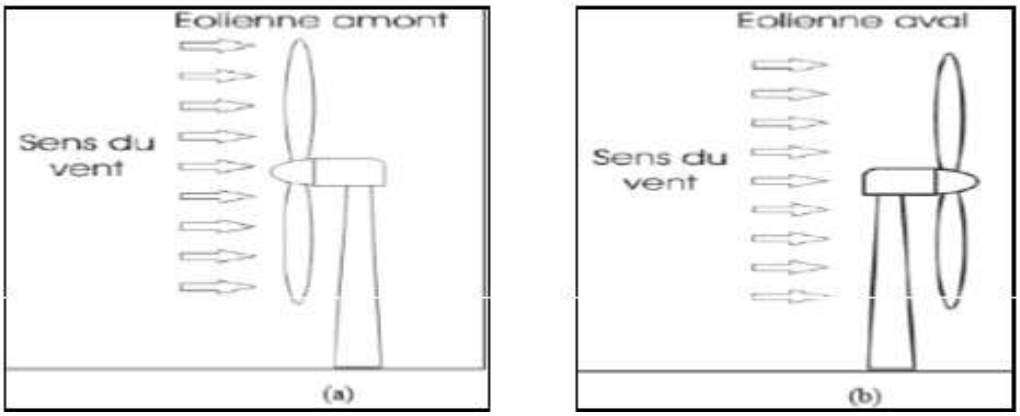


Figure I.22 : éoliennes à axes horizontal. [29]

I.9.2. Eolienne à axe vertical :

Elles présentent certains avantages : machineries au sol, pas besoin d'orientation en fonction de la direction du vent, construction souvent simple. Elles tournent à faible vitesse et sont de ce fait peu bruyantes. Elles présentent par contre des difficultés pour leur guidage mécanique, le palier bas devant supporter le poids de l'ensemble de la turbine [23, 25].

Il existe principalement trois technologies de ce type d'éoliennes (Voir Figure I.23) [23, 25] :

- Turbines Darrieux classiques,
- Turbines Darrieux à pales droites (type-H),

- Turbines Savonius.



Figure I.23 : *éoliennes à axes vertical.* [28]

I.10. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne :

La régulation d'une source éolienne de secours est un facteur primordial pour son bon fonctionnement. Ce système permet d'assurer la sécurité de l'éolienne en cas de trop forte vitesse de l'avion au déploiement, mais aussi, de limiter sa puissance pour éviter une détérioration des composants mis en jeu. Cette source éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance nécessaire, dénommée puissance nominale P_n. Cette puissance P_n est obtenue à partir de la vitesse V_n (vitesse nominale) du vent relatif. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à V_n la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter sa destruction mécanique, en faisant de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante. A côté de la vitesse nominale V_n du vent relatif, on spécifie aussi :

- Vitesse de démarrage, V_D, à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie.
- Vitesse maximale du vent relatif, V_M, pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour des raisons de sûreté de fonctionnement. Les vitesses V_n, V_D et V_M définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent (Voir Figure I.24) [28, 29].

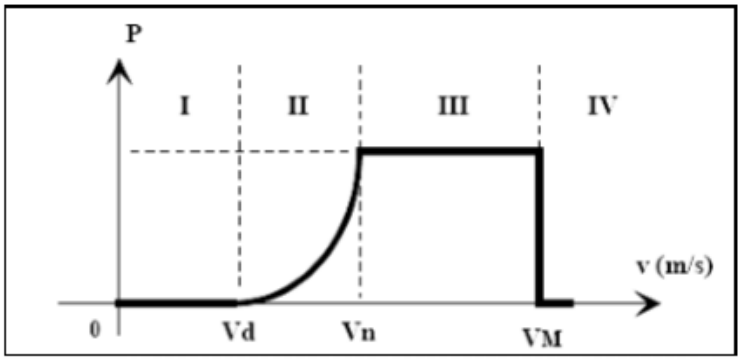


Figure I.24 : *diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.* [28,29]

- Zone I, où P = 0 (la turbine ne fonctionne pas).
- Zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V.
- Zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_n.
- Zone IV, dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

I.11. Notions théoriques sur l'éolien :

I.11.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique :

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dx, de section S, de masse volumiqueρ, animée d'une vitesse v, (Voir Figure I.25) s'écrit [25]:

$$dE_c = \frac{1}{2}\rho S\, dx\, v^2$$

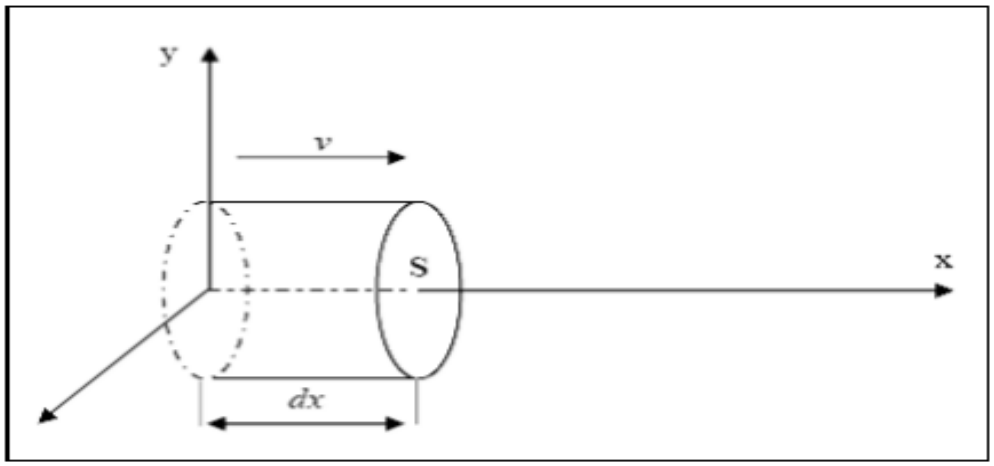


Figure I.25 : *colonne d'air animée d'une vitesse V.* [25]

La puissance Pm extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps [25].

En supposant dx = vdt, on déduit l'expression de P_m :

$$P_m = \frac{dEc}{dt} = \frac{1}{2}\rho S_0 v^3$$

ρ : Densité volumique de l'aie (kg/m³)

V : Vitesse instantanée du vent (m/s)

E_c : Energie cinétique du vent (Joules)

I.11.2 Loi de Betz :

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Albert BETZ en 1929, qui suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse V1et à l'infini en aval d'une vitesse V2. La production d'énergie ne pouvant se faire que par la conversion de l'énergie cinétique du vent, la vitesse V2 est nécessairement inférieure àV1. Il en résulte que la veine de fluides traverse le générateur éolien en s'élargissant [30, 31]. Soit V, la vitesse au travers de S, la section balayée par les pales de l'éolienne (Voir Figure (I.26)), et M la masse d'air qui traverse l'éolienne, la variation de l'énergie cinétique ΔEc est :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (I.19)$$

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

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V' \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (I.20)$$

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

$$F = \rho \cdot S \cdot V' \cdot (V_1 - V_2) \quad (I.21)$$

D'où :

$$P_{aer} = F \cdot V' = \rho \cdot S \cdot V'^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (I.22)$$

En identifiant les équations (I.19) et (I.21), il vient :

$$V' = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (I.23)$$

Et donc :

$$P_{aer} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2) \quad (I.24)$$

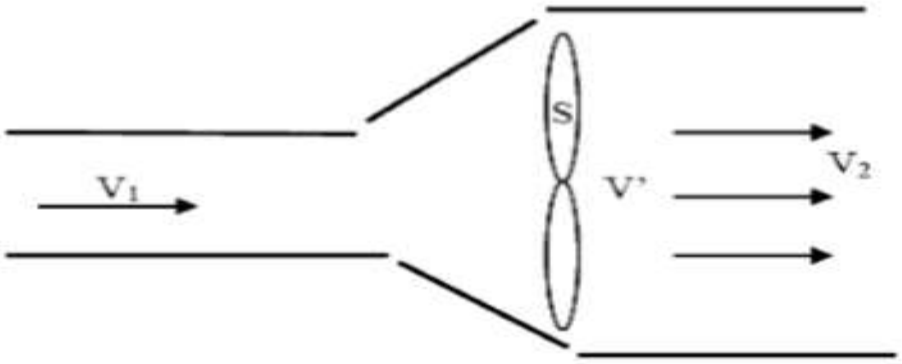


Figure I.26 : *théorie de Betz : schéma de principe*

La puissance de l'éolienne sera alors maximale quand sa dérivée $\frac{\partial Paer}{\partial V2}$ est nulle, soit pour $V_2 = \frac{V1}{3}$, la puissance est maximale et vaut [30, 31] :

$$P_{aer} = P_{aer\ max} = C_{p\ max} \cdot \frac{\rho .S .V1^3}{2} = \frac{12}{27} \cdot \frac{\rho .S .V1^3}{2} \quad (I.25)$$

On peut donc en déduire que même si la forme des pales permet d'obtenir $V_2 = \frac{V1}{3}$, on ne récupère au mieux que 0.593 fois l'énergie cinétique de la masse d'air amont, on écrira alors :

$$P_{aer} = C_p \cdot \frac{\rho .S .V1^3}{2} \quad (I.26)$$

Où Cp est le coefficient de puissance de l'éolienne (valeur maximale 0.593). Ce coefficient dépend de la vitesse du vent en amont V1, du nombre de pales, de leur rayon, de leur angle de calage et de leur vitesse de rotation.

I.12.3. Vitesse spécifique ou normalisée :

On définit la vitesse spécifique ou normalisée λ comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine Ω R sur la vitesse instantanée de vent V (Voir Figure 1.27) et donné par l'expression suivante [25, 32]:

$$\lambda_n = \frac{\Omega t \cdot Rt}{V} \qquad \text{(I.27)}$$

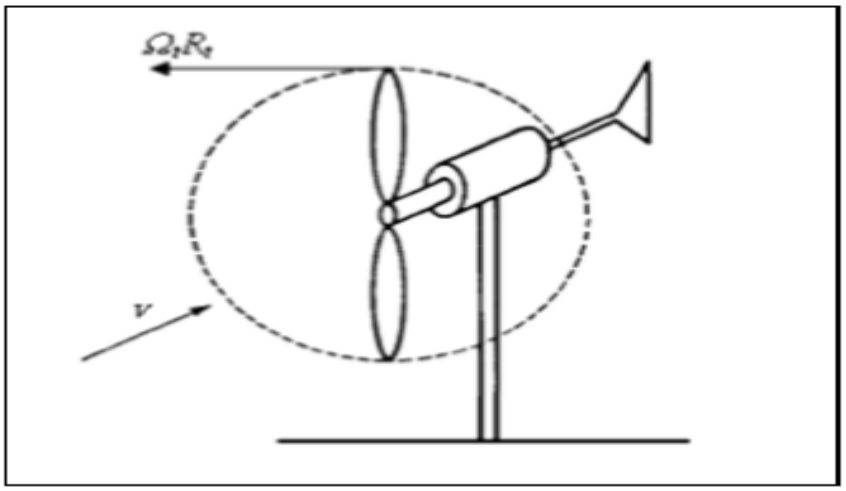


Figure I.27 : *vitesse de vent (V) et vitesse tangentielle de l'aubage* $\Omega_t R_t$

R_t : Rayon de la surface balayée (m) ;

V : Vitesse de vent (m/s) ;

Ω_t : Vitesse de rotation avant multiplicatrice (rad/s).

I.12.4. Coefficient de puissance :

On définit le coefficient de puissance, le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible [23, 25, 32].

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \qquad \text{(I.28)}$$

Le coefficient Cp est variable, il est en fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine Ω_t, et les paramètres des pales de la turbine comme l'angle d'incidence et l'angle de calage [23, 25, 32]. Il est souvent représenté en fonction de la vitesse spécifique λ. La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de BETZ, est de 16/27 soit 0.593 [23, 25, 32, 33]. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte, et les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale, se situent à 60-65% de la limite de BETZ ; on ne récupère globalement que 40% de l'énergie due au vent. On déduit alors le rendement aérodynamique [25, 32]:

$$\eta = \frac{16}{27} C_{p\,max} \tag{I.29}$$

$C_{p\,max}$ Étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance C_p. Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale λ_{opt} pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale V_n et une vitesse de rotation nominale Ω_{tn} [23, 25, 32].

I.12 .5. Coefficient de couple :

Le coefficient de couple Cm est assez proche du coefficient de puissanceC_p. Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation Ω_t nulle, ce qui correspond à une valeur de C_p nulle pour une valeur de C_m non nulle [34]. En combinant les équations (I.25), (I.26), et (I.27), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda)\, \rho \pi R^2 V_1^3 \tag{I.30}$$

Avec :

$$\lambda_n = \frac{\Omega t R}{V1}$$

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

$$T_t = \frac{Pm}{\Omega t} = \frac{R_t Pm}{\lambda V} = \frac{Cp}{\lambda} \cdot \frac{1}{2}\, \rho \pi R^3{}_t\, V^2 \tag{I.31}$$

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

$$C_m = \frac{Cp}{\lambda} = \frac{2Tt}{\rho StRtV^2} \tag{I.32}$$

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

I.12.6. Distribution de Weibull :

Le modèle le plus utilisé pour traduire la variation des vitesses de vent est la loi de distribution de Weibull Sa densité de probabilité se présente sous la forme, [35] :

$$f(\mathrm{V}) = \left(\frac{K}{C}\right)\left(\frac{V}{C}\right)^{\mathrm{K-1}} \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^{\mathrm{K}}\right) \quad \text{(I.33)}$$

En assimilant les fréquences aux probabilités, la densité de probabilité $f(\mathrm{V})$ représente la distribution en fréquences des vitesses mesurées.

K et C sont des paramètres appelés communément les paramètres de Weibull. Le paramètre K (facteur de forme) est sans dimension et caractérise la forme de la distribution de fréquence alors que C détermine la qualité du vent (facteur d'échelle). Ce dernier a la dimension d'une vitesse. La détermination de ces paramètres permet la connaissance de la distribution des vents pour un site donné. Le traitement peut se faire directement ou en passant par les fréquences par classes en considérant les moyennes.

La fonction de répartition est donnée par :

$$\mathrm{f}(\mathrm{V} \leq \mathrm{V_x}) = \int_0^{Vx} f(V)dV = 1 - \exp(-(\mathrm{V_x} / \mathrm{C})^{\mathrm{K}}) \quad \text{(I.34)}$$

$$\mathrm{f}(\mathrm{V} \geq \mathrm{V_x}) = \int_{Vx}^{\infty} f(V)dV = \exp(-(\mathrm{V_x} / \mathrm{C})^{\mathrm{K}}) \quad \text{(I.35)}$$

I.13. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

I.13.1. Avantages :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO2.
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.
- Mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires [36].

I.13.2. Inconvénients :

- Nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- Coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
- Bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des Multiplicateurs [36].

I.14. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce présent chapitre d'une part les différentes notions qui entrent dans la conception des deux énergies : solaire photovoltaïque et éolienne. Et d'autre part, nous avons évoquée tous les éléments constitutifs des deux systèmes photovoltaïques et éoliens, ainsi que leurs principes de fonctionnements, ce qui permet d'introduire à l'analyse du système hybride formé par ces deux systèmes au chapitre II.

Références Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

[1]. O.DERUELLE, « Mise au point d'un système de spectroscopie pour mesurer des sections efficaces neutroniques applicables à un possible développement du nucléaire comme source d'énergie », Thèse de Doctorat en sciences, Université de Paris XI ; pp.9-12, 2002.

[2]. EurObserv'ER, « Seventh inventory of worldwide electricity production from renewable energy sources », 2005.

[4]. L. BROMAN, J.A. DUFFIE, and E. LINDBERG, « A Concentrated Course in Solar Thermal Process Engineering », 2*eeee*, Inc. ISES Solar World Congress, 1991.

[5]. B. FLECHE, D. DELAGNES, « Energie solaire photovoltaïque », STI ELT Approche générale, Juin 2007.

[6]. A.LABOURET, M.VILLOZ, « Energie solaire photovoltaïque », Edition Dunod, Paris, 2006.

[7]. S.PETIBON, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2009.

[8]. C.P.de BRICHAUMBOT et C.VAUGE, « Le Gisement solaire », Edition tech. & doc, Paris, 1982.

[9]. J. BERNARD, « Energie solaire Calculs et optimisation », Edition ellipses, 2004.

[10]. M. GEYER, and W.B.STINE, « Power From the Sun », Journées de Thermiques, Lyle Center, 2001.

[11]. B. BENYOUCEF, « les énergies renouvelables », Cours de Magister, 2008.

[12]. Y. JANNOT, « Thermique solaire », Cours de Transferts thermiques, 2003.

[13]. A. BENATIALLAH, « Etude expérimentale et simulation des performances d'une installation photovoltaïque de faible puissance », Thèse de Magister, Université de Tlemcen, 1998.

[14]. C. ZIDANI, F. BENYAROU et B. BENYOUCEF, « Simulations de la position apparente du soleil et estimation des énergies solaires incidents sur un capteur plan

photovoltaïque pour la ville de Tlemcen (Algérie) », Revue énergies renouvelables, Vol.6, pp.69-76, 2003.

[15]. F. LASNIER, T.G. ANGEL, « Photovoltaic Engineering Handbook », IOP Publishing Ltd. 1980. ISBN 0-85274-311-4.

[16]. A. RICAUD, « Photopiles solaires », Presses polytechniques et universitaires romandes, 1997.

[17]. T. FOGELMAN, « Système photovoltaïque pour les pays en développement », Manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie, (AFME) – septembre 1982.

[18]. F.Z.ZERHOUNI, « Adaptation Optimale d'une Charge à un Générateur Photovoltaïque », Mémoire de Magister, Institut d'Electronique, USTO, 1996.

[19]. Olivier GERGAUD, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de Doctorat en électrotechnique, Ecole normale supérieure de Cachan, 2002.

[21]. L.PROTIN and S.ASTIER, « Convertisseurs photovoltaïques », Technique d'ingénieur, D 3360, 1996.

[22]. B. SORENSEN, « Renewable Energy Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects », Elsevier Academic Press, 2004

[23]. P. LECONTE, M. RAPIN, E. SZECHENYI, « Éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, BM 4 640-2005.

[24]. J. M.MARTIN-AMOUROUX, « Perspectives énergétiques mondiales », Techniques de l'Ingénieur, BE 8 515 -2004.

[25]. G.CUNTY, « Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne », Edissud, Aixen- Provence, 2001, www.edisud.com.

[27]. C. GREZE, « Ce qu'il faut savoir sur : Les aérogénérateurs », Cours D'électrotechnique 2008/2009.

[28]. B. MULTON, « Etat de l'art des aérogénérateurs électriques », Rapport ECRIN, Mai 2002.

[29]. P. ENRICI, « Introduction à la conversion d'énergie éolienne », Cours de DEA Décembre 2003.

[30]. A. I. BRATCU, « Modélisation À Evènements Discrets D'Un Système Éolien À Vitesse Variable En Vue De La Commande Supervisée » 6ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, MOSIM'06, 3 au 5 Avril 2006, Rabat, Maroc, 2006.

[31]. T.BURTON, "Wind energy handbook», Copyright 2001 by John Wiley & Sons, Ltd Baffins Lane, Chichester West Sussex, PO19 1UD, England.

[32]. J .L. Gary, « Wind Energy Systems », Chapter 4-Wind Turbine Power, Nov. 2001.

[33]. L.LECLERCO, « Apport de stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de Doctorat, Université de Lille, n° d'ordre : 3563, UFRR IEEEA, Décembre 2004.

[34]. N. KASBADJI MERZOUK, « Evaluation Du Gisement Energétique Eolien Contribution à La Détermination Du Profil Vertical De La Vitesse Du Vent En Algérie », Thèse de Doctorat en Physique Energétique et Matériaux, Université de Tlemcen, 2006.

[35]. H. CAMBLONG, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Arts et Métiers de Bordeaux, Décembre 2003.

WEBOGRAPHIE:

[3]. www.neal-dz.net : New Energy Algeria, 2009.

[20]. www.solarelectripower.org : Solar Electric Power Association, 2010.

[26]. http://www.windpower.org/fr/tour/wtrb/comp/index.htm : Danish Wind Industry Association, 2010

Chapitre II :

Système hybride photovoltaïque-éolien

II.1. Introduction :

Pour un développement durable, le recours à l'utilisation des systèmes énergétiques à sources d'énergies renouvelables est devenu indispensable.

Les solutions technologiques nouvelles proposées par les générateurs hybrides, même si elles sont très complexes comparativement aux solutions courantes mono source, présentent par contre un intérêt évident considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient vraiment attractif. Cependant, ces solutions exigent au préalable un dimensionnement laborieux basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation à l'amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval et un savoir-faire que seule l'expérience dans l'ingénierie des systèmes énergétiques pourra assurer.

Cette gestion rigoureuse de l'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle rendu possible grâce à des logiciels très performants. Ces installations hybrides vont connaître, à moyen terme un intérêt certain grâce à leur flexibilité vis-à-vis des sources d'énergie primaire.

Nous allons présenter dans ce chapitre les différents caractéristiques du système hybride photovoltaïque-éolien, en se basant sur les différents définitions des constitutifs de ce système.

II.2. Position du problème :

L'objectif est d'alimenter une charge à courant continu, avec une énergie issue de la combinaison de l'éolien et du photovoltaïque. Le problème est de trouver un équilibre entre l'apport énergétique de chaque source d'énergie : le rayonnement solaire la vitesse du vent, et la demande (type de charge) qui varie en fonction du temps de la journée, de la saison et de l'année.

II.3. Définition du système d'énergie hybride (S.E.H) :

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables [1].

Il consiste en l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie par une meilleure disponibilité. Les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre

de parvenir à une production électrique plus continue. Dans bien de régions, les journées ensoleillées sont en général caractérisées par une activité éolienne faible alors que les vents forts sont observés plutôt lors de journées nuageuses ou la nuit (Voir Figure II.1) [2].



Figure II.1 : *système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien.* [3]

A : Panneau Photovoltaïque ; a : Parafoudre ; B : Éolienne ; m : Moniteur de batterie ; R : Chargeur de batterie ; S : Sectionneur ;

1 : Disjoncteur de protection ; 2 : Régulateur charge/décharge ;

3 : Disjoncteur CC ; 4 : Batterie ; 5 : Onduleur ;

6 : Coffret de branchement électrique ; 7 : Charge électrique ;

a : Parafoudre [3] :

• Le parafoudre ou « suppresseur de surtension » va protéger le système contre les surtensions d'origine atmosphérique comme la foudre, en dérivant le courant de surtension vers la mise à la terre. Il est habituellement placé après le panneau, dans la boite de jonction, pour dissiper le surplus d'énergie et écrêter les hausses de tension. Dans le cas hybride il sera aussi placé dans la boite de jonction associée à l'éolienne (Voir Figure II.2).

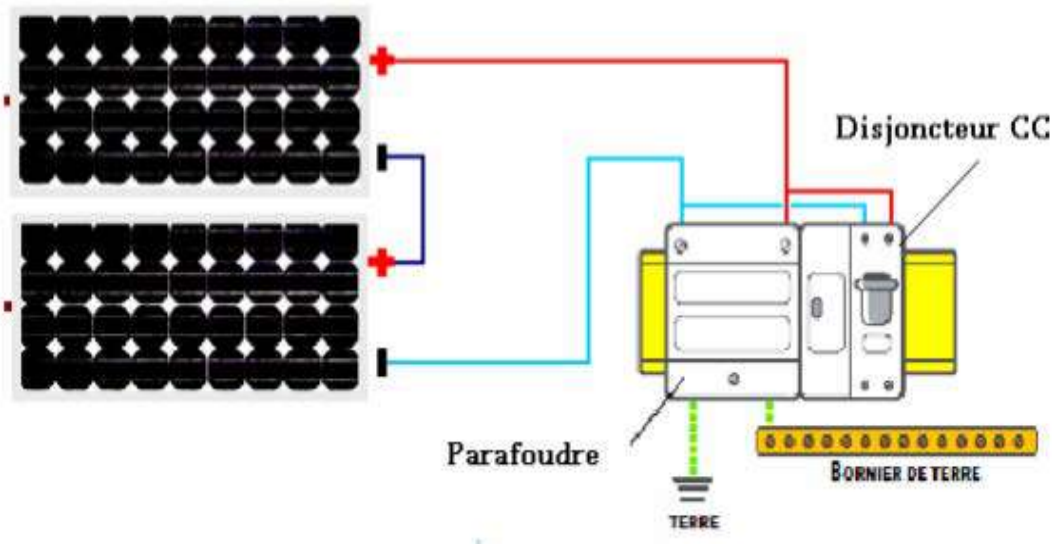


Figure II.2 : *position du parafoudre dans le système d'énergie hybride.* [3]

m : Moniteur de batterie :

• Il affiche les valeurs de tension, de courant, et de capacité en ampère-heure de la batterie afin de vérifier et de contrôler son état.

R : Chargeur de batterie :

• Le rôle de cet appareil est de contrôler et réguler la charge de la batterie.

S : Sectionneur :

• C'est un interrupteur d'arrêt qui est placé après l'éolienne. Il a pour rôle d'isoler tout le système de l'éolienne, de façon à permettre l'entretien ou la réparation des équipements électriques. Il va assurer aussi la protection contre les surintensités dues à des défauts électriques.

1 : Disjoncteur de protection :

• C'est un disjoncteur à courant continu qui est installé entre le panneau photovoltaïque et le régulateur pour isoler et protéger le système lors de la maintenance du panneau ou quand survient un défaut électrique. Il doit pouvoir supporter le courant de court-circuit et la tension ouverte du panneau ou du champ PV.

2 : Régulateur charge/décharge :

• Il est installé entre la batterie et le panneau Photovoltaïque; Il sert à contrôler le courant qui rentre ou qui sort de la batterie afin d'éviter qu'elle ne soit endommagée par un excès de charge ou de décharge.

3 : Disjoncteur CC :

• C'est un disjoncteur à courant continu qui est installé entre la batterie et l'onduleur pour isoler et protéger le circuit batterie onduleur contre des défauts électriques. Il est indispensable lorsque l'onduleur n'est pas lui-même équipé d'une protection à basse tension. On peut cependant utiliser à la place du disjoncteur, un fusible branché sur le conducteur non mis à la terre. Tous ces dispositifs doivent être conformes aux normes et aux codes en vigueur pour les installations CC et CA.

4 : Batterie [3]:

• La batterie doit être installée si possible dans une enceinte isolée ou un bac en plastique avec couvercle et entreposée dans un endroit bien ventilé, car elle est sensible aux variations de températures.

5 : Onduleur :

• L'onduleur convertit le courant continu sortant de la batterie en courant alternatif nécessaire au fonctionnement de la majorité des appareils électriques domestiques. Faire attention dans le choix de l'onduleur car la forme d'onde qu'il reproduit peut ne pas convenir à certains appareils; aussi l'onduleur doit pouvoir absorber le pic de puissance lors de leur allumage. Privilégier un onduleur à rendement élevé et installer le aussi près que possible de la batterie pour diminuer les pertes électriques dans les fils conducteurs.

6 : Coffret de branchement électrique :

• Il contient le disjoncteur principal, les fusibles ou les disjoncteurs secondaires indispensables à la protection des appareils électriques de la maison. Les différents circuits électriques de la maison y sont rattachés pour être protégés (ex : le circuit de l'éclairage, celui des petits électroménagers et celui des gros électroménagers).

7 : Charge électrique [3]:

• La charge électrique est la quantité d'énergie que consomme l'ensemble des appareils présents dans la maison (ex : éclairage, électroménager, électronique, etc.). Il est conseillé choisir des appareils « éco énergie » et de changer sa façon de consommer l'électricité. Par

exemple, éteindre les appareils que l'on n'utilise pas. Bien souvent les disfonctionnements rencontrés sont dû à un choix inadapté d'appareils électriques à consommation trop élevée.

II.4. Etat de l'art :

Il est important de noter que les systèmes d'énergie hybrides (S.E.H) participent au développement du marché de l'énergie renouvelable.

De même, ils constituent un compromis économique acceptable entre les frais d'immobilisation nécessités par les S.E.H autonomes et les frais d'exploitation et d'entretien des génératrices alimentées aux combustibles fossiles qui sont tous deux élevés. L'ampleur de ces frais est étroitement liée aux fluctuations saisonnières du rayonnement solaire et à la vitesse moyenne du vent.

Les configurations du S.E.H que nous rencontrons dans la littérature peuvent incorporer une distribution :

- à courant alternatif CA;
- à courant continu CC ;
- avec un système de stockage, des convertisseurs, des charges, des charges de délestage et une option de gestion des charges ou un système de supervision [4].

Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques contiennent deux bus [5] : un bus à CC pour les sources, les charges à CC et les batteries et un bus à CA pour les générateurs à CA et le système de distribution (Voir Figure II.3). Les sources d'énergie renouvelable peuvent être connectées au bus à CA ou à CC en fonction de la dimension et la configuration du système. L'interconnexion entre les deux bus peut être réalisée par l'intermède de l'électronique de puissance : onduleurs/redresseurs ou convertisseurs bidirectionnels. A part la charge principale, un système hybride peut contenir aussi des charges auxiliaires (charge différée, charge optionnelle, charge de délestage) pour réaliser l'équilibre énergétique. Si la charge principale est alimentée sans interruption, les charges auxiliaires sont alimentées en énergie par ordre de priorité, seulement quand il existe un surplus d'énergie. Ainsi, dans un S.E.H avec des batteries de stockage et charges auxiliaires, s'il existe un excès d'énergie (venant des sources d'énergie renouvelable), celui-ci passera d'abord dans les batteries et ensuite, il sera utilisé pour alimenter les autres charges auxiliaires en fonction de leur priorité. Dans un tel système, les batteries de stockage jouent un double rôle : charge et source. Ces systèmes sont largement instrumentés, avec des capteurs qui permettent d'obtenir les conditions météo :

- Vitesse du vent;
- Direction du vent;
- Ensoleillement dans le plan horizontal;
- Températures ambiantes;
- Ensoleillement dans le plan des panneaux;
- Températures des panneaux [4].

Des capteurs nous permettent de mesurer les courants, tensions et puissances de :

- Chaîne de production photovoltaïque;
- Chaîne de production éolienne ;
- Batterie;
- Bus continu;
- Réseaux;
- Charges : Les charges sont constituées par les éléments de consommation de chaque ménage (lampes, charge de batteries, ordinateurs, télévision et autres) et de ceux qui sont mises en commun (exemple l'éclairage publique, la production d'eau et autres).

Ces données sont envoyées vers un système de gestion et de pilotage qui permet de commander le niveau de tension de la batterie. Avec une telle structure, nous pouvons contrôler les transferts d'énergie en intervenant sur le niveau de la tension batterie [4].

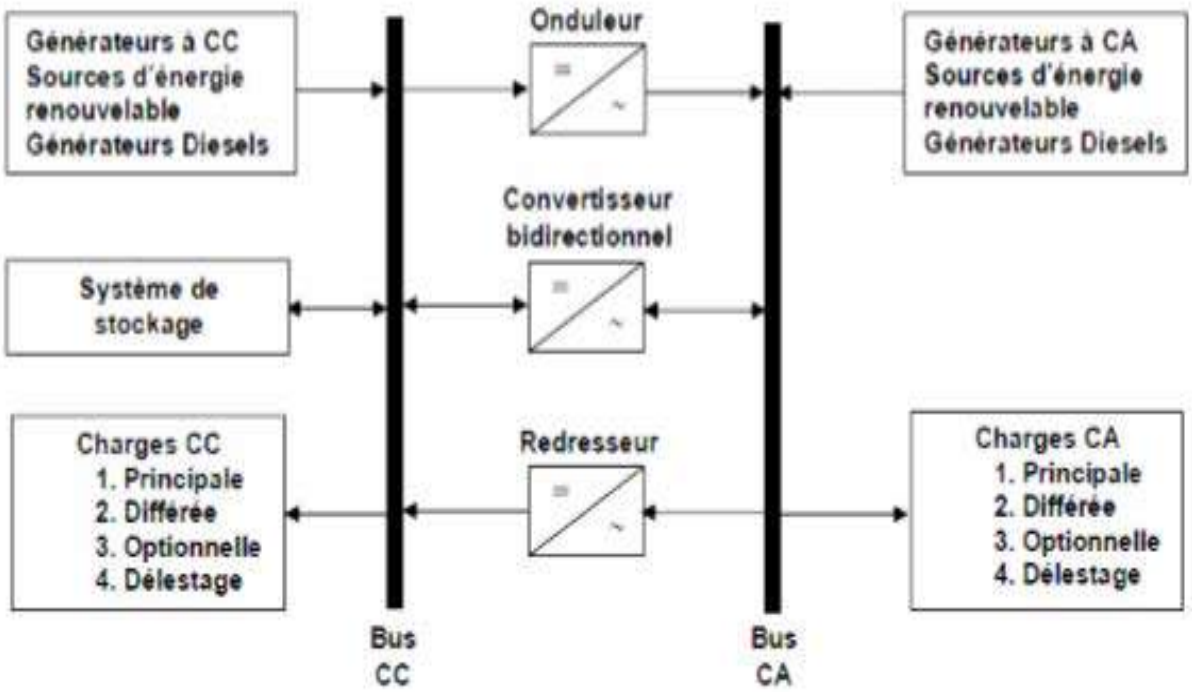


Figure II.3 : *architecture d'un système d'énergie hybride.* [5]

Les systèmes d'énergies hybrides utilisés pour des applications de très faible puissance (en dessous de 5 kW) alimentent généralement des charges à CC [6].

Les systèmes plus grands, ayant une puissance supérieure à 100 kW, sont centrés sur le bus à CA, avec des sources d'énergie renouvelable conçues pour être connectées aux grands réseaux interconnectés [7]. Si ces systèmes contiennent des sous-systèmes de stockage, ce qui est rare, c'est pour lisser les variations de l'énergie de nature renouvelable.

Le champ d'application des S.E.H est très large et par conséquent, il est difficile de classer ces systèmes. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance (Tableau II.1). Les seuils de puissance donnés ne sont que des ordres de grandeurs.

PUISSANCE DU SEH [KW]	APPLICATION
Faible : < 5	Système autonome : stations de télécommunications, de pompage de l'eau, autres applications isolées.
Moyenne : 10-250	Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, d'un hameau, des zones rurales…
Grande : > 500	Grands réseaux isolés (ex : réseaux insulaires).

Tableau II.1 : *classification des S.E.H par gamme de puissance.* [7]

II.5. Présentation du système hybride photovoltaïque-éolien :

Dans notre cas précis, on s'intéresse aux systèmes de petites puissances qui regroupent deux parties à savoir l'éolienne et les panneaux solaires. Ces deux sources de production de l'énergie produisent du courant continu facilitant le couplage de ces systèmes. Nous aurons alors les avantages suivants :

- Exploitation du système sans interruption;
- Possibilité de préserver le surplus d'énergie produite par ce système;
- Sécurité d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologiques [9].

Figure II.4 : *schéma synoptique du système hybride étudié.*

II.6. Principaux composantes du Système d'énergie hybride photovoltaïque –éolien :

Les systèmes hybrides photovoltaïque-éolien comprennent généralement :

- un système générateur ;
- un système de régulation ;
- un système de stockage ;
- des équipements de puissance ;
- une charge.

Le système générateur est composé par les modules photovoltaïques et les aérogénérateurs.

Il est indispensable que les deux fonctionnent à la même tension nominale 12 ou 24 V et en courant continu.

La régulation doit tenir compte du fait qu'il s'agit de deux courants de nature différents :

- Le photovoltaïque assez constant et d'un seuil bas [10],
- L'éolien, très variable.

Le système de régulation se chargera donc de faire fonctionner le système générateur en un point optimal pour la charge des batteries.

II.7. Descriptions des composantes du système hybride photovoltaïque-éolien :

II.7.1. Générateurs photovoltaïques :

Un générateur photovoltaïque est constitué à la base par des cellules photovoltaïques. Elles produisent de l'électricité du moment où elles sont exposées au rayonnement solaire. Elles ne polluent pas, n'ont aucune pièce mobile, ne nécessitent pratiquement aucun entretien et ne produisent aucun bruit. La cellule photovoltaïque est donc un moyen sûr et écologique de produire de l'énergie.

II.7.2. Modèle d'une cellule solaire photovoltaïque :

Dans la littérature, une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode [11]. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série R_s et R_{sh}. (Voir Figure II.5) [11, 12, 13].

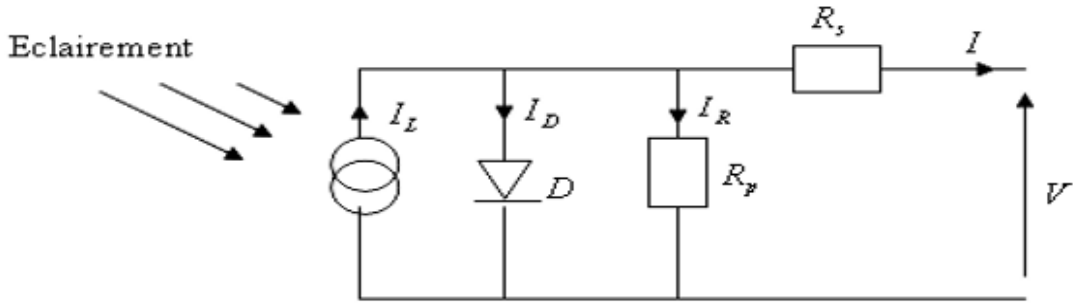


Figure II.5 : *circuit équivalent de la cellule solaire.*

La cellule comporte une résistance série R_s et une résistance en dérivation ou Shunt R_p. Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile :

- La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles ;
- La résistance shunt est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule ; elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la

jonction (surtout si elle est profonde), lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule [14].

II.7.3. Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque

Le courant délivré sur une charge par une cellule PV éclairée s'écrit [13] :

$$I(V) = Iph(V) - I_{obs}(V) \quad \text{(II.1)}$$

Avec :

I_{ph} : Densité de courant photo généré ;

I_{obs} : Densité de courant d'obscurité.

Dans une cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent : le courant photo génère et un courant de diode appelé courant d'obscurité qui résulte de la polarisation du composant. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à la cellule d'une cellule sous éclairement (Voir Figure II.6).

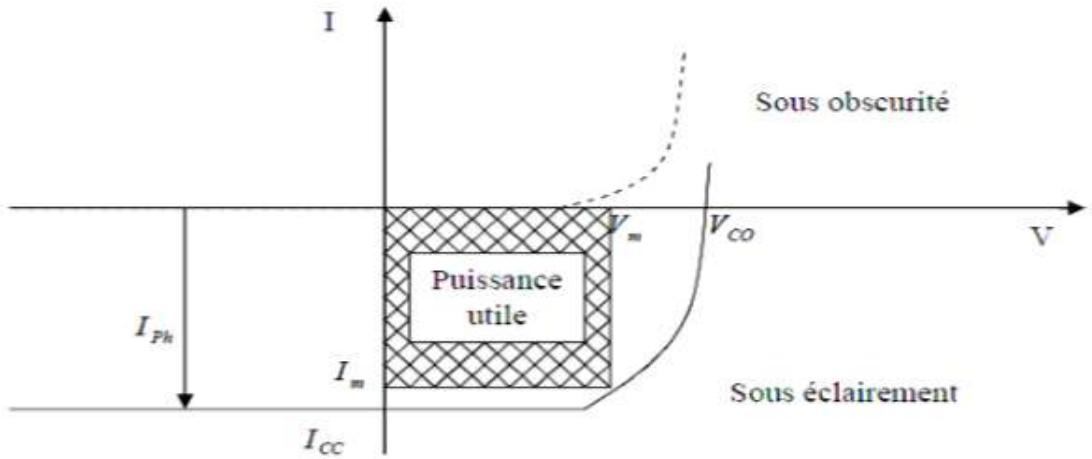


Figure II.6 *: caractéristiques I = f (V) sous obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque.* [15]

II.7.4. Présentation du modèle mathématique :

A partir de la figure (II.5), la loi de Kirchhoff (loi des nœuds) nous permet d'écrire la relation du courant photopile suivante [13, 16,17] :

$$I = I_{ph} - I_d - I_r \quad \text{(II.2)}$$

Avec : $I_{ph} = I_{SC}\left(\frac{\psi}{1000}\right)$: Photo-courant de cellule,

Le courant de jonction I_d (courant traversant la diode) est donné par :

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{q(V+RsI)}{nKt}} - 1\right) \quad \text{(II.3)}$$

Le courant dérivé par la résistance shunt, est :

$$I_r = \frac{V+RsI}{Rsh} \quad \text{(II.4)}$$

A partir de ces différentes équations, on peut en tirer l'expression implicite du courant délivré par une cellule photovoltaïque ainsi que sa caractéristique courant−tension (voir figure II.7).

$$I = I_{SC}\left(\frac{\psi}{1000}\right) - I_0 \left(e^{\frac{q(V+RsI)}{nKt}} - 1\right) - \frac{V+RsI}{Rsh} \quad \text{(II.5)}$$

Où :

I : Courant de cellule [A] ;

V : Tension de cellule [Volt] ;

T : Température de la jonction en [°K] ;

q : Charge de l'électron ($1{,}6.10^{-19}\ C$) ;

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode en [A] ;

K : Constante de Boltzmann ;

V : Tension de seuil de diode ($1{,}1VV$) ;

n : Facteur d'idéalité de la photopile, compris entre 1 et 5 dans la pratique ;

R_s : Résistance série de la cellule [Ω].

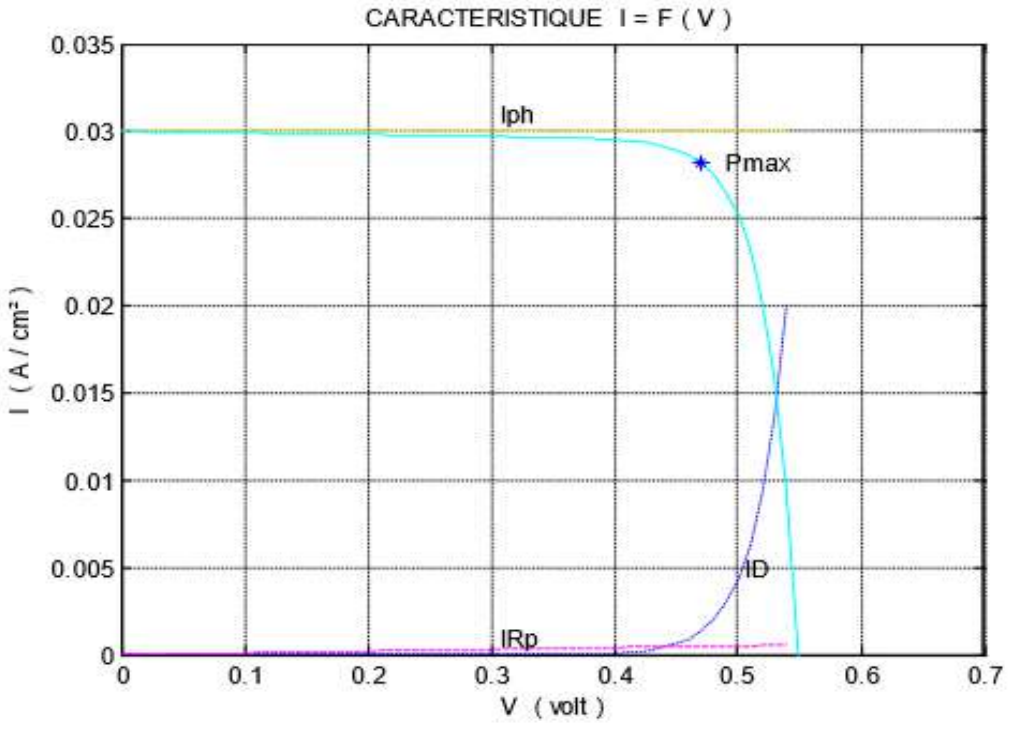


Figure II.7 *: caractéristique d'une cellule solaire photovoltaïque.*

La figure II.7, illustre la caractéristique I-V (courant-tension) pour des conditions climatiques données. On y a représenté le courant pour une tension nulle.

On voit bien que pour un éclairement et une température donnés, il existe une valeur de la tension et de courant qui maximise la puissance produite par le module notée P_{max} [11].

II.7.5. Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque :

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant−tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes [13, 18] :

Courant de court –circuit I_{cc} : C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule est nulle [15]. Dans le cas idéel (R_s est nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (II.5), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{RsIcc}{VT}} - 1\right) - \frac{RsIcc}{Rsh} \qquad \text{(II.6)}$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible),

On peut négliger le terme :

$$I_0 \left(e^{\frac{q(V+RsI)}{nKt}} - 1\right)$$

Devant I_{ph} l'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \approx \frac{Iph}{\left(1 + \frac{Rs}{Rsh}\right)}$$

Tension en circuit ouvert V_{co} : C'est la tension pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque) [15].

$$0 = I_{Ph} - I_0 \left(e^{\frac{Vco}{VT}} - 1\right) - \frac{Vco}{Rsh} \qquad \text{(II.7)}$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieur à :

$$V_{co} = V_T \ln\left(\frac{Iph}{I0} + 1\right) \qquad \text{(II.8)}$$

Puissance optimale : la puissance utile maximale s'obtient en optimisant le produit courant tension, soit :

$$\frac{IM}{VM} = -\left(\frac{dI}{dV}\right) M \qquad \text{(II.9)}$$

La puissance des modules photovoltaïques s'exprime en Watts crête. Cette dernière représente la puissance que peut fournir un module lorsqu'il est fermé sur sa charge nominale (optimale), sous un éclairement de $1000W/m2$ et à une température de25°C.

Facteur de forme FF : Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} (Voir Figure II.8.), et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{cc}$ (puissance optimale) [19] :

$$FF = \frac{Pmax}{Popt} = \frac{Im\,.\,Vm}{Icc\,.\,Vco} \qquad \text{(II.10)}$$

Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales.

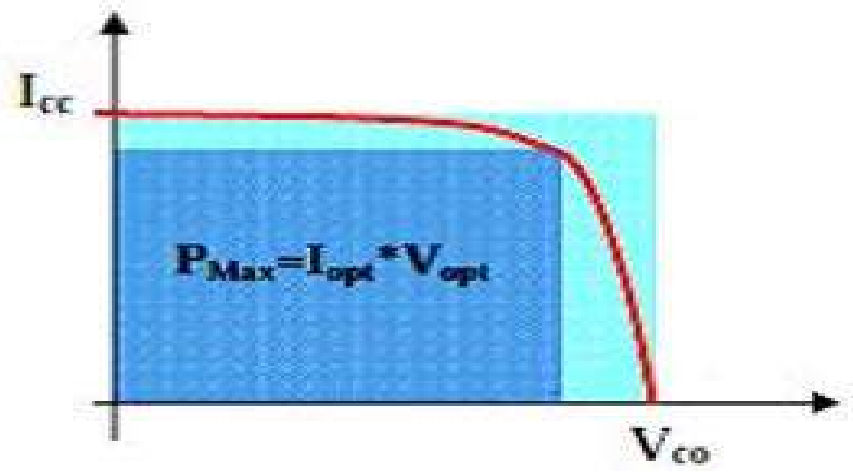


Figure II.8 *: notion de facteur de forme FF pour une cellule photovoltaïque.* [19]

Rendement énergétique maximum η_m : Le rendement énergétique maximum η_m des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport de la puissance maximale (P_{max}) fournie par la cellule sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_i) :

$$\eta_m = \frac{P_{max}}{Pi} = \frac{Im\,.\,Vm}{S\varphi} = \frac{FF\,.\,Vco\,.\,Icc}{Pi} \qquad \text{(II.11)}$$

S : surface de la cellule solaire (m^2);

φ : flux incident (W/m^2);

$I_m \cdot V_m$: coordonnées de point de fonctionnement.

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court- circuit et la tension à circuit ouvert [20].

II.7.6. Influence des résistances série et shunt :

II.7.6.1. Influence de la résistance série R_S :

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible [13]. La figure (II.9) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique $I = (V)$ de la cellule. Cette influence est traduite par une diminution de la pente de la courbe dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension. La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule.

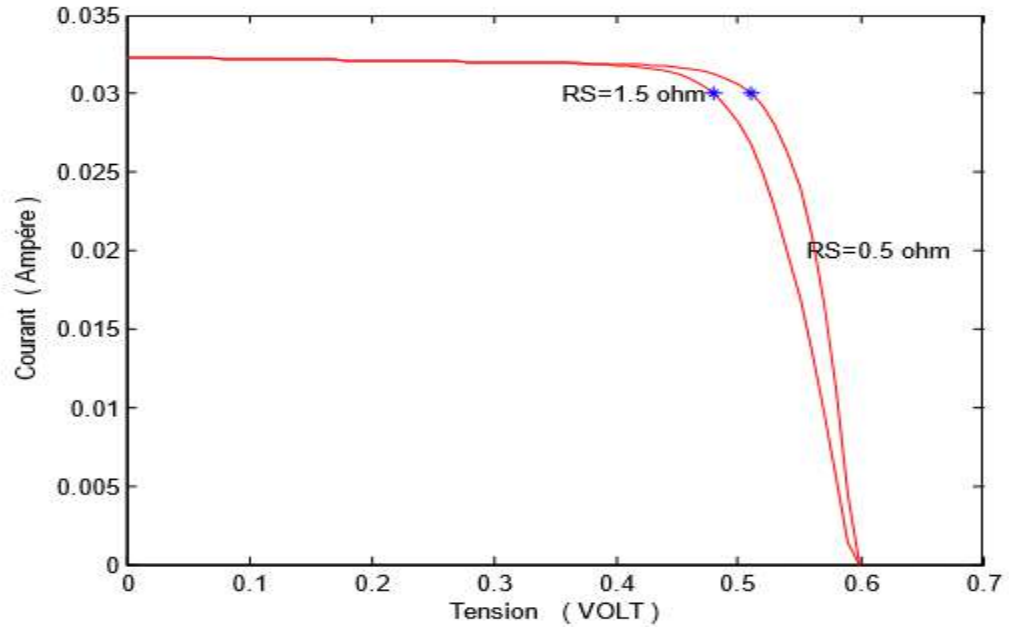


Figure II.9 *: influence de R_s sure la caractéristique $I = f(V)$.*

II.7.6.2. Influence de la résistance parallèle :

La résistance shunt, est liée directement au processus de fabrication, et son influence se montre que pour de très faibles valeurs de courant [13]. La figure (II.10) montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme source de courant. Ceci provient du fait qu'il faut soustraire de la photo courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée.

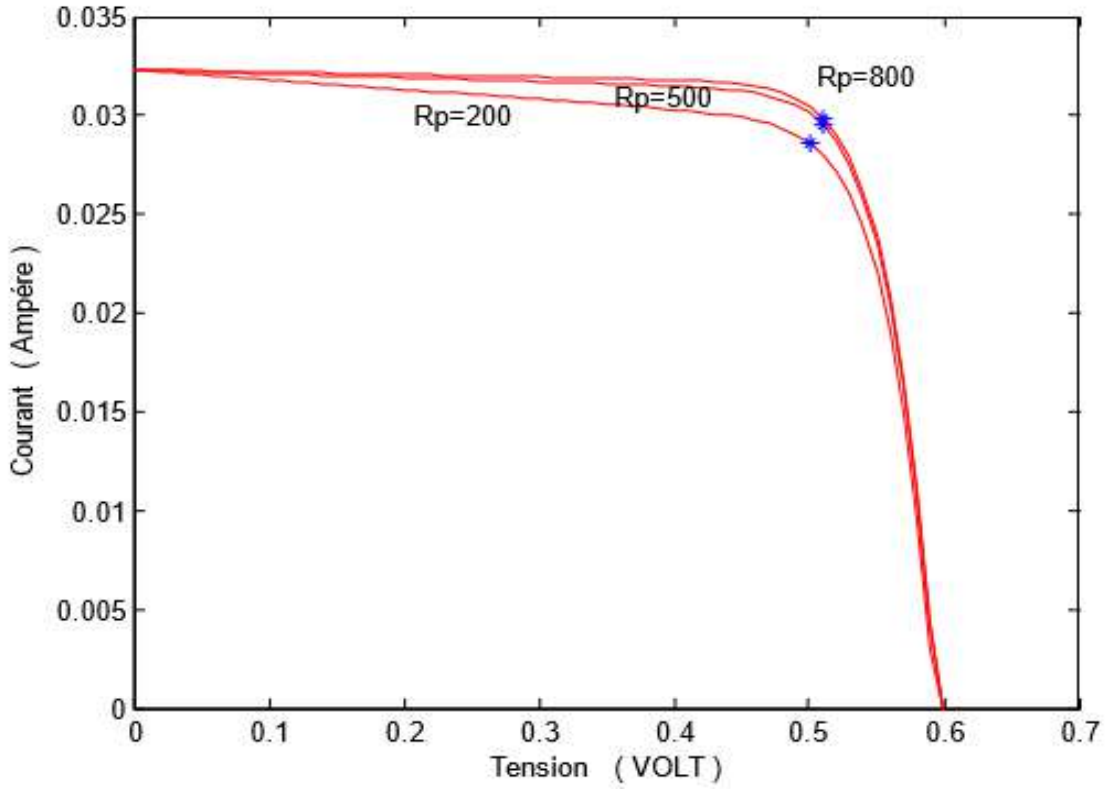


Figure II.10 : *influence de $\mathcal{R}_P$ sur la caractéristique $I = f(V)$.*

II.7.7. Influence de l'éclairement :

Le photo-courant I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement ou au flux lumineux ψ. Le courant I_d (V_d), étant par définition le courant directe de la jonction sous obscurité, et normalement non modifié. Ceci n'est valable que pour des cellules n'utilisant pas la concentration du rayonnement solaire ou travaillant sous une faible concentration. En effet, la densité des porteurs de charges et donc le courant de saturation sont modifiés par la variation de la température et de la concentration de l'éclairement. Le photo-courant créé dans une cellule solaire photovoltaïque est aussi proportionnel à la surface S de la jonction soumise au rayonnement solaire ; par contre la tension de circuit ouvert n'en dépend pas et n'est fonction que de la qualité du matériau et du type de jonction considérée. La figure (II.11) représente les caractéristiques $I = (V)$ d'une cellule photovoltaïque (jonction p-n sur du silicium monocristallin de 57mm de diamètre) à 28°C et sous diverses valeurs de l'éclairement ψ [13].

A chacune de ces valeurs de flux lumineux correspond une puissance électrique maximale que pourrait fournir la cellule solaire. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert suite à une chute du flux lumineux.

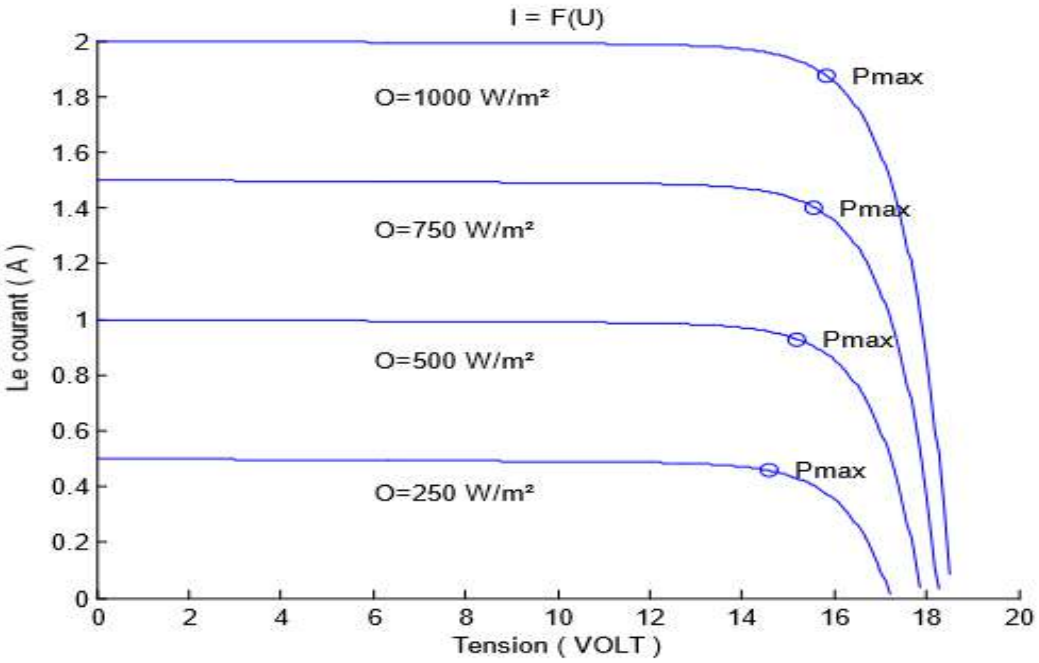


Figure II.11 *: influence de l'éclairement sur la caractéristique I = f (V)*

II.7.8. Influence de la température :

La température est un paramètre très important dans le comportement des photopiles [13]. En effet, si la température augmente, le photo-courant augmente à peu près de $3 \cdot 10^{-2} \mathrm{mA} \cdot \mathrm{K}^{-1}$ par cm^2 de cellule et par conséquence le courant I, ce qui engendre une diminution de la tension du circuit ouvert V_{co} (figure (II.12)). L'augmentation de la température se traduit aussi par la diminution de la puissance maximale disponible, de l'ordre de $5 \cdot 10^{-}5W/\mathrm{K}$ par cm^2 de cellule, soit une variation de 0,35% par degré.

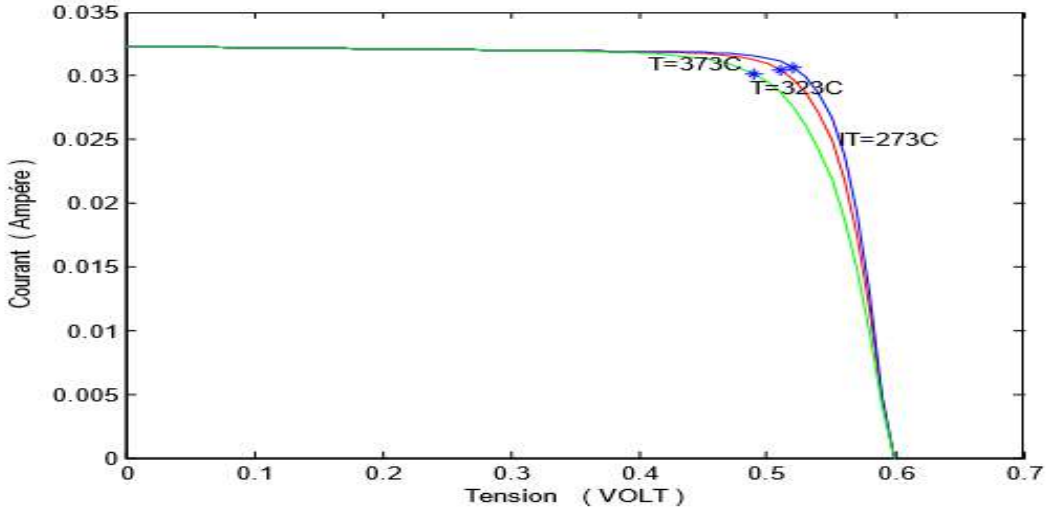


Figure II.12 : *influence de la température sur la caractéristique I = f (V).*

II.8. Générateur éolien :

II.8.1. Introduction :

Un système éolien ou un aérogénérateur ou encore une éolienne peut être défini comme étant : un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique [21]. La plupart des aérogénérateurs commerciaux, surtout les grands, sont à axe horizontal. La part de marché représentée par les systèmes à axe vertical est minuscule. Les aérogénérateurs de grande taille sont parfois construits isolément ou rassemblés en groupes (parcs d'éoliennes) comportant dix éléments ou plus, parfois même des centaines [22]. Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, pour cela, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est nécessaire [23].

II.8.2. Types d'aérogénérateur dans les systèmes éoliens :

La conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique peut être identifiée selon le générateur électrique utilisé :

Générateur asynchrone

C'est une machine à induction asynchrone qui transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique [14]. Pour réaliser la génération de l'énergie électrique la machine doit être entraînée au-delà de la vitesse de synchronisme (variable suivant la charge) le cas d'une génératrice à cage d'écureuil. Son rotor peut être à cage d'écureuil ou bobinée. La puissance nécessaire à sa magnétisation est fournie par le réseau lorsqu'elle est couplée en parallèle ou par une batterie de condensateurs dans le cas d'une utilisation isolée [14]. Pour les petites puissances, le rotor est à cage d'écureuil, pour des puissances plus importantes, le rotor est bobiné, relié à l'extérieur via un collecteur simplifié à trois bagues, et court-circuité en fonctionnement normal. Mais on peut aussi modifier les propriétés électromécaniques du générateur en agissant sur le rotor par ces connexions « Machine Asynchrone Double Alimentée MADA ». Cependant, pour les machines asynchrones à cages, il faut néanmoins fournir la puissance de magnétisation "puissance réactive" correspondant à une composante du courant réactif. Ce courant peut être emprunté au réseau mais peut aussi bien être obtenu de façon statique en branchant en parallèle à la machine une batterie de condensateurs. En outre, en ajustant ces condensateurs de façon précise, il est possible, dans certaines conditions, d'utiliser une génératrice asynchrone en

dehors d'un réseau, en fonctionnement autonome, pour alimenter une charge isolée. Son emploi est réservé aux générateurs de puissance moyenne dont l'arbre d'entraînement tourne à des vitesses fortement variables : mini centrale hydraulique, éolienne, turbine ou moteur à gaz de récupération, certains groupes électrogènes,…etc.

Les machines asynchrones à rotor bobiné permettent, par un réglage dynamique du glissement, de s'adapter aux variations de puissances fournies par la turbine. La partie mécanique peut généralement subir les variations brutales du régime de vent, ce type de contraintes devient inacceptable pour les fortes puissances. La variation de vitesse devient donc de plus en plus justifiée à mesure qu'on augmente la puissance de l'éolienne.

Equations électriques:

Les équations des tensions s'écrivent dans le référentiel d –q sous la forme générale suivante :

$$V_{ds} = R_s \times I_{ds} + \frac{d\Phi ds}{dt} - \theta_s \times \Phi_{qs} \quad \text{(II.12)}$$

$$V_{qs} = R_s \times I_{qs} + \frac{d\Phi qs}{dt} - \theta_s \times \Phi_{ds} \quad \text{(II.13)}$$

$$V_{dr} = R_r \times I_{dr} + \frac{d\Phi dr}{dt} - \theta_r \times \Phi_{qr} \quad \text{(II.14)}$$

$$V_{qr} = R_r \times I_{qr} + \frac{d\Phi qr}{dt} - \theta_r \times \Phi_{dr} \quad \text{(II.15)}$$

Equations des flux: les expressions des flux s'expriment par:

$$\Phi_{ds} = L_s \times I_{ds} + M \times I_{dr} \quad \text{(II.16)}$$

$$\Phi_{qs} = L_s \times I_{qs} + M \times I_{qr} \quad \text{(II.17)}$$

$$\Phi_{dr} = L_r \times I_{dr} + M \times I_{ds} \quad \text{(II.18)}$$

$$\Phi_{qr} = L_r \times Iq_r + M \times I_{qs} \quad \text{(II.19)}$$

Le couple mécanique et le couple électromagnétique sont donnés par les relations suivantes :

$$\Gamma_{mec} = \Gamma_r + f \times \Omega + j + \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{(II.20)}$$

$$\Gamma_{mec} = -P \times \frac{M}{Ls} \left(I_{dr} \times \Phi_{qs} - I_{qr} \times \Phi_{ds}\right) \quad \text{(II.21)}$$

Générateur synchrone

La génératrice synchrone (ou alternateur) n'a pas besoin de magnétisation extérieure pour créer son champ magnétique. Celui-ci est créé par des bobines ou par des aimants permanents, placés sur le rotor tournant induisant un courant dans le stator bobiné. Cette génératrice étant indépendante du réseau, elle fournit une fréquence variable en fonction de la vitesse de rotation, donc de la vitesse du vent. Le raccordement au réseau, qui lui exige une fréquence fixe, s'effectue par un convertisseur qui comporte un étage redresseur, un bus continu et un onduleur : on reconstruit donc une onde sinusoïdale parfaite, ce qui permet aussi de gérer plus facilement la qualité de l'énergie produite.

La régulation de puissance s'effectue en partie au niveau de ce convertisseur. Elle permet un fonctionnement à vitesse variable, donc à rapport d'avance constant et rendement optimal. Elle permet aussi de limiter les efforts dynamiques en autorisant le rotor à accélérer en cas de forte rafale (stockage d'une partie de l'énergie cinétique du vent dans l'inertie du rotor). Plus complexe à construire et plus chère (aimants permanents, convertisseur), la génératrice synchrone est relativement peu utilisée [21].

Génératrice électrique à courant continu

La génératrice à courant continu (à excitation séparée) [24] est une machine tournante qui transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique apparaissant sous forme de tension et courant continu. Elle comporte deux circuits bobinés (Voir Figure II.13) :

1. l'un est un circuit inducteur, porté par le stator, et il crée un champ de direction fixe sous les pôles de la machine ; il est pour cela appelé « circuit de champ » ou encore « Circuit d'excitation »,

2. et l'autre est un circuit induit ou circuit d'armature, porté par l'armature du rotor ; il crée des forces électromotrices induites 'F.E.M'.

La force électromotrice F.E.M peut être exprimée par la relation suivante [25] :

$$E = \frac{P}{a} \cdot N \cdot n \cdot \varphi \qquad (II.24)$$

Avec :

E : Force électromotrice F.E.M (Volt) ;

P : Nombre de paires de pôles ;

a : Nombre de paires de voies en parallèles ;

n : Vitesse (tr/s) ;

N : Nombre total de conducteurs actifs ;

φ : Le flux par pôle en Wb.

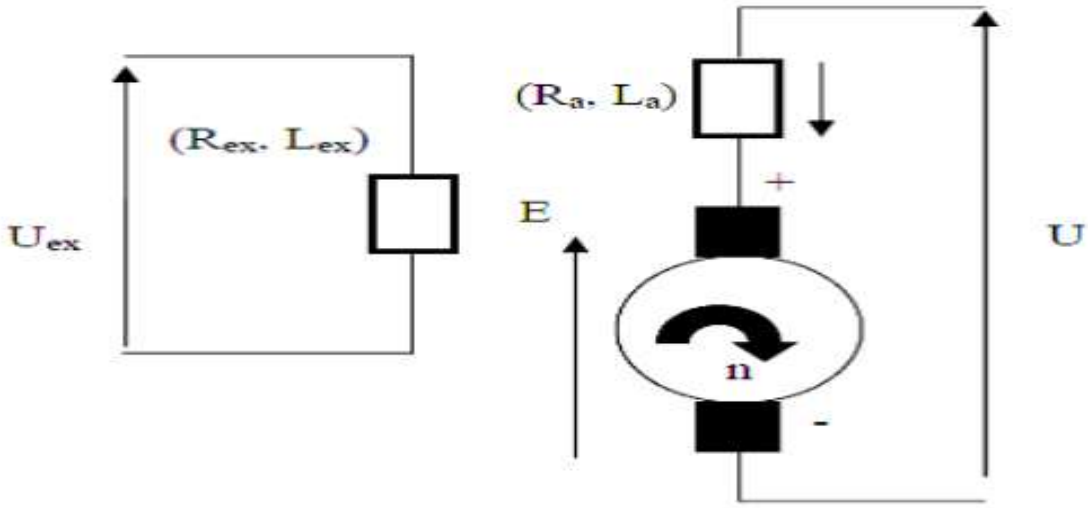


Figure II.13 *: schéma électrique équivalent d'une génératrice à courant continu à excitation séparée.* [25]

La tension extraite de la génératrice notée «U» selon le schéma électrique équivalent (figure II.13) peut être donnée comme suit [25] :

$$U = R_a \cdot I + L_a \frac{dI}{dt} - E \qquad (II.25)$$

Avec :

U : Tension extraite de la génératrice (Volt) ;

R_a : Résistance de l'induit (Ω) ;

L_a : Inductance de l'induit (Henry) ;

I : Courant extrait de la génératrice (A) ;

E : Force électromotrice (Volt).

La puissance électromagnétique Pem est donnée par [25] :

$$P_{em} = E \cdot I \qquad (II.26)$$

Avec :

P_{em} : puissance électromagnétique (watt).

Le couple électromagnétique C_{em} de la génératrice s'exprime par [25] :

$$C_{em} = \frac{Pem}{\Omega} \quad \text{(II.27)}$$

Avec :

Ω : vitesse angulaire (rad/s).

La puissance électrique générée s'écrit [25] :

$$P = U \cdot I \quad \text{(II.28)}$$

Générateur à structures spéciales

Des machines à structures spéciales avec un principe de fonctionnement spécial aussi. Le but de leurs fabrications est la réponse au besoin actuel, mentionnant par exemple : la machine à réluctance variable, la Machine Asynchrone Double Stator, …etc.

II.8.3. Différentes classes d'un système éolien :

On peut classifier les systèmes éoliens à axe horizontal [23, 25] en deux différentes classes :

- **Système éolien à vitesse fixe :** Ce sont des systèmes qui fonctionnent pour des vitesses fixes et bien déterminées afin de produire de l'électricité selon les normes. Cette vitesse est définie selon le générateur électrique utilisé. Ce genre de système est destiné à travailler pour des vitesses égales à la vitesse nominale et cela si on admet que la vitesse nominale est celle qui donne au générateur électrique la possibilité de générer une puissance électrique à 50Hz.
- **Système éolien à vitesse variable :** Ce sont des systèmes aptes à travailler pour des vitesses égales ou différentes des vitesses nominales [23]. Pour cela plusieurs technologies sont mises en service afin d'assurer ce fonctionnement :
- **Technique mécanique :** C'est une technique qui utilise les paramètres aérodynamiques de la turbine comme outil de variation de la vitesse, et dans ce sens-là on distingue deux modes [25, 26] : le « stall control » (basé sur l'accrochage et le décrochage de la génératrice à la turbine), robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance chute plus vite : il s'agit donc d'une solution passive, et le « pitch control » (basé sur l'abaissement et l'augmentation de l'angle de calage des pales, qui permet d'ajuster la portance des

pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante). Il faut noter que cette technique n'est fonctionnelle que pour des vitesses égales ou supérieures à la vitesse nominale.

- **Technique électrique :** C'est une technique qui utilise les convertisseurs statiques comme outil de variation de la vitesse [23].
- **Technique hybride :** C'est une technique qui utilise les deux techniques précédentes à la fois afin d'améliorer le rendement de production et de sécurité du système [21, 23].

II.9. Systèmes de stockage :

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides à fin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours). Il est parfois aussi utilisé avec les SEH connectés à des grands réseaux de courant alternatif isolés. Dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme [27].

Le stockage d'énergie est généralement réalisé grâce aux batteries. Les batteries sont, d'habitude, du type plomb – acide. Les batteries nickel – cadmium sont rarement utilisées. Il y a d'autres formes de stockage, mais peu utilisées, comme le pompage de l'eau, les volants d'inertie et le stockage de l'hydrogène.

Dans le cas de stockage par pompage de l'eau, l'énergie produite sert à remplir un réservoir de stockage dont l'eau sera turbinée pour restituer l'énergie [27].

Le principe du volant d'inertie est simple. Il s'agit d'emmagasiner l'énergie en mettant en rotation une masse importante [28]. L'énergie cinétique obtenue peut être restituée à la demande sous forme d'énergie électrique, en utilisant une machine électrique en régime générateur.

L'hydrogène alimente les piles à combustible. Il possède un grand pouvoir énergétique gravimétrique (120 MJ/kg) en comparaison au pétrole (45 MJ/kg), au méthanol (20 MJ/kg) et au gaz naturel (50 MJ/kg). Cependant, il est aussi le gaz le plus léger. Ceci pose un véritable problème de stockage. La densité énergétique volumétrique de l'hydrogène n'est intéressante qu'à l'état liquide ou comprimé (700 bars). Il existe de multiples modes de stockage de l'hydrogène : comprimé, liquéfié, hydrures métalliques, charbon actif, nano fibres et nanotubes en carbone etc. Si les deux premiers modes de stockage sont actuellement les plus utilisés, ils sont loin d'être satisfaisants.

II.10. Convertisseurs :

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs.

Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le SEH, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement. Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu' ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Ceux-ci sont les plus flexibles, mais sont aussi les plus chers. Parfois, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont réalisées par un seul appareil.

II.11. Charges :

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et courant pendant les changements dans le fonctionnement du système.

II.12. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur le système d'énergie hybride (S.E.H) qui combines deux systèmes très populaires actuellement dans le marché de la production d'énergie électrique d'origine renouvelable, les systèmes photovoltaïques et les systèmes éoliens.

Dans ce contexte, les principales notions liées à la technologie utilisée dans les S.E.H ont été données. Notre travail portant sur un S.E.H composé d'une éolienne, des panneaux photovoltaïques et de batteries de stockage, une attention particulière a été consacré à ce type de sources et de stockage. Les différents types d'architectures existants, les outils de dimensionnement, ainsi que les problèmes habituels des S.E.H ont également été présentés.

Le dimensionnement et le fonctionnement des composantes du S.E.H doivent tenir compte des variations de la charge et des ressources renouvelables disponibles pour maximiser l'utilisation des ressources renouvelables. Dans ce but, les sources du S.E.H étudié sont modélisées puis dimensionnées dans le chapitre suivant.

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

[1] D. SAHEB-KOUSSA, M.BELHAMEL, « Production d'électricité sans interruption moyennant un système hybride (éolien – photovoltaïque – diesel) » Revue des Energies Renouvelables, ICRESD07 Tlemcen 121 – 128, 2007.

[2] D. REKIOUA, Z. ROUMILA et T. REKIOUA, « Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien – diesel », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N°4 623 – 633, 2008.

[4] A. OULD MAHMOUD, « Caractérisation, modélisation, fonctionnement et impact d'un système hybride pour l'alimentation de charges mixtes », Thèse de Doctorat, Université de DAKAR, 2008.

[5] J. G. MCGOWAN, J.F. MANWELL, « Hybrid/PV/Diesel system experiences », Renewable Energy, 16, 928-933, 1999.

[6]. E. KOUTROULIS, K. KALAITZAKIS, N. C. VOULGARIS, « A hybrid PV-Wind generator system using à maximum power point tracking technique », Renewable energies for islands, Chania, Crete Greece, 2001.

[7] T. L. JENSEN, « Renewable Energy on Small Islands », Forum for Energy and development (FED), Second Edition Danemark August 2000.

[8] A. KAABECHE, M. BELHAMEL, R. IBTIOUEN, S. MOUSSA et M. R. BENHADDADI, « Optimisation d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) totalement autonome », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 9, N°3 199 – 209, 2006.

[9] B. BOURGESM, « Improuvement in Solar Declinaison Computation », Solar Energy, Vol. 35, N°4, pp. 367 - 369, 1985.

[10] A. EL KHADIMI, « Modélisation de l'Irradiation Solaire Globale d'un Plan Horizontal et de la Vitesse du Vent en Vue de leur Utilisation dans le Dimensionnement d'un Système Hybride », Thèse de Doctorat de 3ème Cycle, Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, 1998.

[11] M. ANGEL CID PASTOR, « Conception Et Réalisation De Modules Photovoltaïque Electronique », Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse, 2006. [12] B. OULD ZEIDANE, «

Contribution to the study of the grid connected photovoltaic system », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2006.

[13] Y. PANKOW, « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque», Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale de L'ENSAM ED 432, Lille, 2004.

[14] M. R. PATEL, « Wind and Solar Power Systems», U.S. Merchant Marine Academy Kings Point, New York, 1999.

[15] N. OLEKSIY, « Simulation, fabrication et analyse des cellules photovoltaïque à contacts arrières interdigités», Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 2005.

[16] B. BROUSSE, « Réalisation Et Caractérisation De Cellules Photovoltaïques Organiques Obtenues Par Dépôt Physique », Thèse Doctorat, Université de LIMOGES, 2004.

[17] T.MARKVART, A. MCEVOY, L. CASTANER, « Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications», Edition 1 - 30 October 2003 - Ebook Kindle.

[18] J. ROYER, « LE POMPAGE PHOTOVOLTAIQUE », Institut de l'Énergie des Pays ayant en commun l'usage du Français, 56 rue Saint-Pierre 3e étage, Québec (Québec) G1K 4A1 CANADA, Site Internet : http://www.iepf.org.

[19] S. PETIBON, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2009.

[20] Ministère de l'Energie et des Mines (Algérie), « Guide des Energies Renouvelables », Edition 2002.

[21] F. POITIERS, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne (machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée aux réseaux) », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France, 2003.

[22] V.ROGEZ, « Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseaux de distribution insulaire », Thèse de Doctorat, Université d'Artois, France, 2004.

[23] S. EL AIMANI, « modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans réseaux de moyenne tension », Thèse de Doctorat, Université Lille, France, 2004.

[24] S. JEAN, « Electrotechnique et machines électriques », Editions Eyrolles 61, boulevard SaintGermain, Paris, 1977.1976.

[25] S. AMEZIANE, « Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2009.

[26] M. IVAN, « Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance », Laboratoire d'électrotechnique de Montpellier (LEM) meny@univ-montp2.fr.

[27] I. CRUZ, F. ARIAS, F. AVIA, L. M. ARRIBAS, R. P. FIFFE, « Assessment of different energy storage systems for wind energy integration », European Wind Energy Conference, 2001.

[28] F. FAURE, « Suspension magnétique pour volant d'inertie », Thèse de Doctorat, INPG, France, 2003.

WEBOGRAPHIE :

[3] www.energie-propre.org : Énergie propre – Wikipédia, 2010.

[18] http://www.iepf.org : Institut de l'Énergie et de l'Environnement de la Francophonie, 2010.

Chapitre III : Simulation et discussion

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on présentera une étude de simulation d'un système hybride photovoltaïque éolienne connecté à un réseau DC. Ce système est comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « boost », une commande MPPT « perturbation et observation » ainsi qu'une charge R. Le contrôle de la puissance, un générateur éolien, ainsi que la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink.

III.2. L'outil Matlab/Simulink :

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulions spécialisés (Blocksets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop. SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal

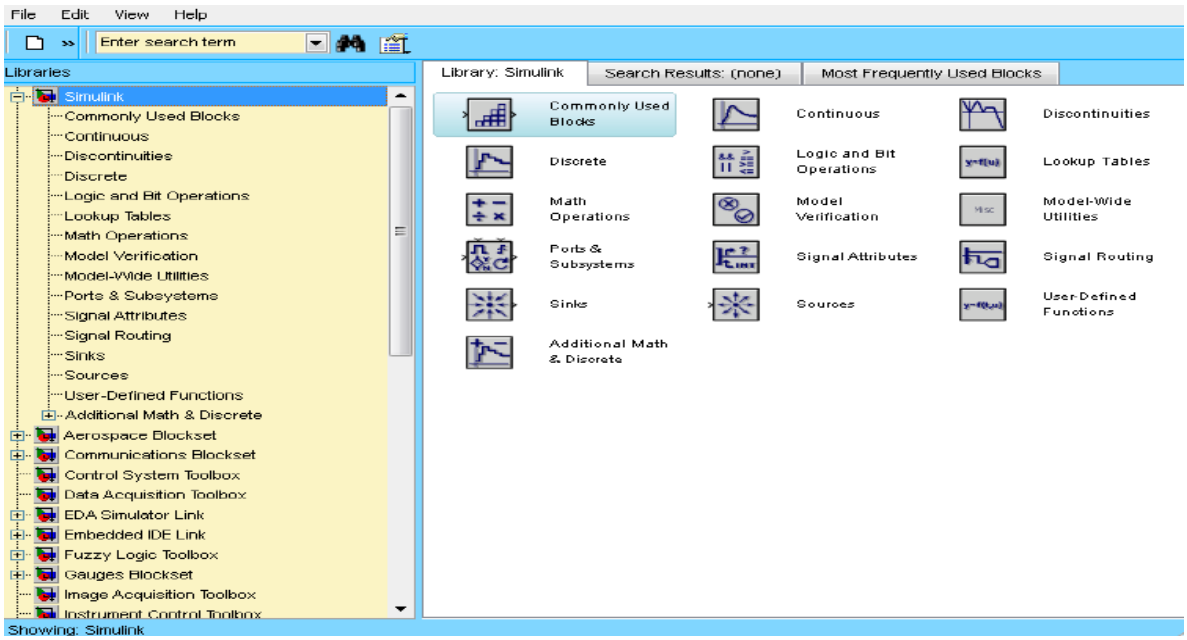


Figure III.1 *: Bibliothèque SIMULINK*

III.3. Système photovoltaïque proposée :

La figure (III.2) est représenté le schéma synoptique d'un système PV alimente une charge résistive RS.

- Le générateur PV (MSX60) est en silicium monocristallin est constitué de 36 cellules photovoltaïques élémentaires. Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST) une puissance de 130 W, un courant de 2.02A sous une tension optimale de 86.8V.
- Le quadripôle d'adaptation est un convertisseur d'énergie de type survolteur pour des applications nécessitant des tensions supérieures à 17V.
- La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV qui dépend des conditions météorologiques et de la variation de la charge stables. Son principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α à la valeur adéquate de manière maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau PV.

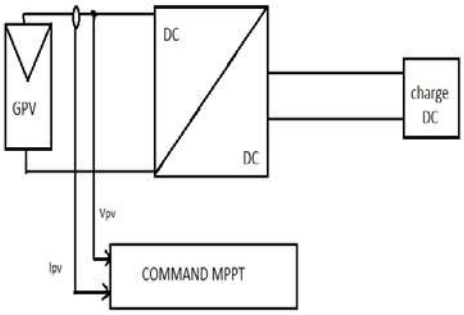


Figure III.2 : *schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) sur charge (DC)*

III.4. Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque :

III.4.1. Modélisation du GPV :

Pour trouver le modèle de ce générateur, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques, 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. Le module fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation d'une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, une résistance série Rs représentant les diverses résistances de contacts et de connexions et une résistance parallèle RP Le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle standard à une seule diode, établit par shockley pour une seule cellule PV, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle. caractérisant les divers courants de fuites dus à la diode et aux effets de bords de la jonction.

Le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle standard à une seule diode, établit par shockley pour une seule cellule PV, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle, On présente le schéma du circuit électrique par la figure (III.3) :

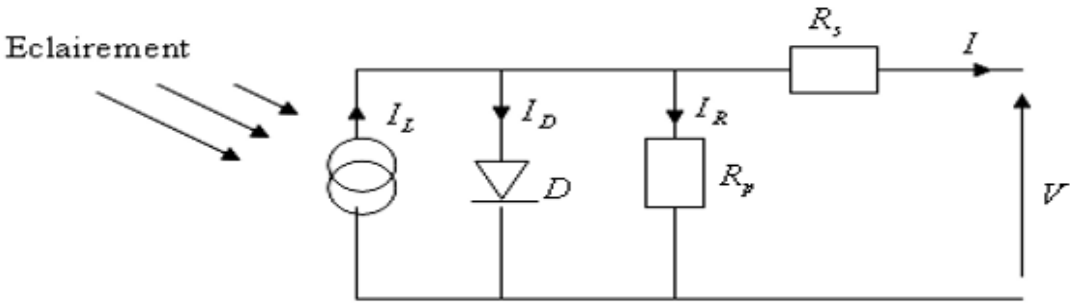


Figure III.3 *: Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.*

Alors, on peut présenter le schéma électrique équivalent du générateur photovoltaïque (GPV) par un schéma bloc Figure (III.4) comportant quatre paramètres. Deux variables d'entrées qui sont: l'ensoleillement dans le plan des panneaux Es(W/m2), température de jonction des cellules Tj (°C) et deux variables de sortie : courant fourni par le GPV Is(A), tension aux bornes du GPV Vs(V).

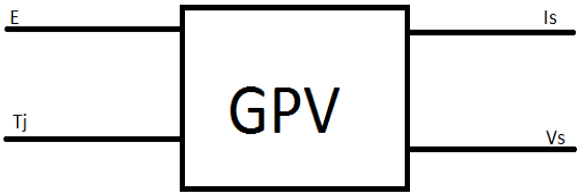


Figure III.4 : *Schéma bloc du générateur photovoltaïque*

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

éclairement standard	G 1000W/m2
Température standard	T 25°C
Puissance maximale	130W
Tension à(Pmax) tension optimale(V$o$pt)	70.4V
Courant à(Pmax) ou courant optimal (Iopt)	1.93A
Courant de court-circuit Isc	2.02A
Tension à circuit ouvert Vco	86.8V
Nombre des cellules en séries	36
Energie de la bande interdite	1.39 ev
Coefficient de température de Isc	65 mA/ °C
Coefficient de température de Vco	-80mV/ °C
Coefficient de température de puissance	(0.5±0. OO5)% /°C
Courant de saturation Isat	Isat 20 nA

Tableau III.1 : *caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau MSX60 Dans les conditions standards «CST».*

Plusieurs modèles mathématiques sont utilisés pour simuler le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque. Ces modèles se différencient par la méthode de calcul et le nombre des paramètres intervenants dans la caractéristique courant-tension.

Dans ce cas, on a choisi un modèle simple ne nécessitant que les paramètres donnés par le fabriquant, la caractéristique I-V de ce modèle est donnée par :

$$I = I_{SC}(\frac{\psi}{1000}) - I_0\,(e^{\frac{q(V+RsI)}{nKt}} - 1) - \frac{V+RsI}{Rsh} \qquad \text{(I.1)}$$

Où V, I sont la tension (V) et le courant (A) de sortie du panneau, $I_{SC}(\frac{\psi}{1000})$: est le photo courant en ampère, Isat Courant dans la diode en ampère, Rsl est la résistance série en ohm, Rsh est la résistance shunt en ohm, q est la charge de l'électron q=1.602.10 -19 coulomb, k est la constante de Boltzmann k=1.381.10-23 J/K, n est le facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

III.4.2. Simulation du générateur PV :

Le schéma de générateur photovoltaïque en l'environnement Matlab-Simulink est représenté par :

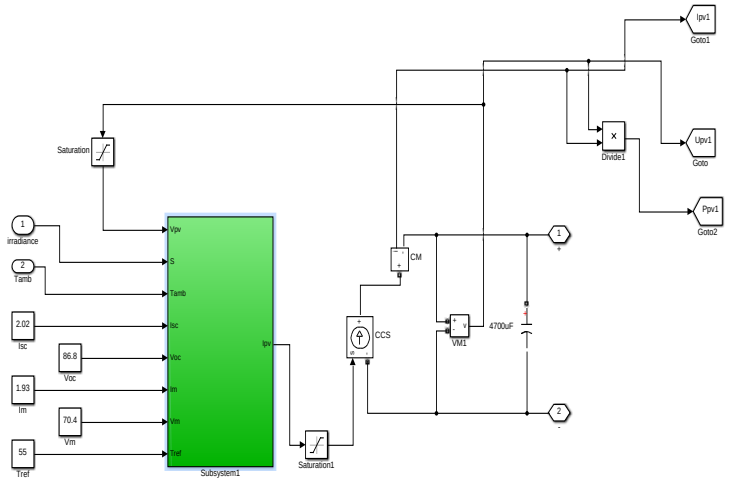


Figure III.5 : *Schéma de générateur PV en MATLAB-SIMULINK*

Les résultats de simulation du générateur photovoltaïque représentent par la figure (III.6). Cette figure représente les caractéristiques Courant-Tension .pour différents températures.

Ces figures montrent clairement la baisse du rendement causée par l'augmentation de la chaleur sur la cellule. On peut remarquer sur la figure (III.7) que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

Les figures (III.8) et (III.9) montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

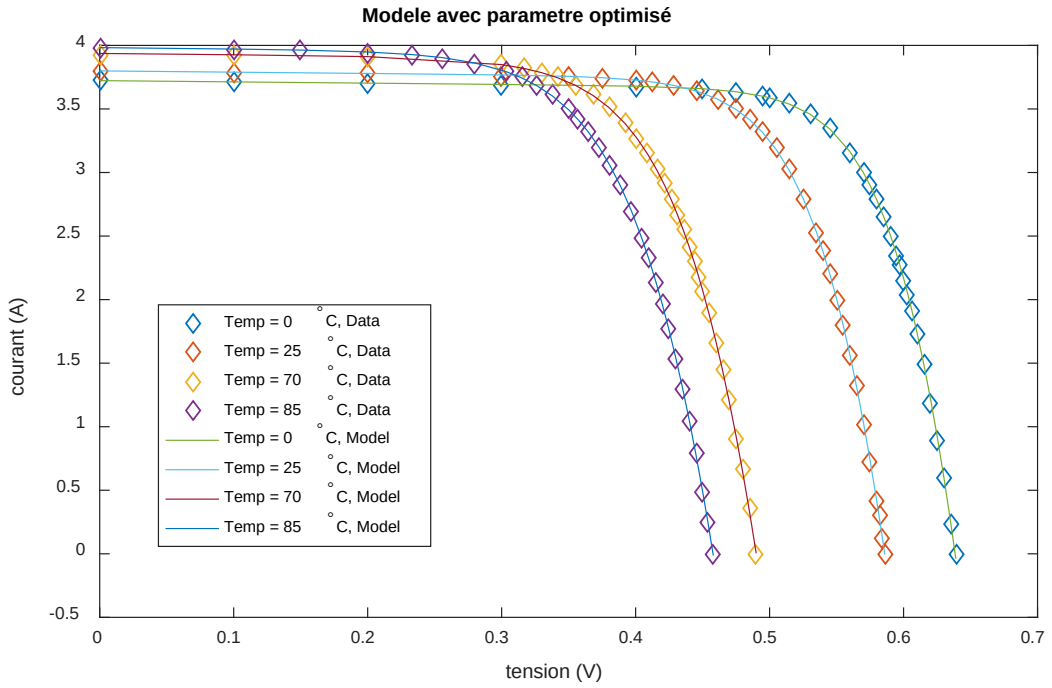


Figure III.6 : *Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension, pour différentes températures*

Les figures (III.6) et (III.7) ci-dessous montrent que la tension à vide d'un module photovoltaique (une cellule solaire) diminue avec l'augmentation de la température du module PV (de la cellule). Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température du module PV (de la cellule solaire).

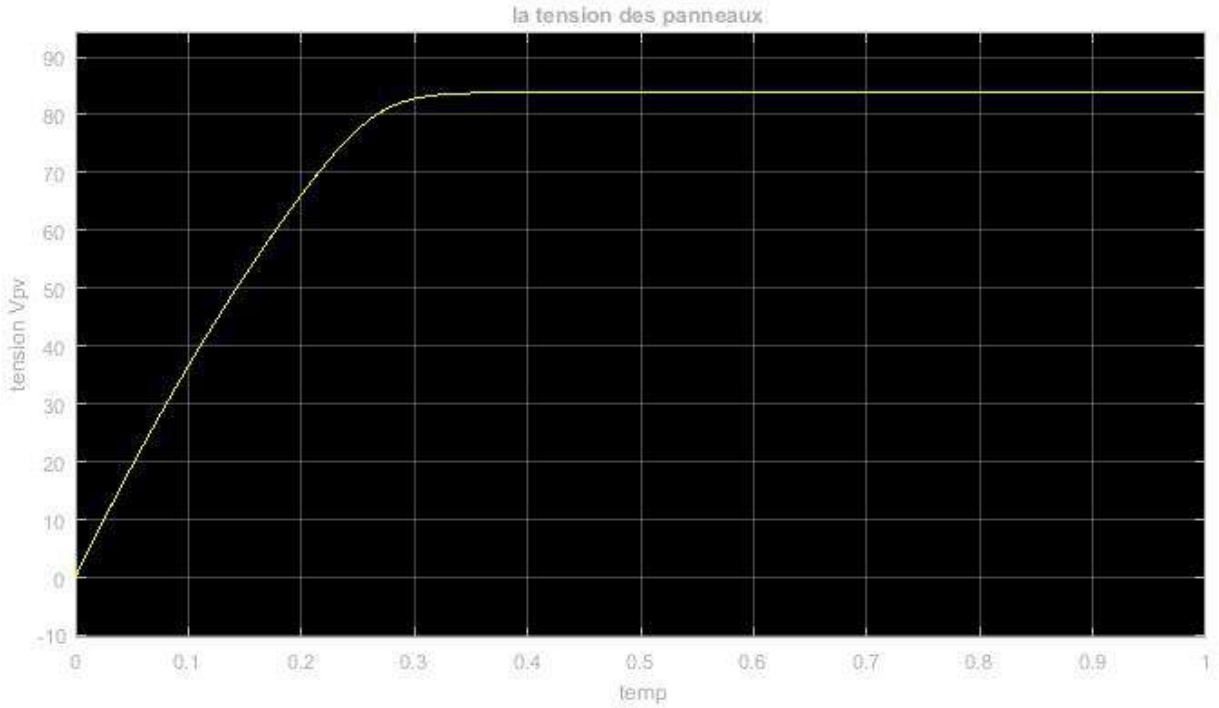


Figure III.7 : *Résultats de simulation des caractéristiques de Tension Vpv(t).*

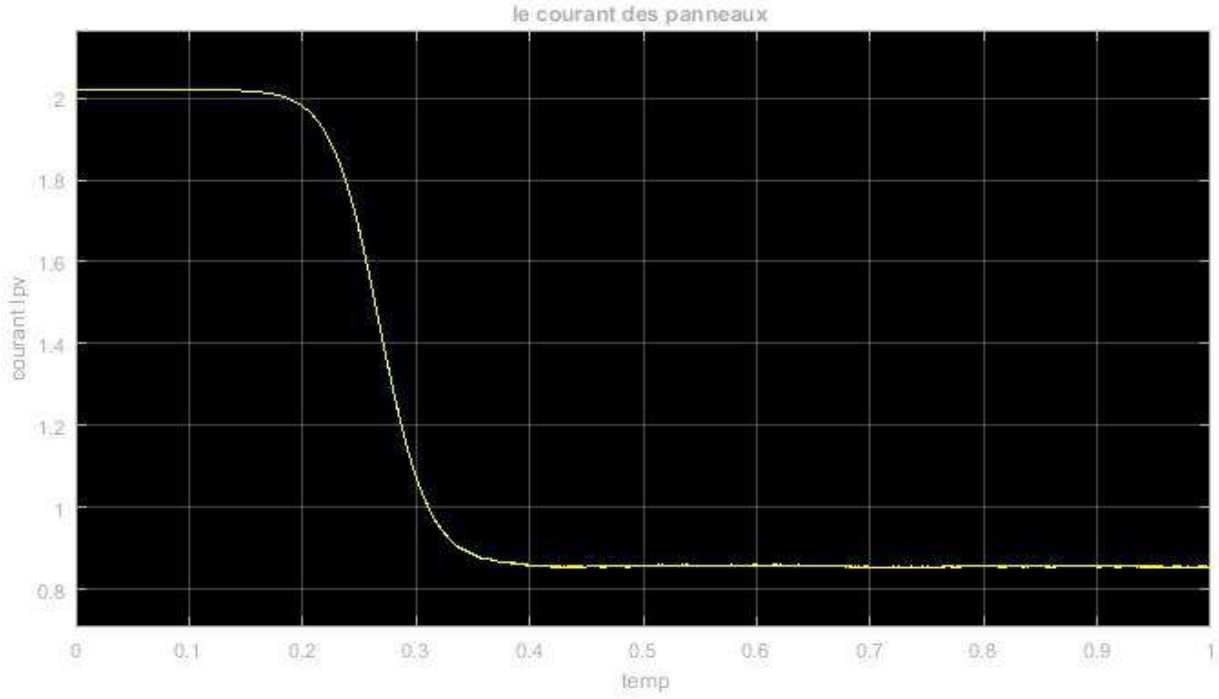


Figure III.8 : *Résultats de simulation des caractéristiques de Courant Ipv(t).*

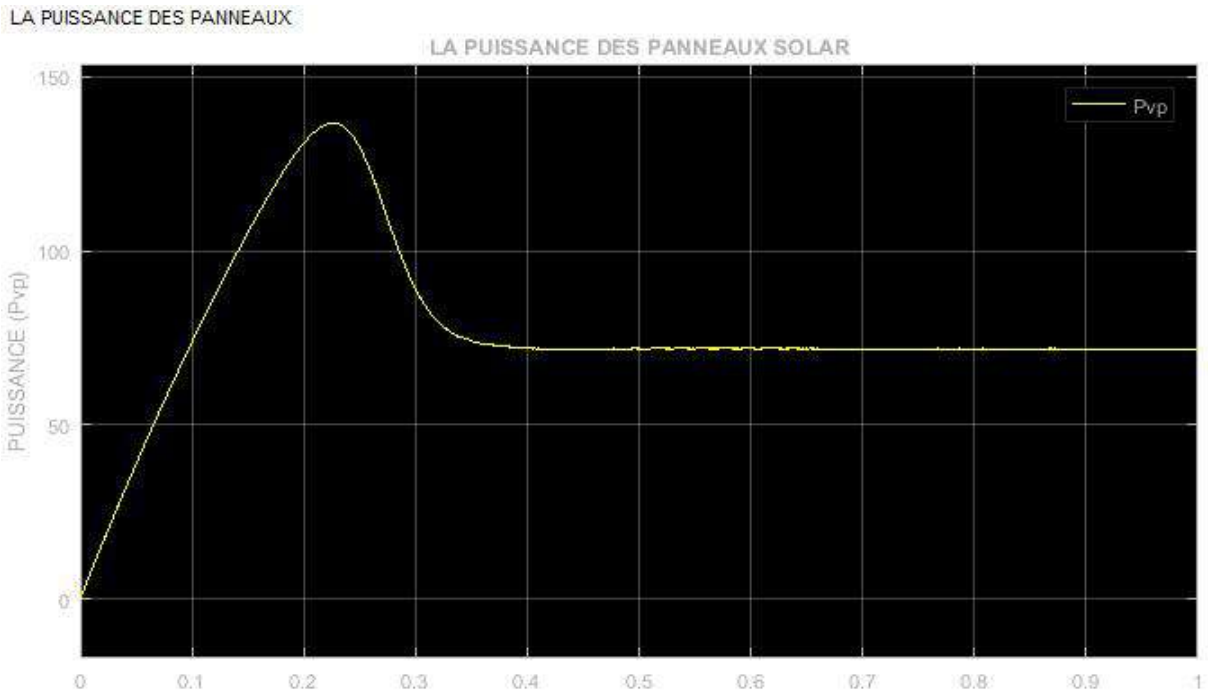


Figure III.9 *: Résultats de simulation des caractéristiques de puissance Ppv(t).*

III.4.3. Modélisation du système éolien :

Une voilure éolienne 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 (Voir Figure III.9)



Figure III.10 *: Modèle de la voilure.*

Selon la caractéristique propre de la voilure (λ) donnée par l'équation suivante:

$$C_p(\lambda) = \frac{2.Peol}{\tau.S._{V_V^3}}$$

On peut calculer la puissance éolienne qui est donnée par l'équation ci-dessous :

$$Peol = \frac{1}{2}.C_p(\lambda).\rho.S.V_V^3$$

Le couple éolien est donné par l'équation suivante :

$$C_{eol} = C_{mec} = \frac{1}{2}\frac{C_p(\lambda).\rho.R.S.V_V^3}{\lambda}$$

Dans notre travail, nous avons utilisé un modèle simplifié basé sur la connaissance de la densité de probabilité et qui a donnée preuve de précision.

$$P = \int_{v_{in}}^{v_{out}} p(v)f(v)d(v)$$

III.4.4. Simulation d'un hacheur survolteur :

Le schéma de block d'une éolienne, caractérisée par sa machine synchrone à faible puissance $p_{eol} \leq 81$kva et une vitesse de rotation ≤ 1500(tr/min) avec un hacheur boost (survolteur).

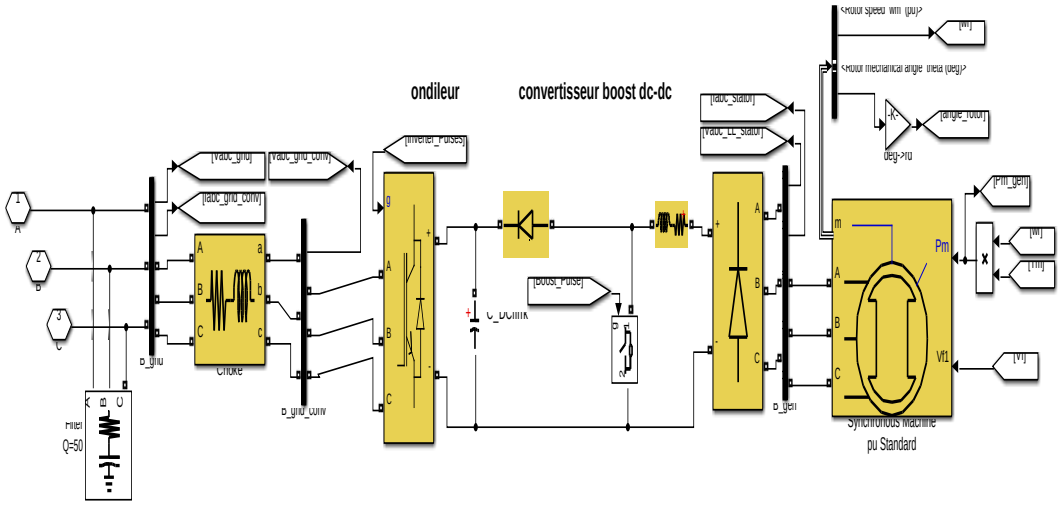


Figure III.11 *: Schéma de block d'un générateur éolien*

Les signaux suivant représentent les résultats de simulation d'un schéma de block d'un générateur éolienne.

La puissance de la turbine éolienne représente par le signal suivant :



Figure III.12 : *la puissance de la turbine éolienne* P*et* Q

La vitesse de rotation de la turbine éolienne représentée par le signal suivant :



Figure III.13 : *vitesse de rotation de la turbine éolienne* w_r

La tension de générateur éolienne est donnée par le signal suivant :



Figure III.14 *: tension de générateur éolien.*

III.4.5. Simulation du hacheur survolteur :

C'est un convertisseur DC/DC parallèle inséré entre le générateur photovoltaïque GPV et le reste de la chaîne de conversion. Il est caractérisé par son rapport cyclique *dd* (0< *dd* <1) avec lequel on peut exprimer les valeurs moyennes des grandeurs de sortie avec celles de l'entrée. Le schéma électrique du hacheur survolteur est donné par :

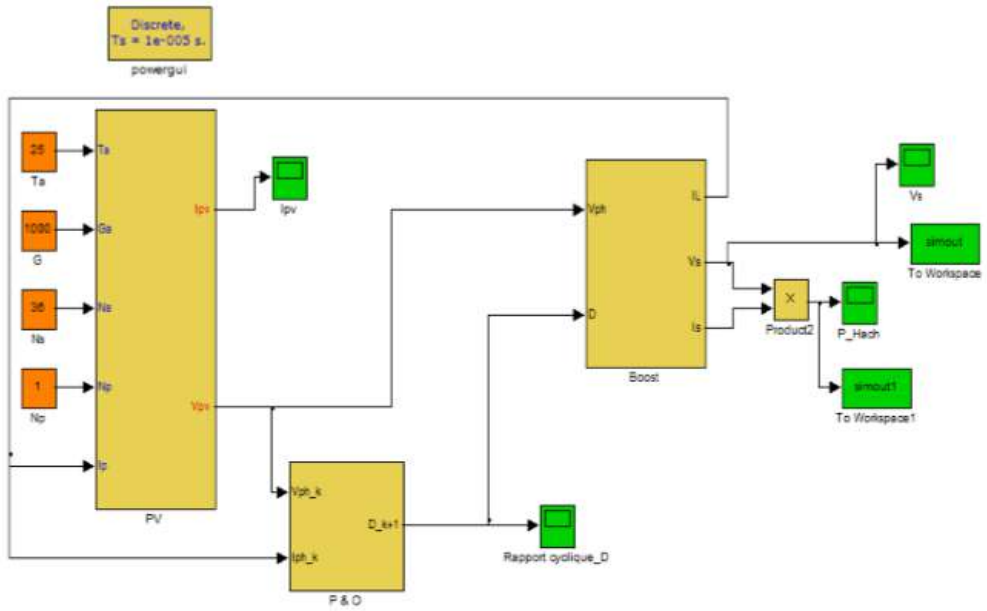


Figure III.15 *: Schéma de block d'un convertisseur survolteur*

Après la simulation on obtient la variation de la puissance à la sortie du hacheur (figure III.16).

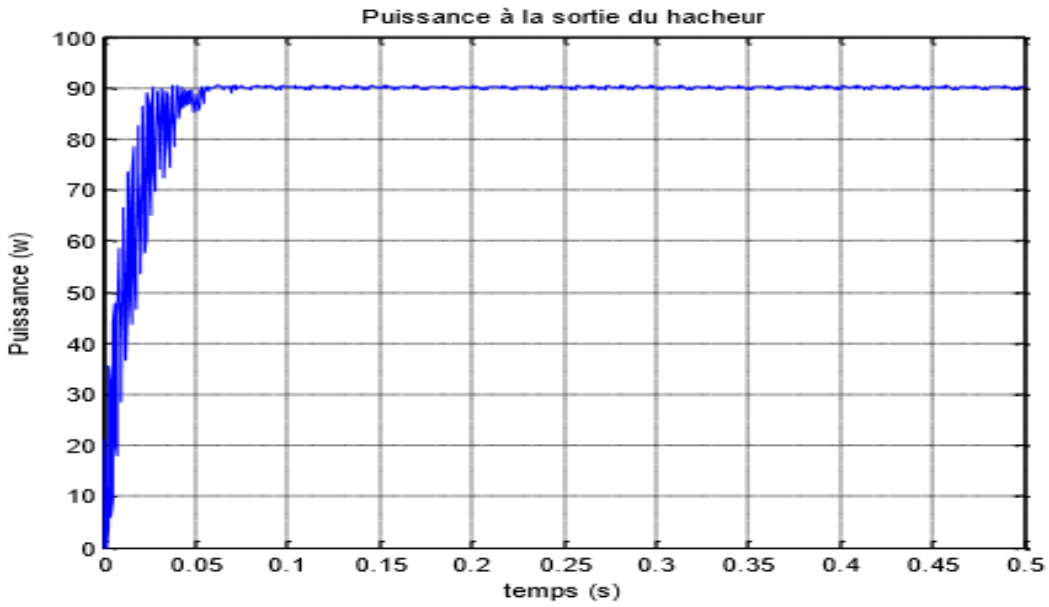


Figure III.16 *: Caractéristique P = f (t) à la sortie du hacheur Boost.*

III.4.6. Simulation d'un system hybride (panneau solaire avec turbine éolienne connecter a une charge R :

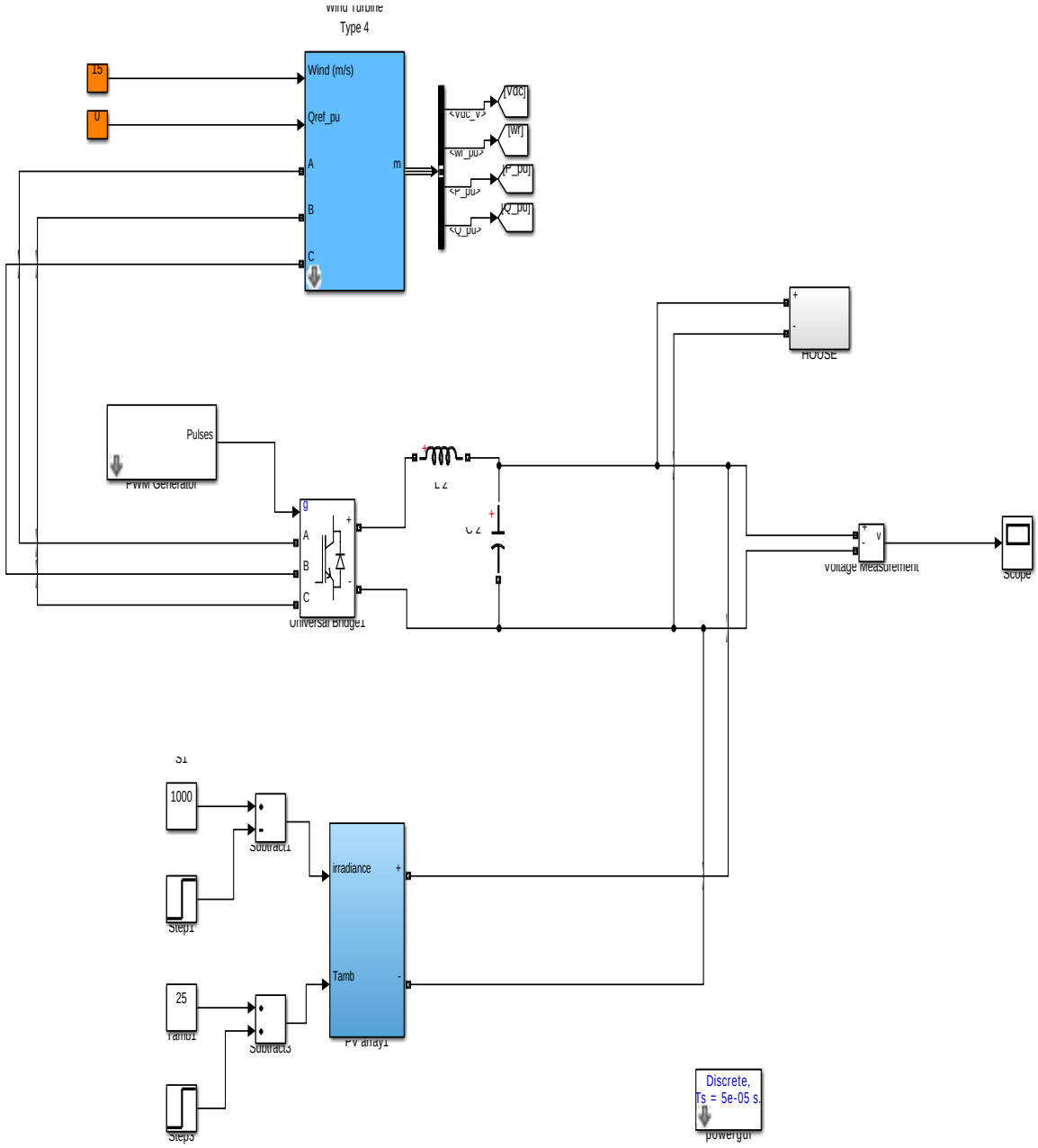


Figure III.17 : *schéma block d'un system hybride (PV-éolienne-charge R)*

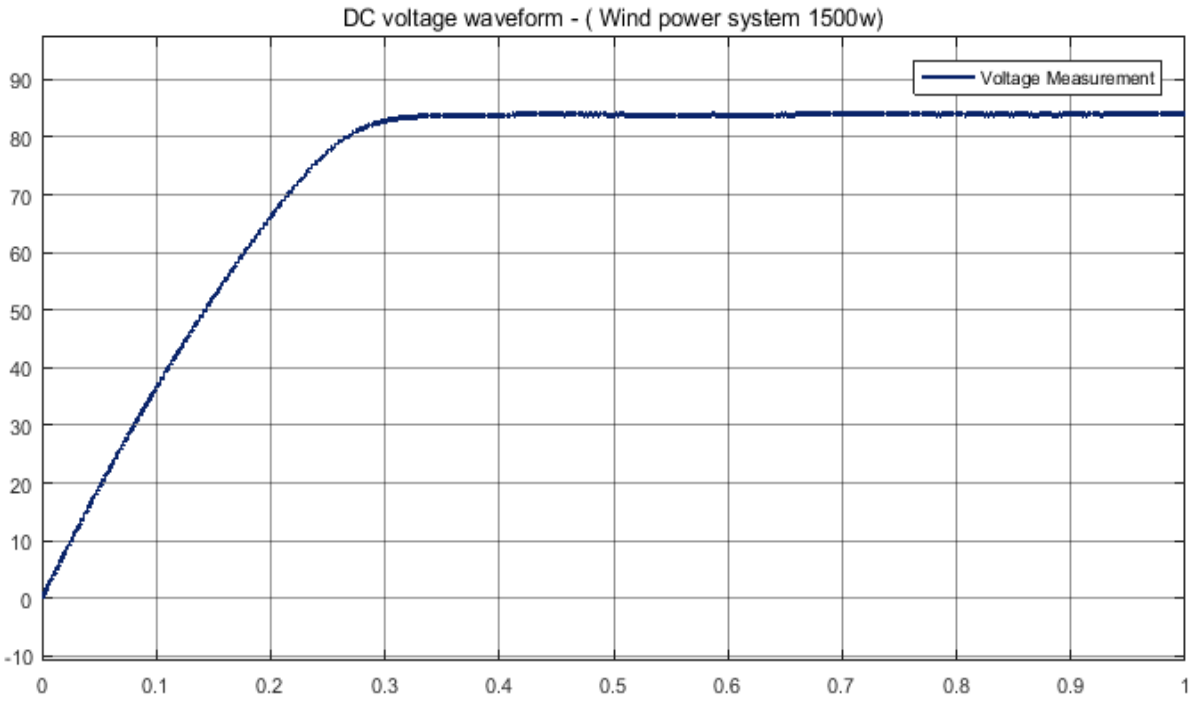


Figure III.18 : *signal de la tension d'un système hybride*

III.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, la modélisation de l'ensemble composé de : générateur photovoltaïque, hacheur survolteur et la générateur éolienne est présentée Les modèles SIMULINK sont construits pour les différentes composantes du système hybride

D'après les résultats obtenus de la simulation, on remarque :

- Les performances du générateur PV se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et les variations de la charge. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement 1000W/m^2 température 25°C.
- Le convertisseur DC-DC et effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV.
- le générateur éolienne connecter avec le générateur PV à la charge: et donner la tension maximal de system
- La configuration technico-économique optimale du système hybride étudié, sera ainsi obtenue par simulation numérique sous l'environnement MATLAB.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Les travaux présentés dans ce mémoire concernant d'une façon générale l'étude, la modélisation et la simulation de systèmes de production d'électricité à courant continu, à partir de ressources renouvelables mixtes (photovoltaïque et éolienne). La modélisation et la simulation numérique de la chaine de conversion d'électricité ont été effectuées en utilisant le logiciel Matlab.

Notre étude s'est focalisée sur un système hybride photovoltaïque-éolien raccordé par une charge continu, dont la rentabilité est loin d'être acquise et qui nécessite donc un fort degré d'optimisation de l'efficacité énergétique. Ceci impose une adaptation nécessaire pour maximiser le rendement du système hybride (la quantité d'électricité produite par jour) d'une part et d'autre part réduire le coût du système.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation d'un système photovoltaïque pur présente une variante plus favorable relativement à l'éolien.

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

- Envisager une réalisation pratique du système d'énergie hybride.
- Couplages du système d'énergie hybride sur le réseau électrique de grande puissance, afin de servir plus d'utilisateurs.
- Amélioration du rendement du système d'énergie hybride en introduisons d'autres sources d'énergie renouvelables comme l'hydrogène qui peut être produit par électrolyse, pour produire de l'énergie électrique verte.