

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOAND OULHADJ-BOUIRA



Faculté des Sciences et Sciences Appliquées
Département Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :
Zennati Cylia
Zaknoune Assia

En vue de l'obtention du diplôme de **Master en :**

Filière : ELECTRONIQUE
Option : électronique des Système Embarqué

Thème :

***Etude et modélisation d'un algorithme MPPT
pour un générateur photovoltaïque***

Devant le jury composé de :

M.Mohammedi Ahmed
M.Kherchi Mohamed
Mme.Madi Saida

MAA
MAA
MAB

UAMOB
UAMOB
UAMOB

Président
Encadreur
Examineur

Année Universitaire 2019/2020

Résumé

À l'ère du développement durable, la technologie photovoltaïque a montré son potentiel significatif comme source d'énergie renouvelable. Ce mémoire est centré sur l'amélioration des performances et du rendement d'un système photovoltaïque à travers l'utilisation d'un algorithme approprié pour la commande de l'interface de puissance.

Dans ce travail, on a analysé la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique « perturbation et observation » assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV. Dans notre analyse, on a conçu un système PV où le générateur PV est le module MSX60 produisant, dans les conditions standards de test (CST), une puissance crête de 60W, un courant optimal de 3.5 A et une tension optimale de 17.1V. Les résultats de simulation obtenus sous Matlab/Simulink montrent la performance du contrôle dans le comportement dynamique des systèmes photovoltaïques.

Mots clés: Système Photovoltaïque – Convertisseur (DC/DC) - Commande MPPT – Modélisation – Simulation.

المخلص

في عصر التنمية المستدامة أظهرت التكنولوجيا الكهروضوئية إمكانات كبيرة كمصدر للطاقة المتجددة. هذه الأطروحة تتركز على تحسين أداء و كفاءة النظام الكهروضوئي من خلال استخدام خوارزمية مناسبة للتحكم في واجهة الطاقة. الهدف الرئيسي هو إيجاد خوارزمية أو قانون التحكم الأمثل لاستخراج الطاقة القصوى المتاحة من المولدات الكهروضوئية.

في هذا العمل قمنا بتحليل التصميم و محاكاة الاشتغال الكهربائي للنظام الكهروضوئي وفق الآلية الرقمية " الاضطراب و الملاحظة " لضمان متابعة الاستطاعة الاعظمية المفرغة عن طريق المولد الكهروضوئي.

في هذا التحليل قمنا باخذ النظام الكهروضوئي او المولد الكهروضوئي ذو الصنف MSX60 المنتج في الشروط النظامية لتجربة استطاعة اعلاه 60 واط و تيار ذوقيمته 3.5 امبر بجهد 17.1 فولط. نتائج المحاكاة المتحصل عليها تمت بواسطة Matlab/Simulink الذي دل على المراقبة في السير الديناميكي للنظام الكهروضوئي

الكلمات المفتاحية: المحول الرفع_ النظام الكهروضوئي_ الية التحكم MPPT_ محاكاة_ التصميم.

Abstract

In the era of sustainable development, photovoltaic (PV) technology has shown significant potential as a renewable energy source. This thesis focuses on improving performance and efficiency of a PV system through the use of an appropriate algorithm for controlling the power interface.

In this work, we analyze the modelisation and the simulation of the electric operation of a photovoltaic (PV) system adapted by an numerical control « perturbation and observation » ensuring the tracking of the maximum power provided by the PV generator. In our analysis, we conceived a PV system where the PV generator is the panel MSX60, this panel gives under the test standard conditions (CST), a power peak of 60W, an optimal current of 3.5A and an optimal voltage of 17.1V. The simulation results under Matlab/Simulink show the control performance and dynamic behaviour of photovoltaic system.

Keywords:

Photovoltaic (PV), converter (DC/DC), control MPPT, Modelisation, Simulation



Remerciement


Nous remercions en premier lieu Dieu qui nous avons donnés ce bien là et pour que nous venons ce jour et la force et la patience pour terminer ce travail.

A la suite Nous tenons à remercier vivement Mr Kharchi Mohamed notre promoteur, qui a fourni des efforts énormes, par leurs informations, leurs conseils et leurs 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,

Et tous les professeurs de département de Génie électrique 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.



Dédicace



Je dédie ce travail :

À la mémoire de mon cher père qui a toujours été mon guide et mon repère, que DIEU le compte parmi ses biens aimés.

À ma chère mère, pour ses prières, ses encouragements et son soutien inconditionnel, moral et financier, ses encouragements, et pour m'avoir permis de réaliser mes études dans les meilleures conditions.

À mon marié Achour et tous sa famille

À mes très chers frères Samir et Mahmoud, mes adorables sœur Thiziri, Dalila et Hakima

À mes adorables neveux Youcef et Issam

À toute la famille Zennati et Nedjadi.

À tout(es) mes cher(es) ami(es) Et toute la promotion 2020 Electronique de Système embarqué à Bouira.

Cylia

Dédicace



Je dédie ce travail :

À mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien inconditionnel, moral et financier, ses encouragements, et pour m'avoir permis de réaliser mes études dans les meilleures conditions.

À mes frères Moussa, Mohamed, Zineddine et Khiredine, mes sœur Kenza, Rana, Hanane, Ahlem et Karima.

À mes neveux Ayoub, Aksil, Dalia, Sojoud et Ellina

À toute la famille Zaknoune

À tout(es) mes cher(es) am(é)es Et surtout mon ami Mohamed Et toute la promotion 2020 Electronique de Système embarqué à Bouira.

Assia

Liste des symboles

- E_g** : Energie de la bande interdite (eV)
FF : Facteur de forme
G : Éclairement absorbé par la cellule
I : Courant (A)
I_{cc} : Courant de court-circuit (A)
I_D : Courant circulant dans la diode (A)
I_L : Courant moyen passant à travers l'inductance
I_{mp} : Courant qui correspond à la puissance maximale (A)
I_{opt} : Courant optimum (A)
I_{ph} : Le photo-courant (A)
I_{ref} : courant de référence
I_{Rsh} : Courant circulant dans la résistance R_{sh} (A)
I_{sat} : Courant de saturation (A)
K : constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/k)
k₁ : constante de proportionnalité
K_i : Coefficient de température en court-circuit
K_v : Coefficient de température en circuit-ouvert
L : l'inductance de filtre de convertisseur statique
n : facteur de non idéalité de la jonction
N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle
N_s : Nombre de modules dans le panneau en série
P : puissance[w]
P_{inc} : puissance solaire incidente
P_{max} : La puissance maximale produite PV (W)
q : charge d'électron (1.602×10^{-19} C)
R : Charge
R_s : Résistance série (Ω)
R_{sh} : Résistances parallèle shunt (Ω)
T : température effective de la cellule en Kelvin
T_{ref} : La température de référence (298 °K)
V : Tension (V)

V_{co} : La tension de circuit ouvert (V)

V_g : énergie de gap

V_{mpp} : Tension qui correspond à la puissance maximale (V)

V_{opt} : Tension optimale (V)

V_{ref} : tension de référence

V_{th} : Tension thermique

η : Rendement

Liste des abréviations

CS : convertisseur statique

CV : Constant Voltage

DSP: digital signal processor

DC/DC : Courant Continu/Courant Continu

IGBT: insulated-gate bipolar transistor

IncCond : Incremental Conductance (Conductance Incrémentale)

GPV : Générateur Photovoltaïque

MPPT : Poursuite du Point de Puissance Maximale, 'Maximum Power Point Tracking'

PPM : Point de Puissance Maximale.

MOSFET: Métal Oxide Silicon Field Effect Transistor

PV : Photovoltaïque

P&O :Perturb And Observe (Perturbation et Observation).

STC: Standard test conditions

Liste des figures

Figure (I.1)	Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	06
Figure (I.2)	Schéma équivalent électrique de la cellule PV	07
Figure (I.3)	Caractéristique I - V courbe d'un dispositif photovoltaïque pratique et les trois points remarquables	09
Figure (I.4)	Composants d'un GPV	11
Figure (I.5)	Schéma bloc de générateur PV en MATLAB SIMULINK	13
Figure (I.6)	Caractéristique I(V) d'une générateur PV (T=25°C, G=1000W/m ²)	14
Figure (I.7)	Caractéristique P(V) d'une générateur PV (T=25°C, G=1000W/m ²)	14
Figure (I.8)	Caractéristique I(V) d'un générateur pour différentes température (G=1000W/m ²)	15
Figure (I.9)	Caractéristique P(V) pour différente températures (G=1000W/m ²)	16
Figure (I.10)	Caractéristique I(V) pour différentes niveaux d'éclairement (T=25°C)	17
Figure (I.11)	Caractéristique P(V) pour différentes niveaux d'éclairement (T=25°C)	17
Figure (I.12)	Influence de résistance série la caractéristique courant-tension (T=25°C, G=1000W/m ²)	18
Figure (I.13)	Influence de résistance série la caractéristique puissance-tension (T=25°C, G=1000W/m ²)	19
Figure (I.14)	Influence de la résistance shunt sur la caractéristique courant-tension (T=25°C, G=1000W/m ²)	19
Figure (I.15)	Influence de la résistance shunt sur la caractéristique puissance-tension (T=25°C, G=1000W/m ²)	20
Figure (I.16)	Caractéristique de nombre des modules en série (T=25°C, G=1000W/m ²)	21
Figure (I.17)	Caractéristique de nombre des modules en parallèles (T=25°C, G=1000W/m ²)	21
Figure (I.18)	Caractéristique de nombre des modules en série et parallèle (T=25°C, G=1000W/m ²)	22
Figure (II.1)	Chaine élémentaire de conversion photovoltaïque à base de Convertisseur DC DC contrôlé par une commande MPPT	24
Figure (II.1)	Schéma de principe de l'hacheur	25
Figure (II.2)	Schéma électronique de convertisseur abaisseur « Buck »	26
Figure (II.3)	Convertisseur Buck durant l'état On	26
Figure (II.4)	Convertisseur Buck durant l'état Off	27
Figure (II.5)	Formes d'onde des Courants et des Tensions d'un convertisseur	28

	abaisseur	
Figure (II.6)	Le convertisseur BOOST	28
Figure (II.7)	Schéma équivalent de la phase 1	29
Figure (II.8)	Circuit équivalent pour TOff	30
Figure (II.9)	Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur boost	31
Figure (II.10)	schéma bloc de simulation du convertisseur Buck	31
Figure (II.11)	Résultats de simulation de la tension d'entrée du hacheur Buck	32
Figure (II.12)	Résultats de simulation de courant de sortie du hacheur Buck	32
Figure (II.13)	Résultats de simulation de la tension de sortie du hacheur Buck	33
Figure (II.14)	signale de commande du hacheur Buck	33
Figure (II.15)	schéma bloc de simulation du convertisseur Boost	34
Figure (II.16)	Résultats de simulation de la tension d'entrée du hacheur Boost	34
Figure (II.17)	Résultats de simulation de courant de sortie du hacheur Boost	35
Figure (II.18)	Résultats de simulation de la tension de sortie du hacheur Boost	35
Figure (III.1)	Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque	39
Figure (III.2)	Principe de la commande MPPT	39
Figure (III.3)	Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température	40
Figure (III.4)	Recherche du PPM par la méthode (P&O)	43
Figure (III.5)	l'algorithme de P&O classique	45
Figure (III.6)	structure de base de la commande floue	46
Figure (III.7)	Caractéristique de tension-puissance du panneau	47
Figure (III.8)	Organigramme de la méthode INC	48
Figure (IV.1)	Principe du couplage direct	49
Figure (IV.2)	Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge.	53
Figure (IV.3)	puissance maximale de module PV	53
Figure (IV.4)	Montage du module PV directement avec la charge	55
Figure (IV.5)	Schéma de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC contrôlé par une commande MPPT sur charge DC	55
Figure (IV.6)	Schéma bloc sous Simulink du système global	56
Figure (IV.7)	schéma bloc de simulation de l'algorithme (P&O).	57
Figure (IV.8)	Résultats de simulation de la tension générée par le générateur photovoltaïque pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$	58
Figure (IV.9)	Résultats de simulation de courant générée par le générateur photovoltaïque pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$	59
Figure (IV.10)	Résultats de simulation de la puissance générée par le générateur photovoltaïque pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$	59
Figure (IV.11)	Résultats de simulation de la tension de sortie du système pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$	60

Figure (IV.12)	Résultats de simulation du courant de sortie du système pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$	60
Figure (IV.13)	Résultats de simulation de la puissance de sortie du système pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$	61
Figure (IV.14)	Variation de l'irradiation (W/m^2).	61
Figure (IV.15)	Réponse du système PV aux changements de l'irradiation	63
Figure (IV.16)	Variation de Température ($^\circ\text{K}$).	64
Figure (IV.1)	Réponse du système PV aux changements de Température ($^\circ\text{K}$).	64

Liste des tableaux

Tableau I.1 : caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau MSX60 Dans les conditions standards « CST »	12
Tableau III.1 Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue.	46

Sommaire

<i>Sommaire</i>	I
<i>Liste des symboles</i>	IV
<i>Liste des abréviations</i>	V
<i>Liste des tableaux</i>	VI
Introduction générale	1

Chapitre I

Modélisation et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque

I.1. Introduction.....	3
I.2. Principe de la conversion photovoltaïque	3
I.2.1. L'effet photovoltaïque	3
I.2.2. La cellule photovoltaïque	4
I.3. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque.....	5
I.3.1. Caractéristique électrique (courant-tension) d'une cellule.....	5
I.3.2. Paramètres d'une cellule photovoltaïque	7
I.3.2.1. Courant de court-circuit (I_{cc})	7
I.3.2.2. Tension de circuit-ouvert (V_{co}).....	8
I.3.2.3. Puissance de la cellule PV	8
I.3.2.4. Puissance maximale Idéale d'une cellule PV	8
I.3.2.5. Rendement énergétique	9
I.3.2.6. Facteur de forme	9
I.4. Module photovoltaïque	9
I.5. Modélisation du générateur photovoltaïque.....	10
I.6. Simulation du générateur PV par Matlab-Simulink.....	11
I.6.1. Comportement d'un générateur photovoltaïque.....	13
I.6.1.1. Influence de la température sur le générateur PV.....	13
I.6.1.2. Influence de l'éclairement sur le générateur PV.....	14
I.6.1.3. Influence de résistance série	16
I.6.1.4. Influence de résistance shunt	17
I.7. l'association des modules PV	18

I.7.1. Mise en série.....	18
I.7.2. Mise en parallèle	19
I.7.3. Mise en série-parallèle	20
I.8. Conclusion	20

Chapitre II

Modélisation et simulation d'un convertisseur DC/DC

II.1.Introduction	21
II.2. Convertisseur DC/DC (hacheur)	22
II.3. Modélisation des hacheurs.....	23
II.3.1. Hacheur dévolteur « Buck »	23
II.3.2. Hacheur survolteur « Boost»	25
II.4. Simulation.....	28
II.4.1. Simulation d'un hacheur série (Buck)	28
II.4.2. Simulation d'un hacheur parallèle (Boost)	31
II.5. Conclusion	33

Chapitre III

Modélisation de l'algorithme MPPT

III.1. Introduction	34
III.2. MPPT	34
III.3. Principe du MPPT	34
III.4. Gestion de la MPPT	36
III.5. Classification Des Commandes MPPT	37
III.5.1. Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée	37
III.5.1.1. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS.....	37
III.5.1.2. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur	37
III.5.2. Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche.....	38
III.5.2.1. MPPT Indirect.....	38
III.5.2.2. MPPT Direct	38
III.6. Les Algorithmes MPPT.....	39
III.6.1. Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)	39

III.6.2. La Commande Mppt Flou.....	41
I.6.3. Technique d'Incrémental Conductance (IC).....	44
III.6.4. Autres Méthodes.....	45
III.7. Conclusion.....	46

Chapitre IV

Simulation de la chaine de conversion PV sous MATLAB/SIMULINK

IV.1 Introduction.....	47
IV.2 Connexion direct source PV-Charge.....	47
IV.2.1 Simulation de Connexion direct source PV-Charge.....	49
IV.3. Connexion à travers un étage d'adaptation entre un générateur PV et une charge.....	51
IV.3.1. Système global (GPV, Boost, P&O, charge).....	52
IV.3.1.1. Simulation de la commande (P&O).....	53
IV.3.1.2. La Charge.....	53
IV.3.2. simulation de système global	53
IV.3.2.1. Simulation sous des conditions climatiques stables	53
IV.3.2.2. Simulation sous des conditions climatiques variable	57
IV.4. Conclusion	60
Conclusion générale.....	61

Introduction

Générale

Introduction générale

Le besoin énergétique, sous ses diverses formes, a rencontré une augmentation très significative dans le domaine industrielle, ce qui a obligé les scientifiques de chercher de nouvelles solutions pour fournir et développer, et même de rationaliser l'exploitation des énergies.

Jusqu'à maintenant, l'énergie électrique est la source la plus utilisée dans les différents domaines, dans les plus grandes usines aux plus petits appareils électroniques, Pour générer cette énergie, plusieurs techniques sont utilisées, on trouve notamment les Générateurs, basés sur l'énergie fossile, particulièrement le pétrole, ou bien qui utilisent l'énergie nucléaire. Ces types d'énergie posent des problèmes environnementaux et même économiques, ce qui oblige à penser sérieusement aux énergies renouvelables.

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables : l'énergie Hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque.

Parmi les énergies les plus modernes, qui ont un brillant avenir, car ils sont propres et écologiques : « l'énergie solaire ». Il existe plusieurs façons d'utiliser cette énergie pour produire de l'électricité, mais la méthode la plus importante, et celle basée sur le principe de la photovoltaïque, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

La chose connue sur l'énergie solaire c'est que rendement réel de la conversion d'un module photovoltaïque est faible. Il faut donc exploiter la plus grande puissance d'énergie fournie par le module solaire. Autrement dit, il faut faire fonctionner le système photovoltaïque dans son point de puissance maximale.

Dans ce contexte, de nombreux chercheurs se sont attachés à inventer des systèmes permettant de récupérer toujours le maximum d'énergie : c'est le principe nommé maximum power point tracker (MPPT) qui est l'objet principal de ce mémoire.

Le suivi du point de puissance maximale peut être obtenu en utilisant plusieurs méthodes, telles que la méthode de perturbation et d'observation de la méthode de conductance incrémentale et des méthodes intelligentes. Ces méthodes varient dans leur simplicité, leur vitesse de convergence et leur implémentation matérielle.

Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés dans ce travail essentiellement au développement d'une procédure d'optimisation qui permet la poursuite de point de la puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT) d'un générateur photovoltaïque (GPV), pour une bonne exploitation, quelques soient les conditions météorologiques (température et éclairement). Ceci nécessite l'implémentation d'une technique de poursuite de point maximale de puissance, telle que la méthode de Perturbation-Observation (P&O). Ce mémoire est partagé en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, on fait une généralité sur les générateurs photovoltaïques. On présente le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. En suite on fait à l'aide de l'outil MATLAB-SIMULINK l'étude par simulation sur les générateurs PV et leurs performances.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté une étude théorique et par simulation des hacheurs. On a présenté les deux types des hacheurs : abaisseur et élévateur.

Le troisième chapitre, présentera le principe de la recherche de point maximal, les classifications de la commande MPPT et des études théoriques de quelques-unes de ces méthodes, tel que l'algorithme de perturbation et l'observation (P&O).

Le quatrième chapitre nous allons étudier le problème de couplage puis analyser deux modes différents : couplage direct et couplage à travers un étage adaptateur .et ainsi la simulation sous l'environnement de simulation (MATLAB/SIMULINK) de l'ensemble (PV-hacheur BOOST-P&O). Une technique de maximation de puissance très répondu qui est le perturb and observe (P&O) qui sera faite.

Nous terminerons par une conclusion générale sur l'ensemble de cette étude.

Chapitre I

Modélisation et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque

I.1. Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Cette énergie solaire est disponible sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol [1-2].

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et le générateur photovoltaïque(GPV). Nous allons modéliser la caractéristique électrique de GPV et voir l'effet de la température, de l'éclairement, de regroupement de cellule (série, parallèle, série – parallèle) ainsi l'effet de la résistance série et shunt sur ses performances, nous avons utilisé l'outil MATLAB -SIMULINK accomplir ce travail.

I.2. Principe de la conversion photovoltaïque

I.2.1. L'effet photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » vient du Grec et qui signifie Lumière, il est composé de deux parties : « photos » (lumière) et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui invente la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt.

Il s'agit de transformer l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique par le biais d'un capteur constitué de matériaux sensibles à l'énergie contenue dans les photons. Ce capteur se présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule nommée cellule PV. L'effet photovoltaïque fut observé la première fois par le physicien français Edmond Becquerel [3]. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire ou de base d'un système photovoltaïque [4].

I.2.2. La cellule photovoltaïque

Une cellule PV « photopile » est un composant électronique réalisé à l'aide de composants semi-conducteurs qui possèdent la particularité de produire l'électricité quand ils sont éclairés. Elle est généralement conçue du silicium sous ses différentes formes [5].

En fait, la photopile est composée de matériaux semi-conducteurs dopés P (excès de trous) et N (excès d'électrons) dont la jonction de type P-N permet aux électrons excédentaires de la zone N de traverser la jonction et d'occuper les trous de la zone P. Ainsi, lorsque la lumière frappe la surface (dopée N) d'une cellule photovoltaïque, les photons constituant cette lumière communiquent leur énergie aux atomes du matériau en libérant les électrons des atomes qui génèrent ainsi des charges N (les électrons) et des charges P (les trous). Or le déplacement d'électrons (créé par l'énergie des photons) est synonyme de production d'électricité. Pour une photopile, la production d'électricité est liée à la production d'électrons (et de trous) par les photons de la lumière qui éclaire le dispositif. Plus de photons frappent la cellule, plus la quantité d'électricité produite est importante. Pour un éclairage donné, cette quantité dépend du rendement de conversion de la photopile (énergie produite/énergie reçue) voir la figure (I.1) [6].

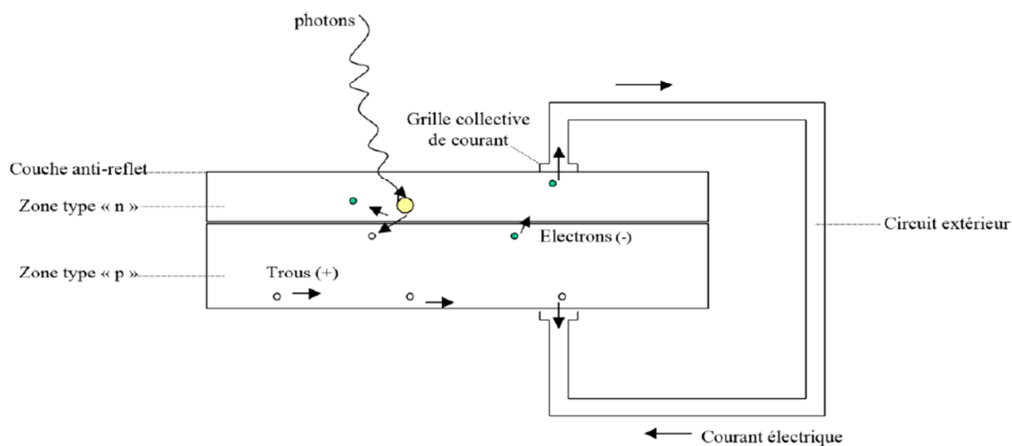


Figure I.1 : Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque [6]

I.3. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

I.3.1. Caractéristique électrique (courant-tension) d'une cellule

La modélisation du comportement d'une cellule PV fait appel aux propriétés du rayonnement solaire et celles des semi-conducteurs. Dans la littérature, il existe plusieurs modèles mathématiques d'une cellule photovoltaïque dont le but est l'obtention de la caractéristique courant-tension (I-V). Ces modèles diffèrent entre eux par la structure choisie du panneau PV et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la paire courant-tension. Le modèle à une diode est le plus classique. Il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident et une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série et shunt R_s et R_{sh} respectivement. La résistance série est due à la contribution des résistances de base, du front de la jonction et des contacts faces avant et arrière. La résistance shunt caractérise les courants de fuite de la jonction [7] (voir Figure (I.2)).

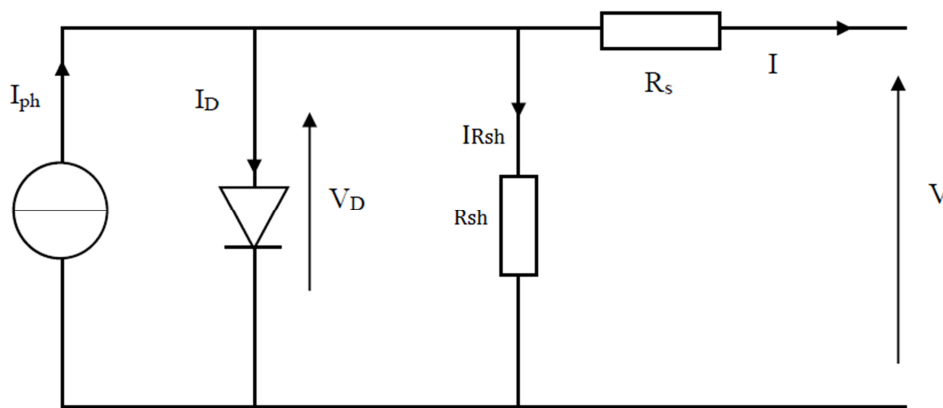


Figure I.2 : Schéma équivalent électrique de la cellule PV

La caractéristique I-V du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par un circuit équivalent.

Avec un tel circuit électrique équivalent, on peut écrire :

La loi de Kirchhoff nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_{ph} = I_D + I_{Rsh} + I \quad \text{Donc} \quad I = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \quad (\text{I-1})$$

Et :

$$I_{ph} = \left(I_{cc} + K_i (T - T_{ref}) \right) \frac{G}{1000} \quad (\text{I-2})$$

$$I_D = I_{sat} \left(\exp \frac{q(V + R_s I)}{nKT} - 1 \right) \quad (\text{I-3})$$

$$I_{Rsh} = \frac{V_D}{R_{sh}} = \frac{V+R_S*I}{R_{sh}} \quad (I-4)$$

Avec :

- V_{th} tension thermique a la Température T :

$$V_{th} = \frac{kT}{q} \quad (I-5)$$

- I_{sat} : Courant de saturation inverse de la diode donner par :

$$I_{sat} = K_1 T^3 e^{-\frac{V_g}{kT}} \quad (I-6)$$

Avec :

K_1 : constante (1.2 A/cm² K³)

V_g : énergie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV)

À partir des expressions décrites précédemment on peut déduire le courant délivré par une cellule :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \frac{q(V+R_S*I)}{nKT} - 1 \right] - \frac{V+R_S*I}{R_{sh}} \quad (I-7)$$

Dans cette équation I_{sat} , courant de saturation inverse de la diode d'une cellule ; q , la charge de l'électron ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C) ; k , la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K) ; n , le facteur de non idéalité de la photopile ($1 < n < 2$) ; T , la température de la jonction en K ; I_D , le courant circulant dans la diode ; I , est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur ; V , est la tension aux bornes de la cellule ; I_{ph} , est le photo-courant de la cellule ; R_{sh} et R_S , sont les résistances série et shunt de la cellule [8].

Cette équation est l'origine de la courbe I-V visible sur la figure (I.3), où trois points remarquable sont mis en évidence : point de court-circuit ($0, I_{cc}$), Point de puissance maximale (V_{mpp}, I_{mpp}) et point de circuit ouvert ($V_{co}, 0$).

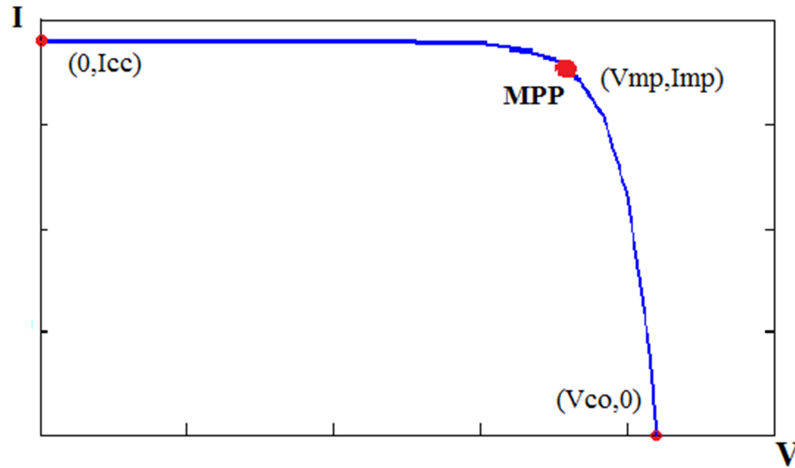


Figure I.3: Caractéristique I - V courbe d'un dispositif photovoltaïque pratique et les trois points remarquables [8].

I.3.2. Paramètres d'une cellule photovoltaïque

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

I.3.2.1. 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 et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (I-7), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{q(R_s I)}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{R_s I}{R_{sh}} \quad (I-8)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme ; $I_{sat} \left[\exp\left(\frac{q(R_s I)}{nKT}\right) - 1 \right]$ devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit et alors:

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (I-9)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{cc} = I_{ph}$) [9].

I.3.2.2. Tension de circuit-ouvert (V_{co})

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'une tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque) [9].

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp \frac{q*V}{nKT} - 1 \right] - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (I-10)$$

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

$$V_{co} = V_t - Ln \left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (I-11)$$

I.3.2.3. Puissance de la cellule PV

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc...), la puissance électrique $P(W)$ disponible aux bornes d'une cellule PV est [9]:

$$P = V.I \quad (I-12)$$

$P(w)$: Puissance fournie par la cellule PV.

$V(V)$: Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

$I(A)$: Intensité débitée par la cellule PV.

I.3.2.4. Puissance maximale Idéale d'une cellule PV

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale P_{max} correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{co} multipliée par le courant de court-circuit I_{cc} [9]:

$$P_{max} = V_{co} * I_{cc} \quad (I-13)$$

La puissance maximale réellement générée par une cellule PV est égale au produit de couple (V_{mpp} , I_{mpp})

$P_{max} (W)$: La puissance fournie par la cellule PV.

$V_{co}(V)$: La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

$I_{cc} (A)$: L'intensité de court-circuit débitée par la cellule PV.

$V_{mpp} (V)$: Tension de point e puissance maximale.

$I_{mpp} (A)$: Courant de point de puissance maximale.

I.3.2.5. Rendement énergétique

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule $P_{max}(I_{mpp}, V_{mpp})$ et la puissance solaire incidente. Il est donné par [9]:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{mpp} * V_{mpp}}{P_{inc}} \quad (I-14)$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

I.3.2.6. Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_s et R_{sh} . Il est défini par [9]:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} * V_{co}} = \frac{I_{mpp} * V_{mpp}}{I_{cc} * V_{co}} \quad (I-15)$$

I.4. Module photovoltaïque

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel (figure I.4). Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules [10].

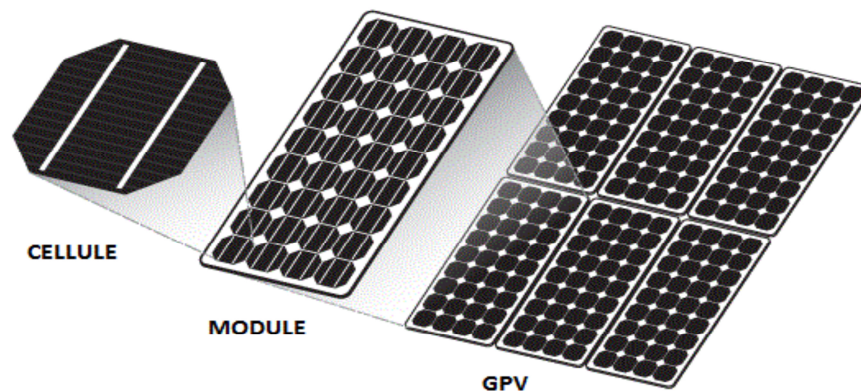


Figure I.4 : Composants d'un GPV

I.5. Modélisation du générateur photovoltaïque

Nous avons pris un générateur composé de 36 cellules connectées en série et est considéré dans les conditions standards. $T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$.

Le tableau suivant représente les caractéristiques du module PV dans les conditions de test standard (STC).

Puissance maximale, P_{\max}	60W
Tension de P_{\max} , V_{mp}	17.1V
Courant de P_{\max} , I_{mp}	3.5A
Courant de court-circuit, I_{cc}	3.8A
Tension de circuit-ouvert, V_{co}	21.1V
Coefficient de température en circuit-ouvert V_{co} , K_V	-80mV/ $^{\circ}\text{C}$
Coefficient de température en court-circuit I_{cc} , K_i	2.4mA/ $^{\circ}\text{C}$
Nombre de cellules	36
Courant de saturation I_{sat}	2.16e-08A
Le facteur d'idéalité	1.2
Energie de la bande interdite	1.12ev

Tableau I.1 : caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau MSX60 Dans les conditions standards « CST » [11]

Les équations décrites précédemment ne peuvent représenter la caractéristique (I-V) d'un module PV puisqu'elles sont propres à une seule cellule PV qui représente l'élément de base du panneau, on introduit donc l'équation spécifique à un module :

$$I = N_P I_{ph} - N_P I_{sat} \left[\exp \frac{q(V+R_S I)}{N_S n K T} - 1 \right] - N_P \frac{V+R_S I}{R_{sh}} \quad (\text{I-16})$$

Où :

N_S : Nombre de cellules connectées en série dans un module.

N_P : Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module.

Et :

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_i(T - 298.15)) \frac{G}{1000} \quad (I-17)$$

$$I_{sat} = \frac{I_{cc} + K_i(T - 298.15)}{\exp\left(\frac{q(V_{co} + K_v(T - 298.5))}{nKT N_s}\right) - 1} \quad (I-18)$$

I.6. Simulation du générateur PV par Matlab-Simulink

L'outil **Matlab-Simulink** est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la Simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal [12]. La figure (I.5) représente le Schéma bloc de générateur PV en MATLAB-SIMULINK.

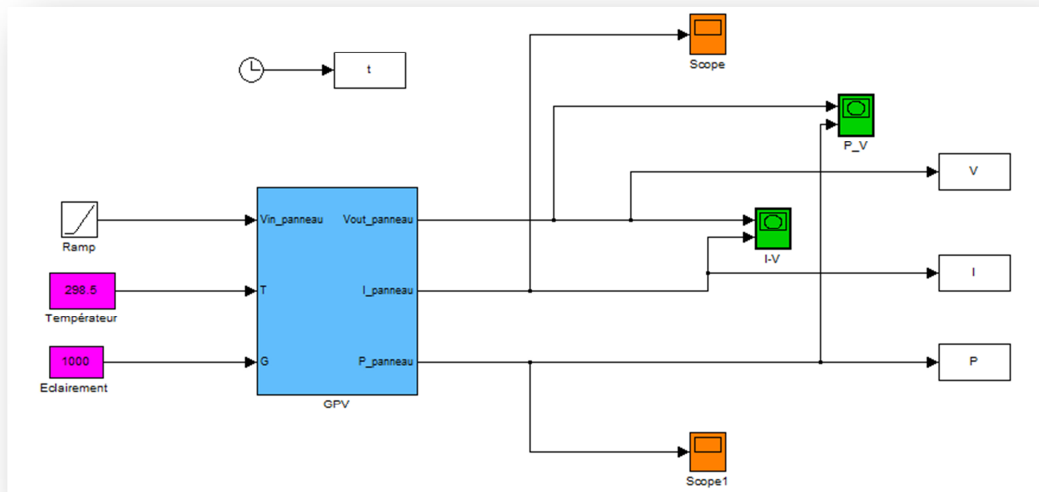


Figure I.5 : Schéma bloc de générateur PV en MATLAB-SIMULINK

Les résultats de simulation du générateur photovoltaïque représentent par les figures (I.6) et (I.7). Ces figures représentent les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension pour un rayonnement constant de 1000W/m^2 et une température de 25°C .

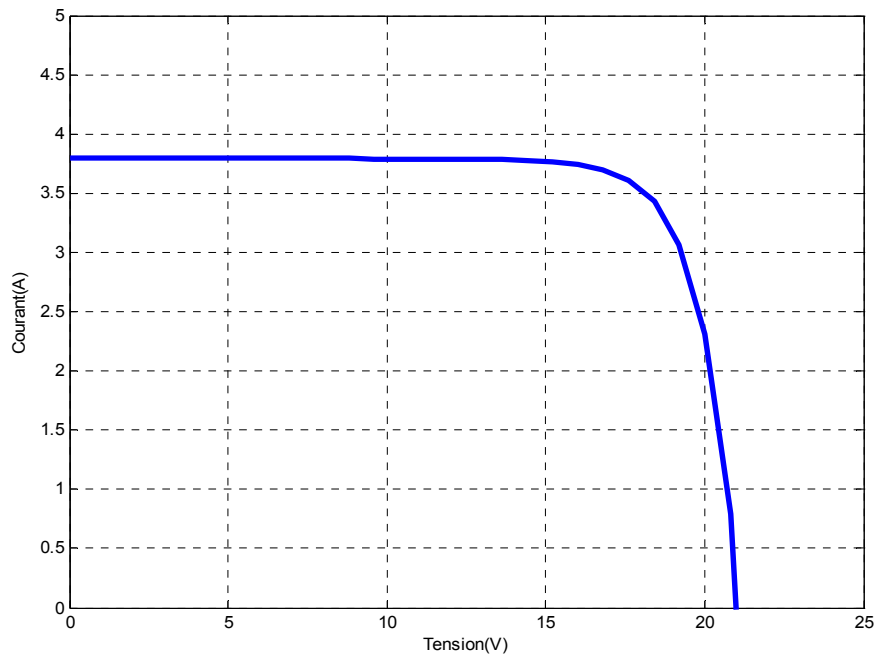


Figure I.6 : Caractéristique I(V) d'une générateur PV ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

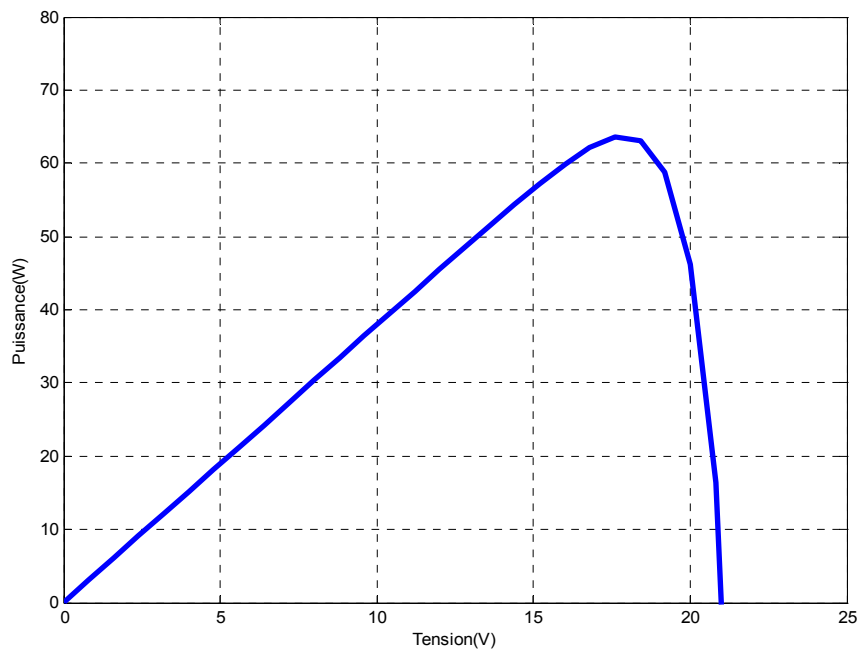


Figure I.7 : Caractéristique P(V) d'une générateur PV ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

I.6.1. Comportement d'un générateur photovoltaïque

L'objectif dans cette étude est de montrer l'influence de certains paramètres telle que (l'ensoleillement ou irradiation, la température, résistance série et shunt) sur le générateur PV.

I.6.1.1. Influence de la température sur le générateur PV

Pour le fonctionnement d'un panneau solaire, la cellule PV doit s'exposer au rayonnement solaire. Ceci provoque un échauffement et la température agit sur les différentes caractéristiques de la cellule [13].

On fixe l'ensoleillement à 1000 W/m^2 et on fait varier la température de 25°C jusqu'à 75°C , les allures obtenues sont présentées en dessous :

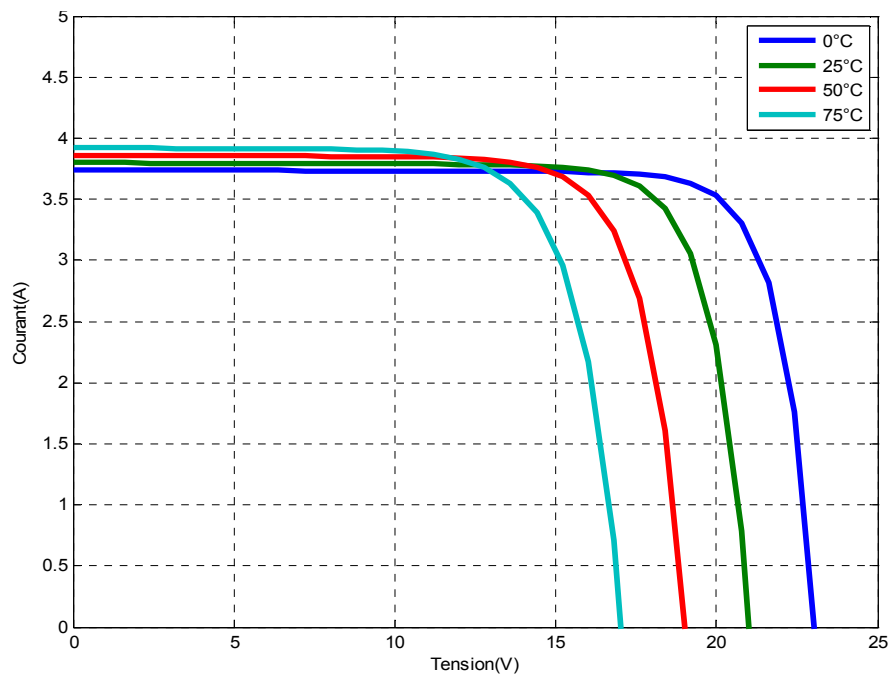


Figure I.8 : Caractéristique I(V) d'un générateur pour différentes températures ($G=1000\text{W/m}^2$).

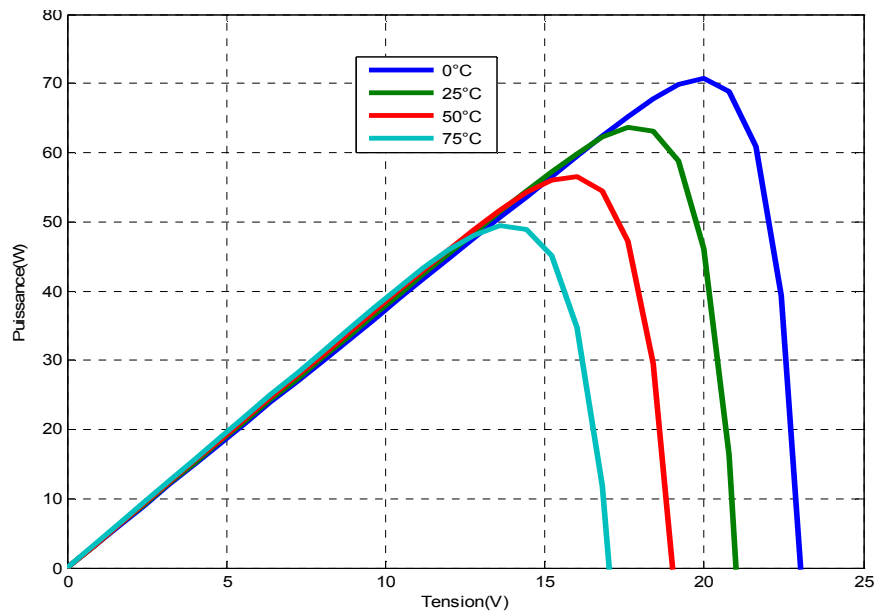


Figure I.9 : Caractéristique P(V) pour différentes températures ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

Les figures (I.8) et (I.9) montrent que la tension à vide d'un module photovoltaïque diminue avec l'augmentation de la température du module PV (de la cellule). Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température du module PV (de la cellule solaire).

Ces figures montrent clairement la baisse du rendement causée par l'augmentation de la chaleur sur la cellule. On peut remarquer sur la figure (I.9) que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

I.6.1.2. Influence de l'éclairement sur le générateur PV

On applique une température $T=25^\circ\text{C}$ maintenue constante et l'on fait varier l'ensoleillement (G) de $400\text{ W}/\text{m}^2$ jusqu'à $1000\text{ W}/\text{m}^2$, les résultats obtenus sont illustrés par les figures suivantes.

Les figures (I.12) et (I.13) montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

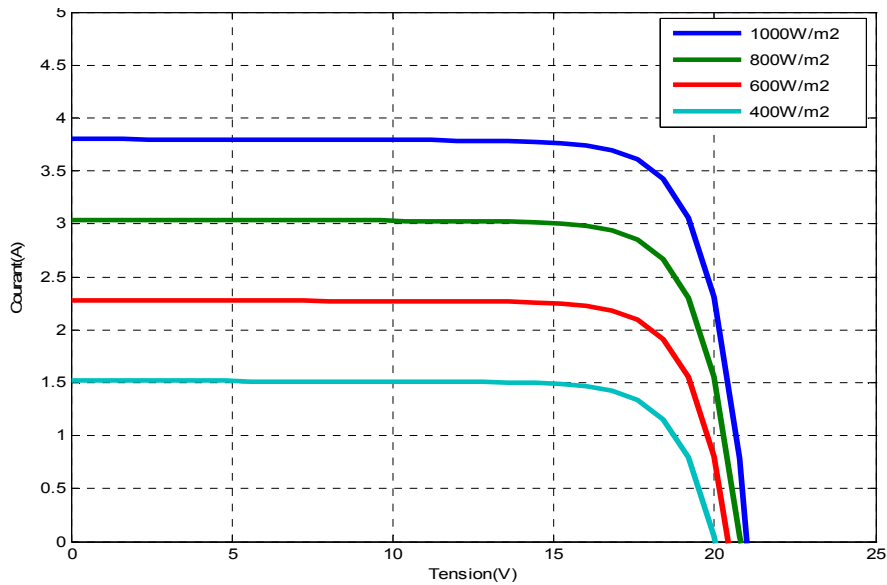


Figure I.10: Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

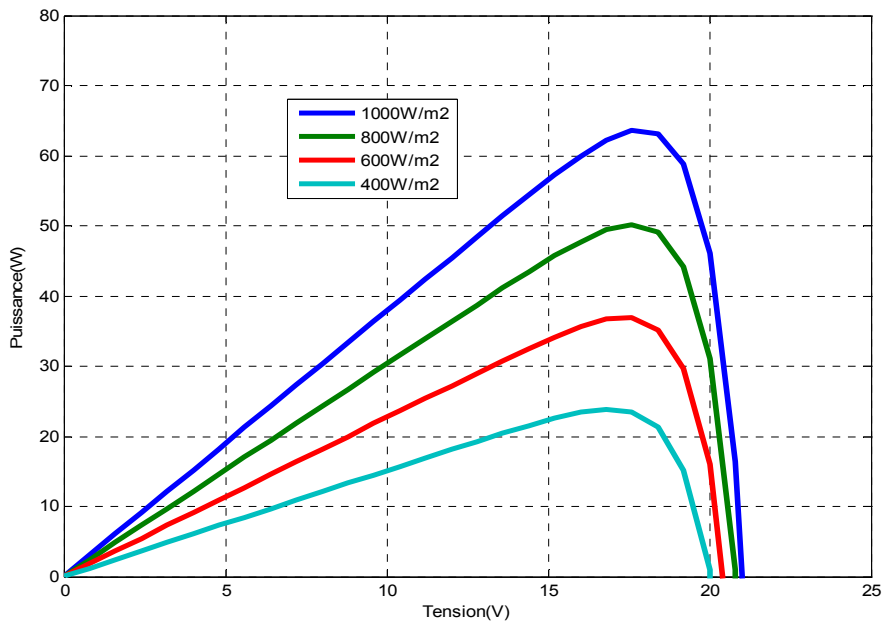


Figure I.11 : Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

Les caractéristiques de figure (I.10) et la figure (I.11) montrent bien la variation du courant du module photovoltaïque ainsi que de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairement. On peut voir aussi sur le graphe l'existence de maximum sur les courbes de puissance. Ces points correspondent aux points de puissances maximales lorsque l'irradiation varie pour une température donnée. On peut voir que le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation. Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert V_{co} (à vide) varie très peu.

I.6.1.3. Influence de résistance série

Les figures I.12 et I.13 montrent l'influence de la résistance série sur la caractéristique I(V) et P(V) de la cellule photovoltaïque.

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension. Elle ne modifie pas la tension du circuit ouvert, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court circuit.

L'augmentation de la résistance série se traduit par une diminution de pente de la courbe de puissance.

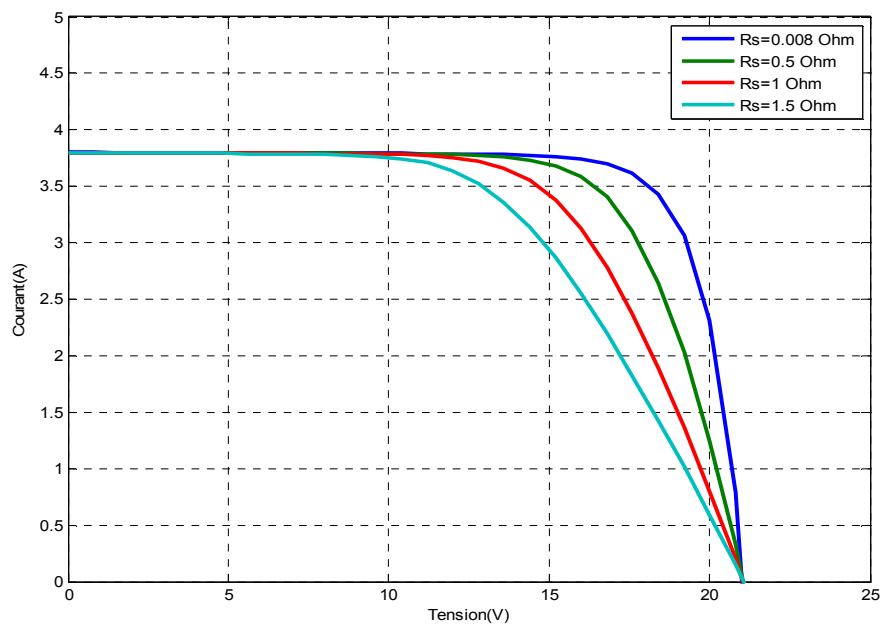


Figure I.12 : Influence de résistance série la caractéristique courant-tension ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

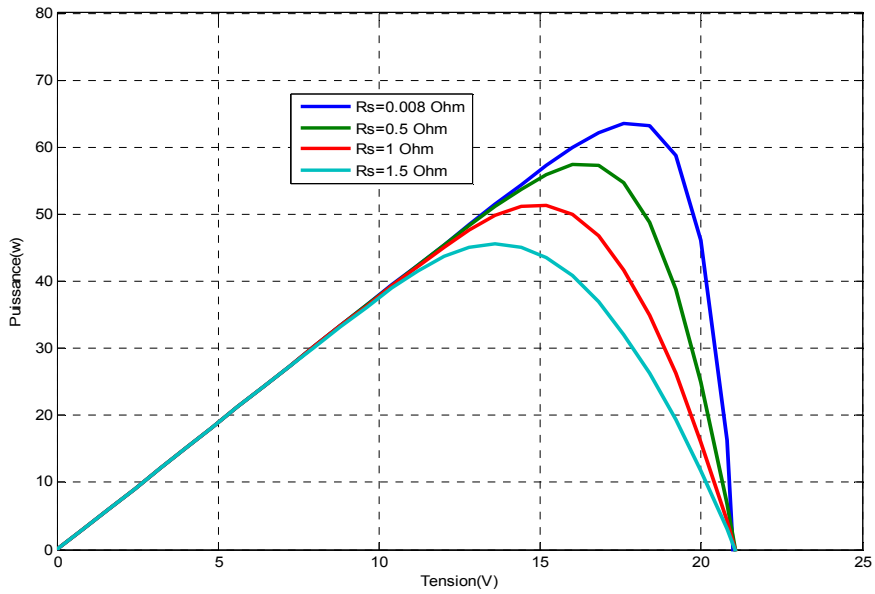


Figure I.13 : Influence de résistance série la caractéristique puissance-tension ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

I.6.1.4. Influence de résistance shunt

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes d'une photopile. En générale, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération de courant.

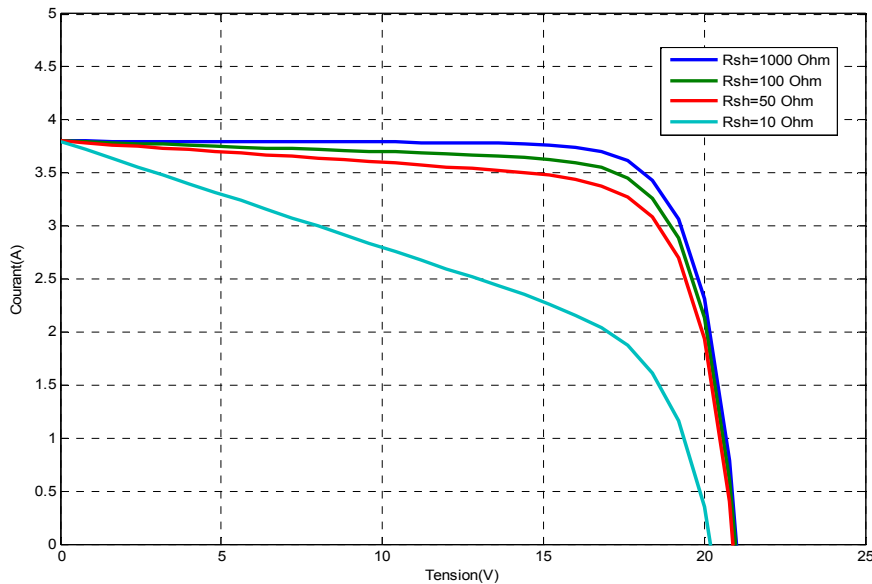


Figure I.14 : Influence de la résistance shunt sur la caractéristique courant-tension ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

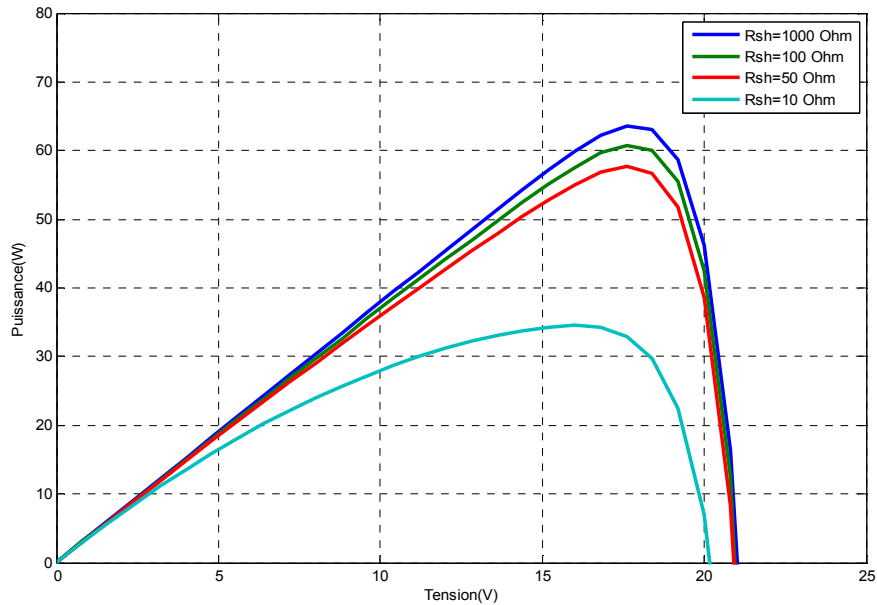


Figure I.15 : Influence de la résistance shunt sur la caractéristique puissance-tension ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

L'influence de la résistance parallèle (shunt) sur la caractéristique courant-tension se traduit par une légère diminution de la tension de circuit ouvert, et une augmentation de la pente de la courbe $I-V$ de la cellule dans la zone correspondante à un fonctionnement comme une source de courant.

Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée. La puissance fournie par une cellule solaire varie avec sa résistance parallèle, plus cette résistance est élevée plus la puissance fournie est importante.

I.7. l'association des modules PV

I.7.1. Mise en série

La caractéristique d'un groupement de N_s modules solaires en série est représentée par la figure suivante :

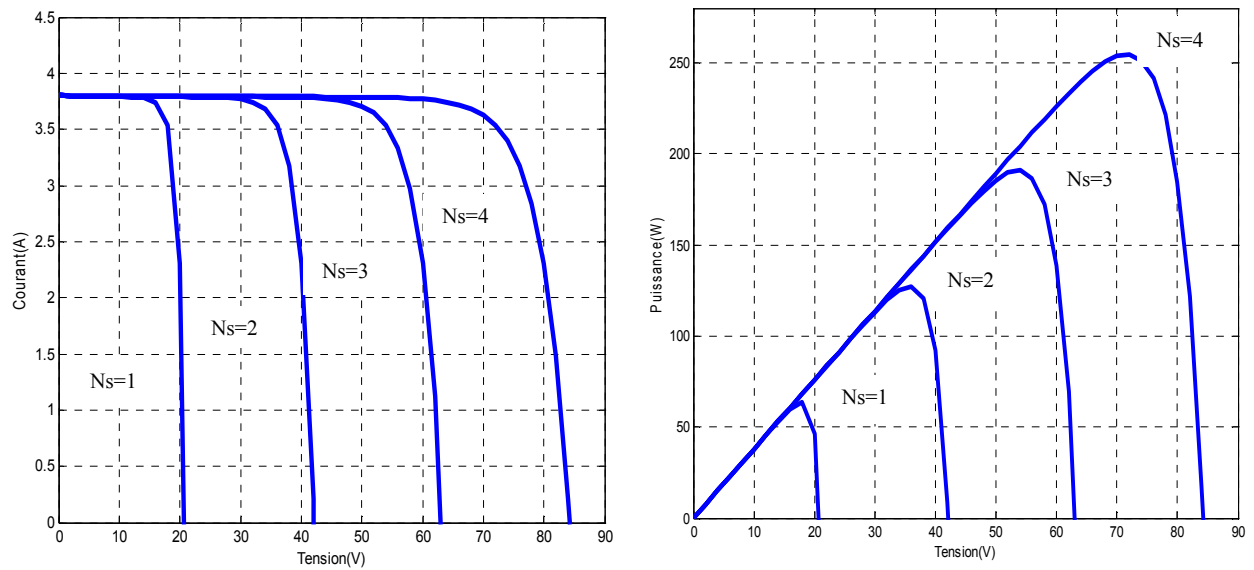


Figure I.16 : Caractéristique de nombre des modules en série($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

Une association de (N_s) cellule en série figure (1.16) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule.

I.7.2. Mise en parallèle

L'association en parallèle des photopiles délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celui d'une seule cellule [14].

La caractéristique d'un groupement de N_p modules solaires en parallèle est représentée par la figure suivante :

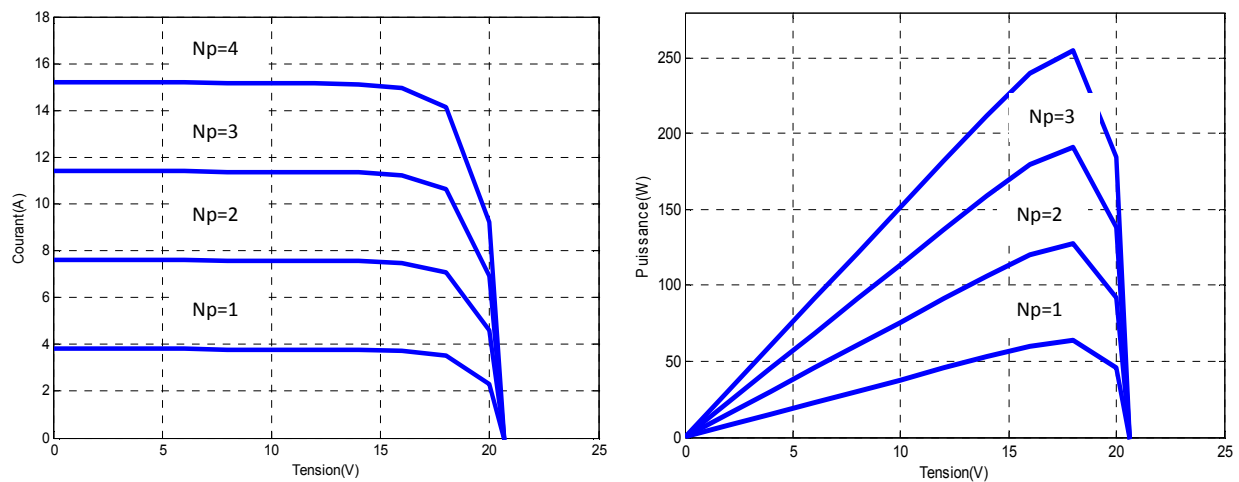


Figure I.17 : Caractéristique de nombre des modules en parallèles($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

I.7.3. Mise en série-parallel

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallel [14]. La figure(I.18).

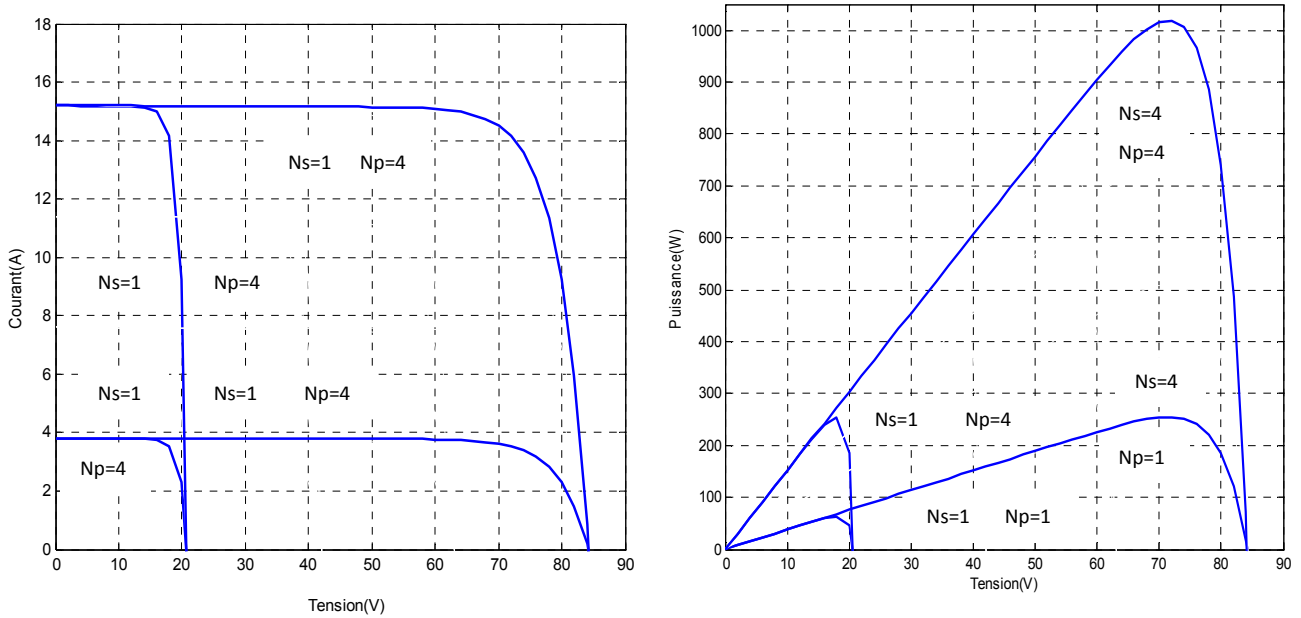


Figure 1.18 : Caractéristique de nombre des modules en série et parallèle($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule et le générateur photovoltaïque, Nous avons vu que la cellule PV présente une caractéristique $I(V)$ non linéaire, présente un point de puissance maximal (PPM) caractérisé par un courant (I_{mpp}) et une tension (V_{mpp}) et qu'elle peut être modélisée par un circuit électrique simple. Ensuite nous avons utilisé l'outil MATLAB-SIMULINK pour simuler le comportement d'un générateur photovoltaïque (composé de 36 cellules connectées en série) dans les conditions standard ($G=1000\text{ W}/\text{m}^2$, $T=25^{\circ}\text{C}$). Nous avons étudié aussi l'influence des différents paramètres sur cette caractéristique.

Chapitre II

Modélisation et simulation d'un convertisseur DC/DC

II.1.Introduction

Les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température. En plus de ces dépendances, le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement et de la température et de la charge. Pour le GPV fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge contrôlé par une commande dite MPPT (Maximum Power Point Tracking) ou SPPM (Suivi de Point de Puissance Maximale) que nous allons présenter dans le prochain chapitre. (Voire la figure suivant).

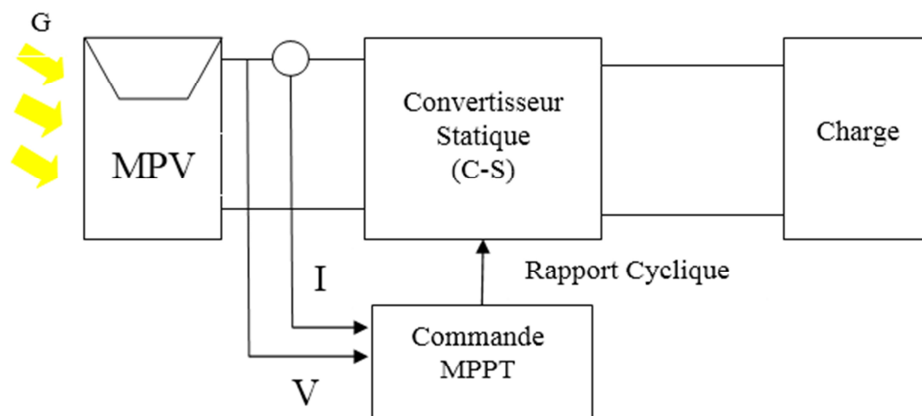


Figure II.1 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque à base de Convertisseur DC-DC contrôlé par une commande MPPT

La Figure (II.1) montre le schéma de principe décrivant les fonctions présentes dans un étage d'adaptation pour GPV réel conçu. Le principe de la commande MPPT délivre l'action de contrôle appropriée afin de suivre le point de puissance maximale à chaque instant. Le choix de la structure de conversion est effectué en fonction de la charge DC à alimenter [15-16].

Le but de ce chapitre est l'étude des types de convertisseurs DC-DC, les plus utilisés dans les systèmes photovoltaïques, comme le hacheur dévolteur, survolteur et le hacheur mixte (dévolteur-survolteur).

II.2. Convertisseur DC/DC (hacheur)

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de générer une tension continue variable à partir d'une source de tension fixe. Ils se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance dans le cas idéal, c'est pour cette raison que les hacheurs ont de bons rendements. Généralement le commutateur est un transistor MOSFET qui travaille en mode (bloqué/saturé). Si le commutateur est bloqué, son courant est nul, il ne dissipe donc aucune puissance ; s'il est saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très petite [17].

La Figure(II.2) rappelle le Schéma de principe du hacheur

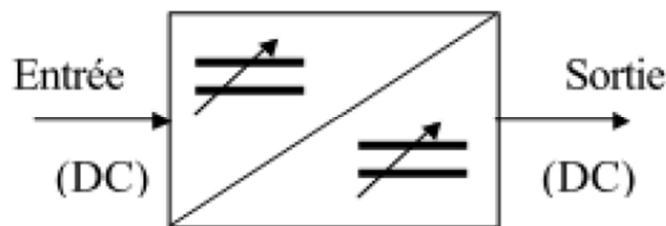


Figure II.2 : Schéma de principe de l'hacheur

Il existe plusieurs types de convertisseurs DC-DC nous citons :

- Convertisseur BUCK (hacheur série).
- Convertisseur BOOST (hacheur parallèle).
- Convertisseur BUCK-BOOST (hacheur série- parallèle).

La topologie Buck est employée pour les faibles tensions. Dans les applications PV, le convertisseur Buck est habituellement employé comme chargeur de batteries et dans des systèmes de pompage de l'eau.

La topologie Boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur BOOST pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telles que le BUCK-BOOST. Les convertisseurs DC-DC peuvent être vus comme des transformateurs DC-DC [19].

Le présent travail est basé sur le convertisseur Boost et Buck.

II.3. Modélisation des hacheurs

II.3.1. Hacheur dévolteur « Buck »

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur Buck ou hacheur série ou encore hacheur abaisseur. C'est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

Le schéma d'un hacheur abaisseur est indiqué à la figure (II.3). Le commutateur Q peut être un transistor MOSFET ou un IGBT qui peut se commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement [20].

La tension de la source V_e doit être plus grande que la tension aux bornes de la charge V_s .

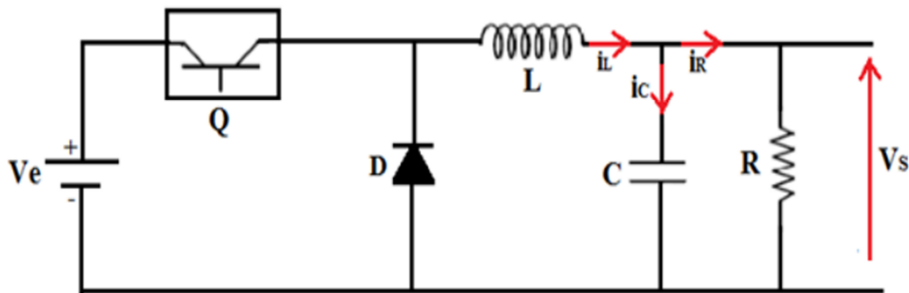


Figure II.3 : Schéma électronique de convertisseur abaisseur « Buck »

Ce convertisseur a deux phases de fonctionnement :

- **Phase 1, Q fermé :** Si le commutateur Q est activé à $t=0$, un courant circule dans le circuit, mais ne passe pas par la diode D puisqu'elle est inversement polarisée. Le courant i_L n'augmente pas immédiatement, mais plutôt linéairement avec un taux d'accroissement imposé par l'inductance L [20].

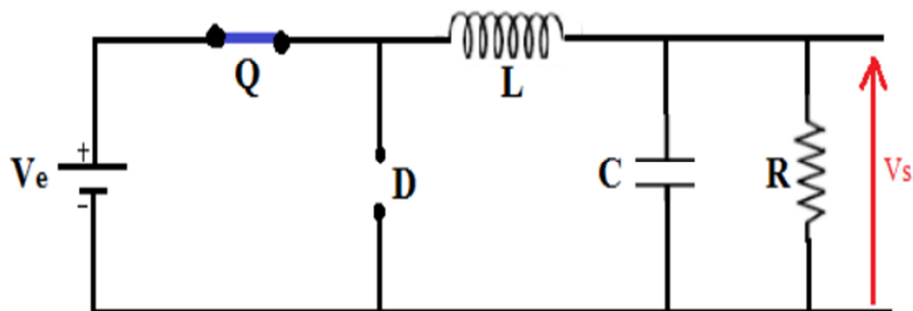


Figure II.4 : Convertisseur Buck durant l'état On

Durant cette phase, on a :

Les équations des tensions des interrupteurs : $V_T = 0$ et $V_D = V_e$

L'équation de tension aux bornes de l'inductance:

$$V_L = V_e - V_S = L \frac{di}{dt} > 0 \quad (\text{II-1})$$

Par intégration de l'équation, on peut on déduit le courant I_L :

$$I_L = \frac{V_e - V_S}{L} t + I_{\min} \quad (\text{II-2})$$

Durant cette phase, l'inductance emmagasine de l'énergie sous forme magnétique.

- **Phase 2, Q ouvert** : Si Q est désactivé à $t = t_1$, la charge est déconnectée de son alimentation. Le courant est toutefois maintenu par l'énergie stockée dans l'inductance L et circule à travers la diode D appelée diode de roue libre. Cette dernière permet d'évacuer l'énergie emmagasinée dans l'inductance à l'ouverture du commutateur sans créer de surtension.

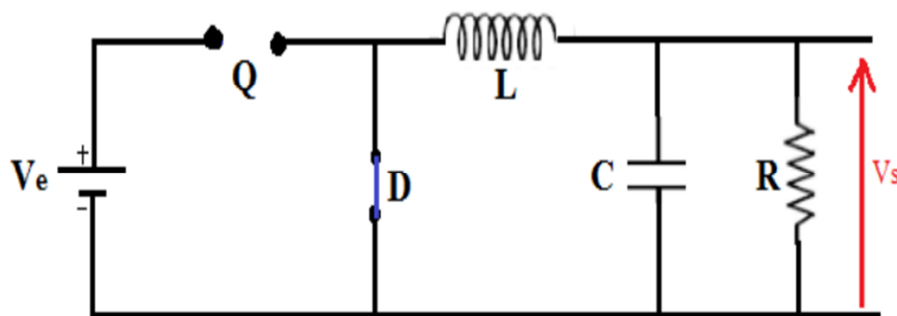


Figure II.5 : Convertisseur Buck durant l'état Off

Durant cette phase, on a :

Les équations des tensions des interrupteurs : $V_D = 0$ et $V_T = V_e$

L'équation de tension aux bornes de l'inductance:

$$V_L = -V_S = L \frac{di}{dt} < 0 \quad (\text{II-3})$$

Par intégration de l'équation, on peut on déduit le courant I_L :

$$I_L = \frac{-V_S}{L} t + I_{\max} \quad (\text{II-4})$$

Remarque : les composants du convertisseur sont dimensionnés pour que les tensions et courants à la sortie présentent de faibles ondulations lors du passage de l'interrupteur de la fermeture à l'ouverture et inversement [21]. Quoi qu'il en soit, la valeur moyenne V_S est inférieure à V_e . Dans le cas où la fréquence est augmentée, par exemple jusqu'aux kHz,

l'inductance nécessaire peut être réduite considérablement. La tension aux bornes de la charge est donnée par :

$$V_s = \frac{T_{ON}}{T} V_e = \alpha V_e \tag{II-5}$$

T_{ON} est la durée de la phase de fermeture de l'interrupteur. Les formes des tensions et des courants d'un hacheur abaisseur dans le cas de la conduction continue sont indiquées sur la (figure II.6)

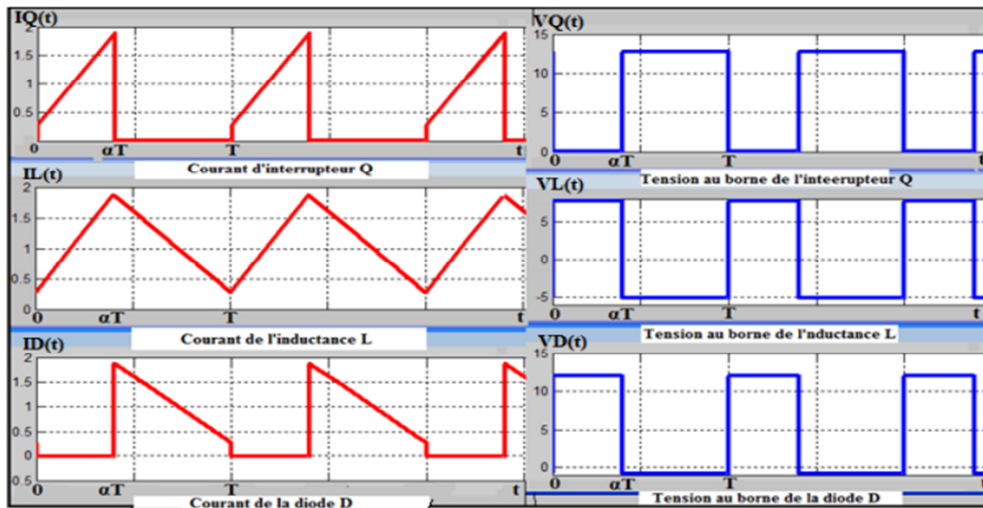


Figure II.6 : Formes d'onde des Courants et des Tensions d'un convertisseur abaisseur[21]

II.3.2. Hacheur survolteur « Boost »

Un hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur .On utilise un hacheur élévateur lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue [21].

Le convertisseur BOOST est connu par le nom d'élévateur de tension peut être représenté par le circuit donne par la Figure (II.7).

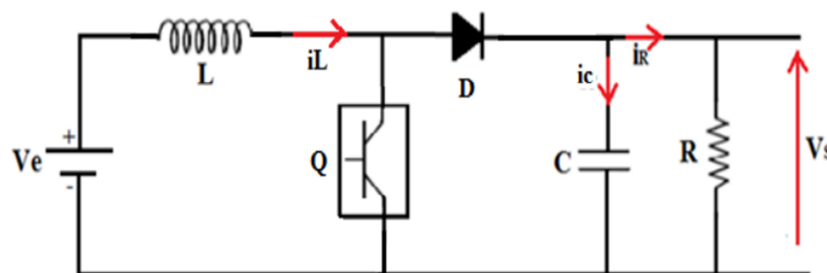


Figure II.7: Le convertisseur BOOST.

Ce convertisseur a deux phases de fonctionnement :

- **Phase 1, Q fermé:** (phase d'accumulation d'énergie), figure (II.8) L'interrupteur Q est fermé ($Q=1$), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance, donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

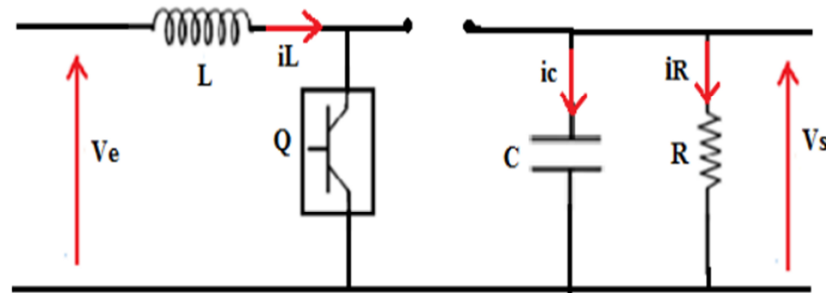


Figure II.8 : Schéma équivalent de la phase 1

Durant l'état passant, la tension de l'inductance est donnée par :

$$V_e = L \frac{di}{dt} \quad (\text{II-6})$$

Par intégration, on déduit le courant i_L :

$$i_L = \int \frac{V_e}{L} dt \quad (\text{II-7})$$

$$i_L = \frac{\alpha V_e}{L} t \quad (\text{II-8})$$

α étant le rapport cyclique. Il représente la durée de la période T pendant laquelle l'interrupteur Q conduit.

Phase 2, Q ouvert, figure (II.9)

Lorsque l'interrupteur Q est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.é.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode, le condensateur et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité.

L'équation de tension

$$V_e - V_s = L \frac{di}{dt} \quad (\text{II-9})$$

Le courant se déduit par intégration :

$$i_{2L} = \int \frac{V_e - V_s}{L} dt \quad (\text{II-10})$$

$$i_{2L} = \frac{(\alpha - 1)(V_e - V_s)}{L} t \quad (\text{II-11})$$

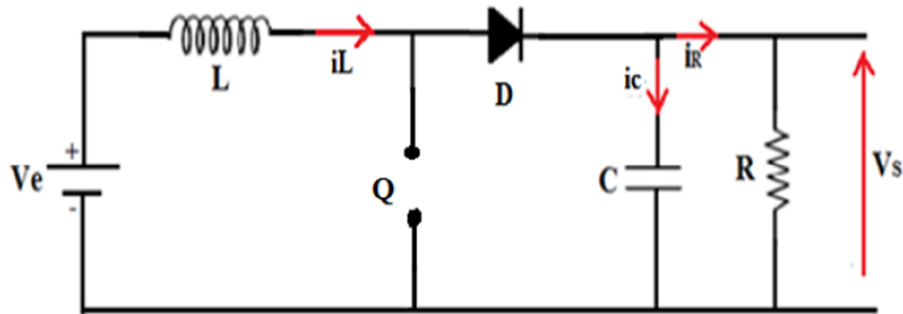


Figure II.9 : Circuit équivalent pour **TOff**

La variation du courant traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$i_{off} + i_{on} = 0 \quad (\text{II-12})$$

En remplaçant i_{on} et i_{off} par leurs expressions, on obtient :

$$\frac{\alpha V_e}{L} t + \frac{(\alpha-1)(V_e-V_s)}{L} t = 0 \quad (\text{II-13})$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1-\alpha} \quad (\text{II-14})$$

On peut faire varier la tension de sortie du convertisseur en changeant la valeur du rapport cyclique α .

Nous pouvons exprimer la tension et courant de sortie en régime établi selon :

$$V_s = \frac{V_e}{(1-\alpha)} \quad (\text{II-16})$$

$$I_s = (1 - \alpha) I_e \quad (\text{II-17})$$

Les allures de tension et du courant du hacheur élévateur sont décrites par la figure suivante :

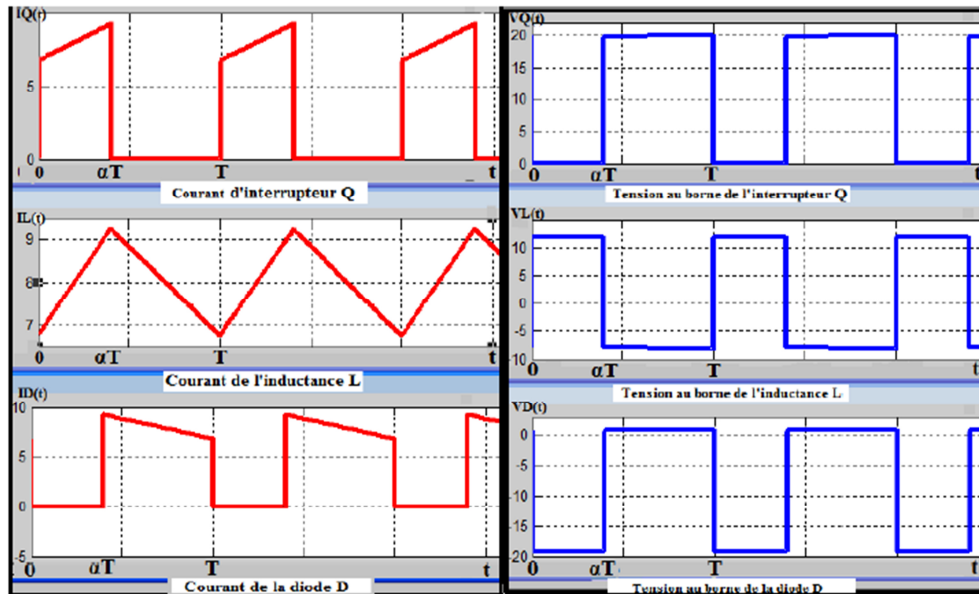


Figure II.10 : Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Boost[21]

II.4. Simulation

II.4.1. Simulation d'un hacheur série (Buck)

La figure (II.11) représente le block de simulation d'un hacheur Buck dans Matlab Simulink.

Les paramètres du modèle sont les suivantes :

$V_{in} = 25V$, $L=100mH$, $R=12ohm$, $C1=2mF$ et $C2=2mF$. Dans la fréquence $F = 10Khz$, et le rapport cyclique $\alpha = 50 \%$.

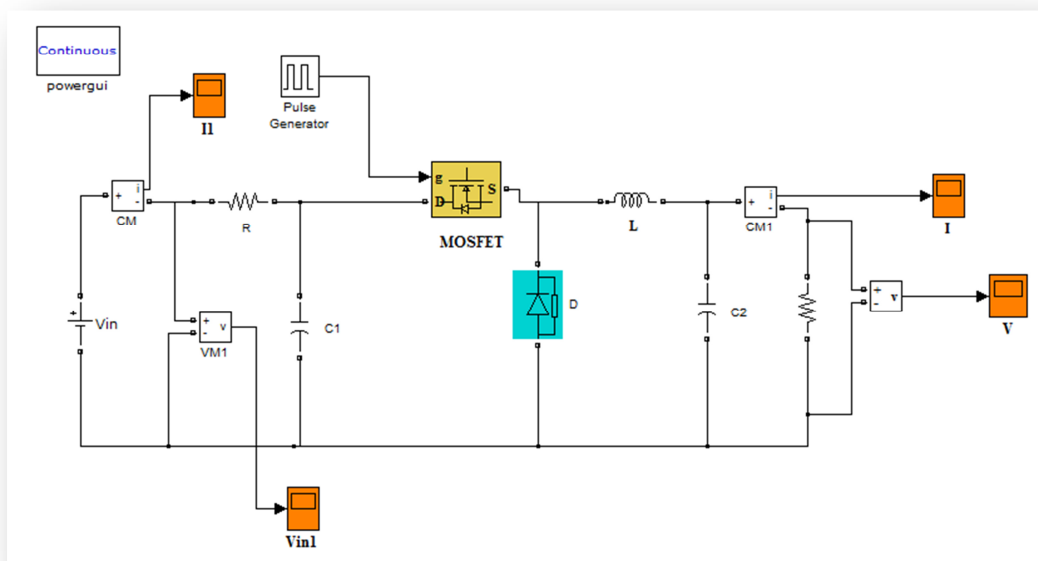


Figure II.11 : schéma bloc de simulation du convertisseur Buck

Les figures suivantes (II.12), (II.13), (II.14) et (II.15) est représentent les résultats de la simulation d'un hacheur Buck:

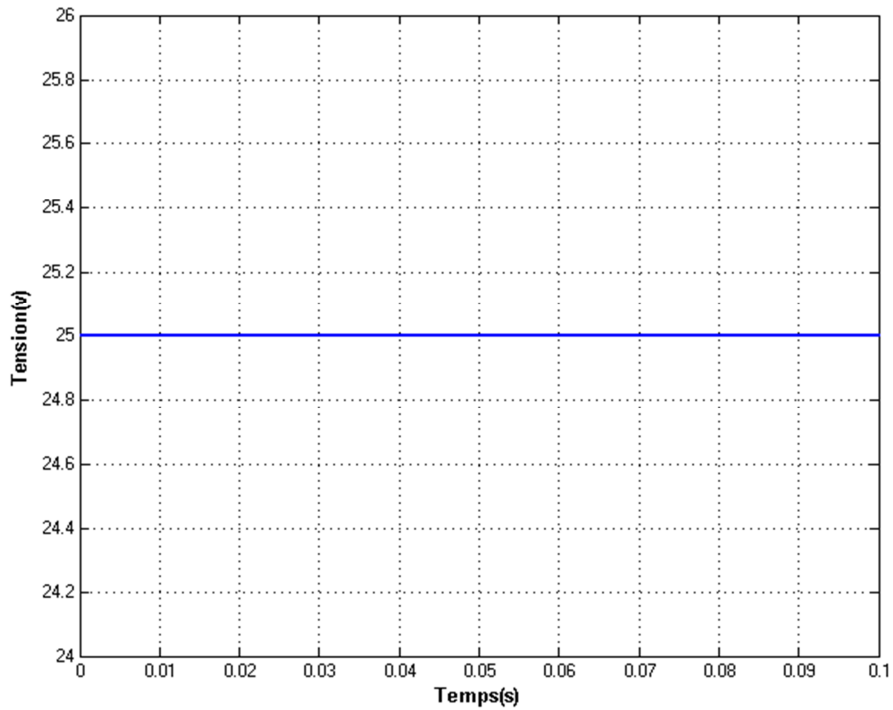


Figure II.12 : Résultats de simulation de la tension d'entrée du hacheur Buck

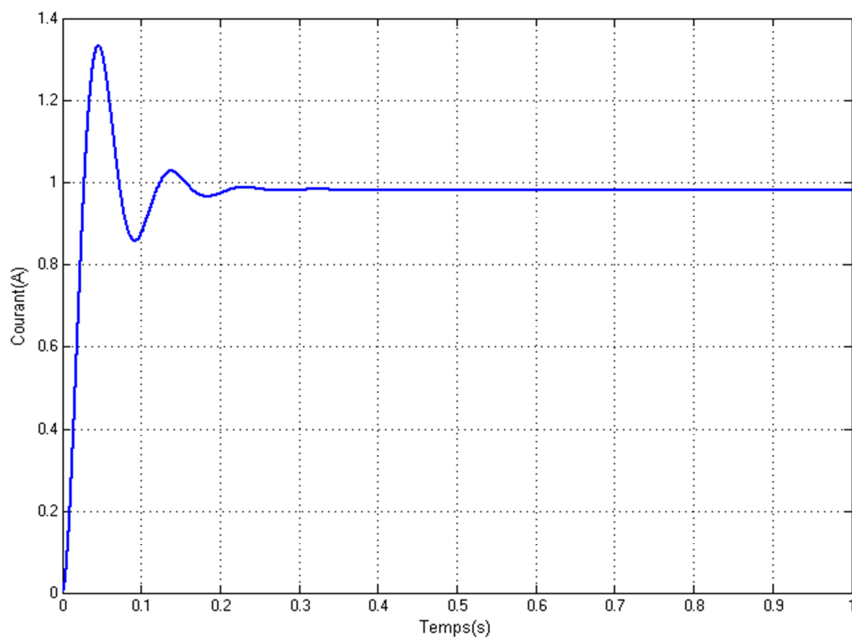


Figure II.13 : Résultats de simulation de courant de sortie du hacheur Buck

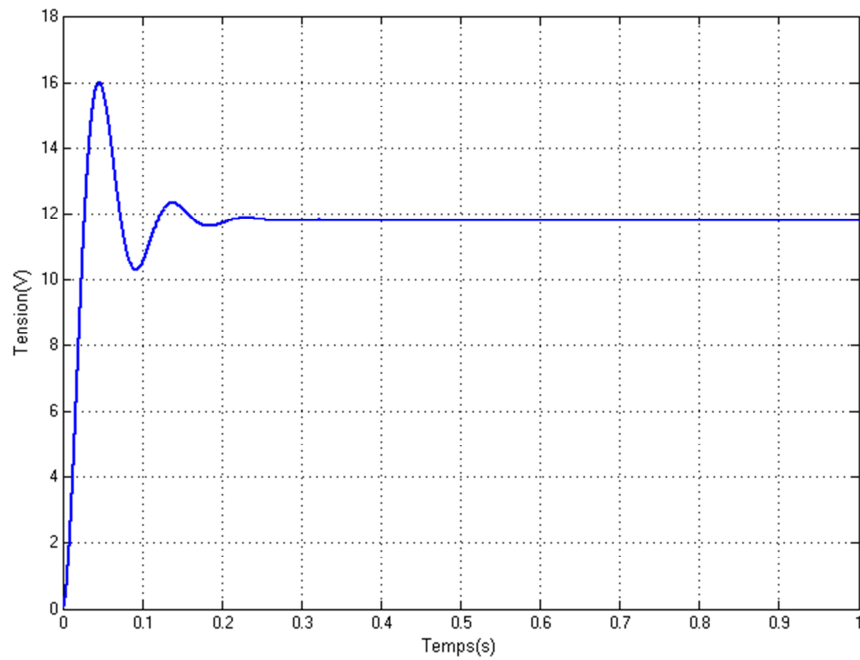


Figure II.14 : Résultats de simulation de la tension de sortie du hacheur Buck

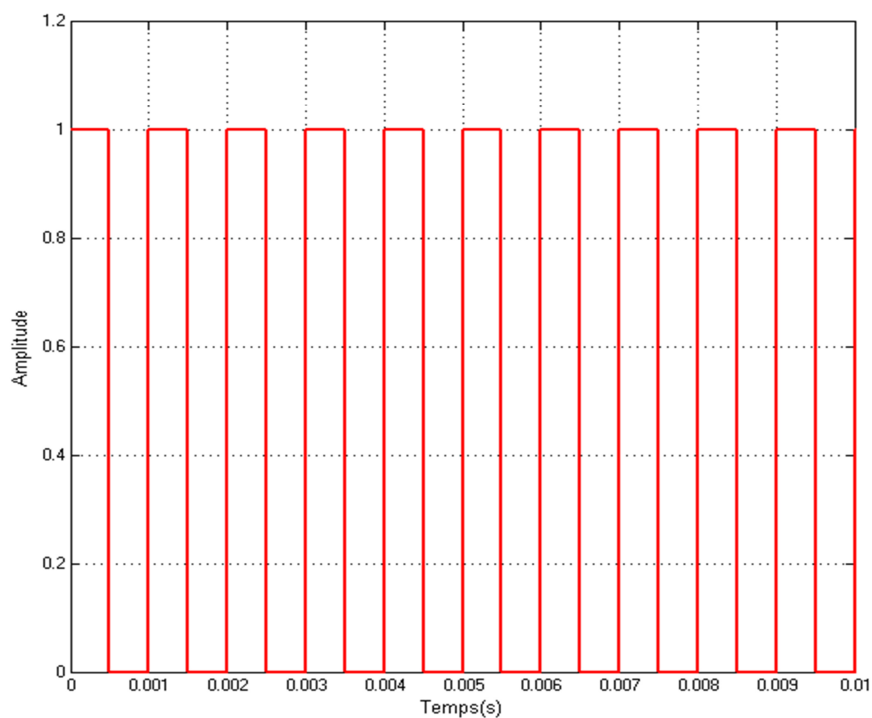


Figure II.15 : signal de commande du hacheur Buck

II.4.2. Simulation d'un hacheur parallèle (Boost)

La figure (II.16) représente le block de simulation d'un hacheur Buck dans Matlab Simulink.

Les paramètres du modèle sont les suivantes :

$V_{in} = 25V$, $L=100mH$, $R=24ohm$, $C1=2mF$ et $C2=2mF$. Dans la fréquence $F = 10Khz$, et le rapport cyclique $\alpha = 50 \%$.

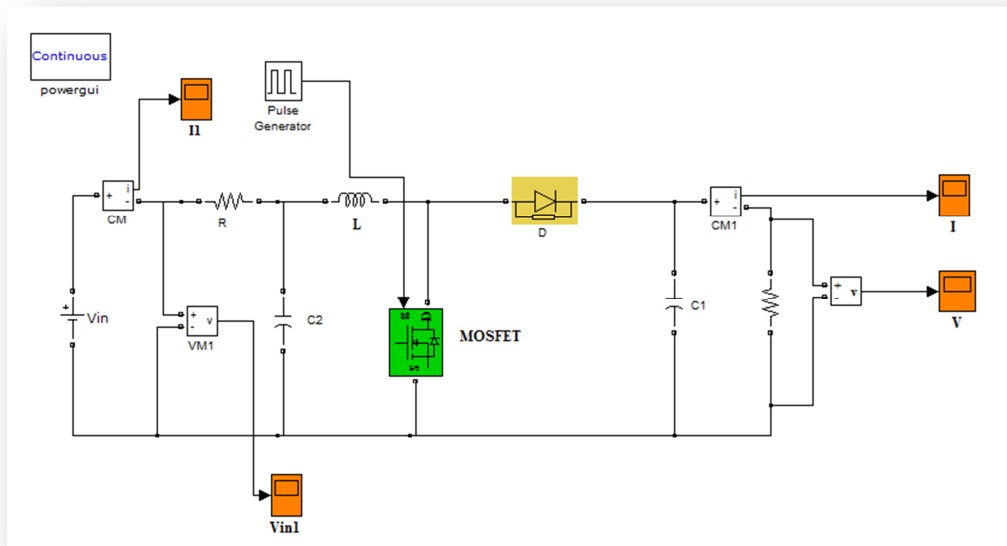


Figure II.16: schéma bloc de simulation du convertisseur Boost

Les figures suivantes (II.17), (II.18) et (II.19) est représentent les résultats de la simulation d'un hacheur Boost :

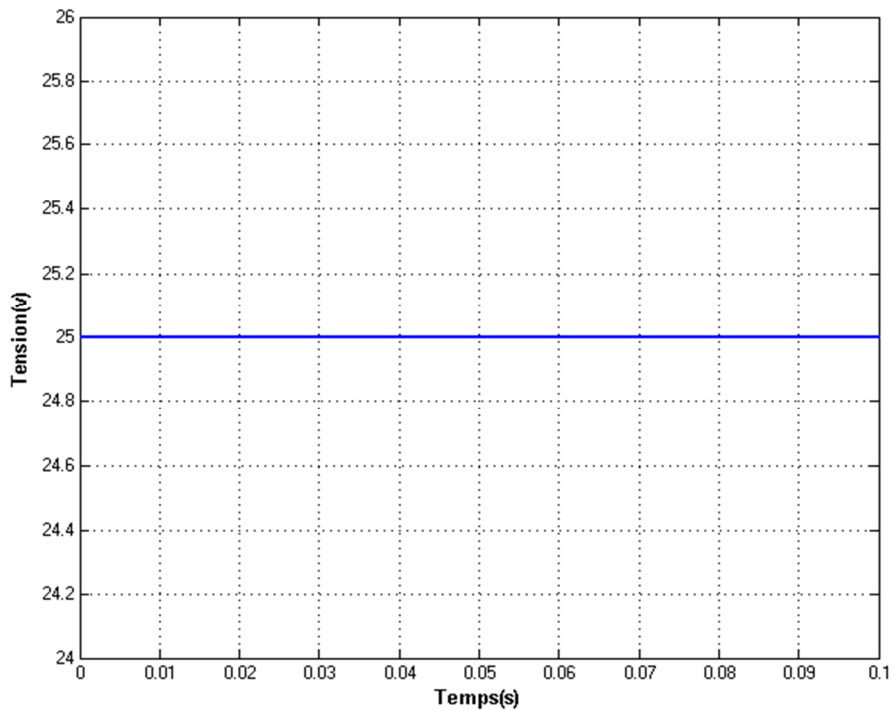


Figure II.17 : Résultats de simulation de la tension d'entrée du hacheur Boost

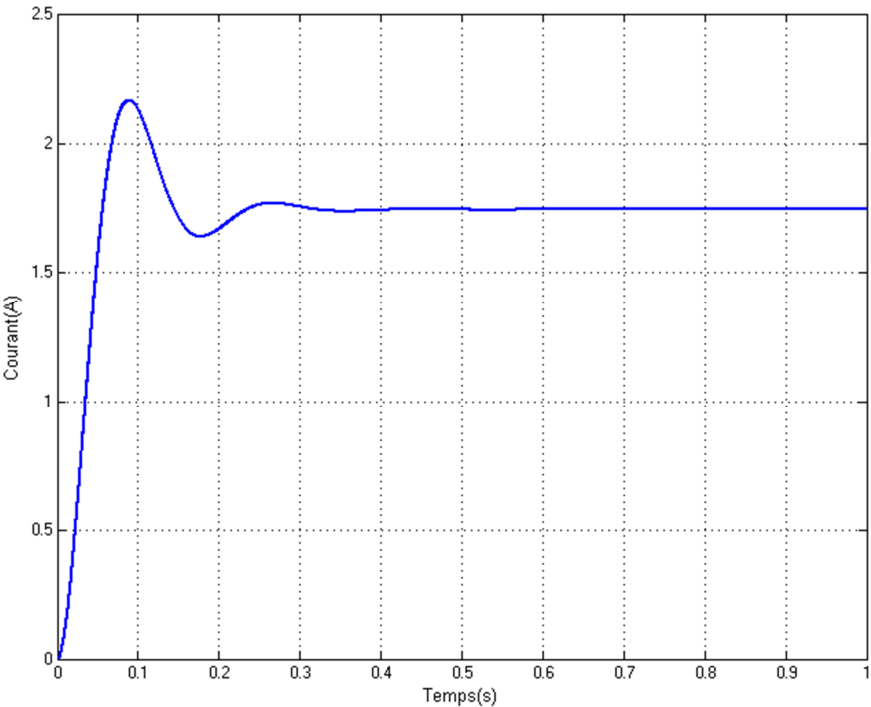


Figure II.18 : Résultats de simulation de courant de sortie du hacheur Boost

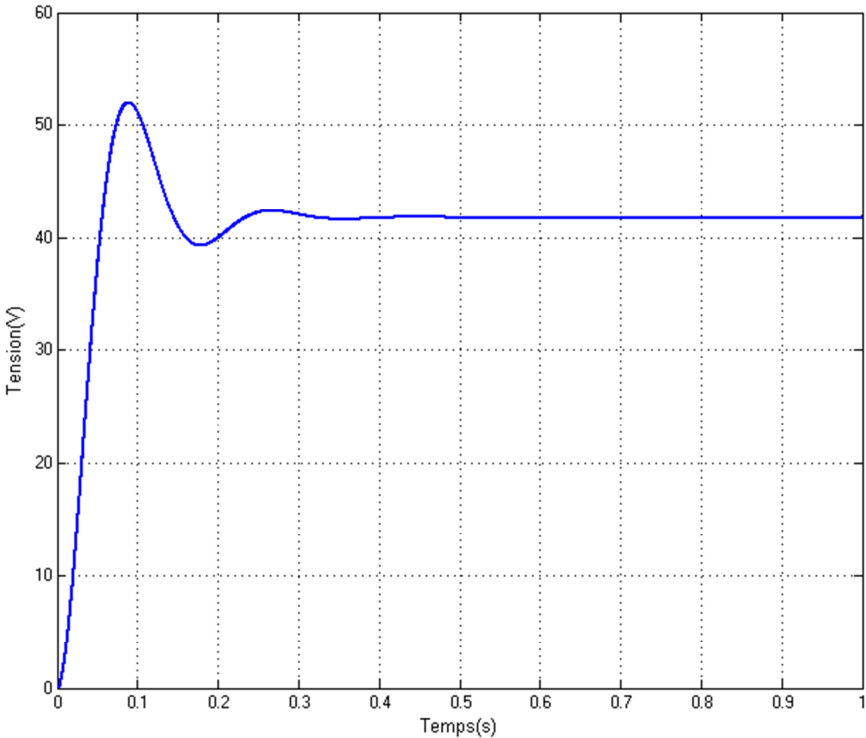


Figure II.19 : Résultats de simulation de la tension de sortie du hacheur Boost

Les résultats de simulation du convertisseur survolteur représentent par les figures (II.17) à (II.19). Ces figures représentent les tensions d'entrée et de sortie d'hacheur survolteur ainsi le courant de sortie d'hacheur. Ces résultats montrent que la tension de sortie d'hacheur survolteur est supérieure à celle d'entrée. Donc le hacheur survolteur effectue correctement son rôle.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude théorique et par simulation des hacheurs. On a présenté les deux types classiques des hacheurs : abaisseur et élévateur.

Chapitre III

Modélisation de l'algorithme

MPPT

III.1. Introduction

La théorie relative à la maximisation de la puissance produite d'un panneau solaire grâce aux grandeurs physiques agissant sur la caractéristique électrique courant tension (I-V), nous permet de créer une technique d'utilisation plus performante, et plus efficace pour extraire un point de puissance maximale d'une manière permanente sans perte dans l'énergie transférée du générateur photovoltaïque vers la charge. Pour obtenir ce résultat on utilise un système d'adaptation basé sur la commande MPPT. Plusieurs techniques nous permettent d'atteindre cet objectif, parmi eux la technique P&O. ce chapitre sera consacré à la définition de cette technique et son application à notre système photovoltaïque [22].

III.2. MPPT

La poursuite du point maximum de la puissance(MPPT), 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 [23].

III.3. Principe du MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}).La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT [24]. Il peut être représenté par le schéma de la Figure III.1

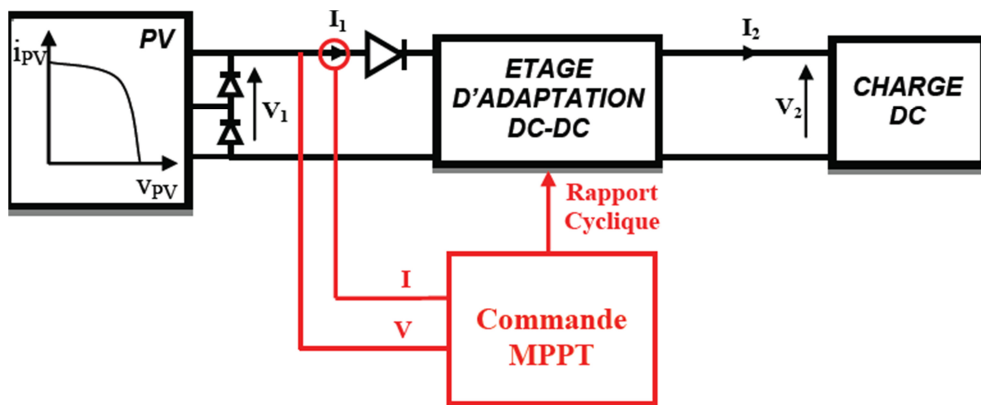


Figure III.1 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP [25].

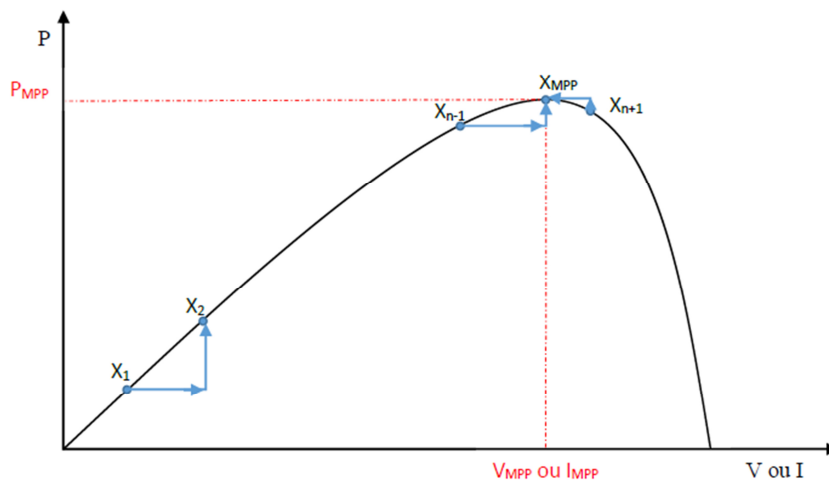


Figure III.2 : Principe de la commande MPPT

III.4. Gestion de la MPPT

La figure III.3 illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Dans ce cas est pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Dans le cas b pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Enfin dans le dernier cas c de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV .Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande [26].

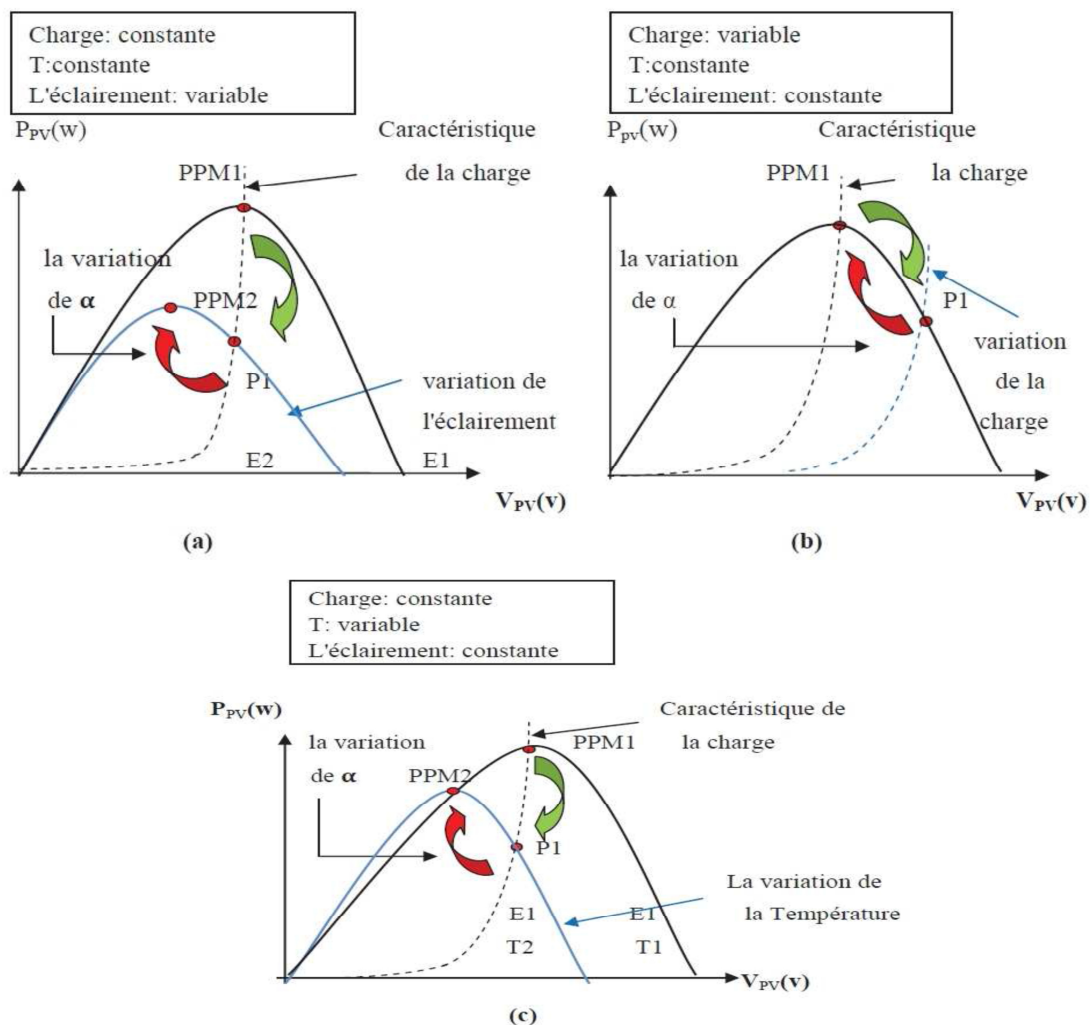


Figure III.3 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température

III.5. Classification Des Commandes MPPT

III.5.1. Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée

III.5.1.1. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de « Perturb&Observe », les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien Les commandes qui sont basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{OPT} et I_{OPT}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{CO} et I_{CC}). Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction [27].

III.5.1.2. Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur

Il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{max} est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine [27].

III.5.2. Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche

III.5.2.1. MPPT Indirect

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{cc} ou V_{CO}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [27-28].

III.5.2.2. MPPT Direct

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction [27-28].

III.6. Les Algorithmes MPPT

En littérature on trouve fréquemment les techniques de maximisation de puissance suivantes :

- Perturbation et observation (P&O).
- La méthode incrémentation de la conductance.
- La Commande Mppt Flou.

Chacune de ces techniques à ces propres avantages et inconvénients du point de vue simplicité, efficacité et robustesse.

Dans notre travail, on se limite à la méthode de Perturbation et observation (P&O), qui est très simple à implanter, et de bon rendement.

III.6.1. Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)

La méthode perturbation et observation 'P&O', est la plus répandue dans le milieu industriel, car son algorithme est facile à implémenter. Ce processus fonctionne par une perturbation du système en augmentant ou en diminuant la tension de panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique d et observer son effet sur la puissance de délivrée par le GPV la figure (III.14) [29].

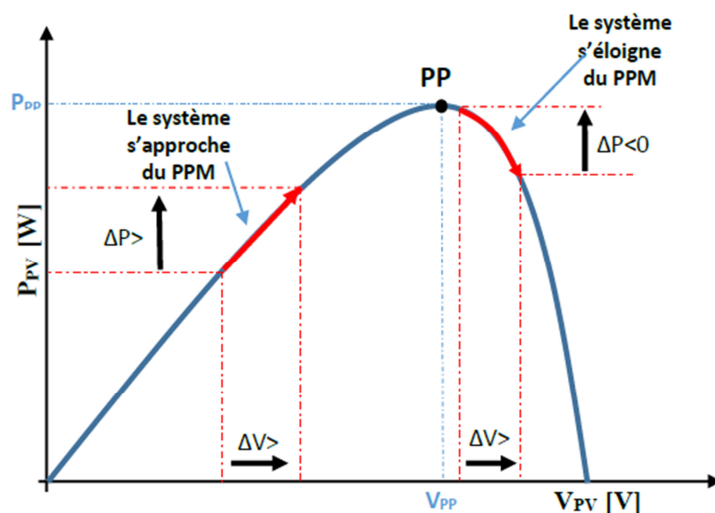


Figure III.4 : Recherche du PPM par la méthode (P&O)

La figure (III.15) montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O', tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle. D'après La figure (II.15), la tension et le courant V et I , sont mesurés pour calculer la puissance de sortie $P(k)$ de la rangée. Cette

valeur $P(k)$ est comparée à la valeur $P(k-1)$ de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension V de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle, [29-30].

Avec cet algorithme, la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour de la valeur optimale de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple

- ❖ Si C_p est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou légèrement changeantes.
- ❖ Si C_p est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

La valeur C_p idéale dépend du système. Elle doit être déterminée expérimentalement en fonction des besoins [29].

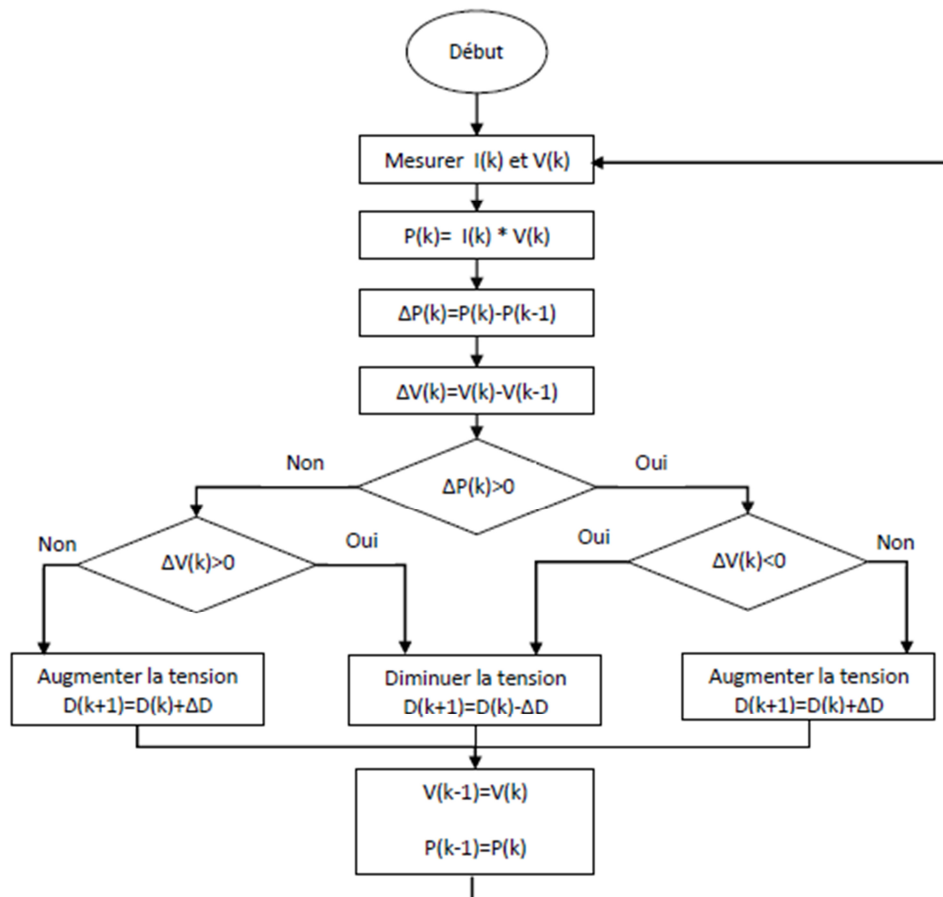


Figure III.5 : l'algorithme de P&O classique[29]

- ❖ Si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite, on aura une augmentation de la puissance du panneau.

L'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce que l'éloigne du vrai point de puissance maximale.

Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains de fonctionnement et des pertes de puissance [29].

III.6.2. La Commande Mppt Flou

La commande basée sur la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Fuzzy Logic Control) est de plus en plus populaire grâce à l'évolution des microcontrôleurs [31-32]. L'avantage de cette technique est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elle n'a pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elle peut traiter des non linéarités.

Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le changement d'erreur ΔE et une variable de sortie $\Delta\alpha$ (variation du rapport cyclique). La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée.

En général, la commande logique floue comprend donc trois étapes communément nommées dans la littérature:

- la *fuzzification*,
- la *lecture de la table de vérité*,
- la *defuzzification*.

Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variable linguistique pouvant prendre les cinq valeurs suivantes :

- NB: Negative Big,
- NS: Negative Small,
- ZE: Zero,
- PS: Positive Small,
- PB : Positive Big.

Comme le montre la structure de base de la commande logique floue illustrée en Figure (III.8)

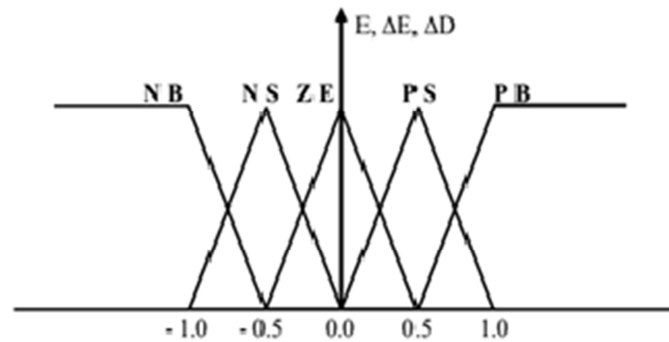


Figure III.6: structure de base de la commande floue[29]

Les paramètres d'entrées E et ΔE sont liées aux équations suivantes :

$$E(n) = \frac{P(n)-P(n-1)}{V(n)-V(n-1)} \tag{III-1}$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n - 1) \tag{III-2}$$

En fonction de leurs évolutions et d'une table de vérité comme indiquée dans le tableau I, une valeur est attribuée au paramètre de sortie $\Delta \alpha$.

$\Delta E \backslash E$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

Tableau III.1 Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue.

La variable linguistique assignée à $\Delta \alpha$, dépend des différentes combinaisons entre E et ΔE . Par exemple, si les variables d'entrée (E et ΔE), ont comme valeur PB et ZE correspondant à un point de fonctionnement très éloigné du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie $\Delta \alpha$ est PB, ce qui implique une forte variation positive du rapport cyclique pour atteindre le PPM. En résumé, les variations du rapport cyclique dépendent de la

différence de position entre le point de fonctionnement et un PPM. Ainsi, dès que ce dernier s'approche du PPM, les incréments appliqués à $\Delta\alpha$ s'affinent jusqu'à atteindre le PPM.

La de fuzzification, consiste à convertir cette fois, une variable linguistique en variable numérique. Cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie $\Delta\alpha$, afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM.

En résumé, cette méthode s'avère être très performante lors de changement des conditions climatiques, cependant sa précision en statique est fortement liée à la complexité de la table de vérité employée entraînant la nécessité du choix obligatoire d'un microcontrôleur ayant une grande capacité de calculs tenant compte des nombreuses disparités des paramètres électriques du panneau. Ici, typiquement, cette commande peut présenter les meilleures performances en termes de précision et de rapidité de recouvrement de PPM mais elle entraîne obligatoirement une consommation énergétique non négligeable liée au microprocesseur ainsi qu'un surcoût [33-34].

I.6.3. Technique d'Incrémental Conductance (IC)

Dans la méthode de la conductance incrémentielle, la tension aux bornes du réseau est toujours ajustée en fonction de la tension MPP. Elle est basée sur la conductance incrémentielle et instantanée du module PV.

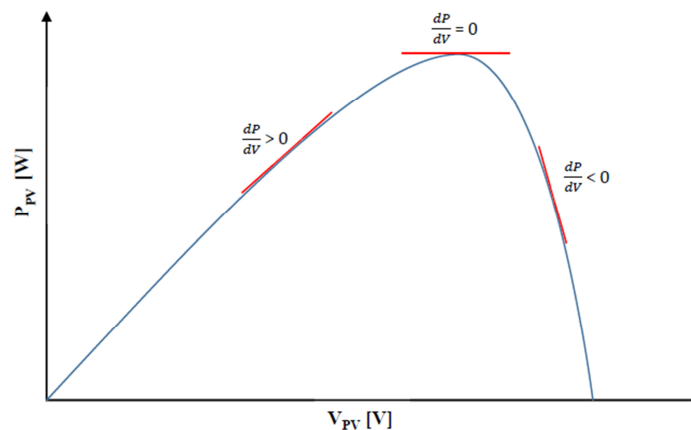


Figure III.7 caractéristique de tension-puissance du panneau

Nous allons chercher le maximum de point d'annulation de la dérivée de puissance de la figure précédente, en comparant la conductance G à la conductance incrémentielle ΔG .

Précisément la puissance en sortie de la source peut s'écrire :

$$P = I * V \quad (\text{III-3})$$

D'où en écrivant la dérivée :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{VdI}{dV} + \frac{dV}{dV} * I \tag{III-4}$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{VdI}{dV} + I \tag{III-5}$$

$$\frac{dP}{dV} \cong V * \frac{\Delta I}{\Delta V} + I \tag{III-6}$$

Donc :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \text{ (a) Au point du MPP}$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \text{ (b) A gauche du MPP} \tag{III-7}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \text{ (c) A droit du MPP}$$

Les deux équations (b) et (c) sont employées pour déterminer la direction du déplacement de point de fonctionnement MPP dans laquelle la perturbation se produit, elle se répète jusqu'à ce que l'équation (a) soit satisfaite.

À partir des équations (III-7), l'algorithme IC peut être représenté par l'organigramme suivant:

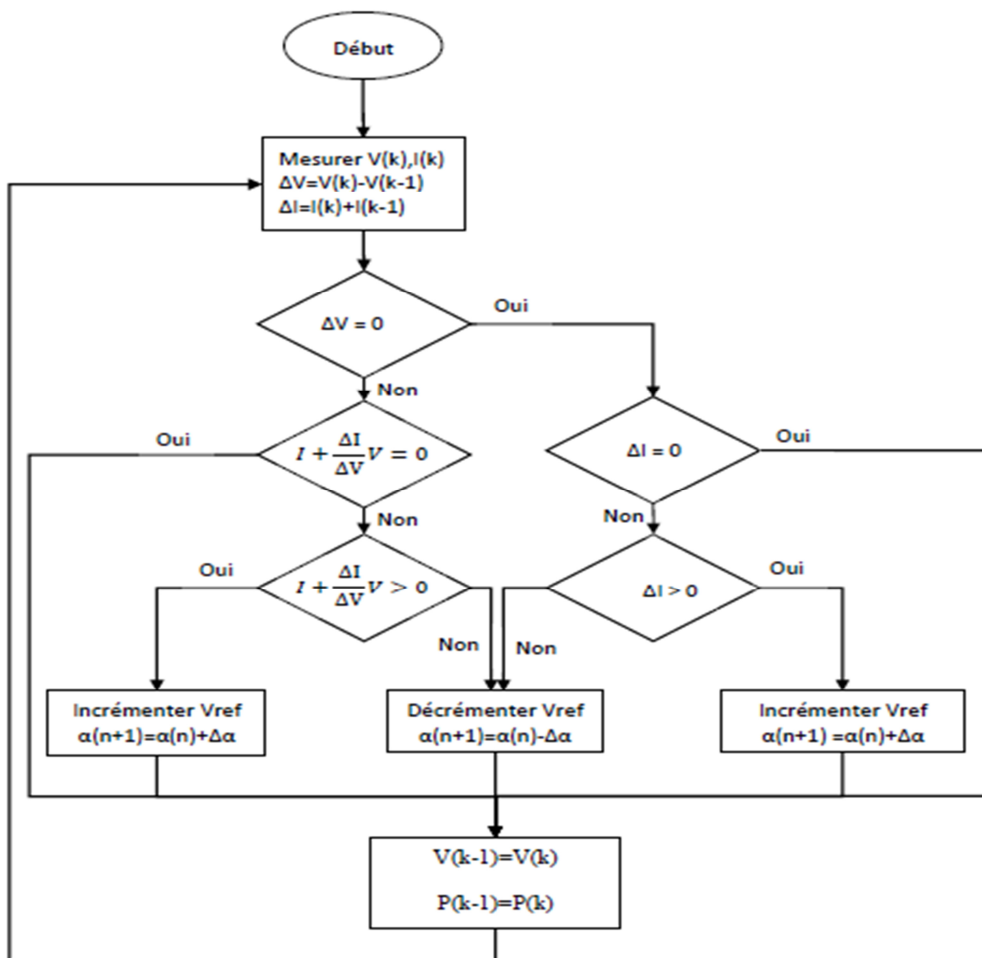


Figure III.8: Organigramme de la méthode INC

En réalité, cet algorithme est une correction de l'algorithme PO puisqu'il est capable de calculer la direction dans laquelle la perturbation du point de fonctionnement devrait être pour atteindre le point MPP [35].

III.6.4. Autres Méthodes

Il existe dans la littérature d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui font parfois appel à des techniques nouvelles. On peut citer [36-37]:

- Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)
- Approche Du Courant Constant (Constant Current)
- les algorithmes à base de réseau de neurones

- méthode de look-up table
- les algorithmes d'identification en temps réel du MPP
- Méthode de β
- l'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance)
- La méthode de balayage du courant (Current Sweep)

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons entamé la partie la plus importante de cette étude. Il s'agit de présenter le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes classifications des commandes MPPT. Nous avons détaillé les différentes méthodes MPPT rencontrées le plus souvent dans la littérature. L'existence de plusieurs types de commandes MPPT montre que ce domaine de recherche est en perpétuel évolution et qu'il est difficile de trouver une ou plusieurs solutions universelles. A la fin, nous avons basé sur l'algorithme P&O pour le but d'utiliser dans notre système.

Chapitre IV

Simulation de la chaine de conversion PV sous MATLAB/SIMULINK

IV.1 Introduction

Les caractéristiques électrique d'un GPV peuvent changer rapidement en fonction de l'irradiation solaire, de la température et à plus longterme du vieillissement des cellules.

De plus le point de fonctionnement peut se trouver plus ou moins éloigné du PPM, voir ne pas exister. Ceci se produit par exemple, lorsqu'une batterie connectée a un GPV, présente une tension de batterie systématiquement supérieure à la tension de circuit ouvert du générateur photovoltaïque (V_{co}). Alors, aucun transfert de puissance ne peut avoir lieu [38]. Ce qui nous amène à l'un des intérêts à introduire un étage d'adaptation.

Cette adaptation pourrait être par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (MPPT) ces techniques sont utilisées classiquement pour les boucles de contrôle en entrée et qui effectuent une recherche permanente du PPM.

Ce chapitre est dédié a l'étudie des différents modes de couplage direct et indirect.

IV.2 Connexion direct source PV-Charge

Un panneau PV peut être directement connecté à une charge. Il faut cependant que la charge accepte la tension et le courant continus délivrés par le générateur.

Ce type de connexion est aujourd'hui l'utilisation terrestre la plus répandue de l'énergie solaire, le point de fonctionnement du GPV dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté [39].

De plus, chaque charge que ce soit en continu ou alternatif (batterie, résistance, impédance) a son comportement propre.

Ainsi, pour qu'une connexion source-charge soit possible, un point de fonctionnement correspond à l'intersection des caractéristiques électriques doivent exister. Pour simplifier en prend l'exemple d'une connexion directe entre un GPV et une charge figure (IV.1), la présence de la diode anti-retour est indispensable pour empêcher la circulation d'un courant négatif vers le module PV.

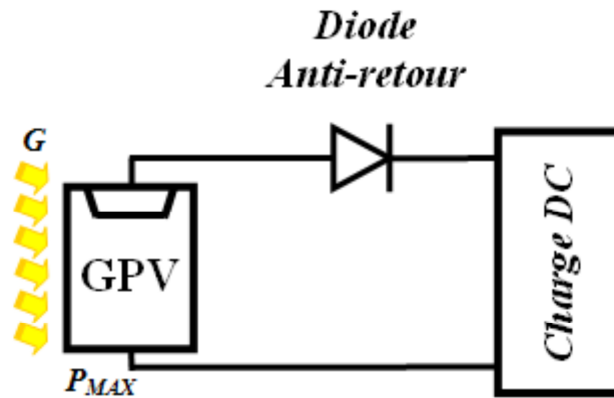


Figure IV.1 : Principe du couplage direct

Cependant, cette configuration n'offre aucun type de limitation et/ou de réglage de la tension de la charge. Ce qui la restreint à des applications nécessitant une tension fixe ou faiblement variable [39].

Un GPV peut être connecté directement à trois types de charges

- Une charge de type source de tension continue.
- Une charge de type source de courant continu.
- Une charge purement résistive.

Sur la figure (IV.2), nous avons représenté les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un GPV ainsi que les caractéristiques $I(V)$ des trois types de charges.

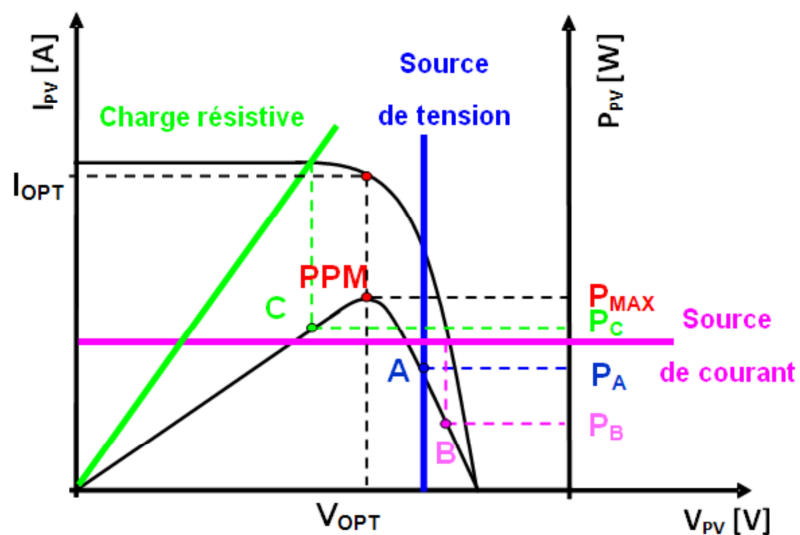


Figure IV.2: Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge [39].

D'après la figure (IV.2), nous pouvons identifier le point de fonctionnement où la puissance fournie par le générateur est maximale (P_{max}) pour un courant optimal (I_{opt}) et une tension optimale (V_{opt}), point nommé PPM. Ensuite, nous pouvons trouver le point d'intersection entre les caractéristiques $I(V)$ du générateur et celles des trois types de charges [40] :

- 1) Point A pour une charge résistive.
- 2) Point B pour une charge de type source de tension.
- 3) Point C pour une charge en source de courant.

Pour ces trois points, la puissance fournie par le générateur est respectivement P_A , P_B et P_C , ces cas de figures montrent que le GPV est mal exploité et ne fournit pas la puissance maximale potentielle, la différence étant perdue sous forme de chaleur dissipée dans le générateur [39][40].

Dans le cas général la charge du générateur PV est une batterie, le rendement du système dépend de l'écart entre la tension optimale du générateur PV et la tension de batterie qui varie en fonction de son état de charge.

À travers ces exemples, on peut montrer rapidement les limites de la connexion directe autant sur les pertes de production qu'elle entraîne que sur les limites des applications compatibles (DC). Des recherches sur des solutions novatrices optimisant mieux la production d'énergie PV sont d'actualité et même nécessaires pour amener l'énergie PV à un degré de fiabilité comparable à une source d'énergie traditionnelle [39].

IV.2.1 Simulation de Connexion direct source PV-Charge

D'après le chapitre I le résultat de simulation de puissance maximale sortie par générateur PV est présent dans la figure (IV.3)

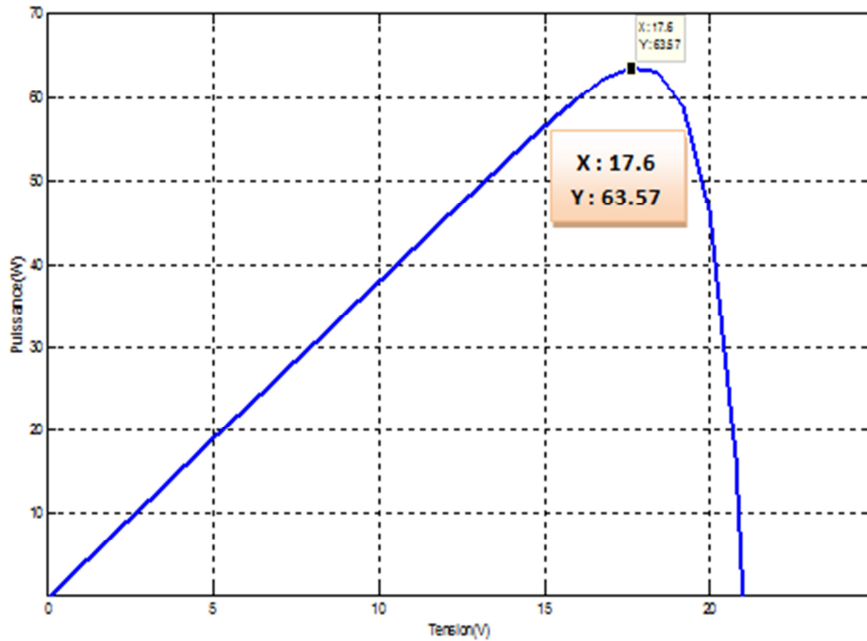


Figure IV.3 : puissance maximale de module PV

La figure (IV.4) présente un module connecté directement à une charge,

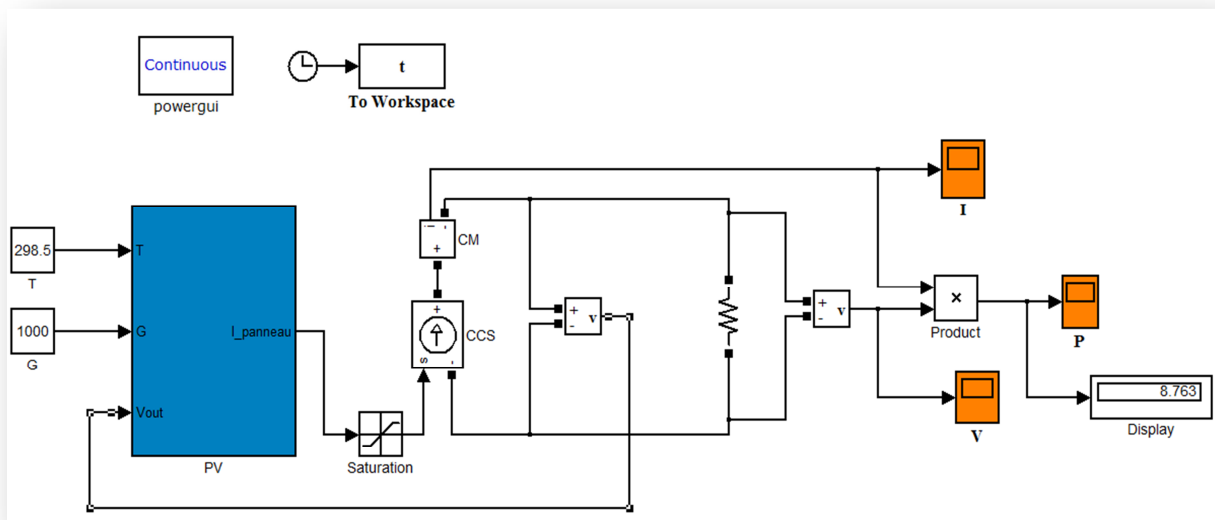


Figure IV.4 : Montage du module PV directement avec la charge

Comme nous pouvons le constater sur la Figure (IV.3), pour une puissance disponible aux bornes du module de 63.57W, et dans la figure (IV.4) une charge résistive de 50Ω, cette dernière n’arrive à en extraire que 8.76W, dans des conditions d’ensoleillement et de température idéales.

Pour pallier ce manque, nous insérons, dans le montage, entre le module et la charge, un hacheur élévateur à rapport cyclique variable α généré par un système de commande MPPT.

IV.3. Connexion à travers un étage d'adaptation entre un générateur PV et une charge

Les caractéristiques non-linéaires du module photovoltaïque et sa sensibilité aux conditions extérieurs, comme l'éclairement et la température, induisent des pertes énergétiques. Pour augmenter la production d'un GPV, on trouve de plus d'étage d'adaptation entre le panneau et la charge, cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant a, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale disponible. Bien sûr, ces étages présentent un surcoût par rapport à la connexion directe qui ne nécessite qu'une simple diode, (figure IV.5).

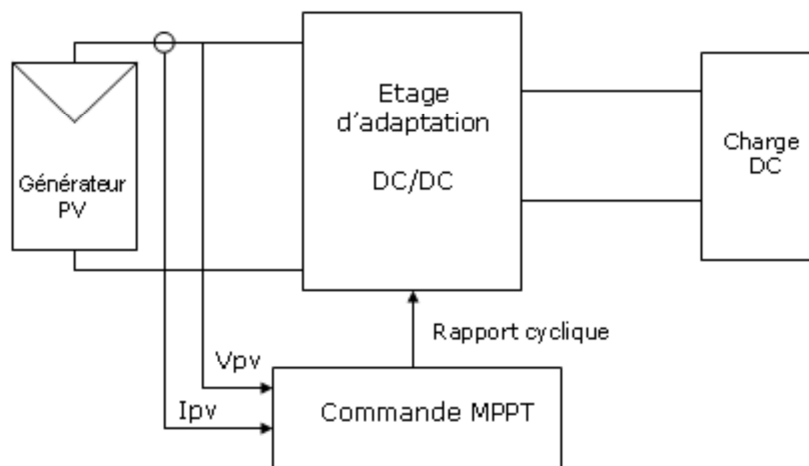


Figure IV.5 : Schéma de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC contrôlé par une commande MPPT sur charge DC

Aujourd'hui, on peut trouver deux types d'étages d'adaptation électroniques distincts commercialisés. Le premier type permet de connecter le GPV à une charge continue telle qu'une batterie. Il fait appel à des convertisseurs DC-DC plus communément connus sous l'appellation d'hacheurs ou de régulateurs. Ce type d'architecture est la plupart du temps utilisé pour un fonctionnement en site isolé (hors réseau, off-grid en anglais). Cela permet de couvrir les besoins énergétiques d'une résidence ne disposant pas d'une connexion au réseau électrique public ou de satisfaire les critères d'augmentation d'autonomie dans les applications portables, les transports

et le spatial [40].

Dans certains cas, il n’y a pas le choix car les caractéristiques de la charge ne sont pas compatibles avec la forme d’électricité produite par un GPV. C’est le cas de toutes les charges ayant besoin de tensions alternatives. Dans ce cas, on fait appel à un second type d’architecture permettant d’effectuer une conversion continu-alternatif (DC-AC). Ainsi, cette dernière permet d’injecter tout ou partie de l’énergie photovoltaïque produite dans un réseau de distribution [40].

Cet étage d’adaptation dispose d’une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui 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 choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé[40].

Dans cette perspective, nous allons étudier un convertisseur Boost, commandé par un MPPT de type perturbe & and observe (P&O), en utilisant Matlab Simulink.

IV.3.1. Système global (GPV, Boost, P&O, charge)

La figure (IV.6) illustre le bloc schématique de SIMULINK de notre system Photovoltaïque étudié adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » :

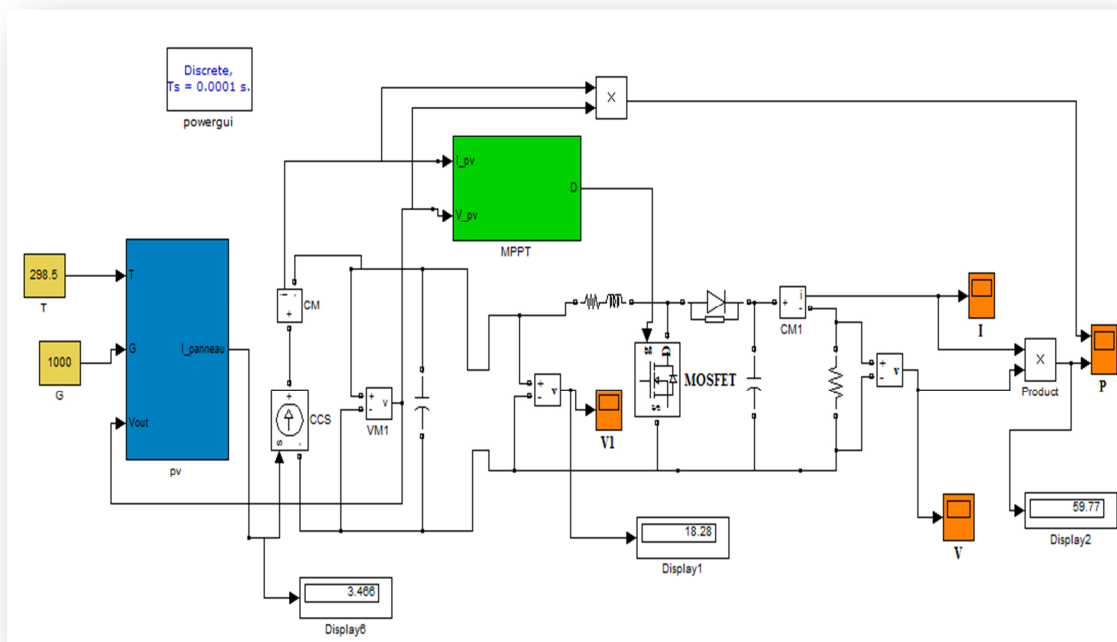


Figure IV.6 : Schéma bloc sous Simulink du système global

IV.3.1.1. Simulation de la commande (P&O)

L'organigramme de l'algorithme " Perturb and observe" (P&O) a été représenté dans la figure (III.6). Le modèle Simulink de l'algorithme est donné par la figure (IV.7).

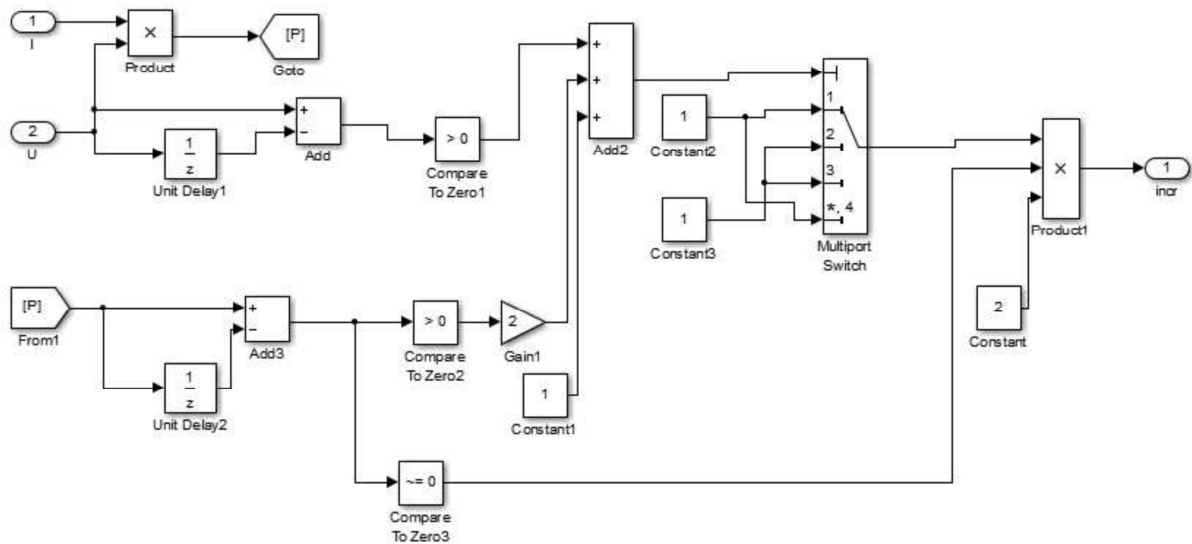


Figure IV.7: schéma bloc de simulation de l'algorithme (P&O).

IV.3.1.2. La Charge

La charge sur le côté (DC) est une résistance idéale ($R=50\Omega$)

IV.3.2. simulation de système global

IV.3.2.1. Simulation sous des conditions climatiques stables

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » représentent par les figures suivantes. Ces figures représentent la tension, le courant et la puissance générées par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la tension, le courant et la puissance à la sortie du système photovoltaïque. Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles.

L'hacheur survolteur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque. Et la commande MPPT adapte le générateur PV à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

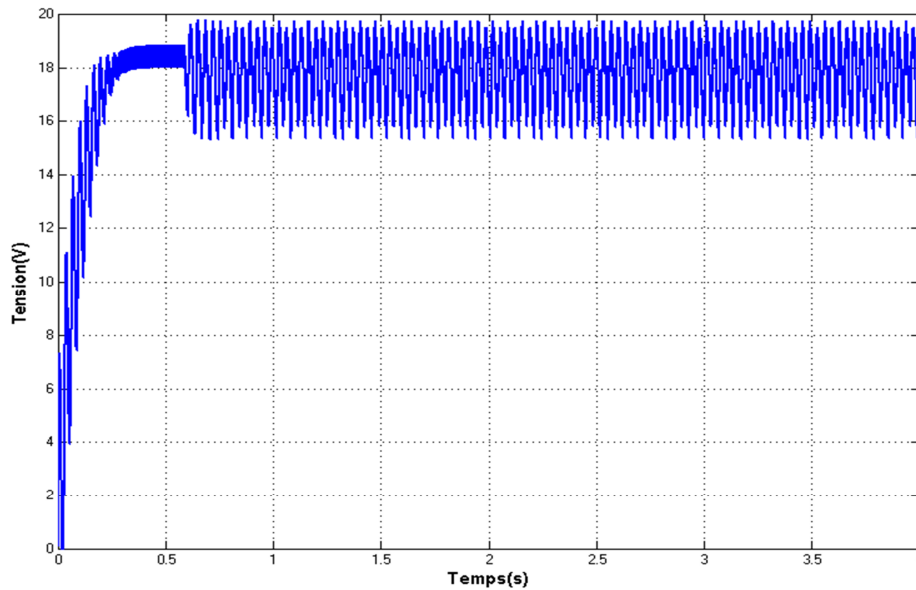


Figure IV.8 : Résultats de simulation de la tension générée par le générateur photovoltaïque pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

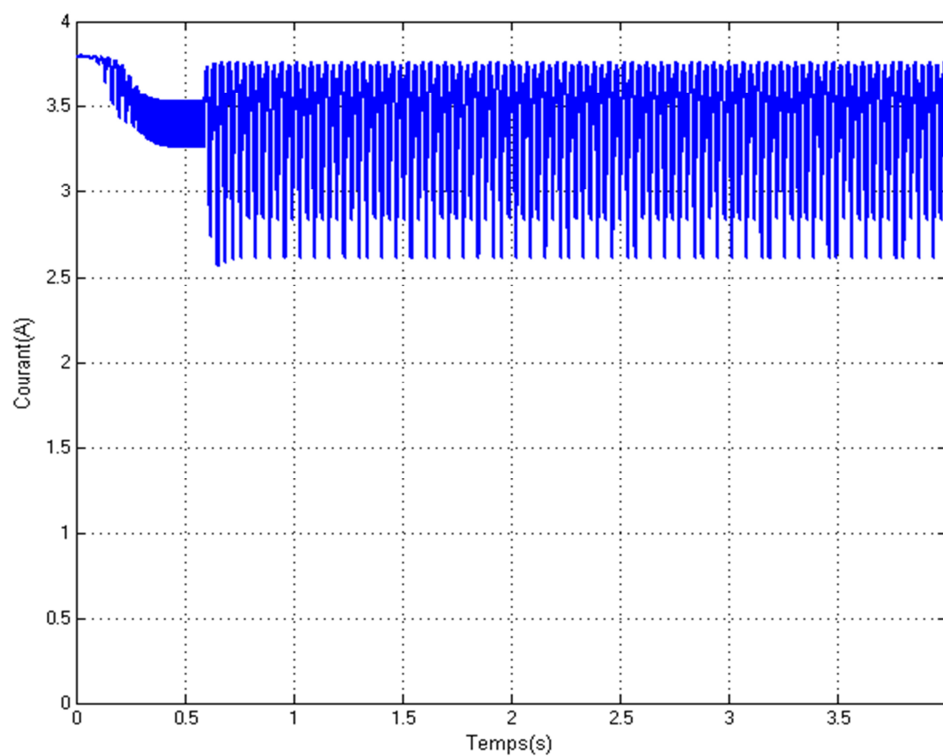


Figure IV.9 : Résultats de simulation de courant générée par le générateur photovoltaïque pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

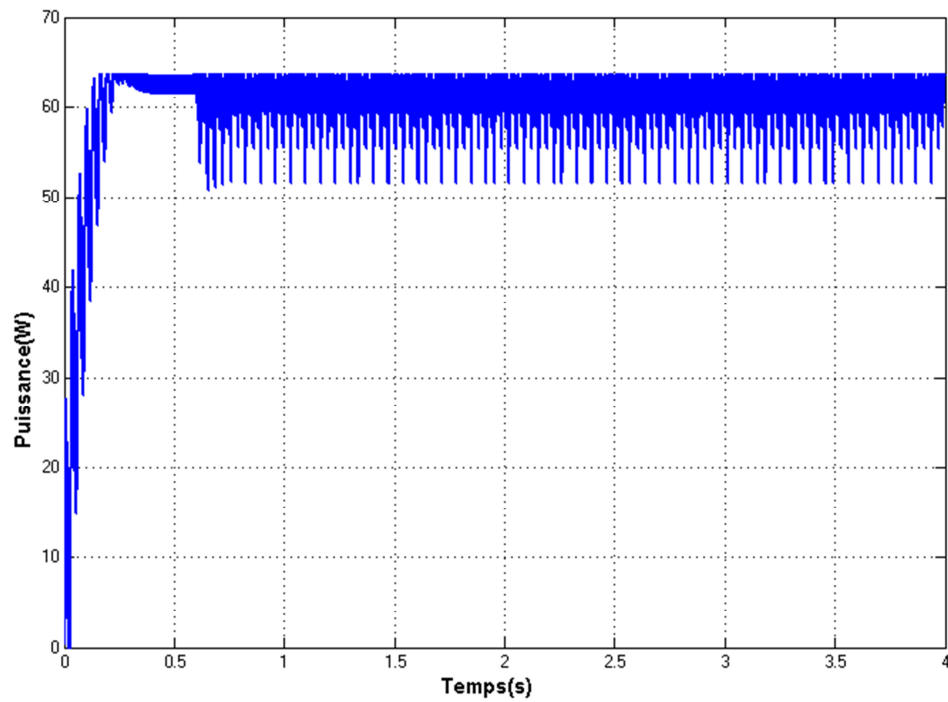


Figure IV.10 : Résultats de simulation de la puissance générée par le générateur photovoltaïque pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

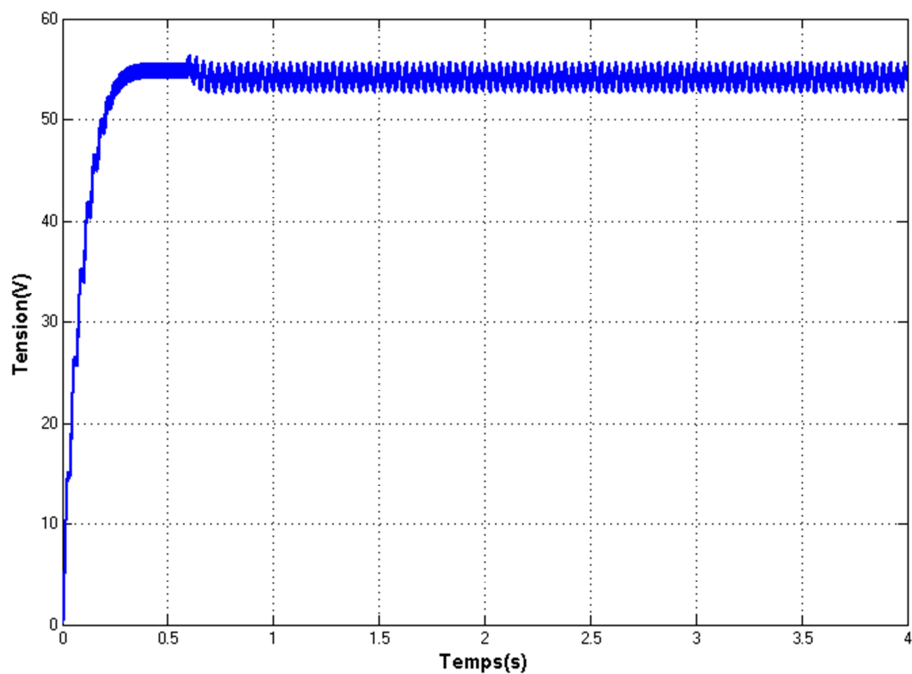


Figure IV.11 : Résultats de simulation de la tension de sortie du système pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

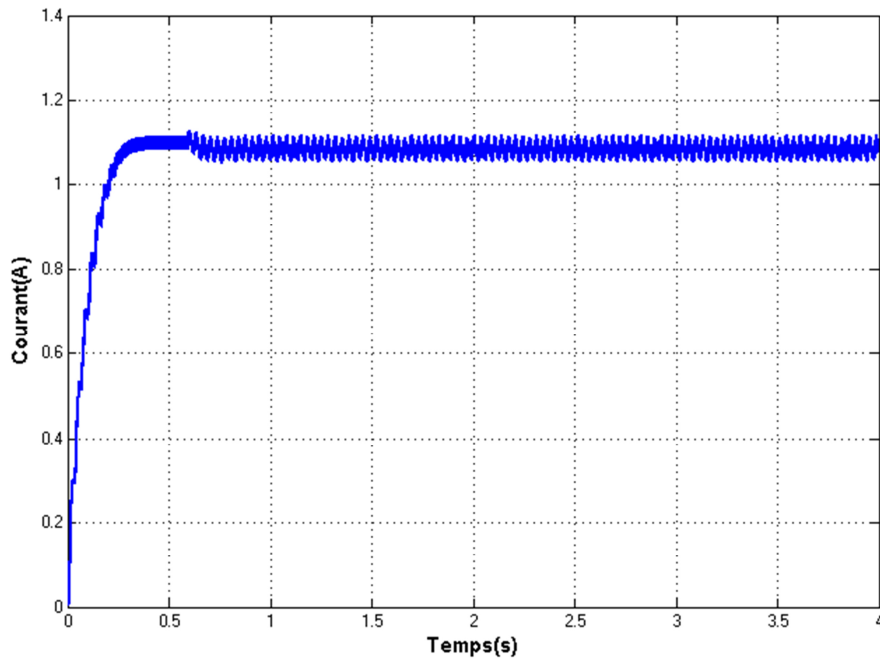


Figure IV.12 : Résultats de simulation du courant de sortie du système pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

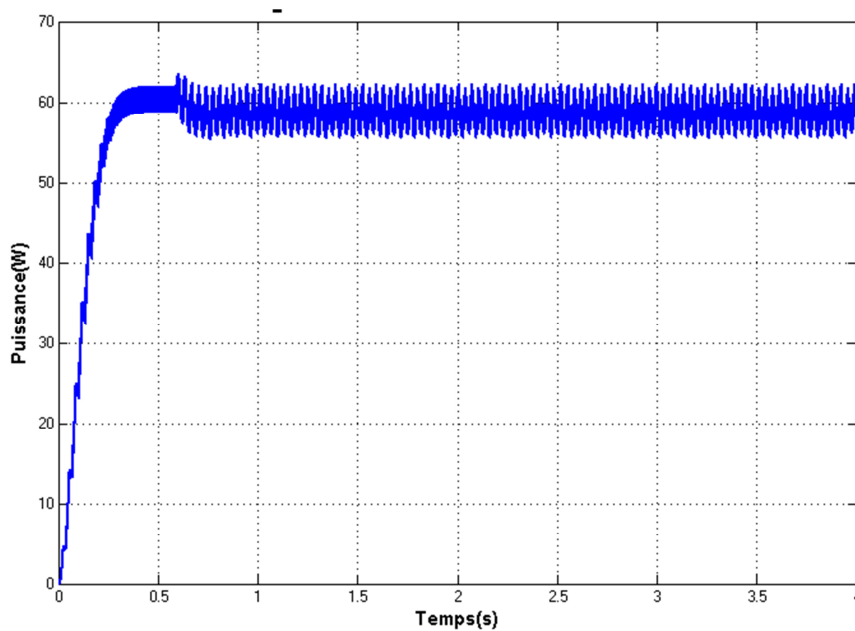


Figure IV.13 : Résultats de simulation de puissance de sortie du système pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

A travers les courbes précédentes on remarque que la tension a la sortie du convertisseur est environ trois fois supérieur a celle de la sortie du panneau et cela grâce au hacheur Boost qui a le rôle d'élever la tension tout en gardant la même puissance, avec une faible diminution a cause des pertes au niveau des composants et la commande utilisée.

Donc le convertisseur DC-DC (Boost) et la commande MPPT effectuent correctement ses rôles d'atteindre le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

IV.3.2.2. Simulation sous des conditions climatiques variable

IV.3.2.2.1. Variation de l'éclairement

Nous avons testé le fonctionnement du système étudié sous une température fixe de 25°C et un éclairement variable (présente une variation rapide) pour le test et l'optimisation de MPPT par la suite. Comme le montre dans la figure (IV.14).

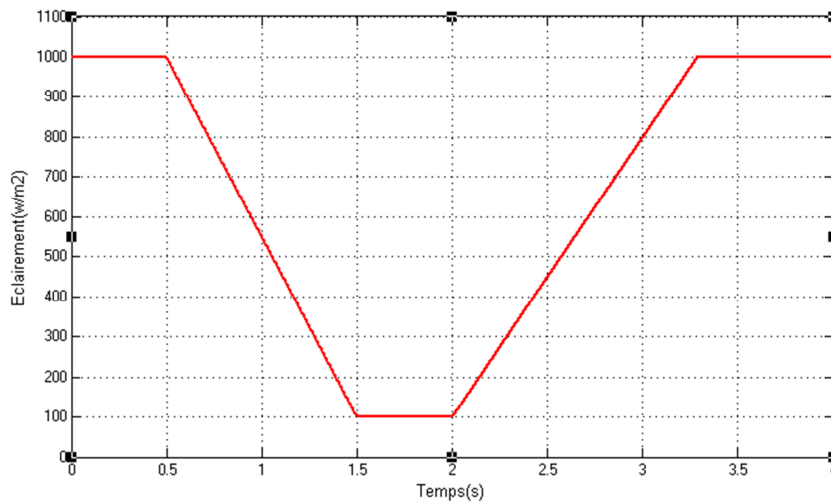


Figure IV.14 : Variation de l'irradiation (W/m²).

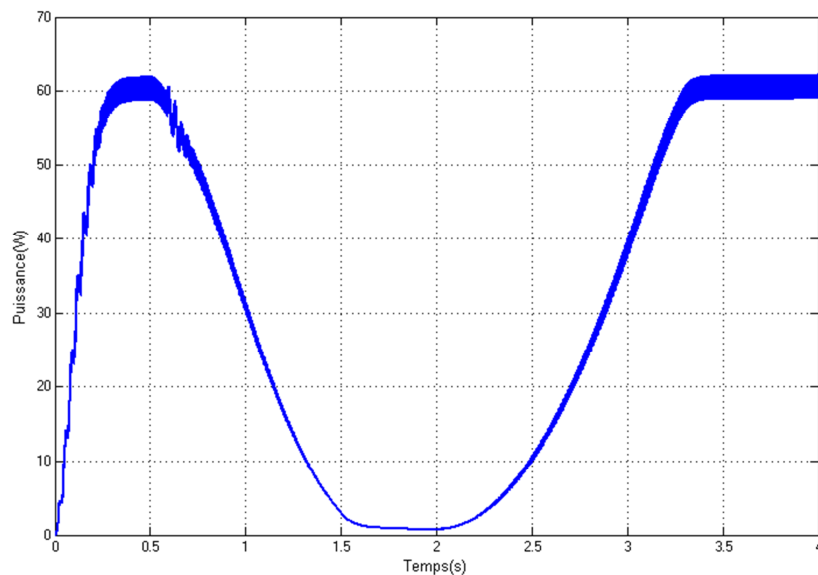


Figure IV.15 : Réponse du système PV aux changements de l'irradiation.

Nous constatons dans la figure(IV.15), un suivi du MPP stable ou borne du la puissance du système. Il est remarquable que la valeur de la puissance a un lien direct et proportionnelle à l'intensité du rayonnement Figure IV.14 elle diminue avec la diminution de cette dernière.

IV.3.2.2.1. Variation de la Température

Pour voir en fonction du temps la réaction du système sur le changement brusque de la température et un éclairement constant $G=1000W/m^2$, on applique une perturbation à l'instant $t = 1s$ de $T=25C^{\circ}$ vers $T=50C^{\circ}$ comme le montre dans la figure (IV.16) :

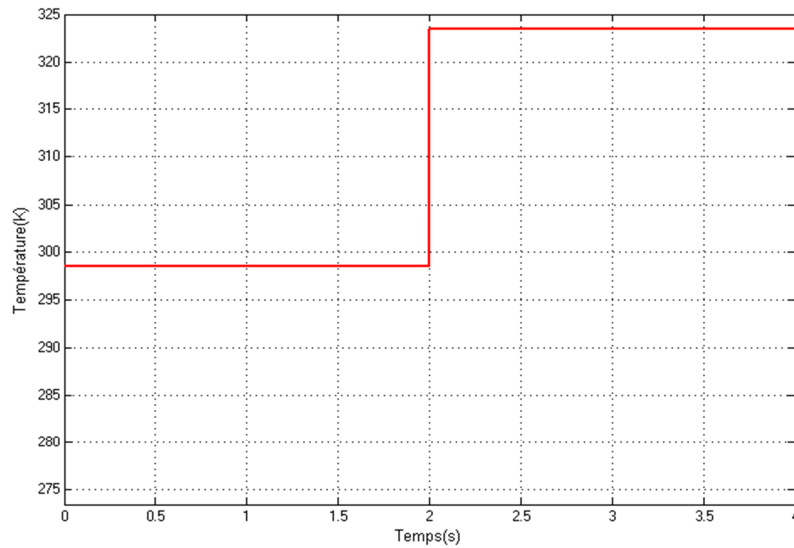


Figure IV.16 : Variation de Température (°K).

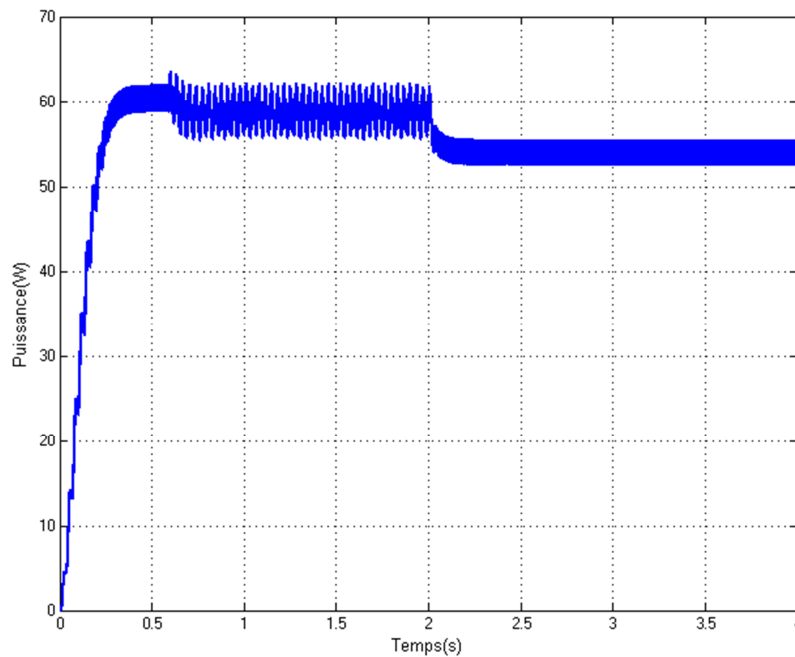


Figure IV.17 : Réponse du système PV aux changements de Température (°K).

Nous remarquons que la température a une influence directe sur la puissance de sortie du générateur photovoltaïque, la puissance de sortie de convertisseur baisse assez fortement lorsque la température augmente Figure IV.16. Ce qui fait lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte. Après un régime transitoire, la commande MPPT fait osciller le point de fonctionnement autour du point du PPM. La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une étude de couplage direct et indirect, par la suite nous avons analysé dans l'environnement Matlab Simulink le fonctionnement électrique de l'ensemble système PV, adapté par le convertisseur (hacheur) Boost, régulé par une commande MPPT analogique (P&O)

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

- Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV.
- La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce mémoire se sont focalisées sur l'optimisation de la production d'énergie électrique photovoltaïque ainsi que son transfert vers une charge avec le moins de pertes possibles.

A la fin de ce travail on peut résumer notre travail par les points suivants :

- La modélisation et la conception d'un module ou générateur PV est une manière d'étude très importante pour analyser le fonctionnement de système PV et voir l'influence de différents facteurs sur le module surtout la variation de l'éclairement et la température.
- Nous avons montré tout d'abord l'importance d'installer un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge, ce type de connexion est indispensable pour augmenter le rendement et minimiser les pertes de transfert d'énergie.
- Nous avons montré aussi que dans un système photovoltaïque, la puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que grâce à des lois de commande spéciale qui réagit directement sur le rapport cyclique.

Finalement, Ce travail propose le régulateur MPPT comme solution pour optimiser le système photovoltaïque quel que soit le taux de variation de l'éclairement et la température

Référence Bibliographie

[1] S. M. Ait-Cheikh, «*Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques*», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.

[2] M. Adouane, «*Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique*», Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.

[3] A. AZIZ, «*Propriétés Electriques des Composants Electroniques Minéraux et Organiques, Conception et Modélisation d'une Chaîne Photovoltaïque Pour une Meilleure Exploitation de l'Energie Solaire* », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, France, 2006.

[4] OUMNAD, «*Electronique Fondamentale*», Ecole Mohammadia des Ingénieurs, Site Internet, <http://z.oumnad.123.fr>.

[5] C. Hua and C. Shen, «*Comparative study of peak power tracking techniques for solar storage system* », IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 15-19 February, Anaheim, CA, USA, 1998.

[6] Dossier Thematique «*effet photovoltaïque et fonctionnement des installations solaires isolées* » energies solidaires courrier es n°03 – janvier 2000.

[7] OUMNAD, «*Electronique Fondamentale*», Ecole Mohammadia des Ingénieurs, Site Internet, <http://z.oumnad.123.fr>.

[8] M. Adouane, «*Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique*», Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

[9] W.Bensaci. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT, Mémoire de Master, Université KASDI MERBAH OUARGLA, 2012.

[10] A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud Et I. Youm «*etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque* » revue des energies renouvelables vol. 11 n°3 sénégal, 2008.

- [11] Saad Motahhir, Abdelaziz Ghzizal, Aziz Derouich. Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM. Congrès International de Génie Industriel et Management des Systèmes, May 2015, fès, Maroc. fhal-01351493f.
- [12] HANANOU.F, ROUABAH.A, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque», MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 09 /06/2014
- [13] Singh, P., Singh, S. N., Lal, M., & Husain, M. (2008). Temperature dependence of I-V characteristics and performance parameters of silicon solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(12), 1611-1616.
- [14] Chekired.F, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [15] N. Abouchabana, « *Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT* », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [16] S. M. Ait-Cheikh, « *Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïque s*», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007
- [17]NECHE .K, « Aide à la mise au point d'un banc de test photovoltaïque », Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi, El-Harrach, ALGER
- [18] A.TOULAIT, R .Aili « *Modélisation et simulation sous MATLAB/SIMULINK d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT*», mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 29/09/2014
- [19] «Etude sur la Commande du Hacheur Quatre Quadrants», Mémoire de Master, 2013, Université Larbi Ben M'hidi-Oum El Bouaghi, Département Sciences & Technologie.
- [20] S.SARRI, H.BFOUTEAHA «*Commande en MPPT d'une chaîne photovoltaïque à base d'un hacheur multiniveaux*», Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel, 2020.
- [21] Nettari Y., «*Commandes robustes et intelligentes des convertisseurs DC-DC*», Mémoire de Master, Université Ferhat Abbas Sétif, 2014.

- [22] ZENAKHI A, «Etude par simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque menu d'une commande MPPT», Université Abou BekrBelkaïd – Tlemcen, 14 /06/2016.
- [23] Home Energy, «Etude comparative de panneaux solaires photovoltaïques», Rapport de stage de fin de D.U.T. Mesures Physiques, Université Paris VII 2, place Jussieu 75005 PARIS, Mai 2006/Juillet 2006
- [24] Amarouayache Mohamed, « contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », doctorat en sciences en électrotechnique option ,2014
- [25] J. Ferrieux, f. Forest, « alimentations a découpage convertisseurs a résonance: principes composants modélisation ». Paris, france: dunod, 1999.
- [26] MLE BENHADDOUCHE NESRINE FATIMA 'La commande d'un système photovoltaïque d'un satellite' Thèse de master université Tlemcen 2013/2014.
- [27] M. Angel Cid Pastor, « conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », docteur de l'institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2006
- [28] M. Boukli-Hacene Omar « conception et réalisation d'une génération photovoltaïque muni d'un convertisseur mppt pour une meilleure gestion énergétique » magister en automatique productique informatique 2010/2011.
- [29] N. Aouchiche , M.S. Aït Cheikh et A. Malek, « *Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation* », Revue des Energies Renouvelables Vol 16, N°3, (2013), p 485 – 498.
- [30] J. Fadat, «*Chaîne de Conversion d'Energie Photovoltaïque Commande MPPT*», La Revue 3EI, N°43, Décembre 2005.
- [31]. M.Hatti, "contrôleur flou pour la poursuite du point de puissance maximum mppt d'un système photovoltaïque".jcge'08 Lyon, 2008.
- [32] N. Khaehintung, K. Pramotung, B. Tuvirat, P. Sirisuk, "risc-microcontroller builtin fuzzy logic controller of maximum power point tracking for solar-powered lightflasher applications", industrial electronics society, 2004.

- [33] W. Chung-Yuen, K. Duk-Heon, K. Sei-Chan, And All, “a new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller”, IEEE power electronics specialists conference, pesc’94, pp. 396-403, jun. 1994.
- [34] M. Veerachary, T.Senjuand K. Uezato, “feedforward maximum power point tracking of pv systems using fuzzy controller”, IEEE trans. On aerospace and electronic systems, vol 38, no. 3, july 2002.
- [35] C.TIGRINE, O. Ait Ouali «*Etude et simulation des techniques MPPT d’un système photovoltaïque*», Université A. MIRA-BEJAIA, 2018/2019.
- [36] Ali Nasr Allah Ali, Mohamed H. Saied, M. Z. Mostafa And T. M. Abdel- Moneim, “a survey of maximum ppt techniques of pv systems”. IEEE energy tech, 2012.
- [37] Trishan Esrarn And Patrick “comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques” IEEE transactions on energy conversion, 2007.
- [38] C. CABAL, “Optimisation énergétique de l’étage d’adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque”, Thèse de Doctorat de l’université Toulouse III-Poul Sabatier, France ,2008.
- [39] Cédric CABAL, "Optimisation énergétique de l’étage d’adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Thèse de doctorat soutenue le 15 décembre 2008.
- [40] M.PETIBON Stéphane, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de l’énergie pour les applications photovoltaïques", Thèse de doctorat de l’université de Toulouse 2009.

Annexes

Annexes1 : Paramètre du module PV

```
1 - clear all
2 - clc
3 - figure(1)
4 - hold on
5 - for Npp=1
6 -     Nss=1
7 -
8 -     G=1000
9 -     N = Nss/Npp
10 -    Rs=0.008
11 -    Rsh=1000
12 -    Tref=298.15
13 -    a=1.2
14 -    q=1.60217646e-19
15 -    K=1.3806503e-23
16 -    Ns=36
17 -    Voc=21.1
18 -    Icc=3.8
19 -    Ki=0.0024
20 -    Gref=1000
21 -    Kv=-0.08
22 -    T=298, 5;
23 -    Iph=(Icc+Ki*(T-Tref))*(G/Gref);
24 -    IO=(Icc+Ki*(T-Tref))/exp((q*(Voc+Kv*(T-Tref)))/a*K*T*Ns)-1;
25 -    %I=Iph-IO*(exp((q*(V+Rs*I))/a*K*T*Ns)-1)-(V+Rs*I)/Rsh;
26 -    sim('simulation')
27 -    plot(V,P)
28 - end
29
```