



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention d'un diplôme de Master

Option : Electromécanique minière

Thème

Contribution à l'étude et la commande des systèmes des énergies solaire-application au central photovoltaïque.

Par:

Boudjemaa MEKKIDI

Salem FOUNDOU

Devant le jury composé de:

Alaa HOUAM	MAA	Université Larbi Tébessi – Tébessa	Président
Moussa ATIA	MAB	Université Larbi Tébessi – Tébessa	Encadreur
Dhouadi RABEH	MAA	Université Larbi Tébessi – Tébessa	Examineur

Promotion 2016/2017



Année universitaire : 2016-2017 Tébessa le : 17-05-2017

Lettre de soutenabilité

Nom et prénom des étudiants :

- 1- Foundou Salem
- 2- Mekkidi Boudjemaa

Niveau : Master 2

Option : Electromécanique Minière

**Thème Contribution à l'étude et la commande des systèmes des énergies
solaire-application au central photovoltaïque**

Nom et prénom du promoteur : ATTIA Moussa

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Généralités sur l'énergie solaire (photovoltaïque).	
Modélisation d'un système photovoltaïque.	
Etudes Et Modélisation convertisseurs électriques.	
Etudes des techniques de commande conventionnelles.	
Développement d'une technique de command floue.	

Remerciement

*Avant tout nous tenons nos remerciements à notre dieu de nos avoir Donné la force et le courage.
A la suite Nous tenons à remercier vivement Mr. ATIA.MOUSSA notre promoteur qui a fourni des efforts énormes, par ses Informations ses conseils et ses encouragements.*

*Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour L'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance
Nos vifs remerciements aussi à Mr. HOUAM.AJAA,
Et Mr. DHOUADI.RABEH et Tous deux maîtres assistants à l'université DE TEBESSA, pour avoir accepté d'être examinateurs de ce travail.
Et tous les professeurs de département de Génie
MINIERE*

*A tous ce qui furent à un moment ou à toute instante partie prenante de ce travail.
Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près et de loin ont contribué à la réalisation de cette mémoire.*

Dédicaces

Au nom du dieu le clément le miséricordieux

Je dédie ce travail :

✚ *A celle qui ma donnée la vie et que ma vie n'est rien sans elle, à ma tendre **mère**, qui m'a soutenu d'amour et de bonheur ; tout ce que je suis, je le doit à elle.*

✚ *A Mon très cher **père**, qui me nourrit toujours de ses sages conseils.*

✚ *A mes chères sœurs.*

✚ *Et à mes adorables frères.*

✚ *A Mon très chère sœurs: **Nour El Houda** qui donnée les bonne conseils.*

✚ *Toute la famille **MEKKIDI**.*

✚ *A tous mes amis les étudiant adrarienne dans Tébessa*

✚ *A mes chers amis en particulier qui aider pour ce travail :*

F.salem, H.hassen, CH.med.salem, Z.abdellatife, M.hamza

MEKKIDI BOUDJEMAA

Dédicace

Au nom du dieu le clément le miséricordieux

Je dédie ce travail

Dieu et le respect du prestige Allah... m'a appris à soumissionner sans attendre

J'apporte son nom de toute la gloire... Je demande à Dieu de donner

à votre âge pour voir le fruit est venu. Après avoir sélectionné

une longue attente, et vos paroles seront guidés par

l'étoile aujourd'hui et demain et pour toujours.

Cher papa

A mon ange dans la vie... au sens de l'amour et le sens de la compassion et

de dévouement... Pour le secret de mon succès a été de prier

et d'affection baume chirurgicale

Ma mère bien-aimée

Pour nos frères, sœurs et ma famille à l'agréable et de fraternité se sont

distingués à remplir tendres ... aux sources net de l'honnêteté

de leur plaisir ... à ceux qui étaient avec moi sur la route

du succès et de bonne... Pour ceux qui ont regardé mes

regards de succès espoir.

Et à ma grand-mère, ainsi que précieux, le mari de ma sœur et la femme, mon frère

Pour ceux qui savaient comment les trouver et m'a appris à ne pas avoir perdu

leur

Mes amis

M. BOUDJEMAA – CH. MED SALEM – H. HASSEN – Z. ABDELLATIF

T. ABDESSAMED

FOUNDOU SALEM

Chapitre I

Figure I.1: Répartition des zones climatiques en Algérie

Figure I.2: Panneau photovoltaïque

Figure I.3: Modèle d'une cellule photovoltaïque

Figure I.4 : Coupe transversale d'une cellule PV typique

Figure I.5 : Ruban métallique d'une cellule.

Figure I.6: Caractéristique idéale I-V

Figure I.7 : Effet photovoltaïque

Figure I.8 : Schéma d'une cellule photovoltaïque

Chapitre II

Figure II.1 : Schéma bloc du générateur photovoltaïque.

Figure II.2 : Chaîne de conversion PV

Figure II.3 : Schéma équivalent électrique d'une cellule PV

Figure II.4 : Caractéristiques, courant-tension $i(v)$ et puissance-tension $p(v)$ d'une photopile La composante i_d a comme expression celle de (II.3) ;

Figure II.5 : Boucle de régulation du courant I_d^g

Figure II.6 : Schéma électrique équivalent d'un groupe de panneaux, modèle 1 diode

Figure II.7 : Modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque et son symbole.

Figure II.8 : Schéma électrique du « Modèle deux diodes » pour un groupe de panneaux.

Figure II.9 : Synthèse graphique des différentes pertes au sein d'un module PV

Figure II.10 : Profil de l'angle d'incidence.

Figure II.11 : Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ à $E=1000W/m^2$.

Figure II.12 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ à $T=25^\circ C$.

Figure II.13 : Influence simultanée de l'éclairement et la température sur la caractéristique $I(V)$ (1): $1000W/m^2$, $55^\circ C$; (2) : $800W/m^2$, $44^\circ C$; (3) : $600W/m^2$, $40^\circ C$; (4) : $400W/m^2$, $32^\circ C$; (5) : $200W/m^2$, $25^\circ C$.

Chapitre III

Figure III.1 : les différents types de convertisseurs statiques.

Figure III.2 : Symbole d'un convertisseur DC-DC.

LISTE DES FIGURES

Figure III.3 : Schéma électrique d'un hacheur buck.

Figure III.4 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck

Figure III.5 : Schéma électrique d'un hacheur buck fermé

Figure III.6 : Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert.

Figure III.7 : Schéma électrique d'un hacheur boost

Figure III.8 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.

Figure III.9 : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.

Figure III.10 : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.

Figure III.11 : Caractéristiques de la tension et des courants de la charge, et le circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur

Figure III.12 : Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont.

Figure III.13 : Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence.

Figure III.14 : Principe de la méthode MPPT à courant de référence en fonction de I_{sc} .

Chapitre IV

Figure IV.1 : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC) contrôlé par une commande (PPM) sur charge DC

Figure IV.2 : Caractéristique du point de puissance maximale MPP

Figure IV.3 : Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation

Figure IV.5 : Organigramme de l'algorithme incrémentation de conductance

Figure IV.6 : Méthode avec Contre-réaction de tension et modulation

Figure IV.7 : Méthode de la contre réaction en courant

Figure IV.8 : Contrôle de courant par MLI

Figure IV.9 : Commande des interrupteurs par MLI

Chapitre V

Figure V.1 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque contrôlée par une commande MPPT.

Figure V.2 : Circuit idéal du convertisseur survolteur (Boost)

Figure V.3 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec contrôleur logique floue.

Figure V.4 : Les ensembles classiques et flous.

Figure V.5 : Schéma synoptique d'un contrôleur flou.

Figure V.6 : Fonction d'appartenance du contrôleur flou (entrées, sortie).

LISTE DES FIGURES

Figure V.7 : Signal de commande du convertisseur à base de logique floue.

Figure V.8 : Caractéristiques $P=f(v)$ d'un générateur photovoltaïque pour différents ensoleillement.

Figure V.9 : Caractéristiques $P=f(v)$ d'un générateur photovoltaïque pour différentes températures.

Figure V.10 : Variation de la puissance du module et la tension, la commande D pour une température de 25°C et un ensoleillement de 1000w/m².

Figure V.11 : Variation de l'ensoleillement du module, de la puissance et de la commande D pour un ensoleillement aléatoire avec une température de 25 C°.

Figure V.12 : Variation de la température du module, Variation de la puissance et de la commande D pour une variation de la température aléatoire avec un ensoleillement de 1000W/m².

Figure V.13 : Variation de l'ensoleillement et de la température du module, Variation de la puissance, la commande D pour un changement aléatoire de l'ensoleillement et de la température.

Figure V.14 : Courbe représente une comparaison entre P sortie et P entré.

Figure V.15 : Courbe représente la fonction $P=f(V)$ de sortie.

Figure V.16 : Courbe représente la fonction $P=f(I)$ de sortie.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : types des cellules photovoltaïques.

Tableau I.2 : résume les différents matériaux existants sur le marché et ceux au stade expérimentale.

Tableau V.1 : Règles floues relatives au contrôleur pour un système photovoltaïque.

LES SYMBOLES

PV : photovoltaïques

GPV : générateur photovoltaïque

MPPT : Maximum Power Point Tracking

AIE : l'Agence Internationale de l'Energie

VT : la tension thermique

MLI : Modulation Largeur d'Impulsion

PWM: Pulse Width Modulation.

EVA : Ethylène Acétate de Vinyle

STC : les conditions standards

Cd Te : tellure de cadmium

CIS : cuivre-indium-di sélénium

FF : facteur de forme

NOCT : Nominal Operating Collectera Température

DC : Courant continu

AC : Courant alternatif

IGBTS : transistors bipolaires à gâchette isolée

IAM : Incidence Angle Modifier

K : Constante de Boltzman ($1.3806503 \times 10^{-23}$ J/K)

T : Température de fonctionnement de la cellule, Kelvin

q : Charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb)

Isc : Courant de court-circuit d'une cellule

Rp : Résistance caractérisant les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structurales du matériau (Ω)

Rs : Résistance caractérisant les pertes par effets Joule dans le semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule (Ω)

TR : la température de référence (=298.18 K)

LES SYMBOLES

EG0 : la largeur de bande du silicium (=1.12 eV)

β : le facteur d'idéalité (=1740)

Ios : le courant de saturation inverse de la cellule (=2.10⁻⁴ A)

Ior : le courant de saturation de la cellule

G : niveau d'irradiation (W/m²)

Vco : tension de circuit ouvert

Icc : courant de court-circuit

Pmax : Puissance maximale fournie par le module en STC

Sm : Surface du module

Psol : Puissance du rayonnement solaire

Iph : le courant de la photopile

Rsh : la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction

rs : la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions

i : le courant fourni par la cellule

v : la tension à ses bornes

id : le courant parcourant la diode

ir : celui parcourant la résistance shunter

i0 : courant de saturation inverse de la diode

q : charge de l'électron (1,6.10⁻¹⁹ [C])

k : est la constante de Boltzmann (1,38.10⁻²³ [J/K])

nj : facteur d'idéalité de la photopile, compris entre 1 et 5 dans la pratique

Tj : représente la température de la jonction [K]

Tj : T_c= T (nommée avec l'un ou l'autre dans l'alittérature)

pM : La puissance utile maximale

p0 : la puissance incidente

iS1 et **iS2** : les courants de saturation des diodes

n1 et **n2** : leurs facteurs de pureté

Si : pourcentage d'insolation

αT : coefficient d'absorption de l'irradiation solaire (environ 0.9)

ηc : est l'énergie extraite d'une cellule

Tc : la température de la cellule

Ta : la température ambiante, données en [°C]

θ_i :Étant l'angle d'incidence sur un plan

LES SYMBOLES

α : le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur

T_e : étant la période des impulsions

f_e : la fréquence de découpage

PPM : Le point de puissance maximale

P&O : Perturbe & Observe

T_r : est la période de commutation et d le rapport cyclique du commutateur (de [0,1])

NG : Négatif Grand

NM : Négatif Moyen

NM : Négatif Petit

Z : Environ Zéro

PP : Positif Moyen

PM : Positif Moyen

PG : Positif Grand

Résumé

ملخص

تعتبر الطاقة من أهم العناصر الأساسية و الضرورية في الحياة، نظرا للتزايد المستمر في الطلب على الطاقة أصبح من الضروري البحث عن مصادر بديلة لإنتاج الطاقة وذلك عن طريق استغلال الطاقات المتجددة ومن أهم المصادر استعمالا الطاقة الشمسية لما لها من مميزات كثيرة .

وفي هذه المذكرة قمنا بتحليل التصميم ومحاكاة الاشتغال للنظام الكهروضوئي وفق الآلية " المنطق الضبابي " لضمان متابعة الاستطاعة الأعظمية المفرغة عن طريق المولد الكهروضوئي . نتائج المحاكات المتحصل عليها تمت بواسطة برنامج "ماتلاب/سوميلينك" من أجل المراقبة في السير الديناميكي للنظام الكهروضوئي .

الكلمات المفتاحية : النظام الكهروضوئي، المحول الرفع، آلية التحكم تتبع نقطة الاستطاعة الاعظمية ،

المحاكاة، المنطق الضبابي

Résumé

L'énergie des éléments plus fondamentaux et nécessaires à la vie, en raison de la hausse continue de la demande d'énergie est devenue nécessaire de trouver d'autres sources de production d'énergie grâce à l'utilisation des énergies renouvelables et des sources plus importantes de l'utilisation de l'énergie solaire en raison de leurs nombreux avantages.

Dans cette thèse, nous analysons la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque fonctionne selon le mécanisme "commande logique floue" assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque. Les résultats de la simulation obtenue par MATLAB/SIMULINK, afin de contrôler de trafic dynamique photovoltaïque.

Mots clés : Photovoltaïque, Convertisseur, Commande MPPT, Simulation, logique floue

Abstract

Energy is considered as the more fundamental and necessary of the conditions of life; the increase of demand of energy led to find other sources of production energy thanks to the use of renewable energies and the more significant sources of the use of solar energy that are having many advantages.

In this study, we analyze modeling and it if mutation of a system photovoltaic which functions according to m's mechanisms " Fuzzy logic" ensuring the continuation of the maximum power provided by the generator photovoltaic. The findings of the simulation obtained by MATLAB/SIMULINK, for observation of dynamic traffic photovoltaic.

Key words: Photovoltaic, Converter, Order MPPT, Simulation, Fuzzy logic.

SOMMAIRE

Remerciement.....	i
Dédicace.....	ii
Liste des figures.....	iii
Liste des tableaux.....	iii
Les symboles	iv
Résumé.....	v
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I Généralités sur l'énergie solaire (photovoltaïque)

I.1. Introduction	2
I.2. Energie du soleil en Algérie	3
I.3. Le photovoltaïque.....	4
I.4. Modèle d'une Cellule photovoltaïque (panneau)	4
I.5. Cellules photovoltaïques	7
I.5.1. Caractéristiques idéales de la cellule photovoltaïque	8
I.5.2. Principe de fonctionnement	9
I.5.3. Différents types des cellules photovoltaïques.....	10
I.6. Avantages, inconvénients des systèmes photovoltaïques.....	12
I.6.1. Avantages.....	12
I.6.2. Inconvénients	12
I.7. Rendement d'un Générateur Photovoltaïque (GPV).....	12
I.8. L'effet photovoltaïque	13
I.9. La jonction PN.....	14
I.10. Conclusion.....	16

CHAPITRE II Modélisation d'un système photovoltaïque
--

II.1. Introduction	17
II.2. Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV)	17
II.3.1. c) Modèle polynomial.....	25
II .4. Etude des pertes au niveau d'un module PV.....	26

SOMMAIRE

II.5. Influence de l'éclairement et la température	28
II.3. Modélisation de la chaîne de production PV	17
II.3.1. Modèles électriques des panneaux	18
II.3.1. a) Modèle une diode	19
II.3.1. b) Modèle deux diodes.....	23
II.6. Conclusion	30

CHAPITRE III Etudes Et Modélisation convertisseurs électriques
--

III.1. Introduction.....	31
III.2. Convertisseurs DC/AC	31
III.2.1. Principes de la conversion DC/AC d'un onduleur photovoltaïque.....	31
III.2.2. Types d'onduleurs	32
III.2.2.1. Onduleur à onde sinusoïdale	32
III.2.2.2. Onduleur à onde carrée.....	32
III.2.2.3. Onduleur à onde pseudo-sinusoïdale.....	32
III.3. Les Hacheurs	33
III.3.1. Type des hacheurs	33
III.3.1.1)- Hacheur Buck :	33
III.3.1.1.a)-Fonctionnement.....	34
III.3.1.1.b) Modèle mathématique équivalent	35
III.3.1.2)- Hacheur boost	36
III.3.1.2.a)- Fonctionnement.....	36
III.3.1.2.b)- Modèle mathématique équivalent.....	37
III.3.1.3)- Le convertisseur Buck-Boost.....	38
III.4. Les onduleurs	39
III.4.1. Principe de fonctionnement d'un onduleur	39
III.4.2 Onduleur Monophasé	40

SOMMAIRE

III.4.3 Onduleur triphasé :	40
III.5. La commande MPPT	40
III.5.1. Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque	41
III.6. Commande par MLI	41
III.7. Les méthodes de poursuite de MPP.....	41
III.7.1. Méthodes à contre réaction de tension	41
III.7.2. Méthodes à contre réaction de courant.....	42
III.7.3. Méthodes à contre réaction de puissance	42
III.8. Conclusion	42

CHAPITRE IV Etudes des techniques de commande conventionnelles
--

IV.1. Introduction	43
IV.2 Commande (MPPT) des convertisseurs DC/DC	43
IV.2.1. Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC-DC.....	43
IV.2.2. Méthode de poursuite du point de puissance maximale.....	44
IV.2.2.1. Méthode de la dérivée de la puissance.....	45
IV.2.2.1.1. Méthode de la perturbation et l'observation la (P&O).....	45
IV.2.2.1.2. Méthode par incrémentation de conductance.....	46
IV.2.2.2. Méthodes à contre réaction de la tension.....	48
IV.2.2.2.1. Méthode à tension de référence fixe.....	48
IV.2.2.2.2. Méthode MPPT avec mesure de la tension à vide du panneau.....	48
IV.2.2.2.3. Méthode MPPT avec cellule pilote.....	49
IV.2.2.3. Méthode avec contre réaction du courant.....	49
IV.3. Commande par MLI	50
IV.4. Conclusion.....	51

SOMMAIRE

CHAPITRE V Développement d'une technique de command floue

V.1. Introduction.....	52
V.2. présentation l'unité	52
V.3. Principe de recherche du point de puissance maximale.....	53
V. 4. Principe du convertisseur considéré	53
V. 5. Conception d'un contrôleur <i>MPPT</i> à base de logique floue	53
V. 6. Définition	54
V. 7. Les ensembles flous	54
V. 8. Le contrôleur flou	55
V.8.1.Base des règles	56
V.8.2.Logique de prise de décision (inférence flou).....	56
V.8.3.Fuzzification.....	57
V.8.4. Défuzzification	59
V.9. Résultats de Simulation	59
V.9.1. Point de puissance maximale	60
V.10. Résultats de simulation avec l'application de l'approche logique floue pour la poursuite du point de puissance maximale	62
V.10.1. Simulation du fonctionnement sous des conditions standard (constantes)	62
V.10.2 : Simulation des conditions variables d'ensoleillement	63
V.10.3. Simulation sous des conditions variables de température	64
V.10.4. Simulation sous conditions aléatoires d'ensoleillement et de Température ..	65
V.10.5. Simulation sous conditions variables d'ensoleillement et de Température ...	66
V .11 . Conclusion.....	67
Conclusion général	69

Référence

Introduction générale

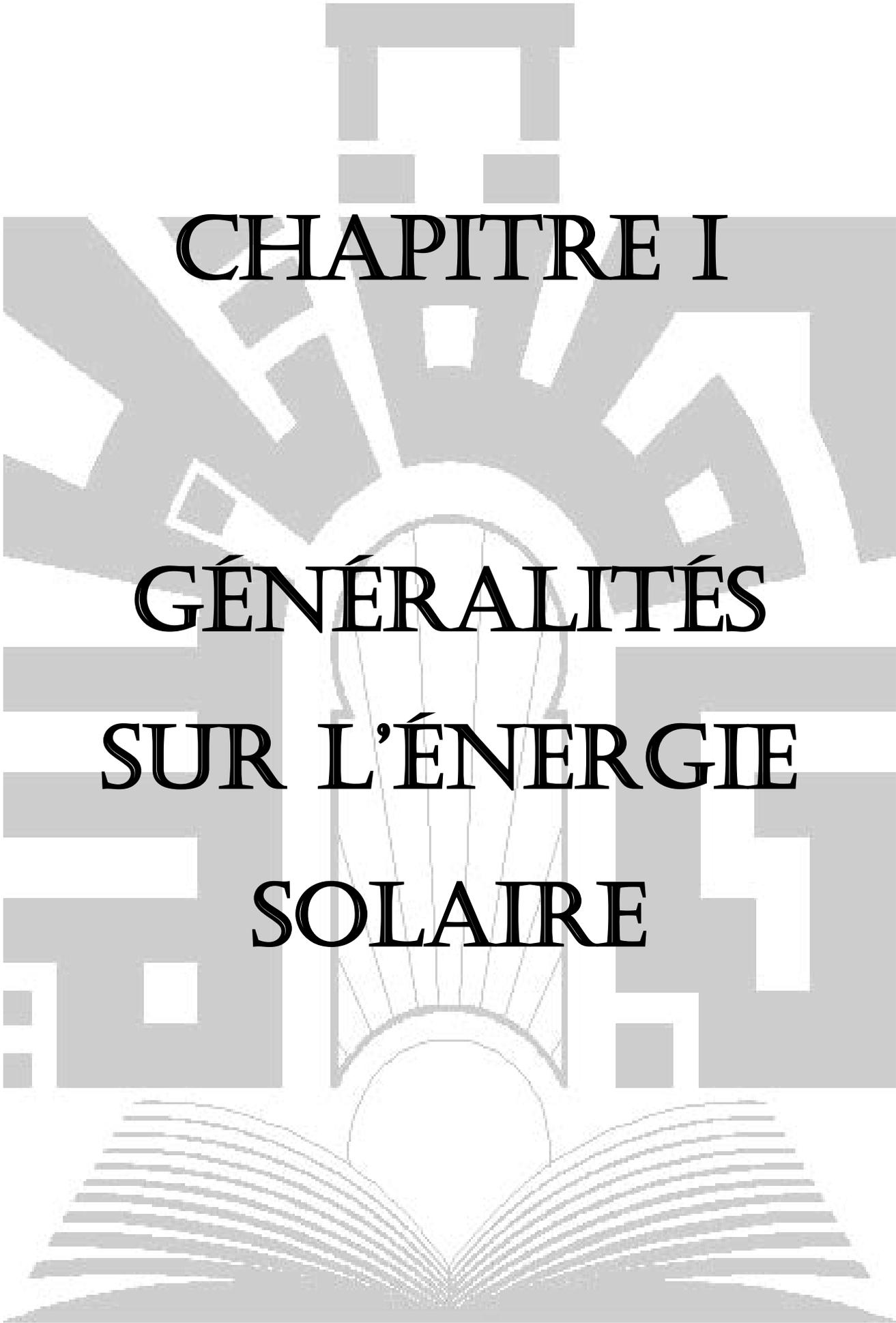
La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de source fossile.

La consommation mondiale d'électricité observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communications. De nos jours, une grande partie de la production électrique est produite à partir de ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. Ce qui entrainera à plus ou moins courte échéance un risque non nul d'épuisement de ces ressources. D'autant plus que la demande ne cesse de croître et dès à présent à être supérieure à l'offre, se traduisant par exemple par une forte fluctuation du prix mondial du pétrole.

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables: l'énergie hydroélectrique, photovoltaïque ... etc., Aujourd'hui, les énergies renouvelables deviennent progressivement des énergies à part entière, rivalisant avec des énergies fossiles du point de vue coût et performance de production. Cependant, leur système de conversion de l'énergie en électricité souffre souvent d'un manque d'optimisation qui en fait encore des systèmes trop chers, et présentant des déficiences importantes en rendement et en fiabilité. Pour cela, bien qu'il existe de plus en plus de travaux de recherches prouvant la viabilité de sources comme l'énergie photovoltaïque (PV), beaucoup de réticences existent encore pour installer ces systèmes à grande échelle, autant en production de masse que chez des particuliers.

Le but de ce travail est la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque et améliorer. À rédaction de notre mémoire se compose de Cinque chapitres : - Généralités sur l'énergie solaire (photovoltaïque).

- Modélisation d'un système photovoltaïque.
- Etudes Et Modélisation convertisseurs électriques.
- Etudes des techniques de commande conventionnelles.
- Développement d'une technique de commande floue.



CHAPITRE I

**GÉNÉRALITÉS
SUR L'ÉNERGIE
SOLAIRE**

UNIVERSITE DE TEBESSA

I.1. Introduction

La flambée vertigineuse des prix du pétrole depuis la fin du millénaire passé, a fait que les débats sur l'avenir énergétique de la planète se sont intensifiés compte tenu des besoins sans cesse croissants dans le domaine et les conséquences que cela peut engendrer à moyen terme. En effet, l'évolution démographique et le développement de certaines zones géographiques, l'Asie aujourd'hui, et d'autres pays demain, laissent présager une augmentation considérable de la consommation en énergie. A ce rythme, les réserves en énergies fossiles ne pourront assurer les besoins que pour quelques décennies encore, entraînant des situations de pénurie dont les prémices se sont fait ressentir à travers la crise du pétrole de ces deux dernières années.

Les gisements de ressources énergétiques d'origines fissiles, même si elles offrent une alternative à court/moyen terme, posent quant à elles de réels problèmes environnementaux liés au traitement des déchets radioactifs et au démantèlement des centrales nucléaires obsolètes (Fukushima par exemple).

Deux idées se sont imposées, une première solution à cette crise annoncée étant la diminution de la consommation énergétique, c'est ainsi que sont apparus sur le marché, ces dernières années, des appareils de faible consommation de classe A ou A+ (réfrigérateurs, laves linge, ampoules basse consommation, ...). En parallèle, il faut développer de nouvelles sources d'énergie propres et renouvelables. A ce sujet, le soleil, le vent, la biomasse, la mer, ... apparaissent comme des énergies inépuisables et facilement exploitables. Ainsi, d'après l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), si l'on prend l'exemple du soleil, une surface de 145000km² (4% de la surface des déserts arides) de panneaux photovoltaïques (PV) suffirait à couvrir la totalité des besoins énergétiques mondiaux [1], [9].

En effet, les performances techniques et la fiabilité des onduleurs utilisés pour le raccordement des modules photovoltaïques au réseau de distribution d'électricité, sont des paramètres qui peuvent très fortement faire varier la production d'énergie électrique annuelle et donc la rentabilité financière d'un système.

I.2. Energie du soleil en Algérie

L'Algérie est l'un des pays qui ont une diversité de sites dus à son grand secteur, environ 2,4 millions de kilomètres carrés limité par la mer au nord et par le Sahara au sud.

Le rayonnement de la région près de la mer est influencé par les saisons. Les zones du nord de l'Algérie sont à ciel couvert plus que ceux du sud. Les régions Sahariennes reçoivent une quantité plus grande d'énergie mais sont caractérisées par une température de l'air plus élevée. En raison de cette diversité dans le climat, l'ensoleillement moyen global au plan horizontal reçu varie entre 4,5 et 7,5 KWh/m².

En tenant compte de cette diversité, l'Algérie peut être divisée en 8 zones climatiques qui ont approximativement un ensoleillement homogène comme indiqué sur la figure (I.1)

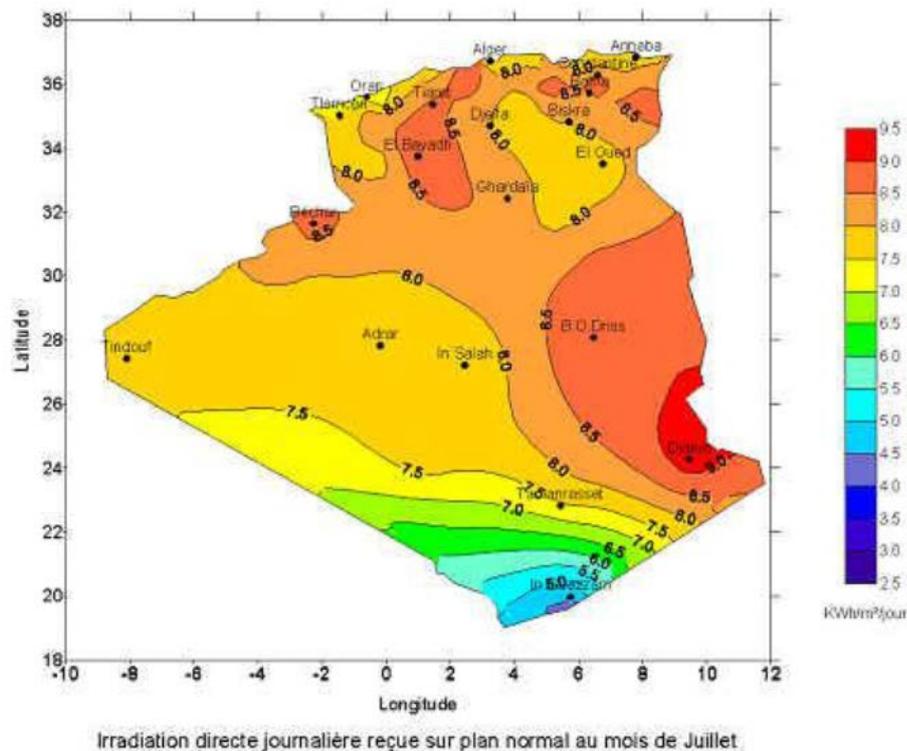


Figure I.1: Répartition des zones climatiques en Algérie

La réalisation des performances citées plus haut constitue un projet très ambitieux, et particulièrement à grande échelle, mais avant de les atteindre, il faudra s'affranchir de certaines contraintes en optimisant le fonctionnement global d'un système photovoltaïque.

Pour parvenir à cet objectif, il faudra s'affranchir des principaux problèmes liés à la production d'énergie. En effet, du fait du caractère non linéaire de la caractéristique

des panneaux photovoltaïques, leur tension dépend fortement de la charge connectée. Pour corriger ce problème, des dispositifs MPPT (Maximum Power Point Tracking : Poursuite du point de maximum de puissance) permettent aux panneaux de fonctionner dans des conditions optimales et ainsi d'extraire le maximum de puissance. S'agissant du problème lié au stockage, l'utilisation des batteries au plomb est très répandue dans le domaine et permet d'atteindre un rapport performance/coût assez intéressant [1] [2].

I.3. Le photovoltaïque

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 [3].

I.4. Modèle d'une Cellule photovoltaïque (panneau)

La figure (I.3) représente la constitution d'un panneau solaire. De manière générale, un module est composé de 36 cellules photovoltaïques. Une cellule photovoltaïque peut être assimilée au circuit électrique équivalent de la figure (I.4) [1],[33].

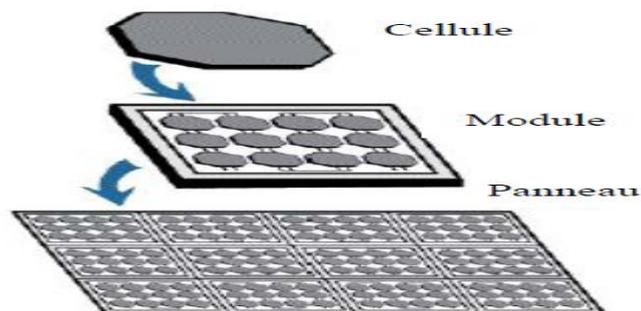


Figure I.2: Panneau photovoltaïque

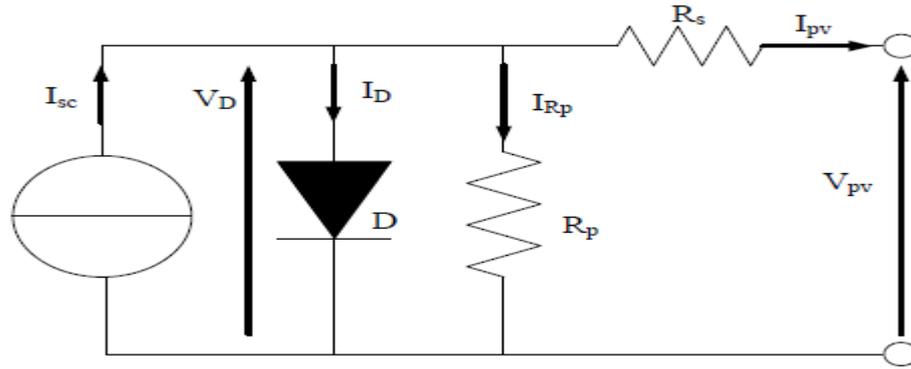


Figure I.3: Modèle d'une cellule photovoltaïque

Pour modéliser la cellule, on exprime les grandeurs électriques relative à la représentation de la cellule sous forme d'équation, tel que, pour le courant circulant dans la diode :

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) \quad (I.1)$$

Avec $V_D = V_{pv} + R_s I_{pv}$ (I.2)

Et V_T la tension thermique définie comme suit :

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (I.3)$$

Avec

k : Constante de Boltzman ($1.3806503 \times 10^{-23}$ J/K) ;

T : Température de fonctionnement de la cellule, Kelvin ;

q : Charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb) ;

La tension V_{pv} est donc définit par :

$$V_{pv} = V_D - R_s I_{pv} \quad (I.4)$$

Et $I_{RP} = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p}$ (I.5)

On obtient alors l'expression de I_{pv} pour une cellule :

$$\begin{aligned} I_{pv} &= I_{sc} - I_D - I_{RP} \\ &= I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{pv}}{R_p} - \frac{R_s}{R_p} I_{pv} \end{aligned} \quad (I.6)$$

Une cellule photovoltaïque seule ne peut pas fournir suffisamment de puissance afin d'alimenter une charge ou le réseau électrique. Il convient donc d'associer ces cellules entres elles dans le but de fournir plus de puissance. Une association en série

augmentera la tension de sortie du panneau solaire tandis qu'une association en parallèles augmentera le courant fournit à la charge. Il est alors nécessaire d'introduire deux nouveaux paramètres N_p et N_s représentant respectivement le nombre de cellules en parallèles et en série.

L'expression de I_{pv} déviant :

$$I_{pv} = N_p I_{sc} - N_p I_0 \left(e^{\frac{V_{pv}}{N_s V_T} + \frac{R_s I_{pv}}{N_p V_T} - 1} \right) - \frac{V_{pv}}{R_p} - \frac{R_s}{R_p} I_{pv} \quad (I.7)$$

Avec :

- I_{sc} : Courant de court-circuit d'une cellule;
- R_p : Résistance caractérisant les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structurales du matériau (Ω);
- R_s : Résistance caractérisant les pertes par effets Joule dans le semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule (Ω).

La quantité de rayonnement solaire affecte la production de porteurs de charge dans le module PV, et par la suite, affecte le courant généré.

I_{pv} avec l'influence de la température de la cellule, peut être décrit par l'équation :

$$I_{pv} = I_{sct} - N_p I_{0s} \left(e^{\frac{\frac{V_{pv}}{N_s} + \frac{R_s I_{pv}}{N_p}}{V_T} - 1} \right) - \frac{V_{pv}}{R_p} - \frac{R_s}{R_p} I_{pv} \quad (I.8)$$

Avec :

$$I_{0s} = I_{0r} \frac{T^3}{T_r^3} e^{\frac{qE_{G0}}{\beta k} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right)} - 1 \quad (I.9)$$

Et

$$I_{sct} = [I_{sc} + K_I(T - 298)] \frac{G}{1000} \quad (I.10)$$

- T_R : étant la température de référence (=298.18 K) ;
- E_{G0} : la largeur de bande du silicium (=1.12 eV);
- β : le facteur d'idéalité (=1740) ;
- I_{0s} : le courant de saturation inverse de la cellule (=2.10⁻⁴ A);
- I_{0r} : le courant de saturation de la cellule ;
- G : niveau d'irradiation (W/m²).

I.5. Cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est l'unité de base du système de conversion d'énergie solaire en électricité du type continue directement utilisable ou convertit en alternatif, qui est basée sur le phénomène physique effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice

Lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.6 V, en fonction du matériau semi conducteur utilisé ainsi que de sa température et du vieillissement de la cellule, cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{co}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court circuit es, il est appelé courant de court-circuit (I_{cc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement.

La cellule solaire est une diode de type spécial, de grande surface et de faible épaisseur [3].

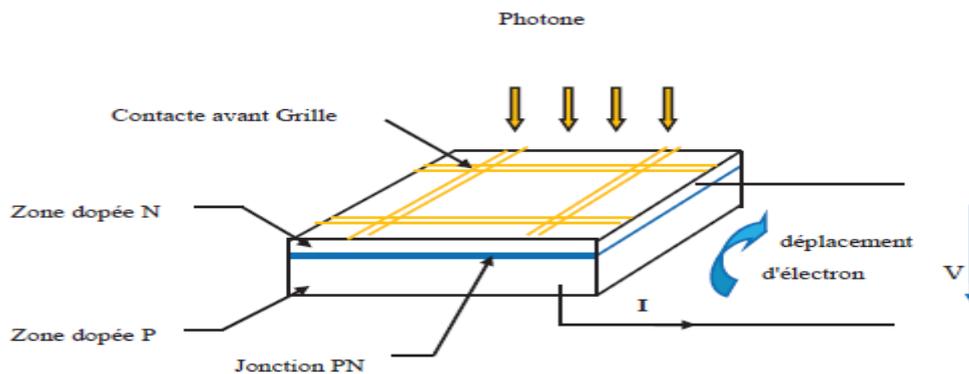


Figure I.4 : Coupe transversale d'une cellule PV typique [3].

La constitution d'un module photovoltaïque de câblage des cellules photovoltaïques : les cellules sont connectées entre elles par un fins ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+)

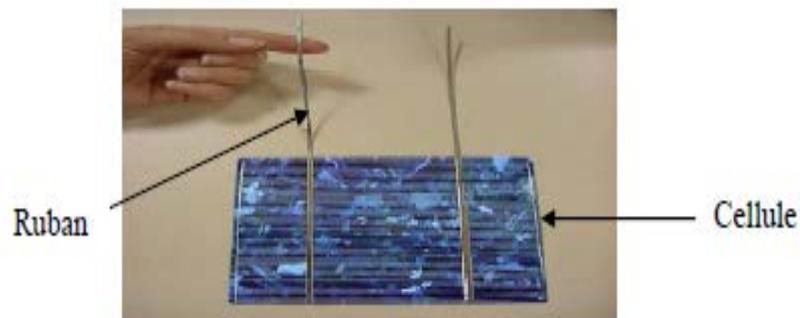


Figure I.5 : Ruban métallique d'une cellule.

- les cellules sont encapsulées sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents (EVA : Ethylène Acétate de Vinyle)
- le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation
- un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière
- la face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR

I.5.1. Caractéristiques idéales de la cellule photovoltaïque

La caractéristique courant-tension (I-V) de la cellule solaire qui présente comment la cellule photovoltaïque réagit à toutes les charges possibles sous des conditions particulières d'ensoleillement et de température, est montrée sur la figure I.4. En observant la caractéristique, on peut voir qu'il y a trois points importants:

- courant de court-circuit: point un (1) correspond au courant maximum que peut fournir la cellule solaire à la tension zéro ;
- Tension à circuit ouvert : Point deux (2) correspond à la tension maximale de la cellule solaire sans charge;
- Circuit en charge : Point trois (3) correspond à la puissance maximale que peut délivrer la cellule solaire.

Sans tenir compte des valeurs de la tension et du courant, la caractéristique (I-V) peut être divisée en trois intervalles différents:

- Intervalle **I** : intervalle où, la cellule solaire, est considérée en tant que source de courant comme le courant est constant alors la tension est variable.
- Intervalle **II** : intervalle où, la cellule solaire, n'est ni considérée comme source de courant ni une source de tension.
- Intervalle **III** : intervalle où, la cellule solaire, est considérée comme une source de tension, comme la tension est constante, le courant est variable.

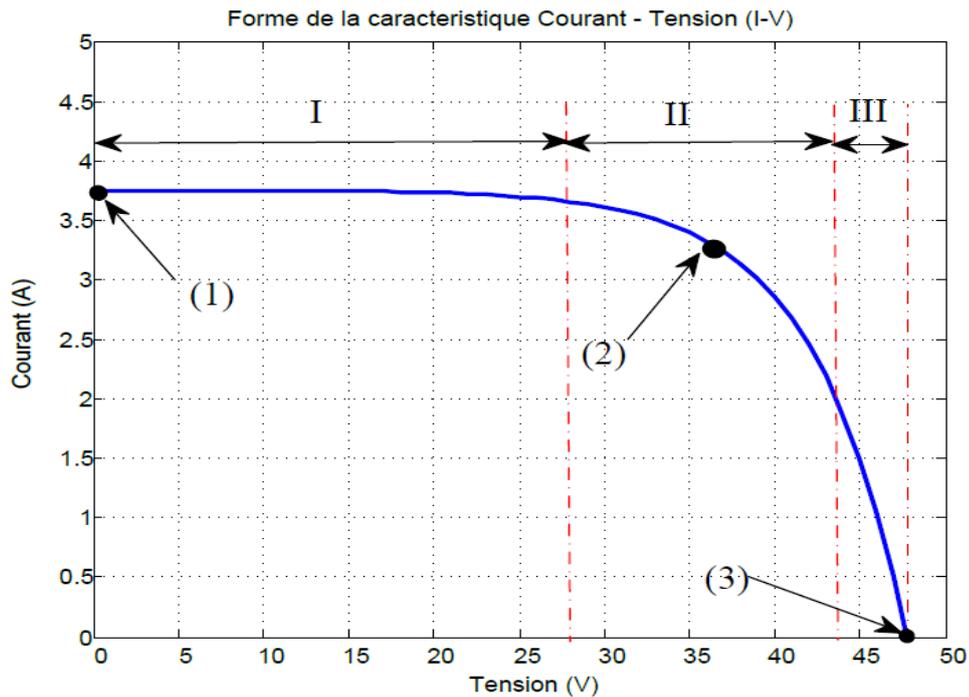


Figure I.6: Caractéristique idéale I-V

I.5.2. 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, figure(I.7) [4].

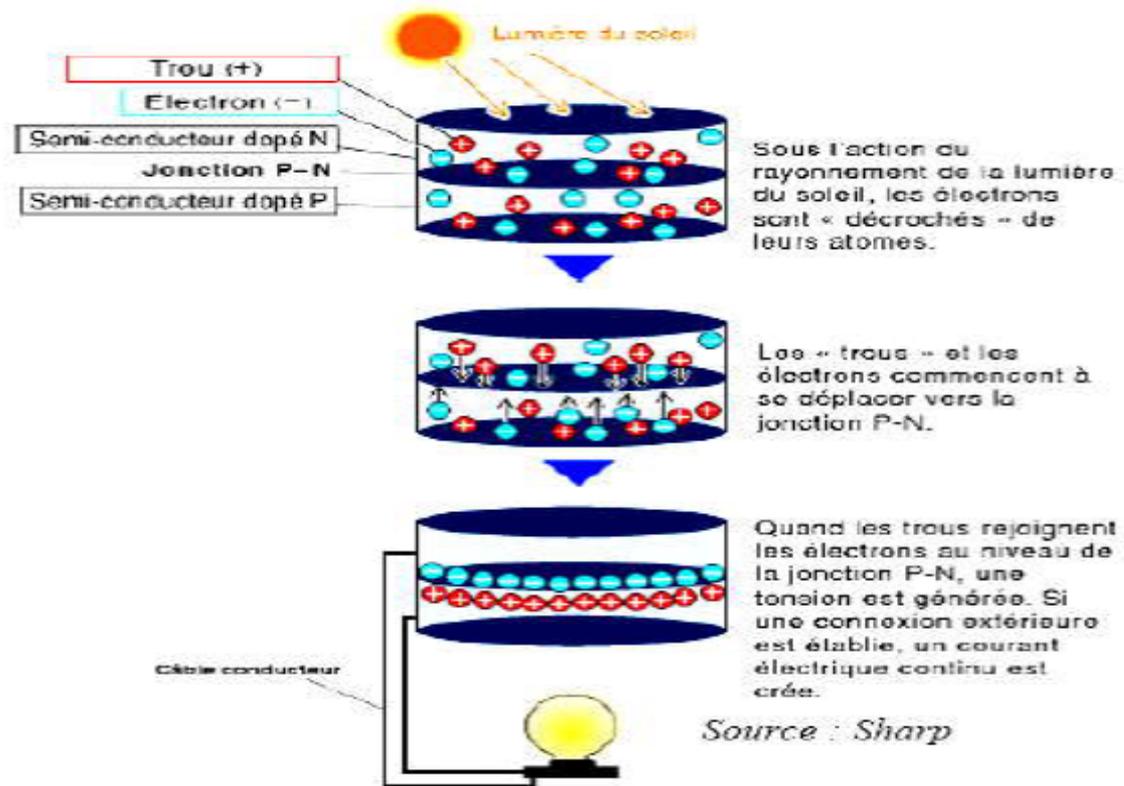


Figure I.7 : Effet photovoltaïque [4].

I.5.3. Différents types des cellules photovoltaïques

Les cellules solaires sont faites de divers matériaux et différentes structures afin de réduire le coût et d'obtenir une efficacité optimale. Il y a divers types de matériaux de la pile solaire, le silicium monocristallin (c-Si) de rendement d'environ 14-18 %, selon la nature cristalline du matériau utilisé et le procédé de fabrication. Le meilleur rendement en laboratoire sur une petite cellule (4 cm²) est de 24,7 % [5,6]. Par contre actuellement le silicium poly-cristallin (poly-Si ou mc-Si) est la technologie la plus répandue sur le marché mondial en raison de son bon rendement 13 -16 % pour des coûts de fabrication maîtrisés [5,6]. Il offre actuellement un bon rapport qualité et prix. L'efficacité d'une cellule en silicium amorphe (a-Si) est environ 7-11 % [7], les meilleurs rendements sont obtenus avec des cellules à triples jonctions [7]. La faible épaisseur (quelques μm) les rend moins chères mais leurs rendements restent assez faibles par rapport au c-Si et au (poly-Si ou mc-Si). Cette technologie acquit la seconde place en termes de vente environ 5 % du marché. Ils s'intègrent bien au bâtiment et ont de bons rendements en lumière diffuse ou dans des environnements « chauds ».

Le tableau suivant représente Différents types des cellules photovoltaïques [8].

Tableau I.1 : types des cellules photovoltaïques.

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principale utilisation
Silicium monocristallin	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> * Très performant * Stabilité de production. * Méthode de production coûteuse et laborieuse. 	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
Silicium polycristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> * Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production, Plus de 50% du marché mondial. 	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	5 à 11% (13% en laboratoire)		<ul style="list-style-type: none"> * 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

I.6. Avantages, inconvénients des systèmes photovoltaïques**I.6.1. Avantages**

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

- D'abord, une haute fiabilité (elle ne comporte pas de pièces mobiles), qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite, le 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 milli-Watt au Méga-Watt.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [2].

I.6.2. Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru.

La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

[2]

[2]

I.7. Rendement d'un Générateur Photovoltaïque (GPV)

Les paramètres caractérisant un module sont les mêmes que ceux de la cellule individuelle. Nous avons vu que l'intensité du rayonnement solaire reçu à la surface de la terre est une valeur dépendante de plusieurs facteurs en particulier de la latitude, de la

saison et des conditions météorologiques. La puissance fournie par un GPV dépend aussi de ces paramètres. Les performances d'un GPV dans la réalité sont inférieures à celles indiquées dans les conditions standards de test STC.

En général, le rendement d'un module PV, fourni par le fabricant, est donné dans les STC par la relation :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{sol}} \quad (I.11)$$

Avec :

P_{max} : Puissance maximale fournie par le module en STC.

S_m : Surface du module

P_{sol} : Puissance du rayonnement solaire

A titre d'exemple, le rendement d'un module composé de cellules au silicium poly-cristallin d'un rendement de 10% vaut approximativement 9.23%. La différence de l'ordre de 0.77% est attribuée aux connexions, encapsulation et à la diode de blocage. En général, le rendement global, défini comme le rapport de l'énergie électrique produite et de l'énergie lumineuse incidente, varie en pratique de 10 à 17% selon le type de cellules.

Notons bien que d'autres paramètres peuvent influencer sur le rendement des modules. Parmi ceux-ci, on peut citer :

- Inclinaison du panneau : en fonction de divers angles d'inclinaison compris entre l'horizontale (0°) et la verticale (90°), le rendement de puissance est maximum lorsque le panneau est tourné vers le ciel (Soleil au Zénith), les rayons du soleil frappent perpendiculairement le panneau.
- Influence de l'ombre : toutes les cellules sont en série, il suffit qu'une seule cellule sur 36 (3% de la surface) soit placée dans l'ombre pour que la baisse de puissance soit considérable.

I.8. L'effet photovoltaïque

Le terme photovoltaïque est formé à partir de deux mots :

- « Phots », qui signifient lumière.
- « Volta », du nom du physicien Alessandro Volta (1745-1827, inventeur de la pile électrique).

Appelé aussi « module photovoltaïque » ou PV, c'est un panneau solaire qui est destiné à récupérer les rayonnements du soleil pour les transformer en électricité (Courant continu DC).

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire [10].

L'ensemble de panneaux photovoltaïques interconnectés forme le générateur. Celui-ci est caractérisé par sa puissance crête exprimée en kilowatt crête (kWc) .

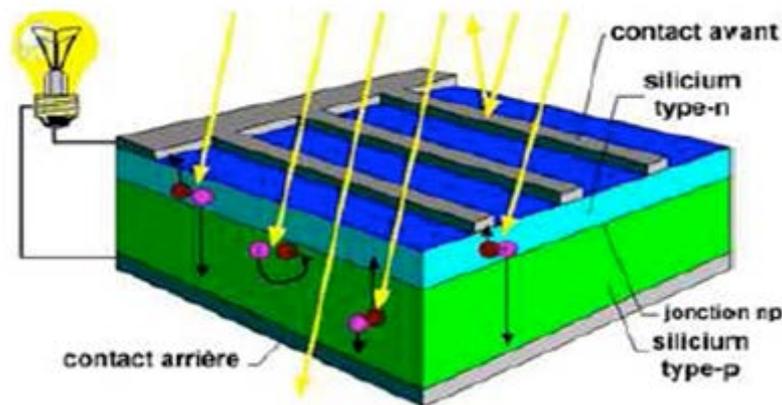


Figure I.8 : Schéma d'une cellule photovoltaïque

I.9. La jonction PN

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs. La cellule photovoltaïque, assimilable à une diode photosensible, permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque. Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur. Ces deux couches sont dopées différemment (pour la couche N, apport d'électrons périphériques; pour la couche P, apport de charges positives). Ces deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur.

L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche antireflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité

de lumière absorbée. Le matériau le plus répandu dans les cellules solaires est le silicium. Il existe plusieurs types de cellules solaires :

- ❖ les cellules monocristallines;
- ❖ les cellules poly-cristallines;
- ❖ les cellules amorphes;
- ❖ les cellules Cd Te (tellure de cadmium), CIS (cuivre-indium-di sélénium).

Le tableau I.2 : résume les différents matériaux existants sur le marché et ceux au stade expérimentale

Génération	Type	Rendement de la cellule en labo (%)	Rendement du module en labo	Rendement du module en condition réel	Niveau de développement
1 ^{ère} Generation	Silicium monocristallin	24.70	22.70	12-20	Production industrial
	Silicium polycristallin	20.30	16.20	11-15	Production industrial
2 ^{ème} Generations	Silicium amorphe	13.40	10.40	5-9	Production industrial
	Silicium cristallin en couche mince		9.40	7	Production industrial
	CIS	19.30	13.50	9-11	Production industrial
	Cd Te	16.70		6-9	Production industrial
3 ^{ème} Generations	Cellule organique	5.70			Au stade de la recherche
	Cellule de Grätzel	11	8.40		Au stade de la recherche

Ce tableau nous a permis de voir également qu'il y a une différence entre le rendement du module au laboratoire et à l'extérieur. On constate donc que les deux technologies principalement utilisées, le silicium monocristallin et poly cristallin, possèdent un rendement et un prix différents. En effet, le monocristallin a un rendement surfacique plus élevé et naturellement un prix plus élevé que le poly cristallin.

I.10. Conclusion

Nous avons d'abord commencé par mettre le point sur l'importance de l'énergie solaire en Algérie. Puis, nous avons abordé l'analyse du générateur photovoltaïque GPV et le principe de génération photovoltaïque. Par la suite, nous avons effectué la modélisation mathématique du GPV qui est essentielle à l'analyse, en se basant sur le modèle de la cellule. Par la suite, nous avons élucidé le principe de conversion dans les systèmes photovoltaïques. Finalement, nous avons procédé à la simulation du GPV sous MATLAB afin de montrer l'effet des changements climatiques sur l'énergie produite par le GPV.

Pour cela, nous nous sommes contentés d'un test pour mettre l'algorithme à l'épreuve dans le cas de conditions climatiques de l'irradiation progressivement variable. Nous avons constaté, la suffisance des résultats de test de l'algorithme P&O.



CHAPITRE II
MODÉLISATION
D'UN SYSTÈME
PHOTOVOLTAÏQUE

UNIVERSITE DE TEBESSA

II.1. Introduction

Un générateur photovoltaïque (GPV) est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert. Pour trouver le modèle du générateur photovoltaïque (GPV), il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques, 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. On rencontre dans la littérature plusieurs modèles du générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant final du générateur photovoltaïque [30].

II.2. Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV)

Le schéma électrique équivalent du générateur photovoltaïque est réduit en un simple schéma bloc figure(II.1)à deux entrées (E : l'éclairement et T : la température de la cellule) et deux sorties (I : le courant et V : la tension).

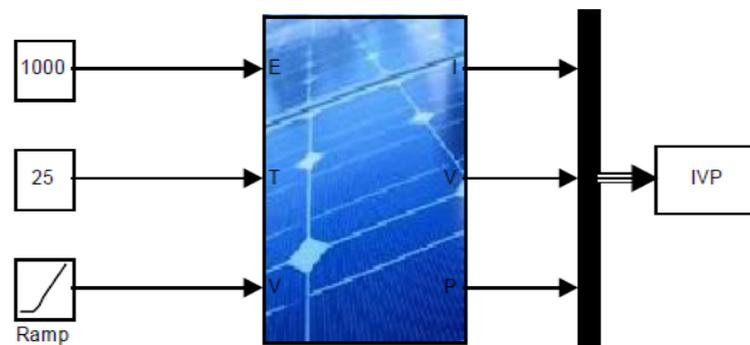


Figure II.1 : Schéma bloc du générateur photovoltaïque.

II.3. Modélisation de la chaîne de production PV

Nous nous intéressons dans cette partie à la chaîne de conversion PV, en vue de l'estimation des a production d'énergie. Cette chaîne est constituée comme indiqué à la figure- (II.2).

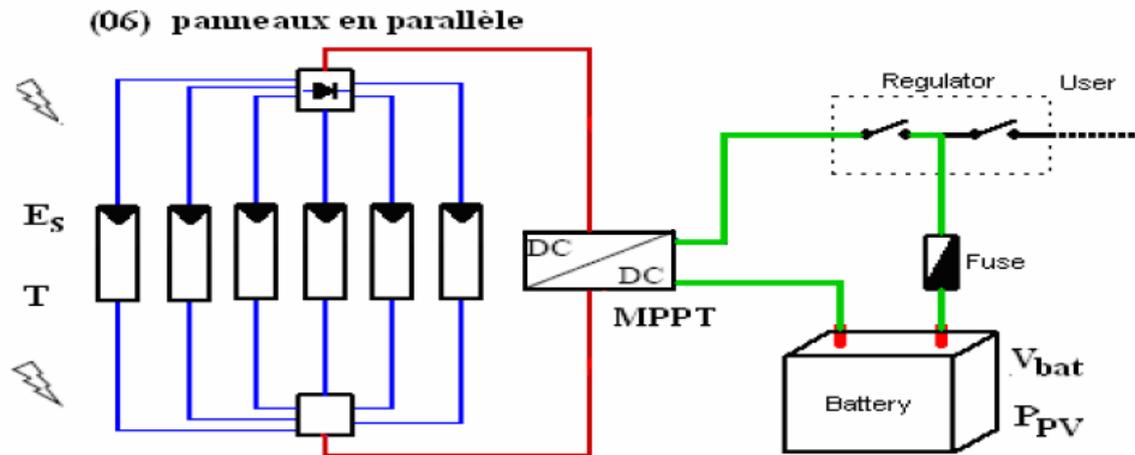


Figure II.2: Chaîne de conversion PV

Les groupes de panneaux débitent dans le bus continu par l'intermédiaire d'un hacheur à commande à puissance maximale MPPT.

L'objectif, est d'obtenir la caractéristique de la puissance fournie au bus continu, en fonction de condition météorologiques et électriques, c'est-à-dire l'éclairement dans le plan des panneaux, leur température ainsi que le niveau de tension du bus continu.

Dans un premier temps, nous étudierons les caractéristiques de cette chaîne sous trois logiciels différents, nous dimensionnerons, analyserons la production avec PV system et Homer et déterminerons les caractéristiques de puissance de chaque groupe avec MATLAB/SIMULINK.

II.3.1. Modèles électriques des panneaux

Nous souhaitons déterminer la puissance maximale que peuvent fournir chacun des deux groupes de panneaux, pour un ensoleillement et une température donnés.

Un travail de comparaison, en termes de simplicité, de temps de calcul et de précision a été effectué en [33].

Les deux premiers modèles permettent plutôt de déterminer les caractéristiques tension /courant à desquelles peut être tirée la puissance maximale que peuvent fournir les groupes de panneaux, pour des conditions météo données. Le troisième modèle nous fournit directement la puissance maximale, théoriquement obtenue grâce au contrôle MPPT, il se distingue largement en termes de rapidité de simulation. En effet, pour un même calcul, il lui faut, d'après [33] une centaine de millisecondes contre plusieurs minutes avec les modèle à une et à deux diodes.

Il a également été constaté que, les modèles sont très bons pour des ensoleillements supérieurs à la centaine de Watts par mètre carré et que les erreurs n'excèdent pas 6 % pour des ensoleillements plus faibles.

L'ensemble se présente comme suit ;

II.3.1. a) Modèle une diode

En nous référant au schéma de la figure (II.3), le courant de la photopile a comme expression ; $i = i_{ph} - i_d - i_r$ (II .1)

Avec:

$$i_{ph} = i_{sc} \left(\frac{E_s}{1000} \right) \quad (II . 2)$$

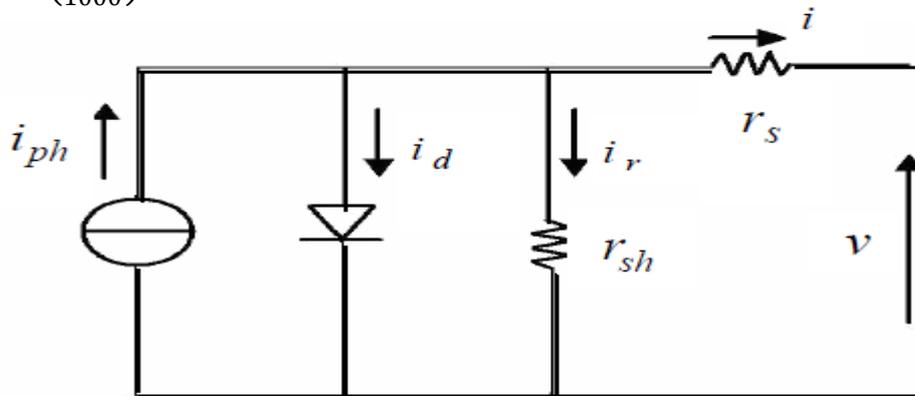


Figure II.3: Schéma équivalent électrique d'une cellule PV

Où :

r_{sh} : la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction ; r_s : la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions ;

i : le courant fourni par la cellule et v la tension à ses bornes ;

i_{ph} : le photo-courant, i_d le courant parcourant la diode et i_r , celui parcourant la résistance shunter.

L'expression (II.2) représente le photo-courant proportionnel à l'éclairement, mais correspond aussi au courant de court-circuit.

Les caractéristiques, courant-tension $i(v)$ et puissance-tension $p(v)$ d'une photopile, données en figure(II.4) sont plus éclairantes.

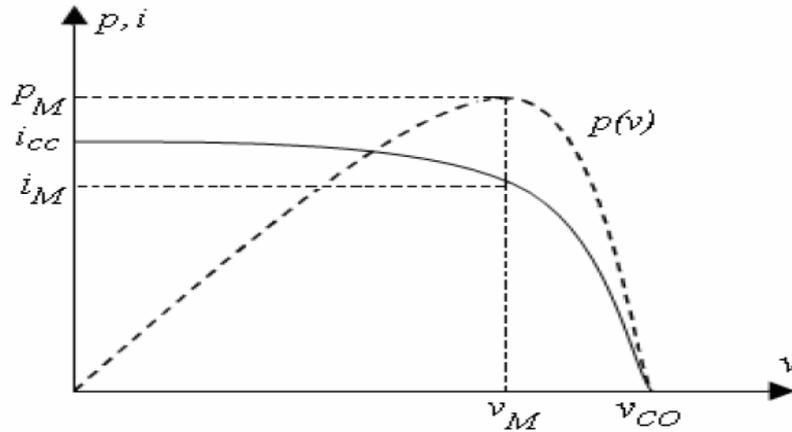


Figure II.4: Caractéristiques, courant-tension $i(v)$ et puissance-tension $p(v)$ d'une photopile

La composante i_d a comme expression celle de (II.3)

$$i_d = i_0 \left(e^{\frac{q(v+r_s i)}{n_j k T_j}} - 1 \right) \quad (II.3)$$

Avec :

$$V_T = \frac{n_j k T_j}{q} \text{ potentiel thermodynamique (25,7 [mV] à 25 [°C]) [34];}$$

i_0 : courant de saturation inverse de la diode ;

q : charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ [C]);

k : est la constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ [J/K]) ;

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

T_j : représente la température de la jonction [K], $T_j = T_c = T$ (nommée avec l'un ou l'autre dans la littérature).

La température des panneaux T_j , est évaluée à partir des données d'ensoleillement E_s et de la température ambiante T_a , par la formule donnée par [33] :

$$T_j = T_a + E_s \frac{(NOCT - 20)}{800} \quad (II.4)$$

NOCT est le « Normal Operating Cella Température », un paramètre fourni par le constructeur des panneaux solaires. Classiquement, nous prenons : NOCT = 43 [°C].

La composante i_r , elle, s'exprime par (II.4) ;

$$i_r = \frac{v + r_s i}{r_{sh}} \quad (II.5)$$

i_r est le courant dérivé par la résistance shunter.

On remplace chaque terme de l'équation (II.1) par son expression. Ainsi, en statique,

Le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction PN à base de silicium peut être décrit par l'équation suivante [35] :

$$i = i_{sc} \left(\frac{E_s}{1000} \right) - i_0 \left(e^{\frac{q(v+r_s i)}{n_j K T_j}} - 1 \right) - \frac{v+r_s i}{r_{sh}} \quad (\text{II.6})$$

• **Paramètres externes** [31]

Ce sont des paramètres pouvant être déterminés à partir des courbes $i-v$ ou de l'équation caractéristique (II.5). Les plus usuels sont les suivants :

- **Courant de court-circuit** i_{cc} :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (r_s nulle, r_{sh} infini) ce courant se confond avec le photocourant i_{ph} .

Dans le cas contraire, en annulant la tension v dans l'équation (II.5), on obtient :

$$i_{cc} = i_{ph} - i_0 \left(e^{\frac{r_s \cdot i_{cc}}{v_T}} - 1 \right) - \frac{r_s \cdot i_{cc}}{r_{sh}} \quad (\text{II.7})$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$$i_0 \left(e^{\frac{r_s \cdot i_{cc}}{v_T}} - 1 \right) \text{ devant } i_{ph}.$$

L'expression approchée du courant de court-circuit est alors celle donnée par l'expression (II.7):

$$i_{cc} \cong \frac{i_{ph}}{1 + \frac{r_s}{r_{sh}}} \quad (\text{II.8})$$

Pour le silicium, $i_{cc} = (30 \text{ mA/cm}^2)$, sous un éclairement maximal.

- **Tension de circuit ouvert** v_{co} :

C'est la tension pour laquelle le courant débité par le GPV est nul (la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur PV). Son expression est déduite de l'expression suivante :

$$0 = i_{ph} - i_0 \left(e^{\frac{v_{co}}{v_T}} - 1 \right) - \frac{v_{co}}{r_{sh}} \quad (\text{II.9})$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à

$$v_{co} = v_T \ln \left(\frac{i_{ph}}{i_0} + 1 \right) \quad (\text{II.10})$$

Pour une photopile au silicium, cette tension vaut 0,55 à 0,6 [V].

- **Puissance optimale** p_M **et facteur de forme** FF :

- ❖ La puissance utile maximale $p_M = v_M i_{MS}$ obtient en optimisant le produit courant tension, soit :

$$\frac{i_M}{v_M} = - \left(\frac{di}{dv} \right) M \quad (\text{II.11})$$

- ❖ Quant au facteur de forme, dit également, facteur de courbe ou de remplissage (fill factor), il est défini par l'expression (II.10) suivante ;

$$FF = \frac{v_M i_M}{v_{co} i_{cc}} \quad (II.12)$$

Ce facteur montre la déviation de la courbe ($i-v$) par rapport à un rectangle (de longueur v_{co} et de largeur i_{cc}) correspondant à la photopile idéale.

Les valeurs de i_M et v_{MS} s'obtiennent à partir des équations (II.5) et (II.9). Pour cela, on distingue deux cas :

- $r_{sh} \rightarrow \infty \Rightarrow$ la dérivation mène à la résolution de l'équation non linéaire en i_M par une méthode numérique, et permet par suite le calcul de v_M .
- $r_s =$ valeur finie \Rightarrow la dérivation mène à la résolution d'une équation non linéaire en v_M , en utilisant encore une méthode numérique.

-Le rendement :

La puissance $p = vi$ est nulle lors d'un court-circuit ainsi qu'en circuit ouvert. Elle passe par un maximum lorsqu'on parcourt la caractéristique $i-v$. Ce maximum peut bien être déterminé en portant sur le même graphique la caractéristique $i-v$ et les hyperboles de puissance constante. Le point de fonctionnement optimal correspond au point de tangence des deux courbes, tel que le montre la figure (II.5).

On exprime le rendement par :

$$\eta = \frac{P_M}{P_0} \quad (II.13)$$

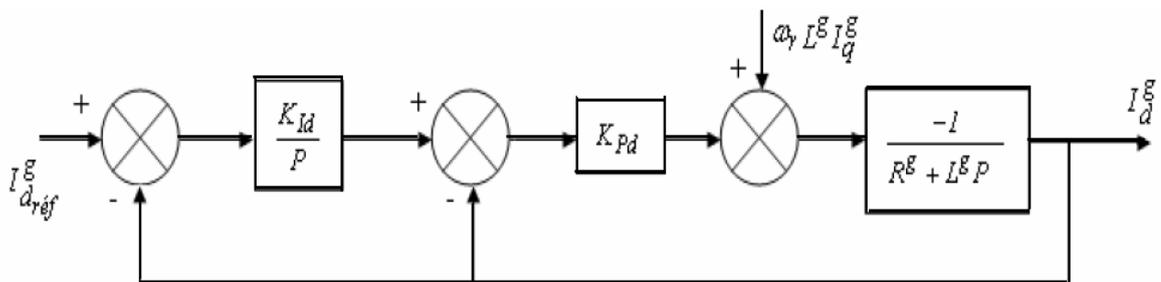


Figure II.5 : Boucle de régulation du courant I_d^g

p_0 est la puissance incidente, égale au produit de l'éclairement et de la surface totale de la photopile, la droite passant par l'origine et le point de puissance maximale a une pente qui correspond à la charge optimale de la photopile, comme le montre toujours la même figure.

Ce qu'a été modélisé jusque là, correspond bien au modèle le plus classique de la littérature [33, 36, 37, 38].

Chaque groupe de panneau est une association série/ parallèle de $n_s \cdot n_p$ cellules élémentaires ; n_s étant le nombre de cellules en série sur une branche et n_p le nombre de branches en parallèle. Si toutes les cellules sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, nous obtenons le GPV de la figure (II.6);

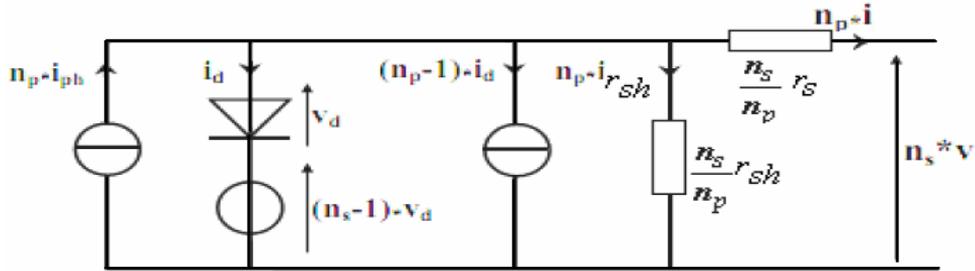


Figure II.6: Schéma électrique équivalent d'un groupe de panneaux, modèle 1 diode

Et nous adoptons dans ce qui suit, les notations suivantes :

$$I_{ph} = n_p i_p V_d = n_s v_s \tag{II.14}$$

$$\begin{aligned} I_G &= n_p i & V_G &= n_s v \\ I_d &= n_p i_d & ; V_s &= \frac{n_s}{n_p} r_s \end{aligned}$$

$$I_d = n_p i_r R_{sh} = \frac{n_s}{n_p} r_{sh} \tag{II.15}$$

Ce modèle comporte deux variables d'entrée ; éclairage dans le plan des panneaux [W/m^2] et température de jonctions des cellules [$^{\circ}C$] et deux variables de sortie I_G et V_G . Nous avons alors l'équation caractéristique pour un groupe de panneaux PV déduite du schéma électrique équivalent de la figure(II.6);

$$I_G = I_{ph} - I_d - I_r \tag{II.16}$$

Nous obtenons au final, une fonction implicite de la forme $I_G = f(I_G, V_G, E_s, T_j)$, contenant sept (07) paramètres à déterminer.

Mais ils en existent, en effet, d'autres modèles, à savoir ;

II.3.1. b) Modèle deux diodes

Les mesures réelles sur de vraies cellules dans des conditions de fonctionnement diverses montrent le besoin de modèles plus sophistiqués. La résistance interne du

dispositif doit, particulièrement, être prise en compte. Ceci mène au "modèle de deux diodes" largement répandu.

Nous avons cette fois-ci, deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN [39]. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, en surface du matériau d'une part, et dans le volume du matériau de l'autre part.

Le modèle deux diodes d'une seule cellule PV, est représenté sur la figure(II.7), ci-dessous [40, 41].

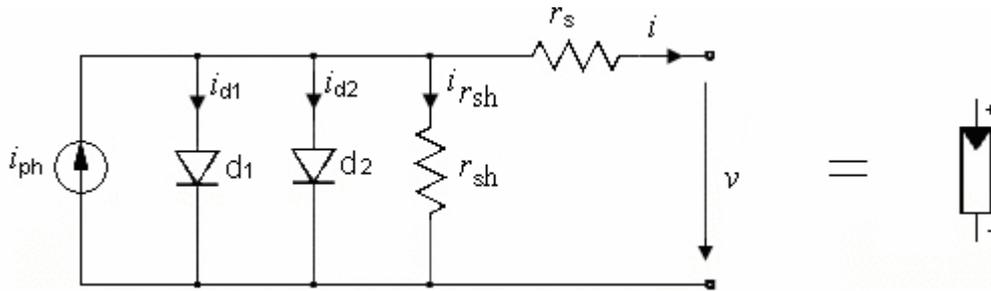


Figure II.7: Modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque et son symbole.

Ce modèle fait l'objet de notre travail vu qu'il est relativement proche du modèle réel au même temps qu'il est d'une mise en œuvre assez simple.

La figure(II.6)est une représentation du modèle mathématique pour la caractéristique courant tension donnée par [42] ;

$$i = i_{ph} - i_{s1} \left[e^{\frac{q(v+i.r_s)}{n_1 k T}} - 1 \right] - i_{s2} \left[e^{\frac{q(v+i.r_s)}{n_2 k T}} - 1 \right] - \frac{v+i.r_s}{r_{sh}} \quad (II.17)$$

i_{s1} et i_{s2} sont les courants de saturation des diodes, n_1 et n_2 leur facteurs de pureté.

Le photo-courant $i_{ph,max}$ est atteint à une insolation maximum, souvent on a

$$(i_{ph} = S_i \cdot i_{ph,max}) \text{ avec :}$$

S_i : pourcentage d'insolation.

Il est évident, d'après l'équation (II.14), que la caractéristique courant-tension dépend fortement de l'insolation et de la température.

La dépendance de la température est encore amplifiée par les propriétés du photo courant i_{ph} et les courants de saturation inverse des diodes qui sont donnés par HANNES [41]:

$$I_{ph}(T) = i_{ph} \Big|_{(T=298.K)} [1 + (T - 298 . K) . (5 . 10^{-4})] \quad (II.18)$$

$$I_{d1} = k_1 T^3 e^{-\frac{E_g}{k T}} \quad (II.19)$$

$$I_{d2} = k_2 T^{\frac{5}{3}} e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (II.20)$$

$$K_1 = 1,2 [A / cm^2 \cdot K^3] \quad (II.21)$$

$$K_2 = 2,9 \cdot 10^5 [A / cm^2 \cdot K^{5/2}] \quad (II.22)$$

Végétant la bande d'énergie du semi-conducteur.

Mais dans les systèmes d'énergie photovoltaïques, les cellules sont combinées dans des rangées de pile solaire reliant un certain nombre de cellules en série.

La considération du modèle du circuit équivalent ci-dessus, mène à l'équation régissant le fonctionnement d'une rangée de cellules photovoltaïques (généralement appelée un panneau solaire ou une rangée solaire) avec n_s cellules photovoltaïques raccordées en série [41].

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[e^{\frac{q(V+n_s I R_s)}{n_s n_1 kT}} - 1 \right] - I_{s2} \left[e^{\frac{q(V+n_s I R_s)}{n_s n_2 kT}} - 1 \right] - \frac{V + n_s I R_s}{n_s R_{sh}} \quad (II.23)$$

Ces panneaux peuvent encore être arrangés en série ou en parallèle jusqu'à aboutir à la tension et au courant, désirés pour le système.

La figure(II.8) donne, relativement au cas de figure(II.6)le schéma électrique du « Modèle deux diodes » pour un groupe de panneaux;

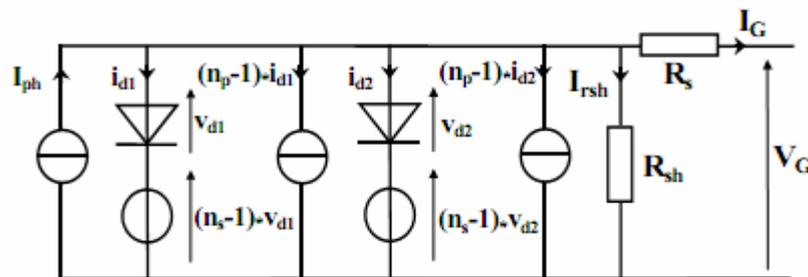


Figure II.8: Schéma électrique du « Modèle deux diodes » pour un groupe de panneaux

Nous avons :

$$I_G = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_r \quad (II.24)$$

Et l'équation finale comporte huit (08) paramètres à déterminer.

II.3.1. c) Modèle polynomial

C'est un modèle simplifié, avec seulement trois (03) paramètres constants à déterminer, et une équation simple à résoudre.

L'identification des paramètres a été effectuée par algorithme génétique binaire dans [43], à partir de relevés expérimentaux sur site d'expérimentation.

II.4 .Etude des pertes au niveau d'un module PV [32, 44]

Une synthèse graphique des différentes pertes au sein d'un module PV est illustrée sur la figure (II.9);

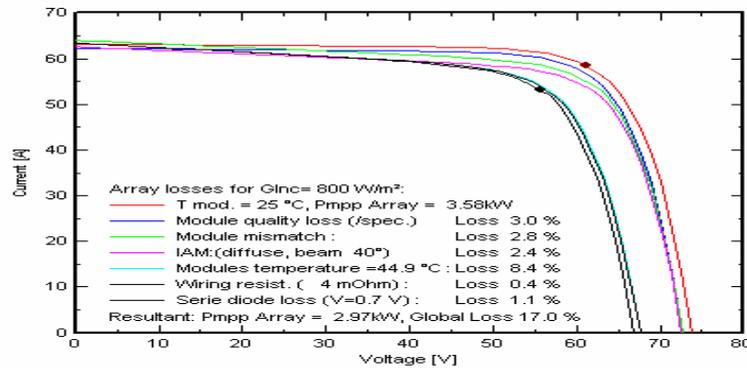


Figure II .9 : Synthèse graphique des différentes pertes au sein d'un module PV

Où on distingue :

- Les pertes ohmiques :

Elles correspondent aux pertes en conditions standard. En effet celles-ci évoluent proportionnellement avec le carré du courant de sortie d'un module. Par conséquent, les pertes moyennes de câblage s'avèrent plus faibles durant une année entière.

- Pertes thermiques :

Le comportement thermique du champ PV qui influence fortement ses performances électriques est déterminé par une balance thermique entre la température ambiante et celle de la cellule sous l'effet de l'irradiante incidente ;

$$k_t(T_c - T_a) = \alpha_T E_s (1 - \eta_c) \tag{II.24}$$

Avec :

α_T : coefficient d'absorption de l'irradiation solaire (environ 0.9) ;

η_c : est l'énergie extraite d'une cellule ;

T_c et T_a : sont respectivement la température de la cellule, et la température ambiante, données en [°C].

Ce même comportement thermique est caractérisé par un facteur de pertes thermiques désigné par k_t , incluant une composant constant k_c et un facteur proportionnel à la vitesse du vent k_{Vw} ; $k_t = k_c + k_{Vw} \cdot V_w$ (k_c en [W/m² K], V_w est la vitesse du vent, en [m/s]).

Ces facteurs dépendent des modes de poses des panneaux PV (ombrage, façade, toiture,...). Si la mesure de la vitesse du vent n'est pas disponible ou si elle n'est pas fiable (ce qui est habituellement le cas dans PV system), nous pouvons supposer une vitesse du vent constante, il est vérifié, d'après plusieurs mesures sur diverses installations que ces paramètres donnaient d'excellents résultats.

Pour les installations intégrées (comme façades ou toitures), le facteur k_c utilisé seul devrait être rapporté aux valeurs entre 15 à 20 [W/m²K] selon les conditions de ventilation.

Certains utilisateurs et catalogues de quelques modules PV – utilisent souvent le coefficient NOCT ("Nominal Operating Collectera Température") qui est la température atteinte par les modules PV sous les conditions du fonctionnement standard.

Et l'utilisateur a à définir où les facteurs k_t ou le NOCT.

- Pertes de qualité du module :

Il est bien connu que la plupart des modules série ne présentent pas les mêmes spécifications nominales du constructeur.

Jusqu'à maintenant, cela demeure l'une des plus grandes incertitudes lors de l'évaluation des performances d'un système PV.

La situation avance vers plus de clarifications. Effectivement, les modules série sont actuellement commercialisés avec une certaine tolérance, leur puissance se trouve en dessous de celle spécifiée par le constructeur, mais comprise dans la fourchette tolérée.

Cet effet est pris en compte en PV system par la définition d'un facteur de pertes, qui n'est autre que la perte d'énergie en MPPT.

Pour un fonctionnement à tension fixe (batteries, réseau continu), ce facteur est supposé le même.

- Pertes de disparité du module

Ces pertes sont relatives au fait que les modules d'un même champ ne présentent pas rigoureusement les mêmes caractéristiques I/V. il s'agit d'une dispersion aléatoire des caractéristiques du courant de court-circuit de chaque module.

Ce facteur est différent pour un fonctionnement à un MPP ou à tension fixe, et maintenu constant le long du temps de simulation.

- Pertes d'incidence IAM (Incidence Angle Modifier)

L'effet d'incidence IAM correspond à l'affaiblissement de l'irradiation atteignant la surface de la cellule PV, avec une irradiation sous incidence normale.

En principe, ces pertes obéissent aux lois de Fresnel concernant la transmission et la réflexion sur les couches protectrices et surfaces des cellules. En pratique, ces pertes sont souvent approchées en utilisant une par métrisation nommée "ASHRAE" dépendant d'un seul paramètre b_o .

$$F_{IAM} = 1 - b_o(1/\cos \theta_i - 1) \quad (\text{II.25})$$

θ_i : Étant l'angle d'incidence sur un plan.

Pour les modules PV, l'interface inférieure, en contact avec la cellule, présente un important indice de réfraction, des mesures effectuées sur des modules à structure cristalline indiquent une valeur de $b_o=0,05$.

La figure (II.10) suivante en est un profil ;

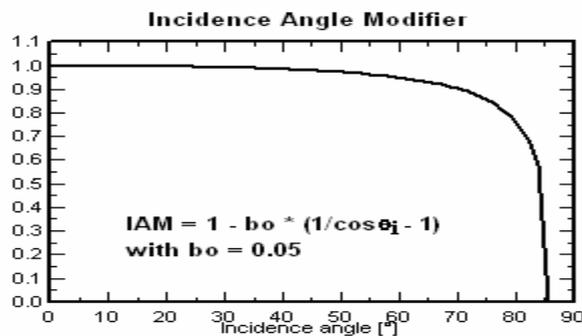


Figure II.10: Profil de l'angle d'incidence

II.5. Influence de l'éclairement et la température [29]

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu un éclairement constant pour différentes températures figure (II .11). La courbe caractéristique va présenter des allures différentes selon la température. La tension à vide va diminuer avec la température, à l'inverse du courant de court-circuit. La variation de tension à vide est pratiquement compensée par la variation du courant de court-circuit, et la puissance nominale fournie par une cellule va donc varier très légèrement avec la température de jonction.

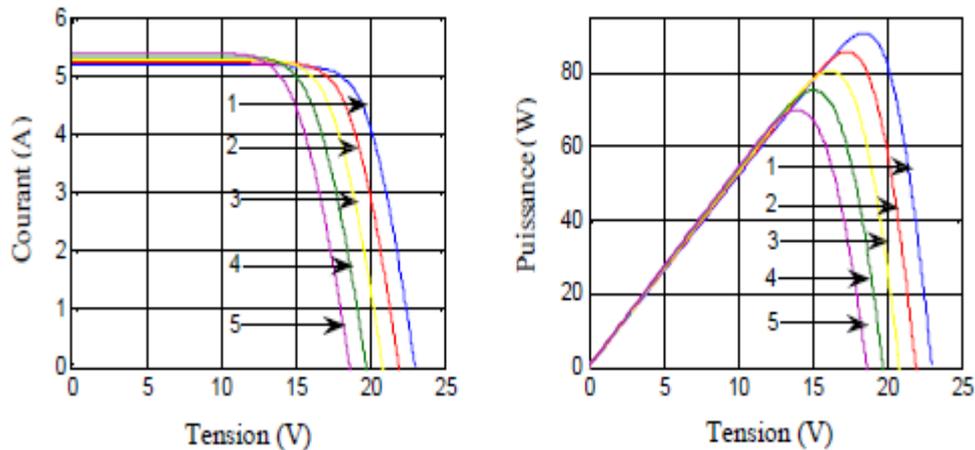


Figure II-11 : Influence de la température sur la caractéristique I(V) et P(V) à $E=1000W/m^2$
 (1): $0\text{ }^\circ\text{C}$; (2): $15\text{ }^\circ\text{C}$; (3) : $30\text{ }^\circ\text{C}$; (4) : $45\text{ }^\circ\text{C}$; (5) : $60\text{ }^\circ\text{C}$.

Par contre, lorsque nous avons maintenu une température constante à différents éclairagements figure (II-12), on remarque que l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert, car le courant de court « circuit (I_{sc}) est une fonction linéaire de l'éclairement et la tension du circuit ouvert (V_{oc})est une fonction logarithmique.

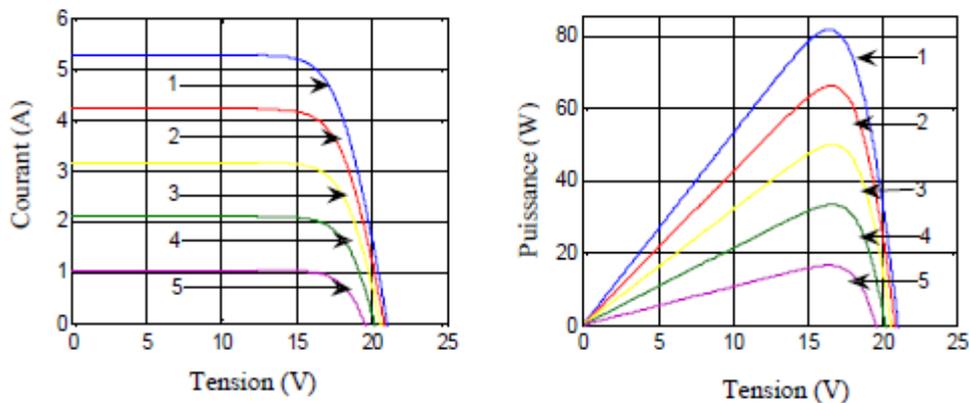


Figure II.12 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) et P(V) à $T=25^\circ\text{C}$
 (1) : $1000W/m^2$; (2) : $800W/m^2$; (3) : $600W/m^2$; (4) : $400W/m^2$; (5) : $200W/m^2$

La variation de la température et de l'éclairement en même temps, nous permet de conclure Qu'il y a une petite variation de la tension du circuit-ouvert V_{OC} qui n'est pas remarquable, par contre il y a une grande variation du courant I_{SC} comme le montre la figure (II.13).

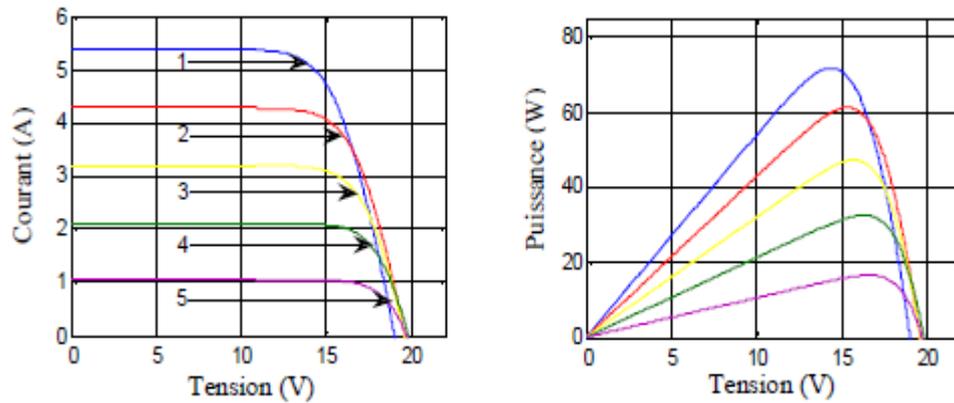


Figure II-13 : Influence simultanée de l' éclairement et la température sur la caractéristique I(V) (1): 1000W/m^2 , 55°C ; (2) : 800W/m^2 , 44°C ; (3) : 600W/m^2 , 40°C ; (4) : 400W/m^2 , 32°C ; (5) : 200W/m^2 , 25°C .

II.6. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'une cellule photovoltaïque et les caractéristiques du générateur photovoltaïque GPV avec ses performances. Ainsi, l'influence de quelques paramètres sur ses caractéristiques. Pour le fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque, il est nécessaire d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge ou un autre système que nous allons étudier dans le chapitre suivant [30].



CHAPITRE III

ETUDES ET MODÉLISATION CONVERTISSEURS ÉLECTRIQUES

UNIVERSITE DE TEBESSA

III.1. Introduction

Dans un système de conversion des énergies renouvelables, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant continu en courant alternatif et inversement. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les énergies renouvelables: les redresseurs, les onduleurs, les hacheurs. L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible...) [12].

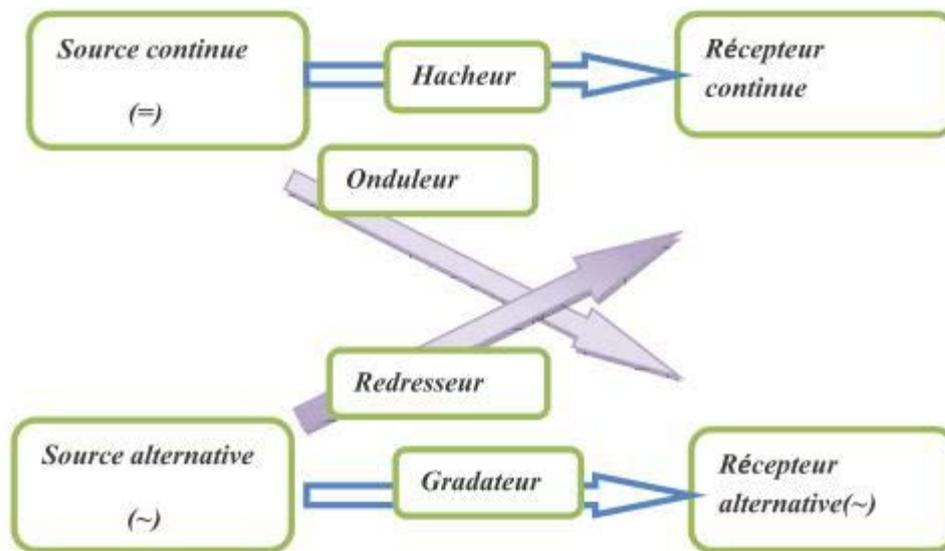


Figure III.1 : les différents types de convertisseurs statiques.

Dans ce chapitre nous présentons les différents types des convertisseurs statiques qu'on peut utiliser dans le système photovoltaïque. Premièrement on commence par les convertisseurs (DC-DC) et sont différents types, et on termine par les convertisseurs (DCAC).

On présente dans ce chapitre, quelques méthodes MPPT basées sur réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrément de l'inductance et méthode de perturbation et observation.

III.2. Convertisseurs DC/AC

III.2.1. Principes de la conversion DC/AC d'un onduleur photovoltaïque

Il a pour rôle de convertir le courant continu des panneaux photovoltaïques en courant alternatif identique à celui de Sonelgaz (réseau triphasé, 220V et 50Hz). C'est un appareil électronique de haute technologie conçu pour répondre à toutes les

exigences du réseau, comme la qualité, la sécurité et la fiabilité, et il permet un contrôle parfait du fonctionnement.

Il se présente sous la forme d'un boîtier métallique de petite dimension, muni d'un radiateur et doit être placé sur un support vertical (mur par exemple). Il n'émet aucun parasite électromagnétique et ne génère quasiment aucun bruit. Afin de limiter les pertes, il doit être placé le plus près possible des panneaux photovoltaïques.

III.2.2. Types d'onduleurs

Les onduleurs utilisés dans les installations solaires autonomes sont caractérisés par leur technologie et par la forme d'onde qu'ils génèrent [19] :

III.2.2.1. Onduleur à onde sinusoïdale

Les onduleurs modernes sinusoïdaux pour les installations indépendantes utilisent les mêmes techniques que celles développées pour la liaison au réseau. Les circuits sont plus simples à mettre en œuvre, les protections et synchronisation au réseau n'existant pas. On trouve ainsi sur le marché de petits onduleurs (100 à 500 W) utilisant la technique HF intermédiaire sans filtre de sortie ; le signal haute fréquence toujours présent peut ainsi éventuellement perturber la charge. Les appareils plus puissants utilisant cette technique ont en général un filtre éliminant les harmoniques HF.

III.2.2.2. Onduleur à onde carrée

C'est la technique la plus simple pour générer une onde alternative. Dans ce cas, on commande deux transistors dans le primaire d'un transformateur par un oscillateur de 50 Hz. S'il est parfaitement carré, le signal généré va produire une somme d'harmoniques impaires qui ne pourront souvent pas alimenter sans problèmes des charges inductives.

Les appareils utilisant cette technique n'ont pas de réglage de la tension de sortie. Celle-ci va donc varier avec la charge et la tension d'entrée.

III.2.2.3. Onduleur à onde pseudo-sinusoïdale

Ce sont en général les appareils les plus performants en termes de rendement. La technique utilisée part d'un oscillateur à modulation de largeur d'impulsion à 50 Hz commandant deux transistors dans le primaire d'un transformateur. Le signal produit est un double carré (positif et négatif) avec passages par zéro : le passage par zéro à chaque commutation réduit les harmoniques par rapport au signal carré. Le carré de largeur variable en fonction de la charge et de la tension d'entrée permet un réglage précis de la tension de sortie.

III.3. Les Hacheurs

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs.

Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance. Trois topologies de base de circuit de conversion seront décrits dans les paragraphes suivants : ($DC-DC$)

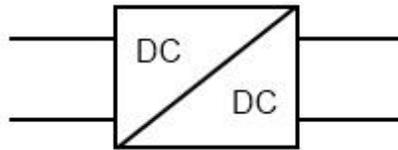


Figure III.2 : Symbole d'un convertisseur DC-DC

III.3.1. Type des hacheurs

Nous traitons dans cette partie des convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela implique que la fluence d'énergie ne peut se faire, au sein du convertisseur, que dans un seul sens. Cela revient également à considérer:

- des sources de tension non réversibles, unidirectionnelles en courant.
- des sources de courant non réversibles, unidirectionnelles en tension.

Cela conduit à l'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Dans ce cadre, on distingue deux familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs).

- hacheur abaisseur (ou buck).
- hacheur élévateur (ou boost) [18].

III.3.1.1)- Hacheur Buck :

C'est un convertisseur direct DC-DC. Le convertisseur buck dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur dévolteur ou hacheur série. La

source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant.

L'interrupteur K figure (III.3) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [18].

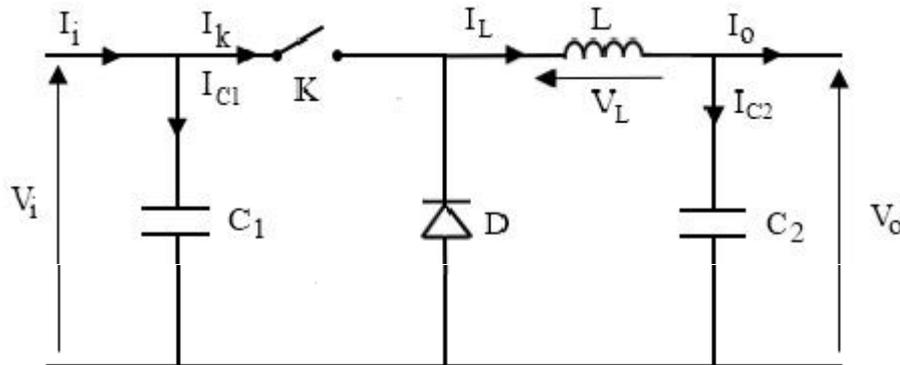


Figure III.3 : Schéma électrique d'un hacheur buck.

III.3.1.1.a)-Fonctionnement

On note

α : le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur.

T_e : étant la période des impulsions.

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , la tension appliquée aux bornes de la diode. L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f_e = \frac{1}{T_e}$.

La source V_i fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps $t \in [\alpha T_e, T_e]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle [18].

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la figure (III.4) sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle [18].

$$V_0 = \alpha \cdot V_i \quad (\text{III. 1})$$

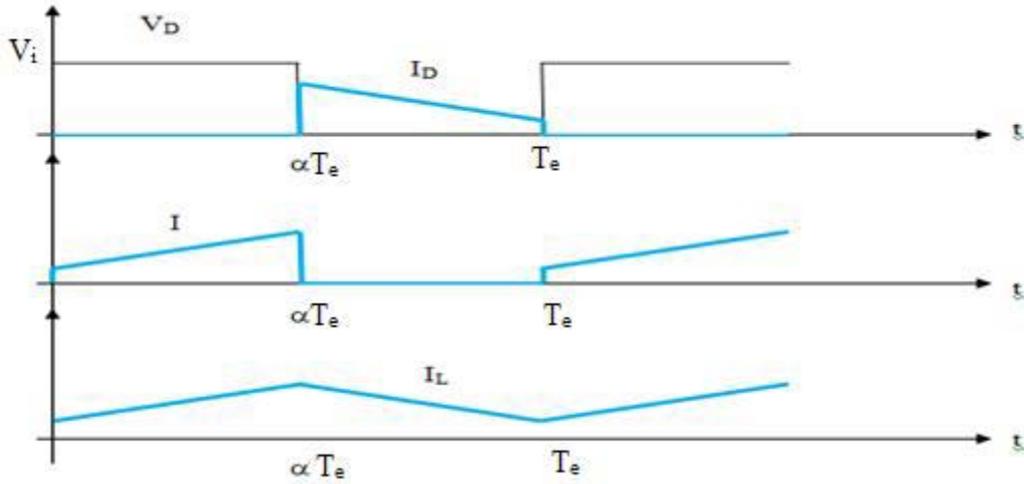


Figure III.4 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck

III.3.1.1.b) Modèle mathématique équivalent

Pour savoir le comportement réel nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (III.5) montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que la figure (III.5) représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant $(1 - \alpha)T_e$ [18].

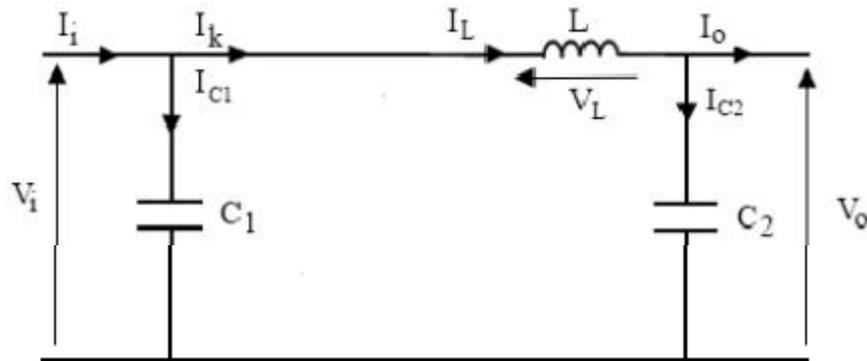


Figure III.5 : Schéma électrique d'un hacheur buck fermé

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations suivantes:

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \tag{III.2}$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = I_i(t) - I_o(t) \tag{III.3}$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \tag{III.4}$$

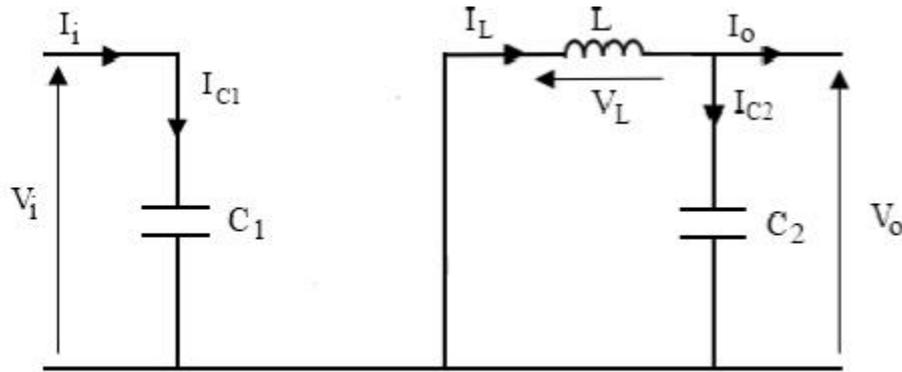


Figure III.6 : Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert.

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = I_i(t) \quad (III.5)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \quad (III.6)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = -V_o(t) \quad (III.7)$$

III.3.1.2)- Hacheur boost

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [18]. Connue aussi sous le nom de «boost» ou hacheur parallèle; son schéma de principe de base est celui de la figure (II.7).

Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [14].

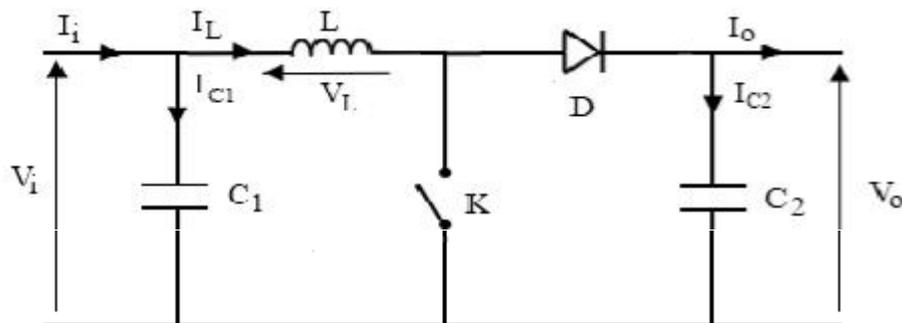


Figure III.7 : Schéma électrique d'un hacheur boost.

III.3.1.2.a)- Fonctionnement

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée, le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps, l'interrupteur

s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [18].

$$V_0 (1 - \alpha) = V_i \quad (III.8)$$

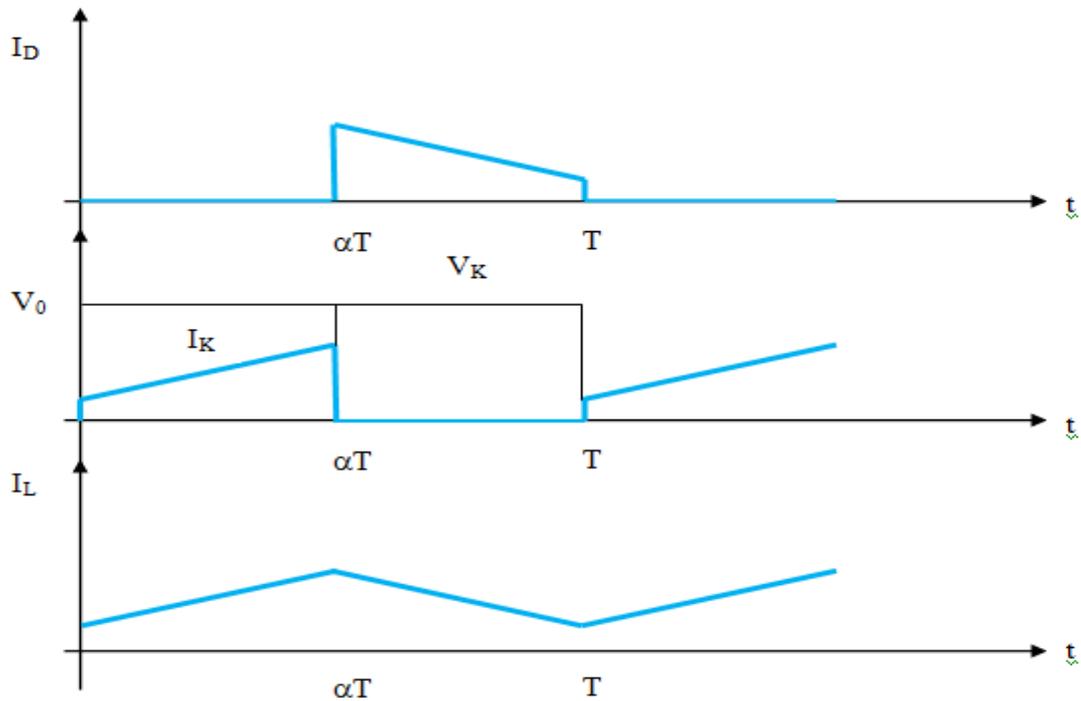


Figure III.8 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.

III.3.1.2.b)- Modèle mathématique équivalent

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la figure (III.9) présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c-à-d d'entre $[0, \alpha T_e]$ [18].

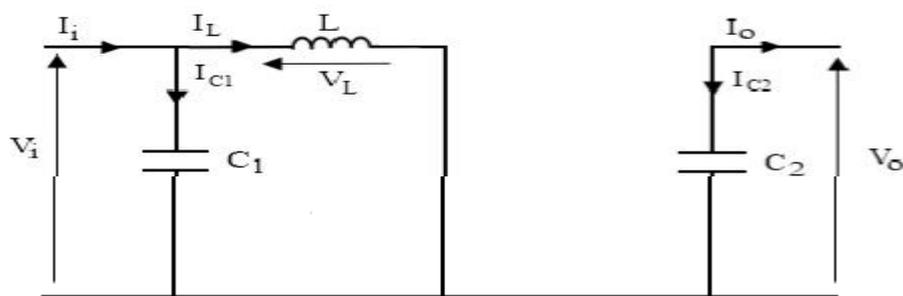


Figure III.9 : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.

Comme pour le circuit buck, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donnent les calculs suivantes :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (III.9)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -I_o(t) \quad (III.10)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (III.11)$$

L'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant:

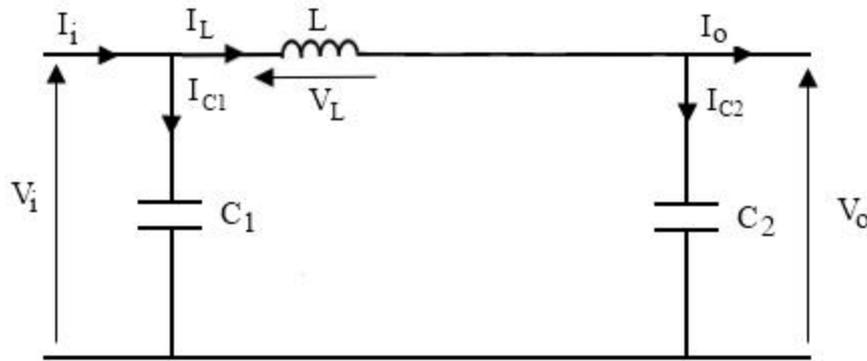


Figure III.10 : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (III.12)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \quad (III.13)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \quad (III.14)$$

III.3.1.3)- Le convertisseur Buck-Boost

La troisième topologie de base de ce convertisseur est donnée par la Figure (III.6). Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée.

Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur tourne sur la position (off), la tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode. Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée comme suit[17]:

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} \times V_i \quad (III.15)$$

Le circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur. et les caractéristique du courant et de la tension de charge sont données par la Figure (III.6).

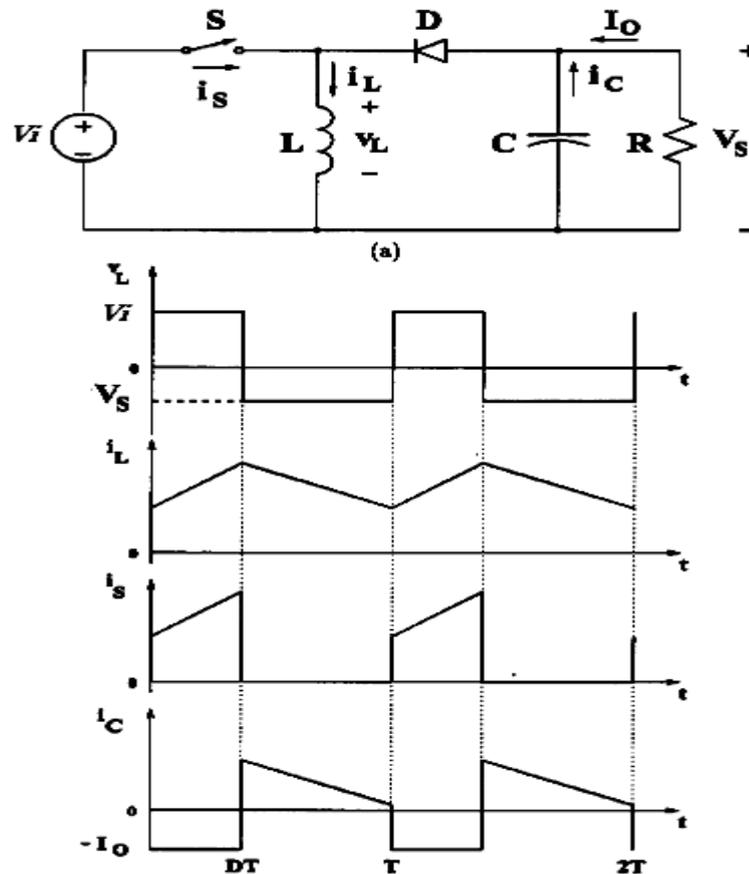


Figure III.11 : Caractéristiques de la tension et des courants de la charge, et le circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur

III.4. Les onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande [15].

III.4.1. Principe de fonctionnement d'un onduleur

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui même sa fréquence et sa forme d'onde .Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion [11].

- Onduleur Monophasé.
- Onduleur Triphasé.

III.4.2 Onduleur Monophasé

Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours. Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie :

- Onduleur monophasé en demi-point.
- Onduleur monophasé en pont (Pont H) [11].

III.4.3 Onduleur triphasé :

Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grande puissance. La structure de tel convertisseur se fait par l'association, en parallèle, de trois onduleurs monophasés en demi pont (ou en pont) donnant trois tensions de sortie déphasées de 120° degrés, l'une par rapport à l'autre.

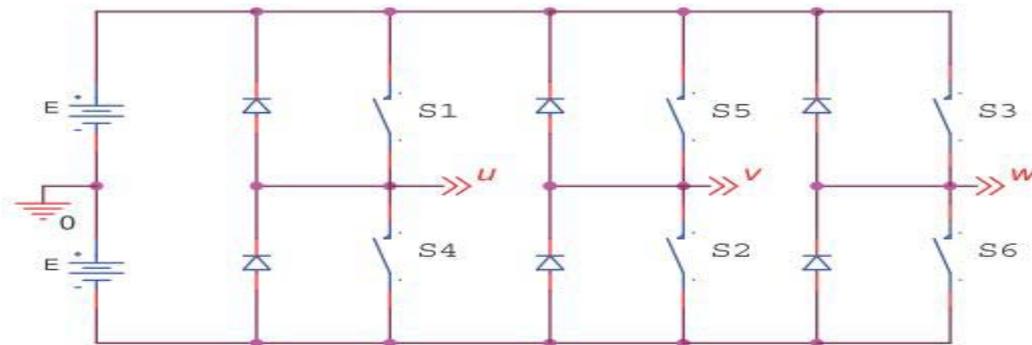


Figure (III.12) : Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont.

La figure (III.12) illustre la topologie d'un onduleur triphasé à six interrupteurs de puissance. Le décalage entre les signaux de commande est de 60° [11].

III.5. La commande MPPT

Un MPPT, (Maximum Power Point Tracker) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens [16].

III.5.1. Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre elles par

leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [16].

III.6. Commande par MLI

La méthode basée sur la MLI met en œuvre d'abord un régulateur qui, à partir de l'écart entre le courant et sa référence, détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice). Cette dernière est ensuite comparée avec un signal en dent de scie à fréquence élevée (porteuse). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs.

III.7. Les méthodes de poursuite de MPP

Il existe de nombreux algorithmes utilisés pour trouver le point de puissance maximale. Idéalement, le suivi de la puissance se fait automatiquement pour s'adapter aux conditions météorologiques variables [18].

III.7.1. Méthodes à contre réaction de tension

Dans ce cas on se repose sur la commande de la tension de fonctionnement des panneaux, par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la commande PWM afin d'annuler cette erreur [16].

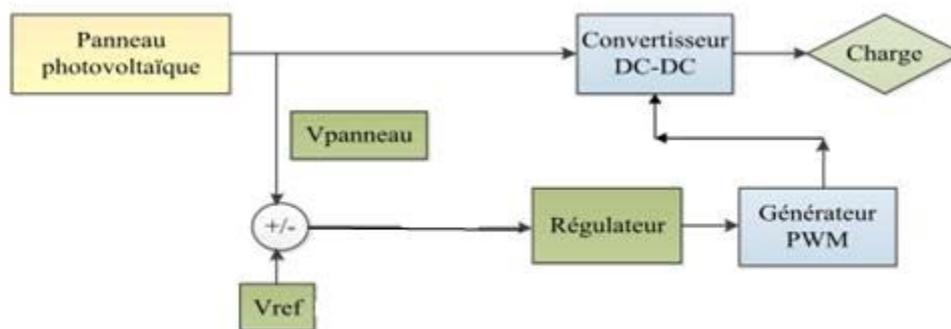


Figure III.13 : Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence.

On a trois types de cette méthode selon la nature de la tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe).

- Référence fixe.
- Référence en fonction de V_{oc} .
- Tension de référence externe (Cellule pilote).

III.7.2. Méthodes à contre réaction de courant

Par analogie avec les méthodes de contre réaction de tension on a le schéma décrit par la figure (III.14) [16].

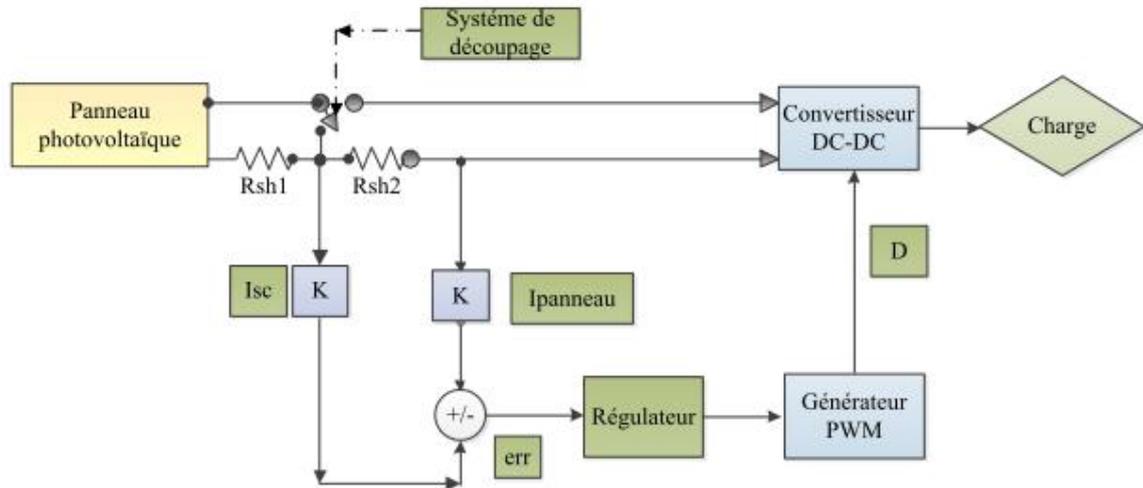


Figure III.14 : Principe de la méthode MPPT à courant de référence en fonction de I_{sc} .

- ❖ Ainsi nous avons présenté les méthodes suivantes
- Référence en fonction du courant de court-circuit I_{cc} .
- Référence externe (Cellule pilote).

III.7.3. Méthodes à contre réaction de puissance

Les méthodes à contre réaction de puissance se bases sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau afin que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système.

La puissance extraite du panneau est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du panneau et la multiplication de ces deux grandeurs $P = V \times I$ [16].

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques électriques des convertisseurs statiques (convertisseur DC-DC/DC-AC). Nous sommes sur l'étude des convertisseurs du courant continu (boost-buck). On a étudié quelques méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrément de l'inductance et méthode de perturbation et observation.



CHAPITRE IV

ETUDES DES

TECHNIQUES DE

COMMANDE

CONVENTIONNELLES

UNIVERSITE DE TEBESSA

IV.1. Introduction

On a vu dans le chapitre précédent que la puissance maximale générée par un module solaire dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température. Pour avoir une puissance maximale le module solaire doit génère une certaine tension et courant de fonctionnement.

Pour que le module fourni sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque. Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC contrôlé par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (MPPT).

Certain dispositif utilise l'énergie alternative pour les alimenté par un générateur photovoltaïque il faut utiliser un convertisseur DC-AC, il y a plusieurs commande des et le but de ces commande c'est d'avoir un signale sinusoïdale.

Dans ce chapitre on va étudier quelque type des convertisseurs DC-DC et DC-AC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Ainsi, on décrive la commande MPPT des convertisseurs DC-DC et la commande MLI des convertisseurs DC-AC.

IV.2 Commande (MPPT) des convertisseurs DC/DC

Les panneaux solaires de première génération sont généralement dimensionnés pour que leurs (PPM) correspondent à la tension nominale de batterie de 12 ou 24 Volts. Grâce à cette configuration, une simple connexion directe via une diode anti-retour suffit pour effectuer le transfert d'énergie du (GPV) à la charge. Cependant, les caractéristiques non-linéaires du module photovoltaïque et sa sensibilité aux conditions extérieures, comme l'éclairement et la température, induisent des pertes énergétiques. L'utilisation d'un étage d'adaptation afin d'optimiser la production d'énergie à tout moment est ainsi de plus en plus préconisée [20].

IV.2.1. Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC-DC

La figure (IV.1) présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation (DC-DC) entre le (GPV) et la charge. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie pour stocker de l'énergie ou une charge qui ne supporte pas les fluctuations de la tension (ballast,...). Cet étage d'adaptation dispose d'une commande (MPPT) (Maximum Power Point Tracking) qui permet de rechercher le (PPM) que peut

fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche (MPPT) peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisie et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé.

De nombreuses recherches sur les commandes (MPPT) ont été effectuées afin de trouver un système optimal permettant une recherche du (PPM) selon l'évolution de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque. Les commandes (MPPT) développées, sont toutes basées sur une commande extrême de type Perturbe & Observe, (P&O).

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes de commandes extrémales présentant plus ou moins de précisions. A partir de l'évaluation ou de la mesure de la puissance fournie par le générateur, ces commandes utilisent le rapport cyclique du convertisseur de puissance pour appliquer une action de contrôle adéquate sur l'étage et pour suivre l'évolution au cours du temps du (PPM). Un grand nombre de ces commandes ont l'avantage d'être précises et d'avoir une grande rapidité de réaction mais souffrent encore d'un manque d'optimisation de leur algorithme parfois trop complexe et consommant alors trop d'énergie [20].

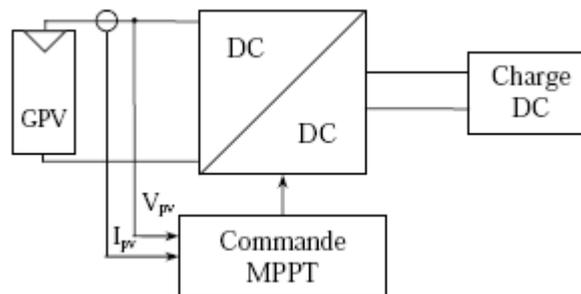


Figure IV.1 : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC) contrôlé par une commande (PPM) sur charge DC [20].

IV.2.2. Méthode de poursuite du point de puissance maximale

Pour obtenir un meilleur rendement dans le fonctionnement des générateurs photovoltaïques, la technique appelée la poursuite de la puissance maximale (MPPT) qui consiste à transférer de façon optimale toute la puissance électrique à extraire de cette source de l'énergie photovoltaïque vers la charge à alimenter. Elle doit être utilisée dans toute application utilisant ces générateurs, et deviendra nécessaire et même indispensable

selon la théorie du transfert optimal de puissance. Les techniques de contrôle employées pour la poursuite du point de puissance sont [22]:

- Méthodes de la dérivée de la puissance
- Méthodes à contre réaction de la tension

IV.2.2.1. Méthode de la dérivée de la puissance

Cette méthode est basée sur la recherche de l'extremum de la courbe de puissance $V_p = f(P_v)$ obtenue directement de la caractéristique du (GPV)). Le point de puissance maximale (PPM) est obtenu lorsque la dérivée de la puissance par rapport à la tension s'annule, c'est-à-dire, lorsque $(\frac{dP_v}{dV_p} = 0)$ [22].

Le point de puissance maximale (PPM) est donné par la figure (IV.2) :

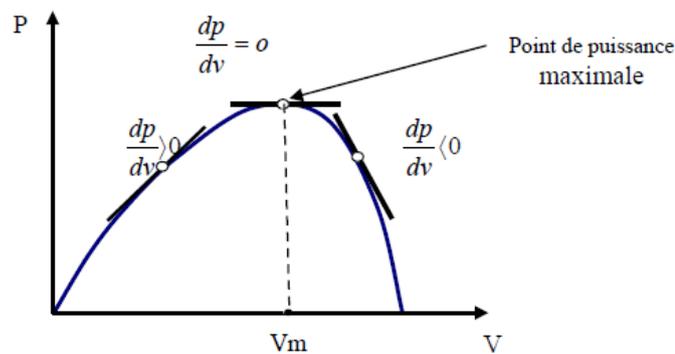


Figure IV.2 : Caractéristique du point de puissance maximale MPP [22].

IV.2.2.1.1. Méthode de la perturbation et l'observation la (P&O)

Si plus généralement, on désire suivre le point de puissance maximale en s'affranchissant de la connaissance des paramètres qui modifient sa position, on doit recourir aux techniques d'asservissement, en utilisant la plus souple, celle de la perturbation et de l'observation, (P & Q). C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence (V_{ref}), ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique.

Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du générateur est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$ alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent [20]. L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O) est donné par la figure (IV.3).

$D = \alpha$: Rapport cyclique.

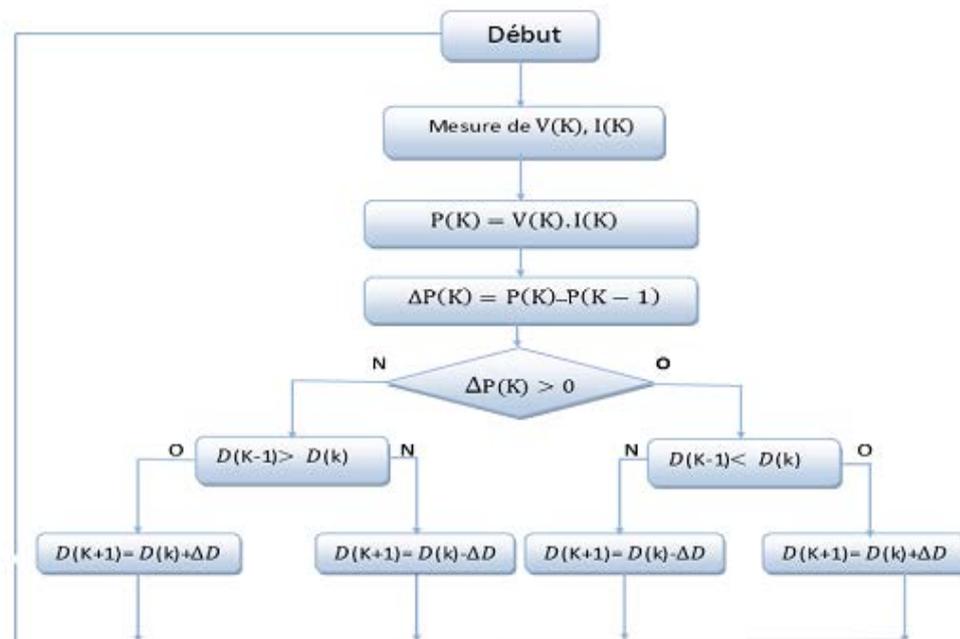


Figure IV.3 : Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation [23]

IV.2.2.1.2. Méthode par incrémentation de conductance

L'algorithme par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro. Ceci peut être décrit par les équations suivantes [25]:

$$\frac{dp_v}{dV_p} = \frac{d(V_p \times I_{pv})}{dV_p} = I_{pv} + V_p \frac{dI_{pv}}{dV_p} = 0 \quad (IV.1)$$

$$\frac{dI_{pv}}{dV_p} = - \frac{I_{pv}}{V_p} \quad (IV.2)$$

Le terme $\frac{I_{pv}}{V_p}$ représente l'opposé de la conductibilité instantanée du panneau photovoltaïque, et $\frac{dI_{pv}}{dV_p}$ représente le terme d'incrément de conductance. Par

conséquent, pour le point de puissance maximum (PPM), ces deux termes peuvent être égaux mais de signes opposés. Si le point de fonctionnement ne coïncide pas avec le point (PPM), l'inégalité de l'équation (IV.8) indique la position de la tension de fonctionnement si elle est plus grande ou inférieure à la tension du point de puissance maximum (PPM) [25].

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}, \left(\frac{dP}{dV} = 0\right)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}, \left(\frac{dP}{dV} > 0\right) \quad (IV.3)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}, \left(\frac{dP}{dV} < 0\right)$$

L'organigramme de cet algorithme est donné par la figure (IV.5):

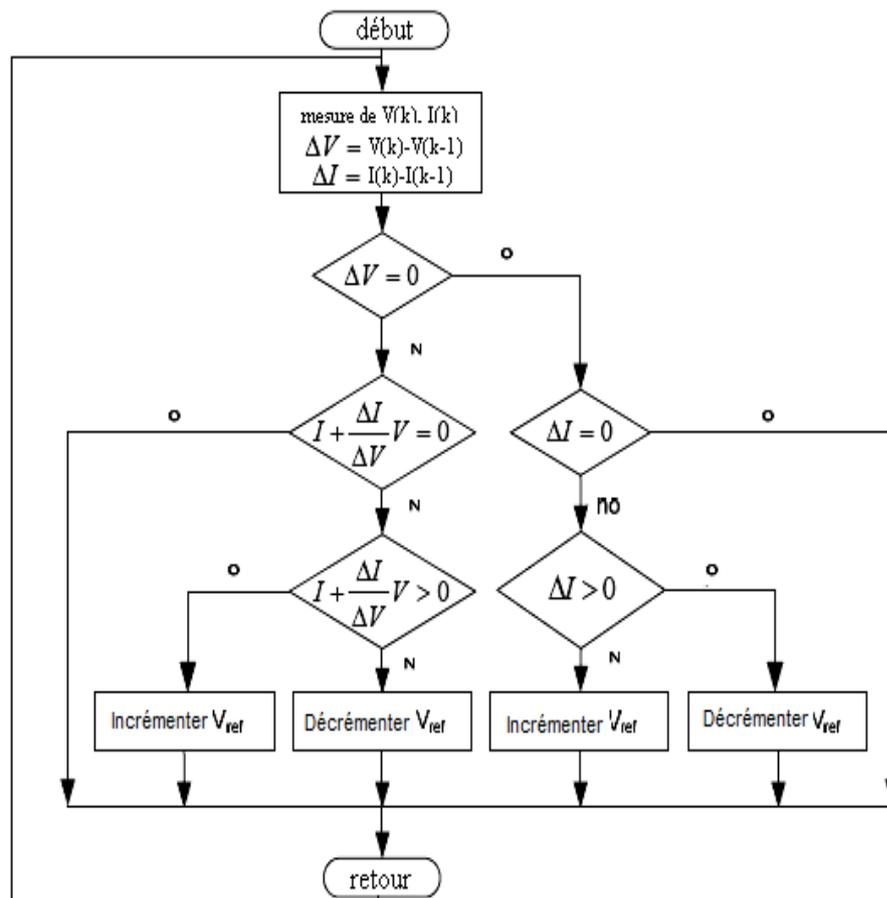


Figure IV.5 : Organigramme de l'algorithme incrémentation de conductance [24]

IV.2.2.2. Méthodes à contre réaction de la tension

Ce genre de mécanisme repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par comparaison de cette tension avec une référence.

Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la MLI de la commande afin d'annuler cette erreur comme le montre la figure (IV.6) [21]:

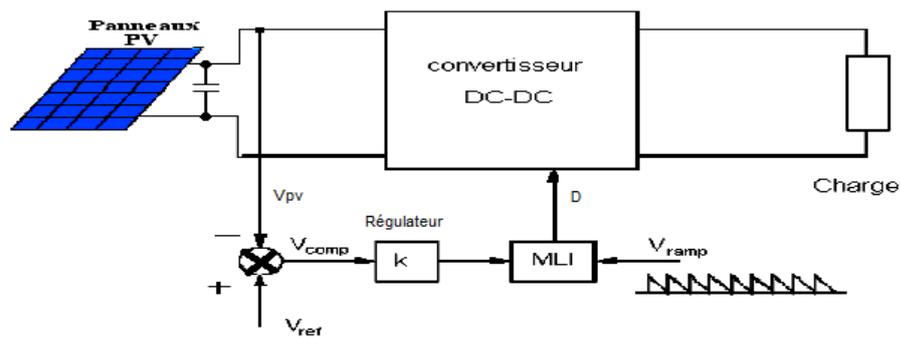


Figure IV.6 : Méthode avec Contre-réaction de tension et modulation [21].

Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe), on distingue trois types de méthodes :

IV.2.2.2.1. Méthode à tension de référence fixe

Cette méthode est basée sur une simple comparaison entre la tension de sortie du panneau avec une tension de référence prédéfinie, pour ajuster continuellement le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC). Cette tension correspond à la tension moyenne de l'intervalle des points des puissances maximales figure (IV.7), relevées par des tests sous différentes conditions d'ensoleillement et de température en agissant simplement sur les différents facteurs de pondération lors de la mise au point afin de générer le maximum de puissance. A cause de la dépendance de la tension du panneau avec l'ensoleillement et la température, la tension de puissance maximale est déviée, alors la tension de référence doit être corrigée pour différents ensoleillements et températures le long des périodes de l'année [21].

IV.2.2.2.2. Méthode MPPT avec mesure de la tension à vide du panneau

La tension à vide du panneau (V_{oc}) est mesurée en interrompant le fonctionnement normal du système avec une certaine fréquence, en mémorisant la valeur mesurée, et puis ajustant la tension de référence (V_{ref}) sur une certaine fraction de la tension du circuit

ouvert qui a été expérimentalement déterminée pour être 76% de (V_{co}). Cette tension de référence est comparée à la tension de fonctionnement du panneau (V) et le signal d'erreur résultant (V_{com}) est employé comme entrée dans la commande MLI du convertisseur (DC-DC) figure (IV.6).

Cette augmentation permet la commande de la tension de fonctionnement du panneau photovoltaïque avec la considération de facteurs importants comme l'ensoleillement et la température. En plus, le vieillissement et l'accumulation de la poussière sur la surface de cellules sont aussi pris en compte [21].

IV.2.2.3. Méthode MPPT avec cellule pilote

Pour éviter les inconvénients liés à l'interruption fréquente de l'exploitation du système, on propose l'utilisation d'une cellule pilote. C'est une cellule photovoltaïque simple qui est électriquement indépendante du reste de la rangée photovoltaïque. Sa tension (V_{coest}) constamment mesurée, elle fournit donc l'information implicite du reste des conditions de fonctionnement courantes du panneau. La tension (V_{code}) la cellule pilote est multipliée par un certain facteur constant pour être comparée à la tension de référence de la boucle de contre réaction.

Puisque cette méthode emploie toujours un facteur fixe pour estimer la tension optimale (V_{mp}) d'une valeur mesurée de (V_{co}), le point de puissance maximale n'est toujours pas vraiment obtenu. Cette technique est fondée sur la connaissance des caractéristiques de la rangée photovoltaïque pour estimer le lieu du point de puissance maximale [21].

IV.2.2.3. Méthode avec contre réaction du courant

Dans toutes les méthodes (MPPT) présentées jusqu'ici, une mesure de (I_{pv}) et (V_p) a été employée pour obtenir des informations sur la puissance de sortie du panneau. Cette nouvelle méthode (MPPT) utilise seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel et actuel du système [26].

L'avantage de cette méthode est qu'elle est simple, contrairement aux méthodes mentionnées précédemment.

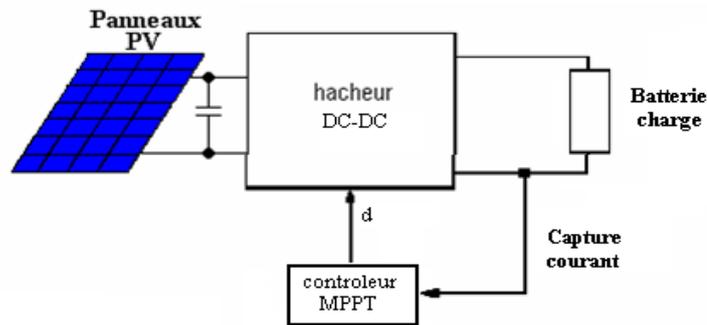


Figure IV.7 : Méthode de la contre réaction en courant [21].

IV.3. Commande par MLI

La méthode basée sur la MLI met en œuvre d'abord un régulateur qui, à partir de l'écart entre le courant et sa référence, détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice). Cette dernière est ensuite comparée avec un signal en dent de scie à fréquence élevée (porteuse). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe de cette méthode est donné sur la figure (IV.8) [27] :

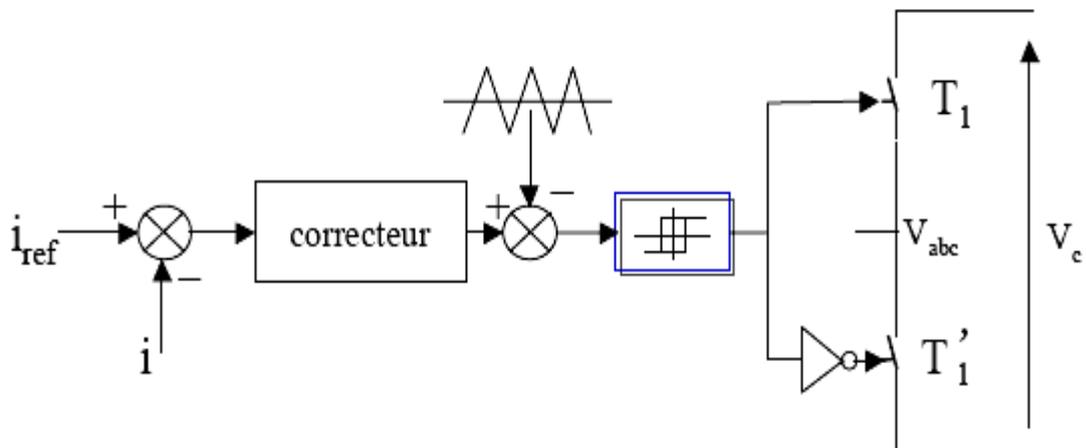


Figure III.18 : Contrôle de courant par MLI [27].

Le schéma de principe de la commande est donné par la Figure III.19 suivante :

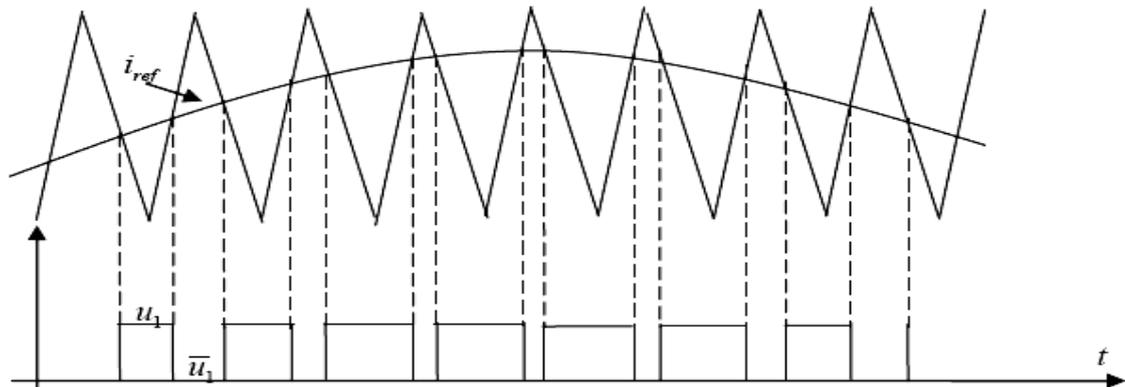


Figure IV.9 : Commande des interrupteurs par MLI [28].

D'autres techniques de MLI existent également dans la littérature comme la MLI à échantillonnage régulier où on peut distinguer deux méthodes :

- La MLI à échantillonnage régulier symétrique où la référence est échantillonnée à chaque période de la porteuse,
- la MLI à échantillonnage régulier asymétrique où la référence est échantillonnée à la demi-période de la porteuse.

La mise au point d'un régulateur doit prendre en compte les critères suivants :

- la bande passante du régulateur doit être assez large afin de ne pas introduire un retard important,
- le fonctionnement de la régulation ne doit pas être perturbé par les harmoniques dus aux découpages de l'onduleur. Ces harmoniques doivent être atténués à la sortie du régulateur.

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur et le hacheur mixte (dévolteur-survolteur) la commande MPPT ainsi que les convertisseurs DC-AC et la commande MLI.

D'après les résultats obtenus de la simulation, on remarque que le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles d'atteindre la puissance maximale de générateur PV. Le hacheur buck-boost peut augmenter la tension de sortie si le rapport cyclique est supérieur à 0.5. La commande MLI a le but d'obtenir l'allure sinusoïdale ou niveau de la sortie de l'onduleur.



CHAPITRE V

DÉVELOPPEMENT

D'UNE

TECHNIQUE DE

COMMAND

FLOUE

UNIVERSITE DE TEBESSA

V.1. Introduction

L'utilisation croissante de l'outil informatique et le développement des techniques de régulation dans le domaine industriel est devenu une réalité qui se manifeste car la fiabilité et la puissance du calculateur numérique qui offre la possibilité d'implantation de la loi de commande avec une grande flexibilité du fait qu'elle peut être modifiée par un programme.

La logique floue est une extension de la logique classique qui permet la modélisation des imperfections des données et se rapproche dans une certaine mesure de la flexibilité du raisonnement humain. Pour cela, la logique floue a connu un intérêt important dans la communauté scientifique au cours des dernières années.

Récemment, la commande par logique floue a été utilisée dans les systèmes photovoltaïques et spécialement pour la poursuite du point maximum de puissance MPPT, cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et relativement simple à élaborer et elle ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle à réguler.

V.2. Présentation l'unité

L'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER.MS) est un structuré de recherche, créée par Arrêt ministériel n° 76 du 22 mai 2004 au sein de l'EPST Centre de Développement des Energies Renouvelables de Bouzaréah.

L'unité de recherche, comprend deux (02) Divisions de recherche :

- La Division Conversion Photovoltaïque
- La Division Conversion Thermique et Thermodynamique

V.3. Principe de recherche du point de puissance maximale

La chaîne de puissance d'un générateur photovoltaïque associé à un convertisseur de conversion d'énergie commandé par une MPPT peut être représentée comme indiquée sur la figure (V. 1) et dont le rôle est de faire varier le rapport cyclique du convertisseur de telle sorte que la puissance fournie par le générateur photovoltaïque soit le la puissance maximale disponible à ses bornes.

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le PPM et en général est basé sur la variation du rapport cyclique du hacheur dans l'objectif d'atteindre le PPM en fonction des évolutions des paramètres (I et V) d'entrée du convertisseur.

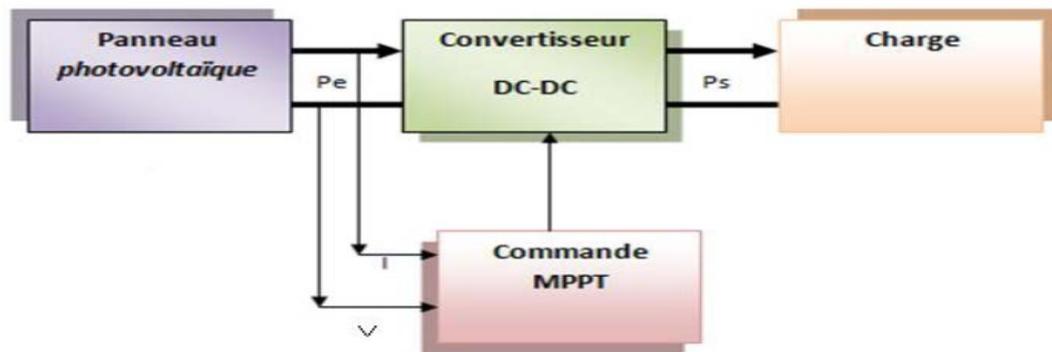


Figure V.1 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque contrôlée par une commande MPPT

V. 4. Principe du convertisseur considéré

Le hacheur ou convertisseur continu - continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en oeuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue. Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur. Dans le cas contraire, il est dit survolteur. Le convertisseur dévolteur survolteur combine les propriétés des configurations de dévolteur et de survolteur. Il peut être employé pour transformer idéalement n'importe quelle tension continue d'entrée en n'importe quelle tension continue désirée de sortie. Pendant le fonctionnement du hacheur, on ferme le commutateur avec un temps de fermeture égale à $(d.T_r)$, et on l'ouvre dans un temps d'ouverture $((1-d).T_r)$,

Avec :

T_r est la période de commutation et d le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0,1]$).

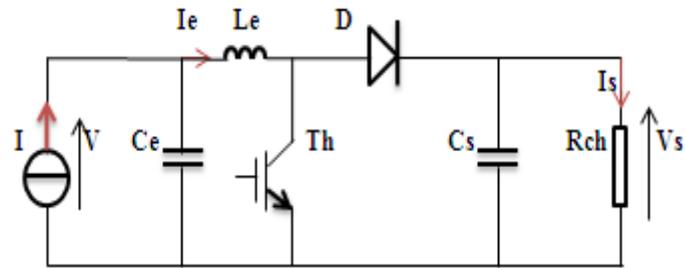


Figure V.2 : Circuit idéal du convertisseur survolteur (Boost)

V. 5. Conception d'un contrôleur *MPPT* à base de logique floue

La figure (V.3) représente le schéma synoptique d'un système photovoltaïque doté d'une commande *MPPT* à base de logique floue.

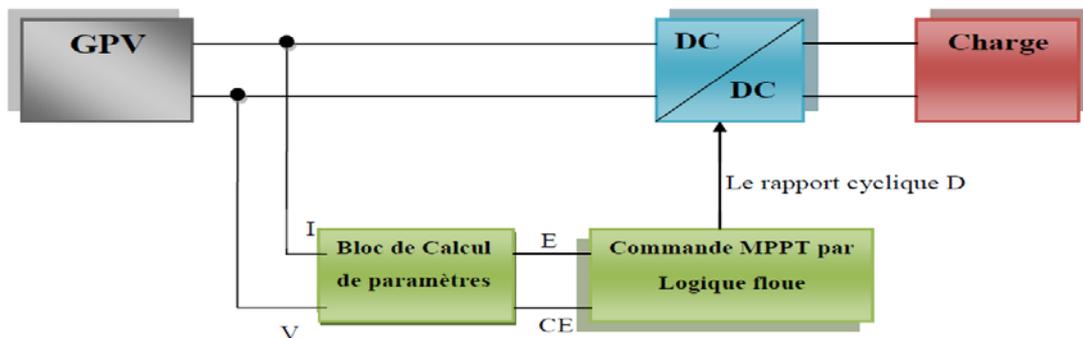


Figure V.3 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec contrôleur logique floue

V. 6. Définition

La logique floue (Fuzzy logic) propose une approche des problèmes beaucoup plus pragmatique que mathématique, dans certains problèmes où les mathématiques peinent par impossibilité ou difficulté de modélisation, la logique floue apporte une étonnante efficacité.

La logique floue est très proche du processus de la pensée humaine. Elle met en œuvre un jeu de règles comme, implicitement, nous en utilisons chaque jour. Elle apprécie les variables d'entrées de façon approximative (faible, élevée, loin, proche), fait de mêmes pour les variables de sorties (freinage léger ou fort) et édicte un ensemble de règles permettant de déterminer les sorties en fonction des entrées.

V. 7. Les ensembles flous

Un ensemble flou A est défini sur un univers de discours U (ensemble d'éléments discrets ou continus) par sa fonction d'appartenance μ_A . La grandeur $\mu_A(x)$

définit le degré d'appartenance de l'élément x à l'ensemble A . La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous, qui sont une généralisation de la théorie des ensembles classiques. La théorie des ensembles flous est une généralisation de la théorie des ensembles classiques signifie que cette dernière n'est qu'un cas particulier la théorie des ensembles flous. Pour faire une métaphore en langage ensembliste, la théorie des ensembles classiques n'est qu'un sous ensemble de la théorie des ensembles flous figure (V. 4).

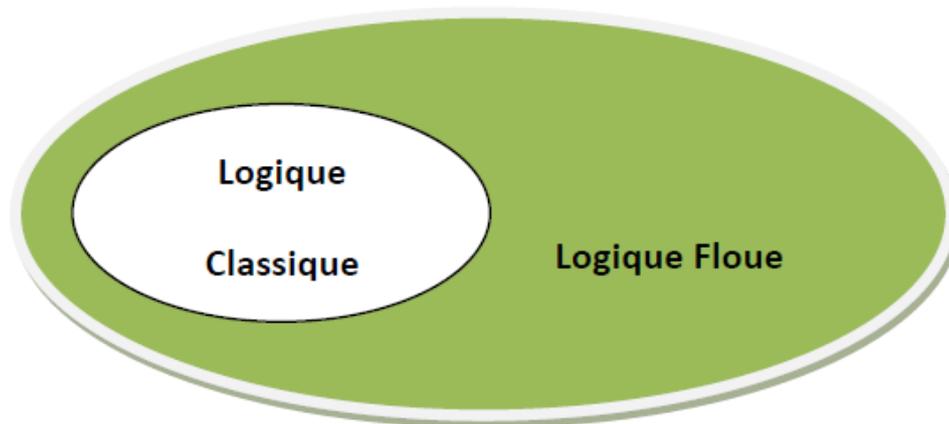


Figure V.4 : Les ensembles classiques et flous

V. 8. Le contrôleur flou

Lorsque le nouveau concept de la logique floue a été proposé par Zadeh, ses premières applications étaient dans le domaine du contrôle des systèmes fait par des experts humains.

Le contrôle de ces systèmes fait apparaître deux types d'informations :

- Des informations numériques obtenues par les mesures des capteurs.
- Des informations linguistiques obtenues par les experts humains.

Le contrôle flou utilise la logique floue comme une démarche qui peut couvrir la stratégie du contrôle linguistique. Il est intégré dans la partie qui gère les données de commandes et de contrôle de la partie opérative du système, appelée contrôleur floue. La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui sont : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification Figure (V. 5).

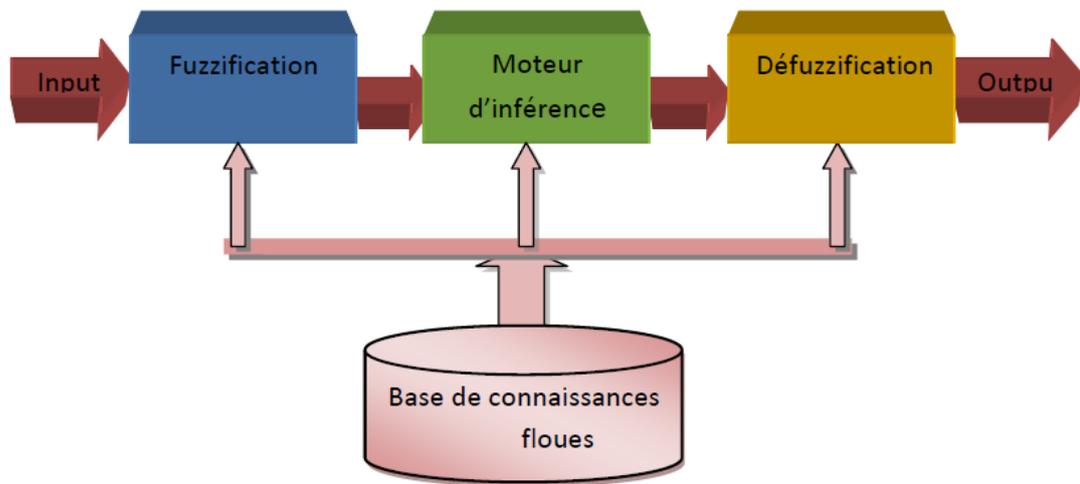


Figure V.5 : Schéma synoptique d'un contrôleur flou

V.8.1. Base des règles

Ces règles permettent de déterminer le signal de sortie du contrôleur en fonction des signaux d'entrée, elles sont exprimées sous la forme 'Si Alors', qui peut être, à titre d'exemple, la suivante :

R1 : Si x_1 est A_{11} et...et x_n est A_{1n} Alors Y est B_1

Ou sous la forme de SUGENO :

R1 : Si x_1 est A_{11} et...et x_n est A_{1n} Alors $Y=f_1(x)$

Avec : $f_1(x)$ est un polynôme.

V.8.2. Logique de prise de décision (inférence floue)

La logique de prise de décision est le noyau du contrôleur flou, elle est capable de simuler la prise de décision de l'être humain en se basant sur les concepts flous et les règles d'inférence en logique floue. Dans les règles floues interviennent l'opération 'ET' et 'OU'. L'opération 'ET' s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle, tandis que l'opération 'OU' lie les différentes règles. Il existe plusieurs possibilités pour interpréter ces deux opérateurs.

Pour le réglage par logique floue, on utilise en générale une des méthodes suivantes :

- Méthode d'inférence *MAX-MIN* (méthode de MAMDANI)
- Méthode d'inférence *MAX-PRODUIT* (méthode de LARSEN)
- Méthode de SUGENO

V.8.3.Fuzzification

La fuzzification permet de rendre flou les variables d'entrée. Une étape préliminaire consiste à définir un intervalle de variation maximale autorisée pour les variables d'entrées. Le but de la fuzzification est de transformer les variables d'entrée en variables linguistiques ou variables floues. Dans notre cas, on a deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et la variation d'erreur CE à l'instant k qui sont définis comme suit :

$$E = \frac{P(k) - P(k-1)}{I(k) - I(k-1)} \quad (V. 1)$$

$$CE = E(k) - E(k - 1) \quad (V. 2)$$

Ainsi ses variables seront qualifiées Négatif Grand (*NG*), Négatif Petit (*NP*), Erreur nul ou bien zéro (*EZ*), Positif Petit (*PP*) et Positif Grant (*PG*) (Figure. V. 6)

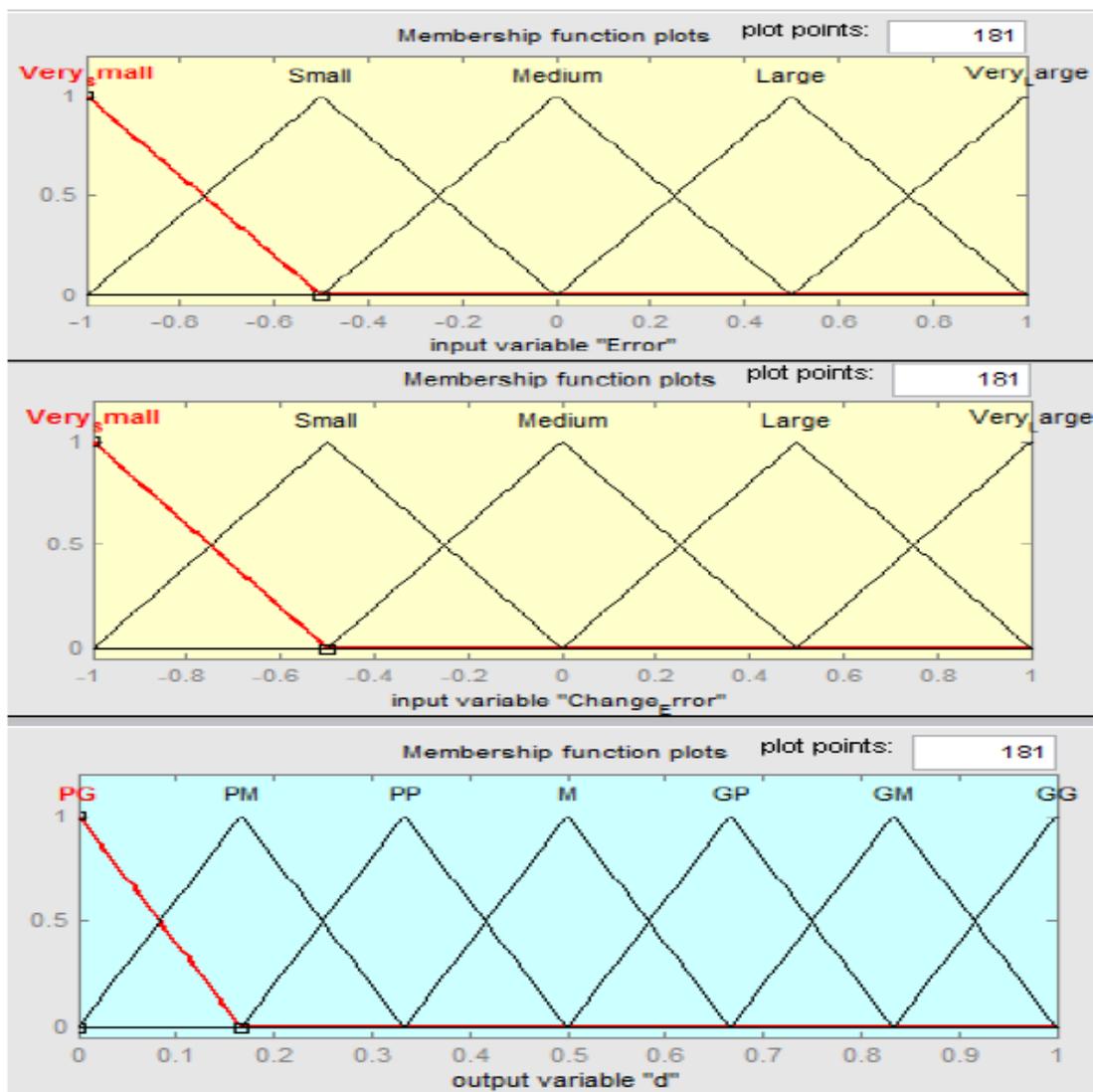


Figure V.6 : Fonction d'appartenance du contrôleur floue (entrées, sortie)

L'inférence est une étape qui consiste à définir un rapport logique entre les entrées et la sortie. En effet, des règles d'appartenance vont être définies pour la sortie comme ça était fait pour les entrées, grâce à ces règles un tableau d'inférence peut être dressé Table (V. 1).

Les règles floues permettant de déterminer le signal de sortie du régulateur en fonction des signaux d'entrée. Elles relient le signal de sortie aux signaux d'entrées par les conditions linguistiques prenant en compte l'expérience ou le savoir-faire acquis par un opérateur humain, on traduisant simplement des remarques de bon sens. Il est tout à fait clair que, si l'erreur est fortement négative et sa variation l'est aussi, le signal de commande doit l'être également. Au contraire, si l'erreur est environ nulle et sa variation aussi, il en sera de même de la commande. Maintenant, si l'erreur est environ nulle mais sa variation est fortement négative, ou si l'erreur est fortement négative mais sa variation est environ nulle, le signal de commande devra être fortement négative.

Tableau V.1 : Règles floues relatives au contrôleur pour un système photovoltaïque

E\CE	NG	NM	Z	PP	PG
NG	PG	PG	PM	M	PP
NP	PM	PP	M	M	GP
Z	M	GP	GM	GG	GG
PP	GM	M	GP	GG	GM
PG	PG	PM	PP	GP	M

Les classes sont notées comme suite :

- ✓ NG : Négatif Grand
- ✓ NM : Négatif Moyen
- ✓ NP : Négatif Petit
- ✓ Z : Environ Zéro
- ✓ PP : Positif Moyen
- ✓ PM : Positif Moyen
- ✓ PG : Positif Grand

V.8.4. Défuzzification

Pour pouvoir définir la loi de commande, le contrôleur flou doit être accompagné d'une procédure de défuzzification jouant le rôle de convertisseur de la commande floue en valeurs physiques nécessaire pour un tel état de processus. Une stratégie de défuzzification est alors nécessaire.

V.9. Résultats de Simulation

Les résultats de simulations obtenues en utilisant la commande *MPPT* floue appliquée au système photovoltaïque considéré en tenant compte de la variation des conditions climatiques tel que la température et l'ensoleillement sont présentés par les ci-dessous. On remarque que dans le cas d'une perturbation causée par la variation de luminosité, le système converge vers *MPP* et reste stable avec un taux d'ondulation minimale par rapport aux autres types de commande, mais avec un temps de convergence plus important.

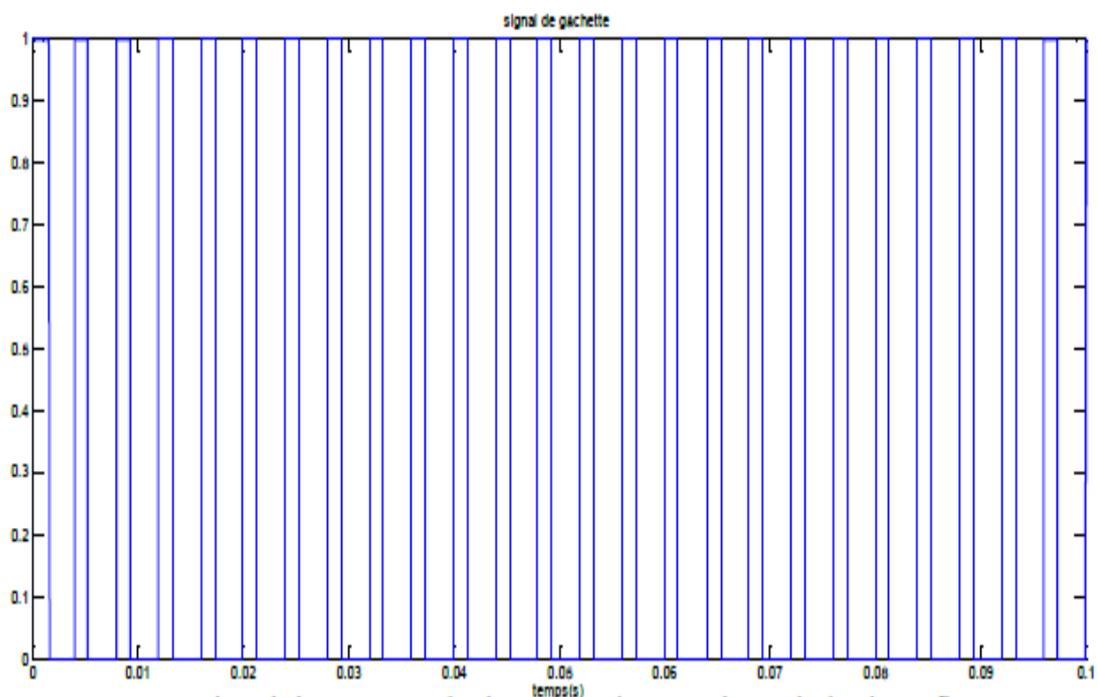


Figure V.7 : Signal de commande du convertisseur à base de logique floue

V.9.1. Point de puissance maximale

Dans la figure (V. 8), un exemple de réseau de caractéristiques puissance/tension d'un générateur photovoltaïque est illustré pour différentes valeurs de l'éclairement auquel est soumis le générateur

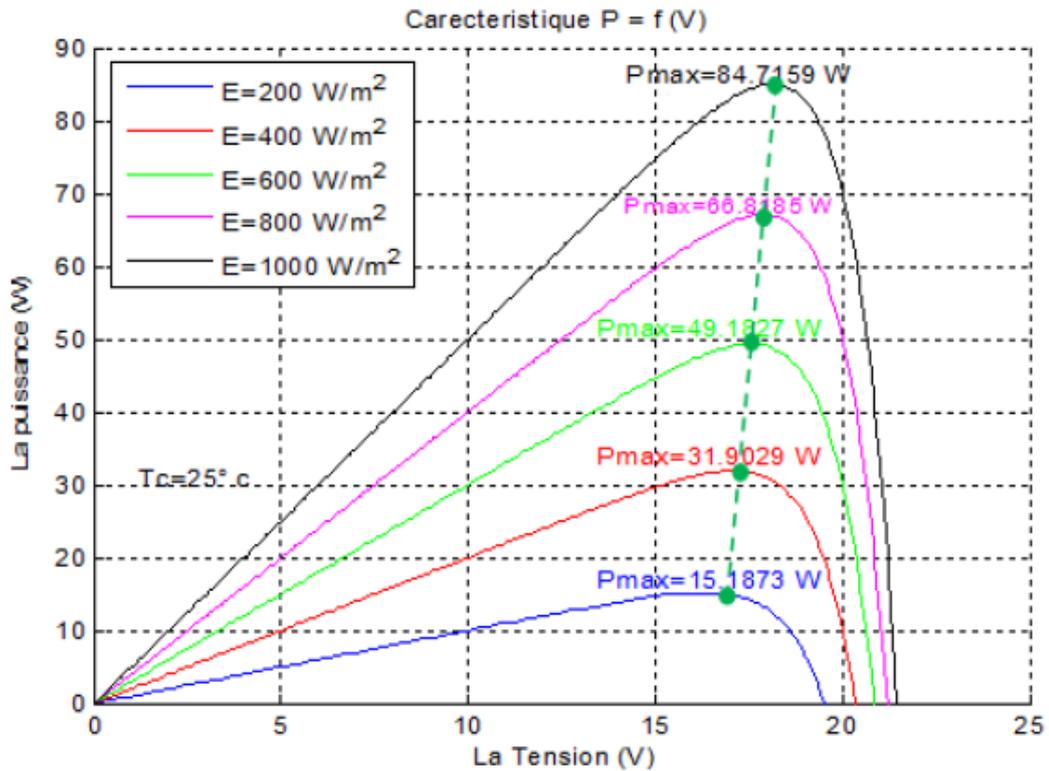


Figure V.8 : Caractéristiques $P=f(v)$ d'un générateur photovoltaïque pour différents ensoleillement

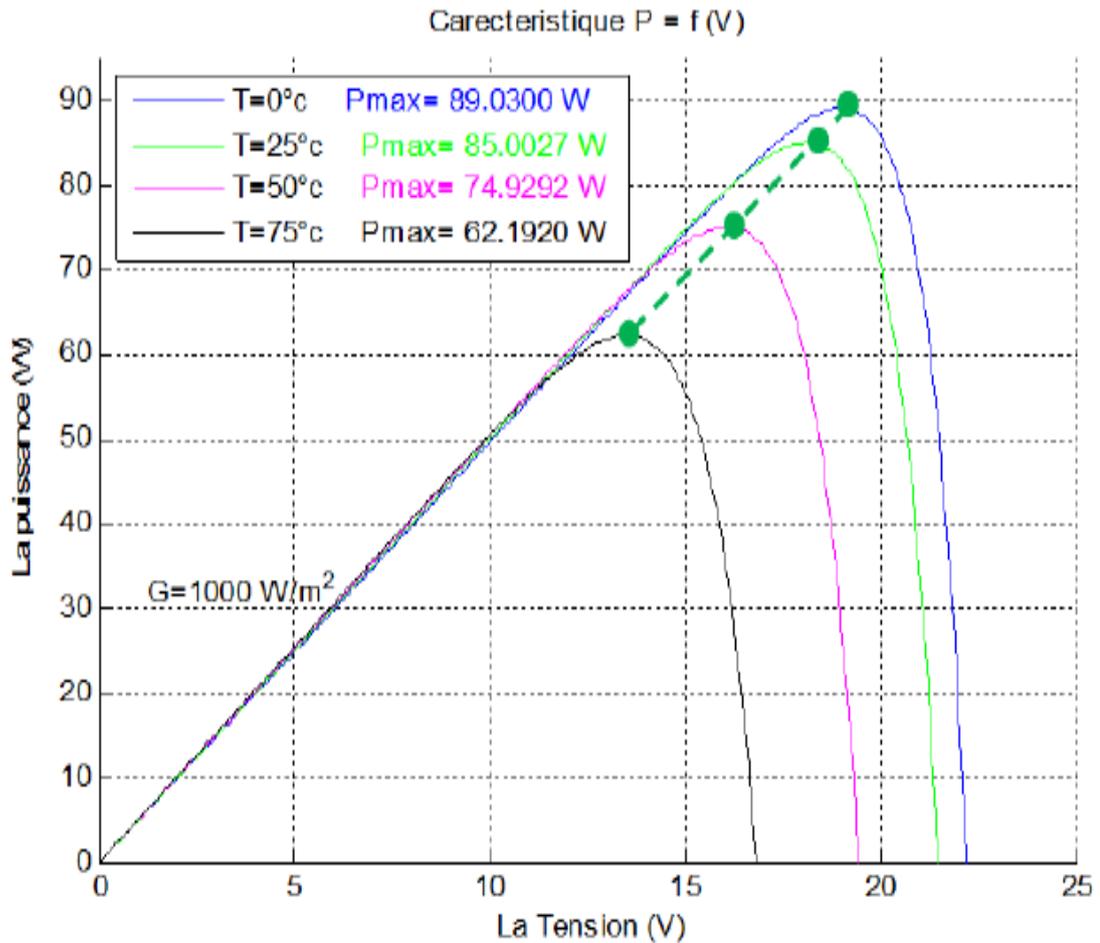


Figure V.9 : Caractéristiques $P=f(v)$ d'un générateur photovoltaïque pour différentes températures

Il est à noter que sur chacune des courbes, le point en gros représente le point de puissance maximale que peut fournir le panneau et que pour un éclairement et une température donnés, il existe une valeur de la tension qui maximise la puissance produite par le générateur. Ce qui nous contraint à insérer un convertisseur de puissance entre le générateur photovoltaïque et sa charge pour assurer un fonctionnement à puissance maximale quelles que soient la charge et les conditions d'éclairement et de température.

V.10. Résultats de simulation avec l'application de l'approche logique floue pour la poursuite du point de puissance maximale

V.10.1. Simulation du fonctionnement sous des conditions standard (constantes)

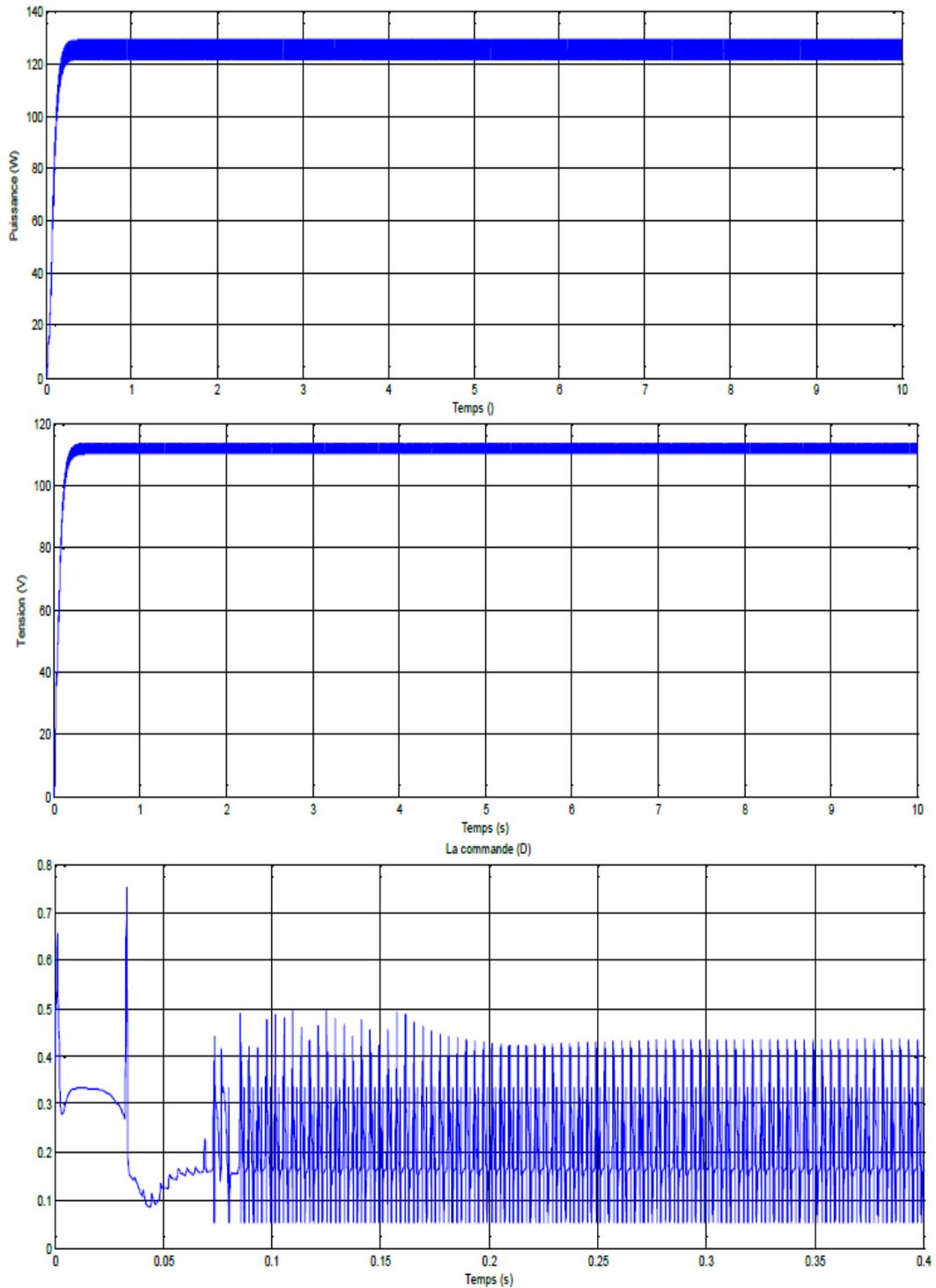


Figure V.10 : Variation de la puissance du module et la tension, la commande D pour une température de $25^{\circ}C$ et un ensoleillement de $1000w/m^2$

V.10.2 : Simulation des conditions variables d'ensoleillement

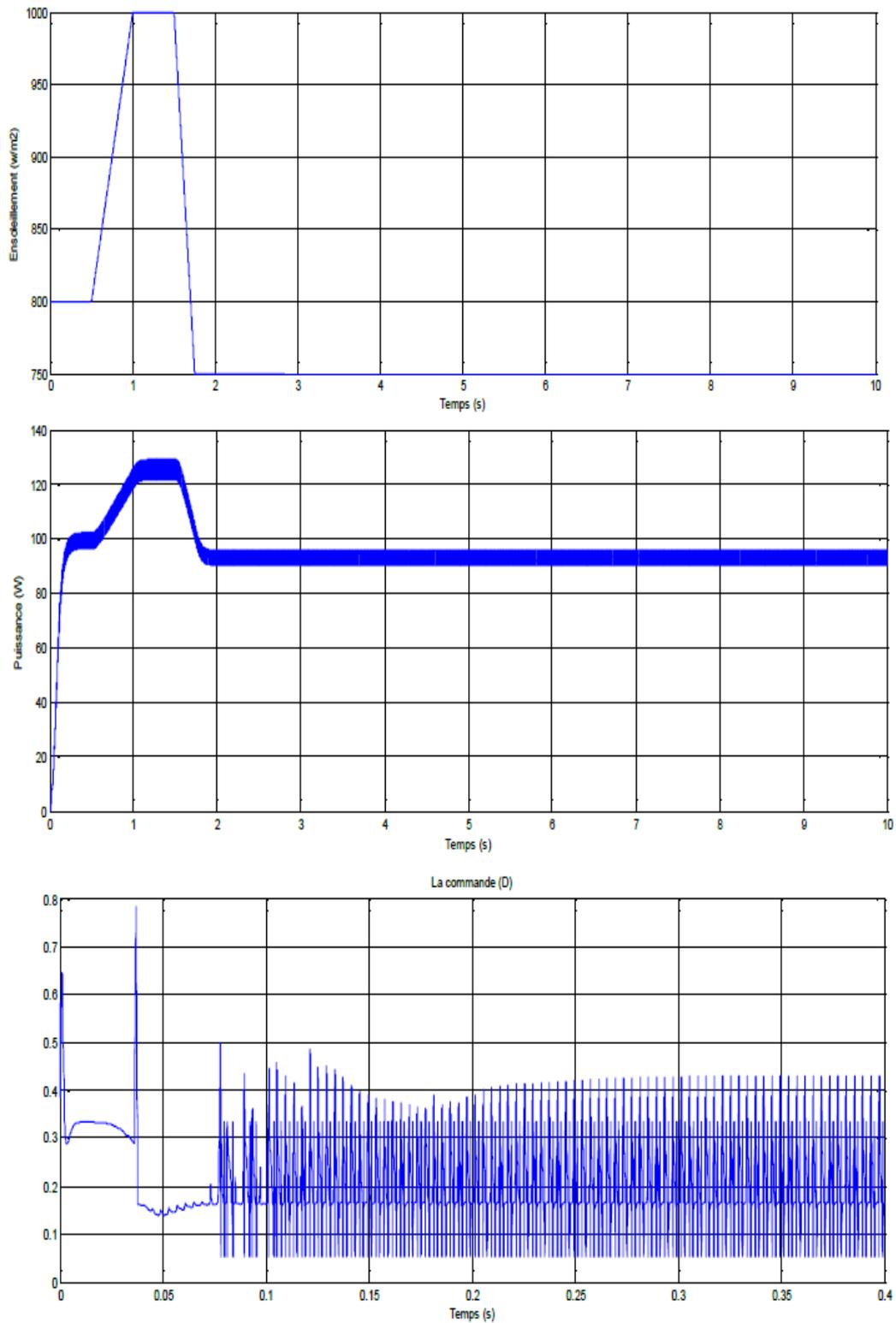


Figure V.11 : Variation de l'ensoleillement du module, de la puissance et de la commande D pour un ensoleillement aléatoire avec une température de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$

V.10.3. Simulation sous des conditions variables de température

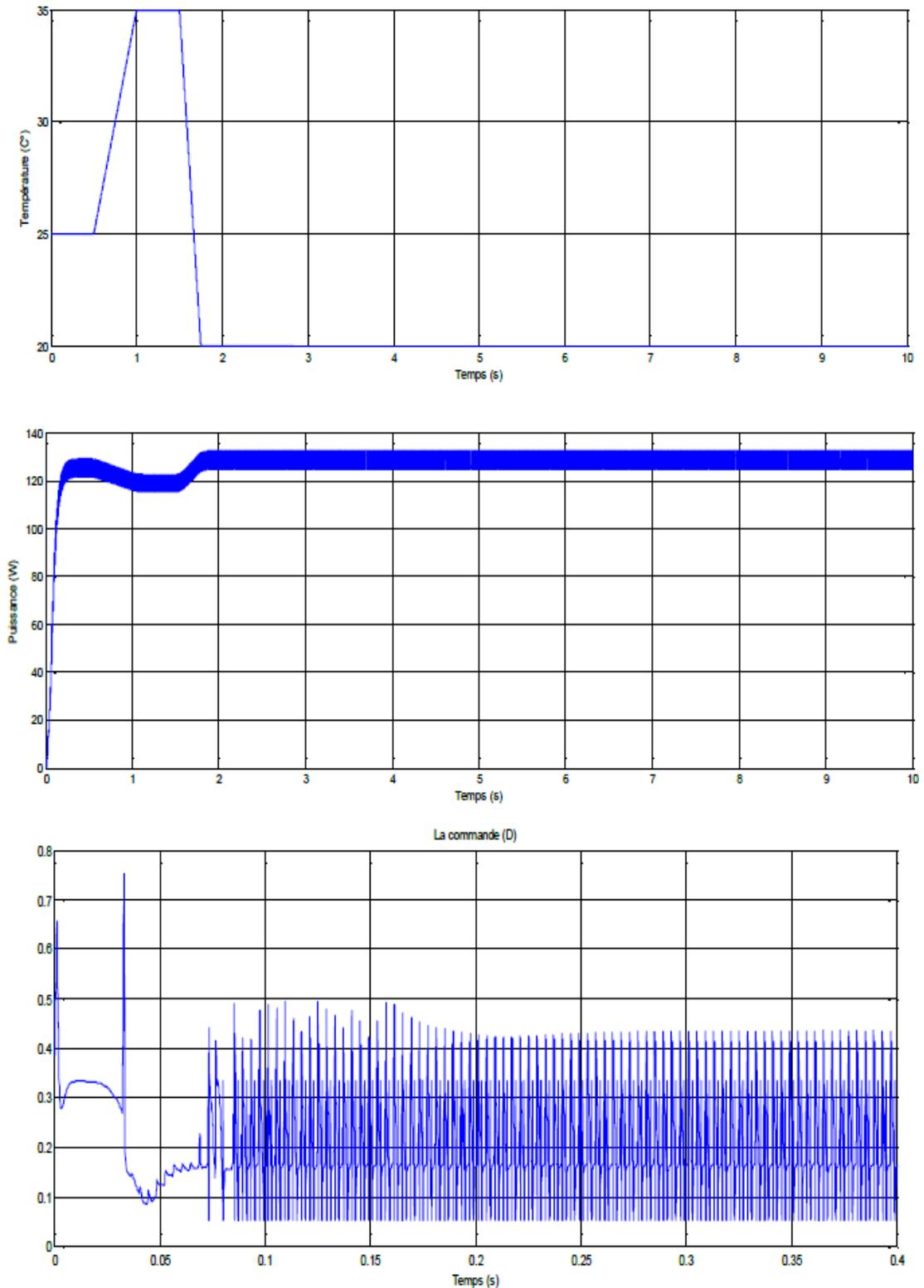


Figure V.12 : Variation de la température du module, Variation de la puissance et de la commande D pour une variation de la température aléatoire avec un ensoleillement de $1000W/m^2$

V.10.4. Simulation sous conditions aléatoires d'ensoleillement et de Température

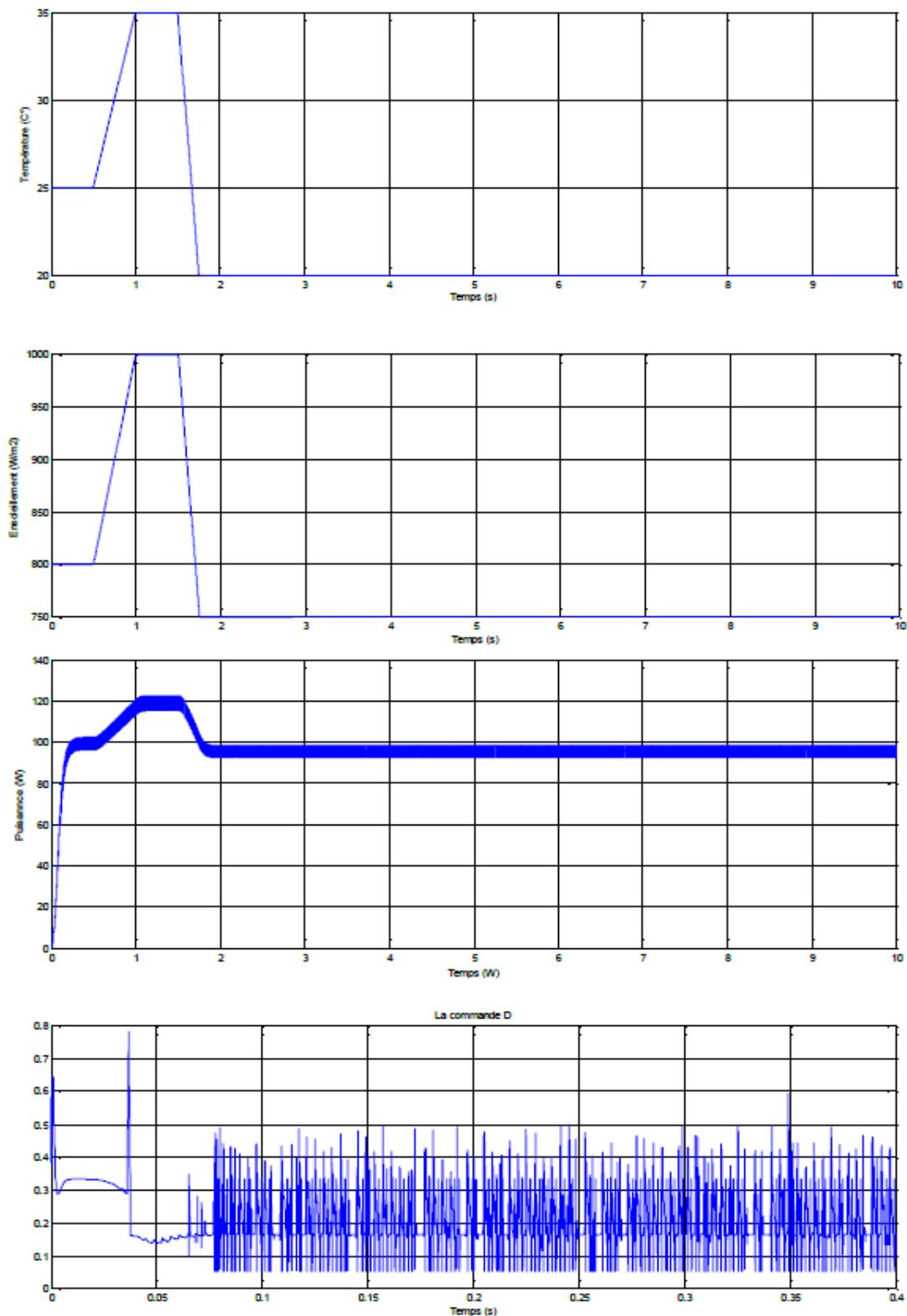


Figure V.13. Variation de l'ensoleillement et de la température du module, Variation de la puissance, la commande D pour un changement aléatoire de l'ensoleillement et de la température

V.10.5. Simulation sous conditions variables d'ensoleillement et de Température

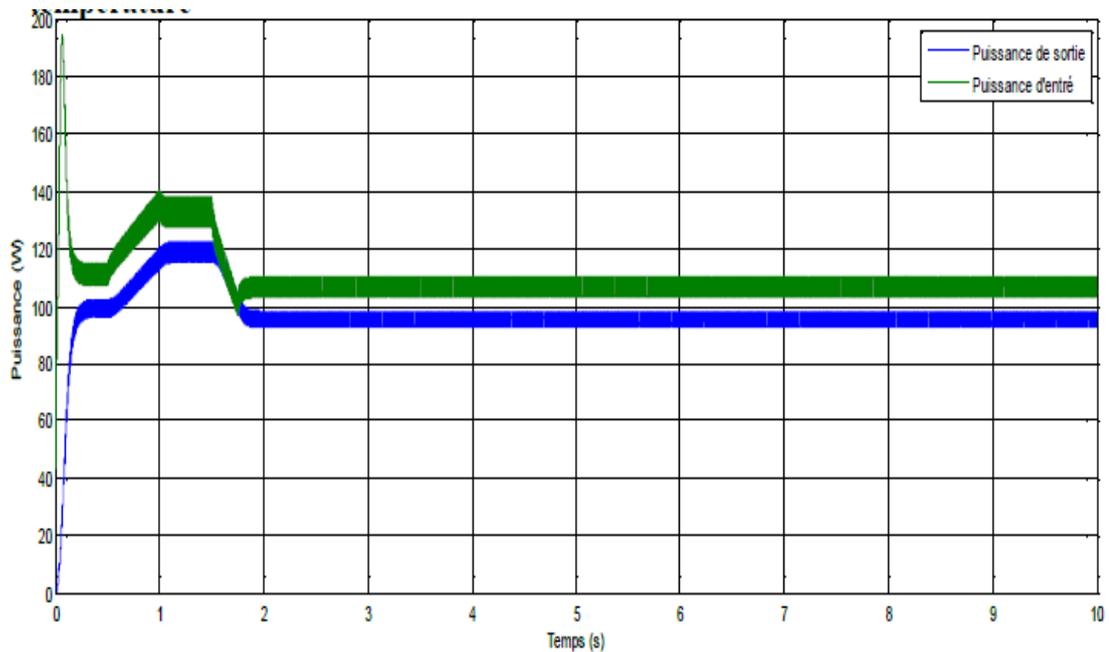


Figure V.14 : Courbe représente une comparaison entre P_{sortie} et $P_{entré}$

La figure (V.15) montre les valeurs de sortie de la puissance en fonction de la tension pour une variation de la température et de l'éclairement.

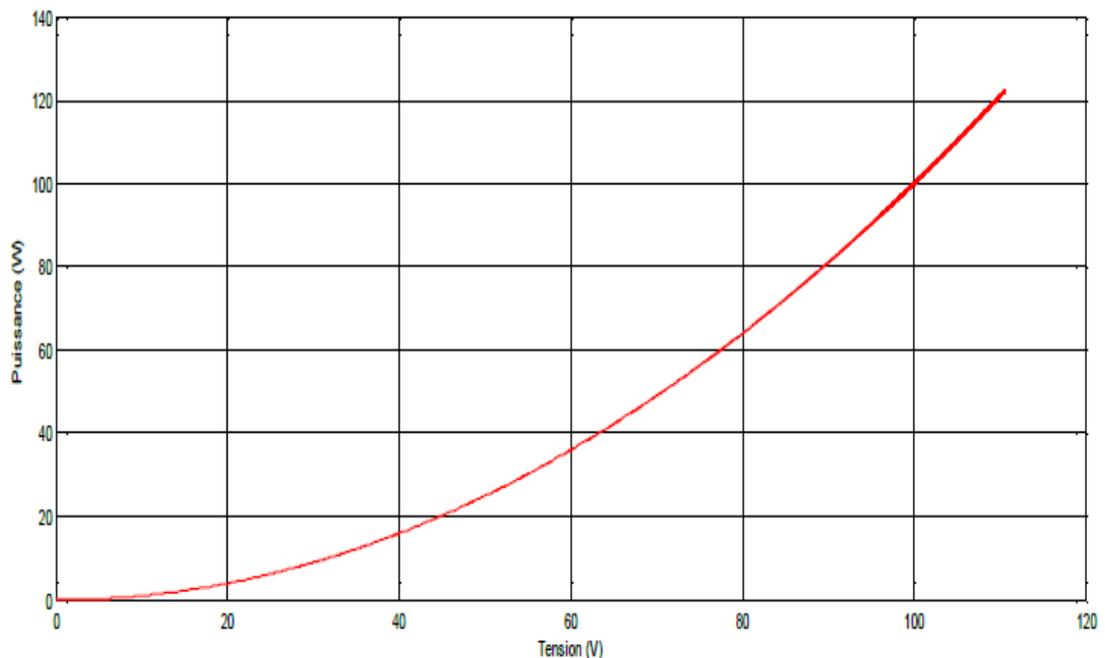


Figure V.15. Courbe représente la fonction $P=f(V)$ de sortie

La figure suivante montre les valeurs de sortie de la puissance en fonction du courant pour une variation de la température et de l'éclairement.

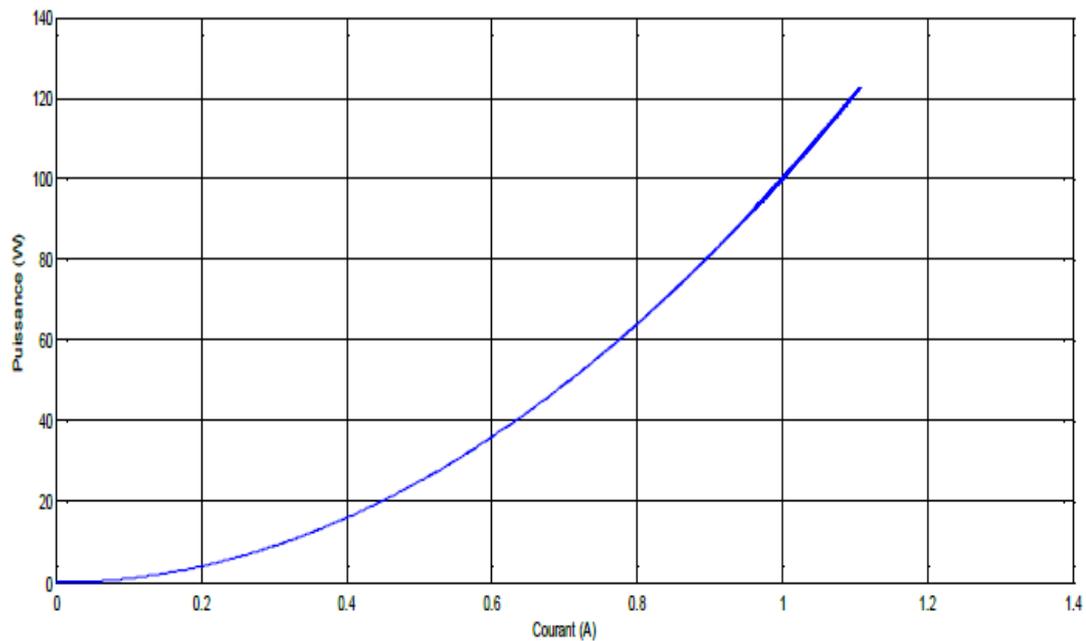


Figure V.16. Courbe représente la fonction $P=f(I)$ de sortie

V.11. Conclusion

La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire est une des alternatives qui, depuis l'avènement des grands programmes spatiaux, a montré sa grande souplesse et son aptitude à fonctionner en milieu convenable. Il s'agit d'une solution intéressante aux moyens de productions conventionnels. Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale, des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs sont destinés à la poursuite PPM et à minimiser ainsi l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence qui est variable en fonction de la charge et des conditions climatiques.

Dans le même but, les techniques les plus répandues telle que la commande P&O de contrôle de la MPPT ont été introduites, dans ce travail, nous avons présenté une stratégie de commande avancée basé sur la logique floue en vue d'élaborer un système de commande et de poursuite du point de puissance maximale afin d'extraire le maximum de puissance.

La poursuite du point de puissance maximale par l'approche logique floue a montré l'efficacité de cette dernière. Selon les résultats obtenus, on peut conclure que la commande logique floue fait apparaître un bon compromis entre la caractérisation et l'efficacité des calculs ainsi que sa robustesse, sa rapidité et sa précision. Les résultats

CHAPITRE V Développement d'une technique de command floue

obtenus lors de notre travail encouragent la poursuite des recherches dans ce sens que nous espérons également envisager de les améliorer.

Ce travail ne recherche nullement à condamner les méthodes classiques. L'approche présentée vient avant tout enrichir la grande famille des méthodes de poursuite du point de puissance maximale.

Conclusion général

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'Uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

Ce travail s'agit d'une contribution à l'optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque. et présentés concernent plus particulièrement la problématique du couplage entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continue. En effet, ce type de couplage souffre encore du problème du transfert de puissance du générateur photovoltaïque à la charge qui est souvent très loin des possibilités du générateur.

Nous avons établi des programmes de calculs sous l'environnement Matlab permettant de tracer la caractéristique $I-V$ pour différents éclairagements et températures solaires et de calculer la puissance maximale délivrée par la cellule photovoltaïque correspondante.

Nous rappelons dans le troisième chapitre les principales caractéristiques des convertisseurs statiques dont il faut tenir compte pour dimensionner les étages d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge. Pour mieux analyser les contraintes de l'exploitation d'un système photovoltaïque.

Dans le quatrième nous avons étudié plusieurs méthodes d'optimisation en commande MPPT.

Dans le dernier chapitre, nous avons analysé dans le simulateur Matlab le fonctionnement optimal d'un système PV de moyennes puissances dont la régulation de la puissance est effectuée par la logique floue, suites aux variations des conditions météorologiques (température, éclairagements,...) et de la charge.

D'après les résultats de la simulation obtenus, on peut dire que :

- ✓ Les performances du générateur se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairage et les variations de la charge. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairage 1000W/m².
- ✓ Le convertisseur DC-DC et la logique floue effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie

Conclusion général

supérieure à celle fournie par le générateur PV. La logique floue adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

- ✓ Ces résultats, forts intéressants, montrent que l'utilisation de la logique floue permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques. Comme perspectives nous envisageons d'améliorer l'algorithme et d'essayer de créer un prototype pour une réalisation expérimentale.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. ARROUF, "Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branche sur un générateur photovoltaïque", Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [2] S.BELAKEHAL « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables » Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [3] 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.
- [4] B. FLECHE, D. DELAGNES, « Energie solaire photovoltaïque », STI ELT Approche générale, Juin 2007.
- [5] Peter Würfel, "physics of solar cells", Edition 2005 Wiley-VCH Verlag GmbH, Boschstr, 12, D- 69469 Weinheim, Germany, p 148, 15.
- [6] Adolf Goetzberger, Joachim Knobloch Bernhard, " Crystalline Silicon Solar Cells", John Wiley & Sons, p 100 -135.
- [7] JefPoortmans and Vladimir Arkhipov, "Thin Film Solar Cells Fabrication, Characterization and Applications", John Wiley & Sons, Ltd, Edition 2007 p 1 -37, 237-290.
- [8] B. FLECHE, D. DELAGNES, « Energie solaire photovoltaïque », STI ELT Approche générale, Juin 2007.
- [9] D. Meekhun, " Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fils autonomes pour l'application aéronautique", Université de Toulouse, 2008.
- [10] K. Helali "Modélisation d'une cellule photovoltaïque Etude comparative " Mémoire de Magister Université Mouloud Mammeri de Tizi –Ouzou 25/06/2012.
- [11] O.BENSEDDIK et F.DJALOU " Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque "Mémoire de Master Université KasdiMerbah-Ouargla 27/06/2012.
- [12] S.Lhlah " Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incrémental Conductance (Inc.CoN) et Hill climbing (H.C)" Mémoire Magister université El hadj Lakhdar Batna 2007.
-

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [13]CH.Maher''Gestion Energétique des Panneaux photovoltaïque'' Mémoire Master Université Sfax 2007-2008.
- [14]K.Sobaihi'' étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction '' Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique
10, Avenue HassenBadi El –Harrach Alger.
- [15] BOUKAROURA Abdelkader'' Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé
Par l'Approche Bond Graph ''Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF 02/12/2009.
- [16] F.Slama'' Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique '' Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF- 01/04/2011.
- [17].T.MarkvartetL.Castaber, «Photovoltaics Fundamentals and applications». Preface Guide to Usage of the Handbook by Professional Groups.
- [18] M.N.Mchalikh et CH.Hmada''Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau '' Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013.
- [19]. P.Reichenbach, M.Sella, P.Affolter et J.Bonvin «Centrales photovoltaïques, Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets à l'usage des bureaux d'ingénieurs». Direction du projet et coordination Jean Graf, EPFL-DA-ITB-LESO, 1015 Lausanne.
- [20]. S. Petibon, «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Janvier 2009.
- [21].A. Mabrouk, «Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique». Mémoire de magister en électricité solaire de l'école Nationale Polytechnique El Harrach, ALGER, 2008.
-

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [22]. F. Bouchtouchecherfa «Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT». Mémoire de magister, Ecole National Polytechnique Elharach, 2004.
- [23]. H.N. Zainudin, S. Mekhilef «Comparison Study of Maximum Power Point Tracker Techniques for PV Systems ». Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10), Cairo University, Egypt, December 19-21, 2010.
- [24]. Dezso Sera, Remus Teodorescu, Tamas Kerekes, «Teaching Maximum Power Point Trackers Using a Photovoltaic Array Model with Graphical User Interface». Institute of Energy Technology; Aalborg University Pontoppidanstraede 101 DK-9220, Aalborg, Denmark
- [25]. G. Adamidis, P. Bakas, A. Balouktsis, «Photovoltaic System MPPT Tracker Implementation using DSP engine and buck – boost DC-DC converter». Electrical & Computer Engineering Department Democritus University of Thrace Vas.Sofias 12, 67100, Xanthi GREECE, adamidis@ee.duth.gr, <http://www.ee.duth.gr>.
- [26]. B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nikita, «Etat de l'art des aérogénérateurs », L'électronique de puissance, vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables, Ed. Novelect-ecrin, 2002.
- [27]. J. XU «Filtrage active shunt des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité». Thèse de doctorat de l'INPL, Nancy, Janvier 1994.
- [28]. M. Boudjdaimi «Commande d'un onduleur par des approches basées sur des réseaux de neurones artificiels». Mémoire de magister, UMMTO, 27/09/2009.
- [29] Mémoire de magister en Electrotechnique. Option entraînements électriques.
- [30] Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de magister en électrotechnique. Option Réseaux Electriques
- [31] Y. Pankow; « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau BT. Application au GPV », Centre National de Recherche Technologique de Lille, Décembre 2004.
- [32] <http://www.pvsyst.com/>
-

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [33] O. 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 de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, Décembre 2002.
- [34] Y. Tian; «Analysis, simulation and DSP based implementation of asymmetric three-level single-phase inverter in solar power system», the Florida state university, 2007.
- [35] A. Cid Pastor ; « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », thèse de Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Septembre 2006.
- [36] I. Marie-Joseph; «Méthodologie de diagnostic appliquée à la maintenance préventive d'unités de production électrique en site isolé », l'ADEME – thèse, 2003.
- [37] V. Quaschnig; «Numerical simulation of current-voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells », Solar energy, Vol. 56, N°.6, pp. 513-520, 1996.
- [38] L. Protin, S. Astier, ; «Convertisseurs photovoltaïques », Techniques de l'ingénieur- Génie Electrique D3 360.
- [39] A. DUMBS; « Développement d'outils pour l'analyse des systèmes hybrides photovoltaïque-diesel»,thèse de l'Ecole des mines de Paris, Décembre 1999.
- [40] H.J. Möller ; «Semiconductors for Solar Cells », Artech House, Inc, Norwood, MA, 1993.
- [41] H. Knopf; «Analysis, simulation, and evaluation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle », Master of Science in Electrical and Computer Engineering, PortlandState University, 1999.
- [42] Gottschalg, M. Rommel, D. G. In_eld, and H. Rysse; «Comparison of different methods for the parameter determination of the solar cell's double exponential
-

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

equation»14th European Photo-voltaic Science and Engineering Conference (PVSEC), Barcelona, Spain, 1997.

[43] T. Diveux ; « Implantation d'un système éolien, optimisation par algorithmes génétiques », thèse de Doctorat de l'ENSAM (LEPT), Septembre 2000.

[44] C.W.A. Baltus¹, J.A. Eikelboom¹ and R.J.C. vanZolingen; «Analytical monitoring of losses in PVsystems », Netherlands Energy Research Foundation ECN-Shell Solar Energy Netherlands.

