

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2021



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Electromécanique

Spécialité: Electromécanique

Par: Bouchareb Khalil et Touati Ayyoub

Thème

Modélisation et simulation d'un système PV adapté par une commande MPPT basée sur un mode glissant.

Soutenu publiquement, le 14 / 07 /2021 , devant le jury composé de:

Mme. BOUCERREDJ Leila	MCA	Univ. Guelma	Président
M.BENLALOUI Idriss	MCB	Univ. Guelma	Encadreur
M. Fezzani Amor	MRA	Unité de recherche appliquée on énergies renouvelables Gharđaia	Co-Encadreur
Mme. LOUCIF Fatiha	MAA	Univ. Guelma	Examineur

Année Universitaire: 2020/2021

Remerciements

On doit de jour sa clarté, à la nuit sa sérénité,

A la terre sa richesse et sa bonté,

A chacun on doit quelque chose...

On doit à ceux qui nous ont aidé et soutenu un sentiment qui ne saurait être traduit.

En leur disant leur simplement "merci..."

On tient à exprimer nos vifs remerciements à :

DIEU, tout-puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces années d'études, afin que nous puissions en arriver là.

Notre promoteur Dr. I. BENLALOUÏ pour ses remarques pertinentes. Lui qui n'a pas cessé de nous accompagner. Ses conseils, ses encouragements, son soutien moral nous ont été d'un grand apport.

Notre président Dr. S.MENDACI pour Ses conseils, ses encouragements, son aide et d'avoir accepté de présider le jury de soutenance du présent mémoire.

Nos professeurs qui ont contribué de près ou de loin à notre formation, qui nous ont permis de rédiger ce mémoire, pour leurs aides, pour leurs encouragements et leurs soutiens moral qu'ils nous ont portés tout au long de ce travail.

Aux membres de jury à qui nous exprimons nos profondes gratitude et nos entières reconnaissances de bien vouloir accepter de juger ce travail.

Enfin , on remercie aussi toutes les personnes qui nous ont aidé de près ou de loin à la rédaction de ce mémoire.

Bouchareb Khalil et Touati Ayoub

Dédicaces

*A tous nos familles, en particulier à **nos parents** ;*

A tous nos amis chacun en son nom ;

A tous les musulmans convaincus que la seule richesse est la bonne foi et que le seul modernisme est l'islam.

Bouchareb Khalil et Touati Ayoub

ملخص:

في هذا السياق ، نقدم نظامًا ضوئيًا يعمل بمحول يعمل على زيادة الجهد . من أجل تحقيق تتبع جيد لأقصى نقطة للطاقة ، نقوم بتطبيق خوارزميتين: خوارزمية الاضطراب والملاحظة) وخوارزمية (تتبع اقصى نقطة للطاقة) على أساس النمط الانزلاقي. بالإضافة إلى ذلك ، سنقوم بدراسة مقارنة بين الخوارزميتين. تؤكد اختبارات المحاكاة باستخدام Matlab / Simulink صحة أداء الخوارزميتين.

الكلمات المفتاحية : مولد الطاقة الضوئية ، الاضطراب والملاحظة ، تتبع اقصى نقطة للطاقة ، النمط الانزلاقي ،

محول

Résumé

Dans ce contexte, nous présentons un système photovoltaïque fonctionnant avec un hacheur survolteur. Dans le but d'atteindre un bon suivi du point de puissance maximale, nous appliquons deux algorithmes : algorithme Perturbation et Observation (P&O) et l'algorithme MPPT basé sur la commande de mode glissant . Ainsi que, nous allons fait une étude comparative entre les deux algorithmes. Les tests de simulation sous Matlab / Simulink viennent confirmer la validité des performances des deux algorithmes.

Mots clés: Générateur photovoltaïque, MPPT, P&O, Mode glissant, Hacheur survolteur.

Abstract :

In this context, we present a photovoltaic system operating with a Boost chopper. In order to achieve good tracking of the maximum power point, we apply two algorithms: Perturbation and Observation (P&O) and MPPT based on sliding mode algorithms control. As well as, we are going to make a comparison study between the two algorithms. The simulation tests under Matlab / Simulink confirm the validity of the performances of the two algorithms.

Keywords: Photovoltaic Generator, MPPT, P&O, Sliding mode, Boost Chopper.

Listes des Symboles et Abréviations

PV	photovoltaïque
GPV	un générateur photovoltaïque
I-V	courant-tension
ICC	Courant de court circuit
VCO	Tension à circuit ouvert
FF	Facteur de forme
Pm	Point de puissance maximale
I_L	Courant traversant l'inductance L dans le convertisseur DC/DC [A].
I_{ph}	Photo-courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation [A].
I_{ppm}	Courant au point de puissance maximale [A].
I_{Rp}	Courant dérivé par la résistance parallèle [A].
I_s	Courant de sortie du convertisseur DC/DC [A].
I_{sat}	Courant de saturation inverse de la diode d'une cellule, dépendant de la température.
N_s	Nombre de modules dans le panneau en série.
N_p	Nombre de modules dans le panneau en parallèle
P_{pv}	Puissance de la cellule photovoltaïque (ou GPV).
P_{max}	Puissance maximale produite PV (W).
P_s	Puissance de sortie du convertisseur DC/DC (de la charge R).
q	Charge d'électron $q = 1.602 \times 10^{-9}$ c.
R	Charge résistive [Ω]
R_p	Résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction [Ω].
R_s	Résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions

[Ω].

S Surface de glissement.

Sat Fonction saturation

Sign Fonction signe

T Température effective de la cellule en kelvin [K].

u Loi de commande

u_{eq} Loi de commande équivalente

u_n Loi de commande discontinue

MPPT Maximum Power Point Tracking

P&O Perturbation et observation

DC/AC Conversion continu/alternatif

DC/DC Conversion continu/continu

- ❖ D'autres symboles et abréviations spécifiques peuvent être définis dans les chapitres, s'il y a lieu.

Listes des Figures

Figure (1.1): Schéma de principe d'un générateur photovoltaïque [2].....	3
Figure (1.2): Fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque.....	6
Figure (1.3): Structure basique d'une cellule solaire.....	8
Figure (1.4): Présentation schématique d'une cellule solaire	10
Figure (1.5): Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	11
Figure (1.6): Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'un générateur Photovoltaïque....	13
Figure (1.7): Modules photovoltaïque.....	14
Figure (1.8): Câblage des cellules dans un module.....	14
Figure (1.9): Exemple de caractéristique courant-tension d'un module.....	15
Figure (1.10): Caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$ d'un panneau solaire constituée de 36 cellules en série pour différents ensoleillements S_s avec $T = 30^\circ\text{C}$	15
Figure (1.11): Caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$ d'un panneau solaire constituée de 36 cellules en série pour différents températures $T_s = 1000\text{w/m}^2$	16
Figure (1.12): Association de N modules solaires en série.....	17
Figure (1.13): Association de N_p modules solaires en parallèle.....	17
Figure (1.14): Association mixte $N_s \times N_p$ modules solaires.....	18
Figure (1.15): Panneau photovoltaïque.....	18
Figure (2.1): Schéma de principe d'un hacheur parallèle (boost).....	21
Figure (2.2): Schéma d'un hacheur parallèle (boost) raccordé au GPV.....	22
Figure (2.3): Formes typiques des ondes du convertisseur boost.....	23
Figure (2.4): Génération des impulsions de commande du hacheur.....	24
Figure (2.5): Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT	25
Figure (2.6): Chaîne de conversion photovoltaïque.....	27
Figure (2.7): Caractéristiques de fonctionnement de la méthode de P&O.....	29

Figure (2.8): Organigramme de l'algorithme perturbation et observation (P&O).....	31
Figure (2.9): Schéma de simulation du système globale en Matlab.....	31
Figure (2.10): Schéma bloc de la commande MPPT « P&O » et PWM.....	32
Figure (2.11): Résultats de simulation de la puissance maximale générée par le module photovoltaïque pour ($G=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$, $R=10\Omega$).....	32
Figure (2.12): Résultats de simulation de la tension générée par le module photovoltaïque pour $G=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$, $R=10\Omega$	33
Figure (2.13): Résultats de simulation du courant généré par le module photovoltaïque pour $G=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$, $R=10\Omega$	33
Figure (2.14) : Résultats de simulation de la puissance du hacheur survolteur pour ($G=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$, $R=10\Omega$).....	33
Figure (2.15): Résultats de simulation de la tension du hacheur survolteur pour $G=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$, $R=10\Omega$).....	34
Figure (2.16): Résultats de simulation du courant du hacheur survolteur pour ($G=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$, $R=10\Omega$).....	34
Figure (2.17): Résultats de simulation de ($I(t)$, $V(t)$, $P(t)$) générée par le module photovoltaïque pour différents éclairagements ($G=1000\text{W/m}^2$, $G=500\text{W/m}^2$) et une température fixe ($T=25^\circ\text{C}$).....	35
Figure (2.18): Résultats de simulation de ($I(t)$, $V(t)$, $P(t)$) du hacheur survolteur pour différents éclairagements ($G=1000\text{W/m}^2$, $G=500\text{W/m}^2$) et une température fixe ($T=25^\circ\text{C}$).....	36
Figure (2.19): Résultats de simulation de ($I(t)$, $V(t)$, $P(t)$) de module photovoltaïque pour ($G=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$, $R=100\Omega$).....	37
Figure (3.1): Configuration par commutation au niveau de la contre-réaction d'état.....	40
Figure (3.2): Configuration par commutation au niveau de l'organe de Commande.....	40

Figure (3.3): Principe de la commande par mode glissant.....	41
Figure (3.4): Commande équivalente comme valeur moyenne de commutation entre u^+ et u^-	43
Figure (3.5): Représentation de la fonction signe	45
Figure (3.6): Profil de l'éclairement G.....	48
Figure (3.7) : Comparaison de la puissance PV, la tension V_{pv} et le courant I_{pv} entre SMC et P&O sous un éclairement variable G.....	48

Listes des tableau

Tableau (1.1): Evénements notables dans l'histoire du photovoltaïques.....	6 . 7
---	-------

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Liste des Symboles et Abréviations

Liste des Figures et Tableaux

Introduction Générale

Problématique

Objectif du Travail

Structure du Mémoire

Chapitre 1

Généralité sur les systèmes photovoltaïques

1.1.	Introduction	3
1.2.	L'énergie solaire.....	4
1.3.	Rayonnement solaire	4
1.4.	Notions préliminaires sur le rayonnement solaire.....	5
1.4.1.	Rayonnement direct.....	5
1.4.2.	Rayonnement diffus.....	5
1.4.3.	Rayonnement réfléchi	5
1.4.4.	Rayonnement global	5
1.5.	L'effet photovoltaïque	5
1.6.	Cellule photovoltaïque	7
1.6.1.	Technologies des cellules PV	8
1.6.2.	Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	9
1.6.3.	Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque).....	10
1.6.4.	Circuit équivalent et modèle mathématique	10
1.7.	Générateur photovoltaïque	11
1.7.1.	Paramètre photovoltaïque	11
1.7.1.1.	Courant de court circuit ICC.....	11
1.7.1.2.	Tension circuit ouvert ; VCO	12
1.7.1.3.	Facteur de forme FF	12
1.7.1.4.	Point de puissance maximale Pm	12
1.7.1.5.	Rendement énergétique maximum	12
1.7.2.	Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque	13
1.8.	Module photovoltaïque	13
1.8.1.	Principales caractéristiques d'un module	14
1.8.1.1.	Puissance crête.....	14

1.8.1.2.	Rendement	15
1.8.1.3.	Facteur de forme.....	15
1.8.1.4.	Caractéristique courant-tension d'un module.....	15
1.8.1.5.	Influence de l'Éclairement.....	15
1.8.1.6.	Influence de la Température.....	16
1.8.1.7.	Influence de l'association série des cellules PV.....	16
1.8.1.8.	Influence de l'association parallèle des cellules PV.....	17
1.8.1.9.	Influence de l'association mixte (Série +Parallèle) des cellules PV.....	18
1.9.	Panneau photovoltaïque.....	18
1.10.	Avantages et Inconvénients de l'énergie PV.....	19
1.11.	Conclusion:.....	19

Chapitre 2

Les convertisseurs statiques et la commande MPPT "P&O"

2.1.	Introduction.....	20
2.2.	Les convertisseurs DC-DC (hacheurs).....	20
2.2.1.	Les type des convertisseurs DC-DC.....	20
2.2.2.	Hacheur survolteur (ou Boost).....	20
2.2.3.	Etude du hacheur survolteur d'un système photovoltaïque.....	22
2.2.3.1.	Représentation d'un hacheur survolteur PV.....	22
2.2.3.2.	Modélisation d'un hacheur survolteur.....	23
2.3.	Commande MLI du hacheur.....	24
2.4.	Technique de commande de l'MPPT.....	25
2.4.1.	Définition.....	25
2.4.2.	Convertisseur Pour la poursuite du point de puissance maximum (MPPT).....	25
2.4.3.	Le principe de fonctionnement du MPPT d'un générateur PV	26
2.4.4.	Différentes techniques d'MPPT.....	27
2.4.4.1.	Les méthodes indirectes.....	27
2.4.4.2.	Les méthodes directes	28
2.4.4.2.1.	Méthode Perturbation & Observation (P&O).....	28
a.	Définition.....	28
b.	Le fonctionnement de l'algorithme P&O.....	28
2.5.	Modélisation d'un générateur photovoltaïque.....	30
2.6.	Simulation du système PV.....	30
2.6.1.	Résultats et analyses.....	32
2.7.	Données techniques.....	39
2.7.1.	Module SCHOTT Solar ASE-100-GT-FT/MC.....	39
2.8.	Conclusion.....	39

Chapitre 3

Commande MPPT basée sur le mode glissant

3.1. Introduction.....	40
3.2. Système à structure variable (SSV).....	40
3.3. Commande par mode de glissement.....	41
3.3.1. Principe.....	41
3.3.2. Objectif de la commande par mode glissant.....	42
3.3.3. Choix de la surface de glissement.....	42
3.3.4. Condition d'existence du glissement.....	42
3.3.5. Méthode de la commande équivalente.....	43
3.4. Commande MPPT par mode glissant du système photovoltaïque.....	45
3.4.1. Choix de la surface de glissement.....	46
3.4.2. Détermination de la commande équivalente.....	47
3.4.3. Détermination de la commande discontinue.....	47
3.5. Résultats de simulation.....	47
3.6. Conclusion.....	49

Conclusion Générale

Travail Accompli

Difficultés et Problèmes Rencontrés

Suggestions et Perspectives

Références Bibliographiques

Introduction Générale

*"Se trouver ensemble est un débat,
Rester ensemble est un progrès,
Travailler ensemble est un succès".*

T. ROOSEVELT

Introduction générale

Problématique

Pourquoi ont les chercheurs s'orientent vers le domaine des énergies renouvelables?

L'énergie est indispensable à la vie de tout le monde, peu importe quand et où ils sont. Cela est particulièrement vrai en ce nouveau siècle, où les gens continuent à poursuivre un haut niveau de vie. Parmi les différents types d'énergie que l'Homme a besoin au quotidien, l'électricité est la plus importante qui lui sert pour l'éclairage, le chauffage, la cuisson, la distraction, la communication et l'information, etc. Au cours du XX siècle, on a abondamment utilisé les combustibles et les sources d'énergie à base d'hydrocarbures, ce qui s'est manifesté par le dégagement de grandes quantités de gaz notamment le dioxyde de carbone.

La pollution de l'air, les changements climatiques, les risques du nucléaire, les limites des réserves des énergies traditionnelles (uranium, pétrole, charbon et gaz naturel) qui sont épuisables et leurs répartitions non équitables sur le globe terrestre, l'augmentation des peuples du monde et l'accroissance des besoins énergétiques ont fait prendre conscience qu'un recours à d'autres moyens de production d'énergies respectueuses de la planète où nous vivons, s'impose.

La solution est de recourir aux énergies renouvelables qui offrent la possibilité de produire de l'électricité satisfaisante aux exigences écologiques. Malheureusement, cette issue rencontre des contraintes économiques ; coût élevé et rendement bas. Le photovoltaïque (PV) fait partie de ces énergies.

L'énergie solaire est une alternative intéressante à l'énergie des combustibles fossiles. La conversion directe du rayonnement solaire en électricité est connue sous le nom d'effet photovoltaïque. L'énergie PV se développe très rapidement. Elle est durable, propre et sans pollution de l'environnement

Une caractéristique importante des panneaux solaires est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement donné, localisé par une tension et un courant connus, appelé en anglais Maximum Power Point (MPP). L'autre problème est que la position de ce point n'est pas fixe mais se déplace en fonction de l'ensoleillement et de la température des cellules solaires. A cause du coût relativement onéreux de ce genre d'énergie on doit extraire le maximum de watts des panneaux solaires.

Cela nécessite un mécanisme de poursuite du point de puissance maximale appelé "maximum power point Tracking (MPPT)" afin que la puissance maximale soit générée en permanence.

Objectif du travail

L'objectif principal de cette mémoire est de créer une plateforme de connaissances sur les chaînes de conversion PV, suivie d'une optimisation du transfert d'énergie entre la source d'énergie PV et le bus DC pour améliorer l'efficacité du système. La création d'algorithmes de contrôle MPPT et la sélection d'interfaces de puissance sont deux façons d'utiliser PV. Le système de conversion d'énergie photovoltaïque doit être étudié en profondeur afin d'optimiser la transmission d'énergie par panneaux solaires. La modélisation, l'analyse et la synthèse du contrôle du système sont tous des sujets inclus dans cette étude.

Pour atteindre cet objectif, il faut réaliser les tâches suivantes:

- Recherche bibliographique approfondie ;
- Optimisation de l'énergie PV par la poursuite du PPM en utilisant un algorithme de commande numérique basée sur le mode de glissement ;
- Application sur une plateforme de simulation basée sur le progiciel Matlab/Simulink ;
- Comparaison avec d'autres méthodes MPPT, notamment la technique P&O

Structure du mémoire

Notre mémoire est divisé en trois chapitres :

- Dans le premier, nous avons abordé les systèmes photovoltaïques en général, ainsi que la production de cellules solaires, ainsi que l'effet photovoltaïque et le principe de fonctionnement.
- Dans le deuxième chapitre, nous avons examiné différents types de convertisseurs statiques (DC-DC et DC-AC) et comment construire des cellules photovoltaïques, ainsi que l'effet photovoltaïque et la théorie de fonctionnement. MPPT est une commande.
- Le chapitre trois traite de la définition des systèmes à structure variable, des généralités sur les commandes non linéaires basées sur le mode glissant, de l'analyse du principe de fonctionnement et de la simulation des algorithmes MPPT suggérés.

En conclusion générale, nous vous proposons un aperçu des travaux réalisés ainsi que les résultats obtenus, avec des perspectives pour l'avenir du travail.

Chapitre Un

Généralité sur les systèmes photovoltaïque

"En toute chose, il n'y a qu'une manière de commencer, quand on veut discuter convenablement : il faut bien comprendre l'objet de la discussion".

1.1. Introduction

Les énergies renouvelables elle énergies qui ne se terminent pas avec le temps et qui sont disponibles en grande quantité. Elles ne produisent pas d'émissions polluées pendant la phase d'exploitation, Et les cinq formes d'énergies renouvelables les plus importants sont la géothermie, la biomasse, l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne et l'énergie solaire photovoltaïque, c'est la dernier (L'énergie solaire photovoltaïque) provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale [1].

Comme montre la figure suivante :

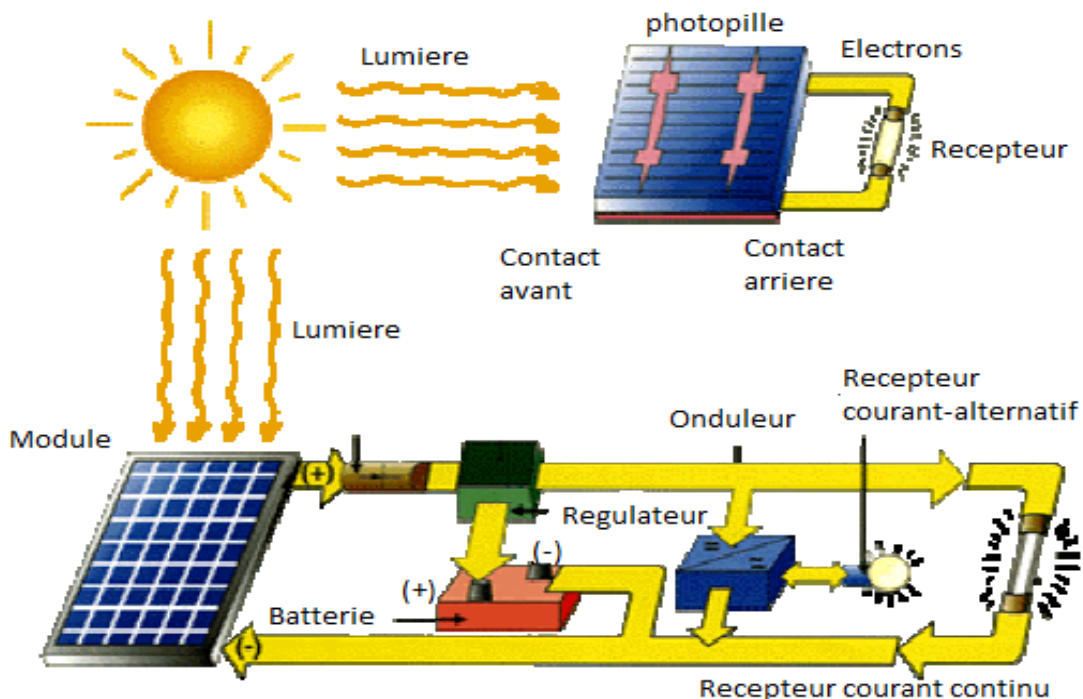


Figure (1.1): Schéma de principe d'un générateur photovoltaïque [2].

Dans ce chapitre, nous commencerons par la définition de l'énergie solaire, suivie de la construction des cellules photovoltaïques, l'effet photovoltaïque et le principe de fonctionnement. Puis, nous nous présenterons les différents types des cellules photovoltaïques. Enfin, les principales caractéristiques d'un module photovoltaïque.

1.2. L'énergie solaire :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KWc/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- L'énergie solaire thermique : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux solaires. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- L'énergie solaire photovoltaïque: qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [3].

1.3. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0.2\mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2.5\mu\text{m}$). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons, il est nécessaire d'introduire une notion de masse d'air (AM) elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct. La masse d'air est exprimée un multiple du trajet parcouru en un point au niveau de la mer, le soleil étant directement à l'aplomb.

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales [3].

1.3.1. Rayonnement direct :

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

1.3.2. Rayonnement diffus :

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère.

1.3.3. Rayonnement réfléchi :

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lieu appelé Albédo (ϵ) $0 \leq \epsilon \leq 1$.

1.3.4. Rayonnement global :

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi.

1.4. L'effet photovoltaïque :

Le terme photovoltaïque est formé à partir de deux mots :

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

La conversion d'énergie solaire PV repose sur un phénomène physique appelé : effet photovoltaïque, qui est la conversion directe de la lumière en électricité quand des photons frappent une cellule faite généralement du silicium. Cette dernière est un composant électronique semi conducteur dans lequel l'absorption des photons, grains élémentaires de la lumière, libère des "électrons" chargés négativement et des "trous" chargés positivement. Ces charges électriques sont séparées par un champ électrique interne et collectées par une grille à l'avant et un contact à l'arrière. La cellule PV constitue ainsi un générateur électrique élémentaire (Figure 1.2).

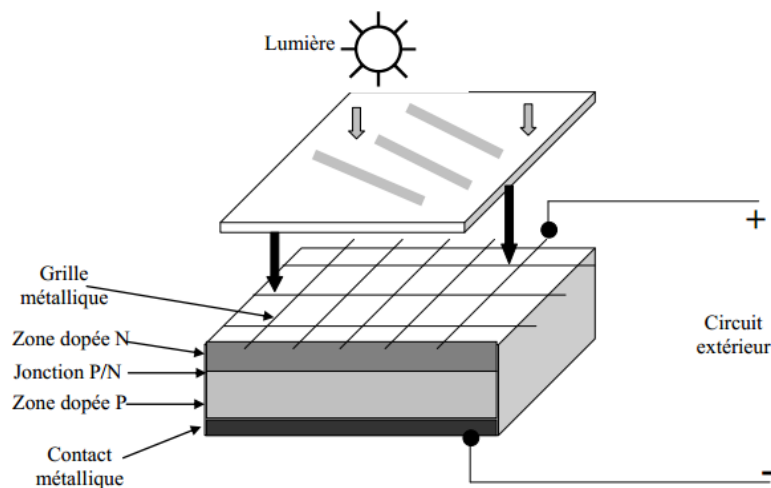


Figure (1.2): Fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque

Le Tableau (1.1) résume les événements importants de l'histoire du photovoltaïque [3].

Tab (1.1): Événements notables dans l'histoire du photovoltaïques [3] :

1839	Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque
------	--

1883	Frits réalise des cellules solaires de grande surface à base de se
1954	Des rendements de 6% sont obtenus : Si (Bell Lab, USA) and Cu ₂ S/CdS (Air Force, USA)
1955	Hoffman électroniques (USA) propose des cellules Si à 2 % de rendement à \$1500/W
1958	Kearns et Calvin ont démontré l'effet photovoltaïque d'une cellule à base de MgPh
1970	Première cellule solaire à hétérostructures GaAs élaborée par Alferov, Andrée et al. en URSS
1973	Première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université Delaware, USA ; à base de Cu ₂ S
1980	La première cellule à base de Cu ₂ S/CdS délivrant un rendement > 10%
1982	Première unité de production de 1 MW (Californie, USA) avec des cellules Arco Si
1985	Les cellules à base de Si donnent un rendement > 20% sous le rayonnement solaire
1994	Des rendements > 30 % avec des cellules à concentration multi jonctions à base de GaInP/GaAs (NREL, USA)
1996	Les cellules solaires hybrides à colorants atteignent un rendement de 11% (EPFL, Switzer land)
1998	Cellules couches minces Cu(InGa) Se ₂ atteignent un rendement de 19% (NREL, US)
2002	Le photovoltaïque installé mondial cumulatif atteint 2000 MW
2007	Cellules solaires organiques en structure tandem avec un rendement de 6,5 % (UCSB, USA)
2008	Un rendement homologué de 5,9% sur une surface active de 2 cm ² obtenu par Heliatek, BASF et l'Institut de photovoltaïque appliquée (IAPP) de l'Université technique de Dresde (Allemagne)
2009	Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 6,1 % à base de PCDTBT et PC70BM (UCSB, USA) Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 7,4 % à base de PBDTTT-CF et PC70BM (Slammer Energy Inc., University of California, University of Chicago, USA)

1.6. Cellule photovoltaïque :

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conducteurs (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une

excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.

- d'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [4].

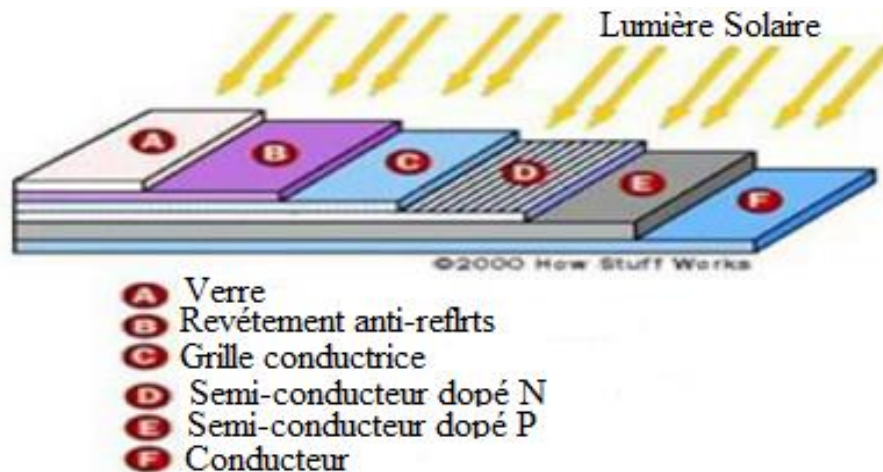


Figure (1.3): Structure basique d'une cellule solaire

1.6.1. Technologies des cellules PV :

Le matériau de base, utilisé dans la fabrication des cellules PV, est dans la plupart des cas le silicium. Cette technologie présente plus de 85% du marché mondial d'aujourd'hui, dont 29% pour le silicium monocristallin et 51% pour le silicium multicristallin. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, poly cristalline, ou mono cristalline. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de Gallium (AsGa), Tellure de Cadmium (CdTe), Indium Gallium Phosphide (InGaP), et Cu(InGa) Se₂. Le choix parmi ces différentes

technologies dépend du prix et du rendement énergétique. Quelques rendements concernant les diverses photopiles existantes sont présentés ci-après [5][6] :

- ❖ Les cellules monocristallines font partie de la première génération de photopiles. Elles ont un taux de rendement excellent de 24,7% en laboratoire (record obtenu en 1999). Sun Power commercialise une cellule de même nature avec un bon rendement qui peut atteindre 24,2%. Cependant, leur méthode de production est laborieuse et difficile, et donc, très chère. Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.
- ❖ Les cellules poly cristallines ont un coût de production moins élevé, et utilisant un procédé moins gourmand en énergie, avec un rendement de 11 à 15% (19,8% en laboratoire).
- ❖ Les cellules amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement avec un rendement plus bas 5 à 8% (13% en laboratoire). Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium de 0,3 à 1,0 micromillimètres seulement (500 μ mm pour les deux autres types). Les panneaux amorphes ont besoin d'environ deux fois plus de surface pour produire la même quantité d'électricité, et semblent se dégrader plus rapidement. Cependant, ils ont l'avantage de mieux réagir à la lumière diffusée et à la lumière fluorescente et d'être plus performants à des températures élevées.
- ❖ Les cellules en composite monocristallin (AsGa) avec un rendement de 18 à 20% (27,5% en laboratoire).
- ❖ Les cellules en composite poly cristallin (CdS, CdTe, CuInGaSe₂, etc.) ont un rendement de 8% (16% en laboratoire).

1.6.2. Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur la collision de molécules photosynthétiques (photons) avec un élément semi-conducteur tel que le silicium, qui sépare les électrons de leurs atomes. Ainsi, les électrons supplémentaires sont dispersés de manière aléatoire.

Le mouvement des électrons est contrôlé en plaçant deux types de silicium, le premier côté étant anesthésié par des atomes de phosphore qui contiennent plus d'électrons que le silicium, de sorte qu'ils deviennent chargés négativement et appelés la région narcotique N. D'autre part, il est anesthésié par des atomes de bore qui contiennent un plus petit nombre d'électrons de silicium, de sorte qu'ils deviennent chargés positivement en raison d'un manque d'électrons appelés la région narcotique P. Cette double face devient un peu une batterie qui s'appelle (jonction pn).

En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un pair électron - trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel [7]. Voir la figure (1.4) :

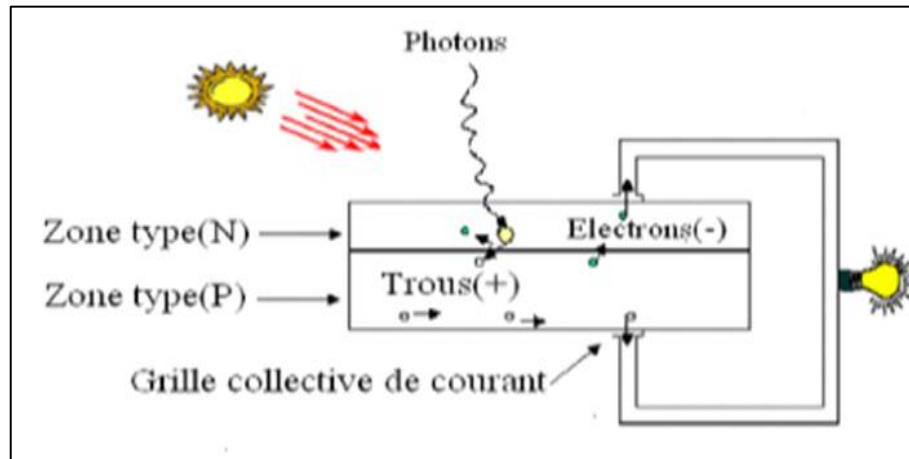


Figure (1.4): Présentation schématique d'une cellule solaire [5]

1.6.3. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque) :

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quelque soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 3 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [8]:

a. Les cellules monocristallines :

Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'à 24% en laboratoire) Cependant, elles coûtent trop chères due à leur fabrication complexe.

b. Les cellules poly cristallines :

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible (de 11% à 15% voir jusqu'à 19.8 en laboratoire).

c. Les cellules amorphes :

Elles ont un faible rendement (de 5% à 8% voir jusqu'à 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation tels que des calculatrices solaires ou encore des montres. L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).

1.6.4. Circuit équivalent et modèle mathématique :

La figure (1.5) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairage. Il correspond à un générateur de courant I monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule [1]:

- La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule : elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt (R_p) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

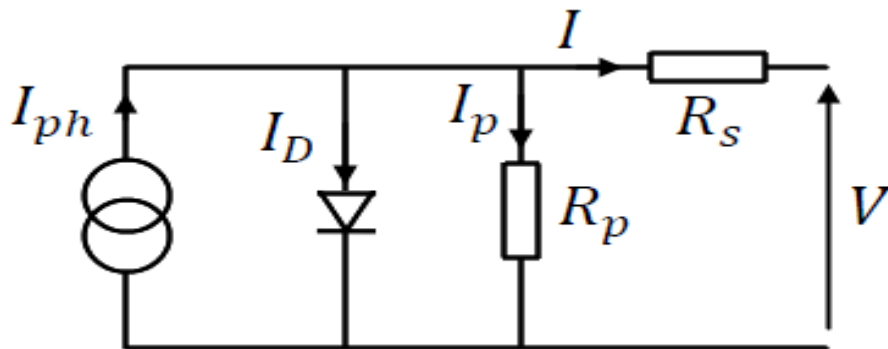


Figure (1.5): Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

I : Courant fourni par la cellule.

V : Tension aux bornes de la cellule.

I_D : Courant de diode.

I_{ph} : Photo courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation.

I_p : Le courant dérivé par la résistance parallèle.

I_0 : Courant de saturation de diode, dépendant de la température. .

R_p : Résistance en parallèle, représentant l'admittance parallèle du générateur de courant.

R_s : Résistance en série, modélisant les pertes ohmiques du matériau et des contacts.

1.7. Générateur photovoltaïque ;

Le terme générateur photovoltaïque GPV est utilisé pour désigner, selon l'application considérée, un module ou un panneau PV. Toutefois, il peut faire allusion au système PV tout entier. Pour la suite de ce document, on utilisera le terme GPV pour désigner un module ou un panneau PV [9].

1.7.1. Paramètre photovoltaïque :

Ces paramètres sont caractérisés par ceux des modules constituant le champ PV[x] :

1.7.1.1. Courant de court circuit ICC :

Si les deux électrodes sont en court-circuit à travers un ampèremètre, les électrons drainés par un champ interne de la jonction vont donner naissance à un courant de court-circuit I_{cc} qui correspond au photo courant I_{ph} généré par le rayonnement. Pour une distribution spectrale donnée, ce photo courant est proportionnel à l'irradiation du rayonnement incident et à la surface active de captation. Il définit la quantité de paire électron-trou générée G qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion L_n et L_p :

Il est obtenu pour une tension de sortie nulle :

$$I_{CC} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{qRS_{ICC}}{KT}} - 1 \right] \frac{RS_{ICC}}{R_p} \quad (1.1)$$

Dans le cas d'une cellule idéale ($R_S \rightarrow 0$ et $R_P \rightarrow \infty$)

$$I_{CC} = I_{ph} = qg(L_n + L_p) \quad (1.2)$$

Tenant compte de l'effet des résistances R_S et R_P ; le courant de court circuit varie en fonction de ces deux résistances et est proportionnel au flux incident.

1.7.1.2. Tension à circuit ouvert ; VCO :

On obtient la tension de circuit ouvert lorsque le courant traversant la cellule est nul en fonction de la barrière de puissance et de la résistance de shunt (varie légèrement avec l'éclairage). Cette valeur correspond à la tension de coupure de la diode, confirmant le fait que la cellule solaire peut être assimilée à une jonction PN. Pour obtenir une tension plus élevée à la sortie de l'unité, il sera nécessaire de connecter des cellules en série.

1.7.1.3. Facteur de forme FF :

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale).

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{opt}} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (1.3)$$

1.7.1.4. Point de puissance maximale Pm:

L'utilisation optimale d'une photopile consiste à faire fonctionner une charge sous la tension maximale et à un courant maximal. En effet, suivant la formule $P = V \cdot I$, pour que P soit maximal : il faut être dans les conditions où le produit $V \cdot I$ est maximale, c'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale P_m .

1.7.1.5. Rendement énergétique maximum:

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_o . On appelle rendement maximal le rapport de la puissance maximale fournie (P_{max}) sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_i) :

$$\eta_m = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{I_m \cdot V_m}{\phi \cdot S} \quad (1.4)$$

S : Surface de la cellule solaire.

ϕ : Flux incident.

(I_m , V_m) : Coordonnées du point de fonctionnement.

1.7.2. Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque :

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe $I = f(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (1.6) représente trois zones essentielles [10] :

- **La zone (1) :** où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- **La zone (2) :** correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire Entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du Générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- **La zone (3) :** qui se distingue par une variation de courant correspondant à une Tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de Tension.

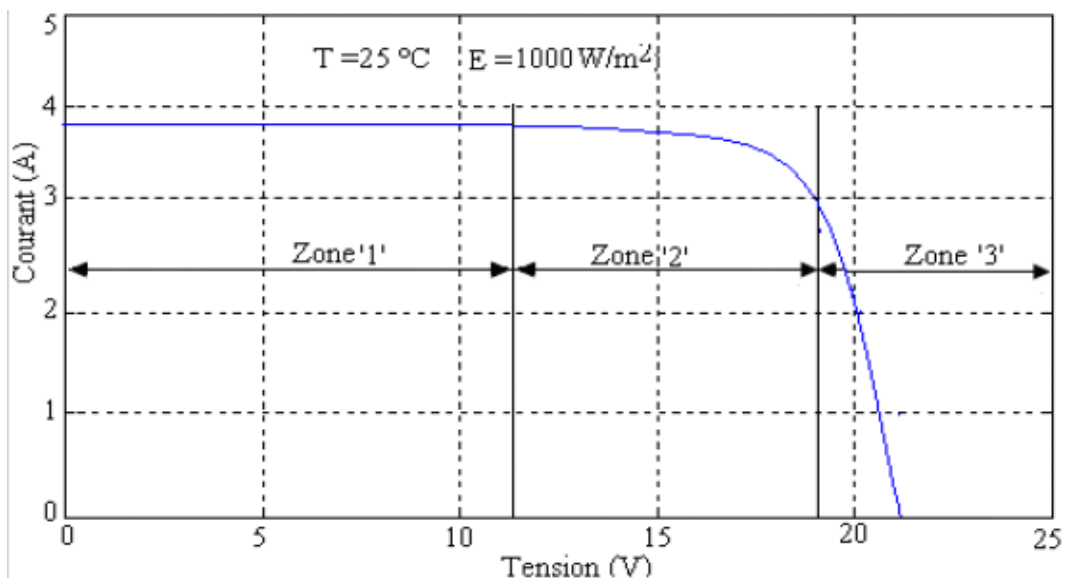


Figure (1.6): Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'un générateur Photovoltaïque.

1.8. Module photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule

élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série [3].



Figure (1.7): Modules photovoltaïques.

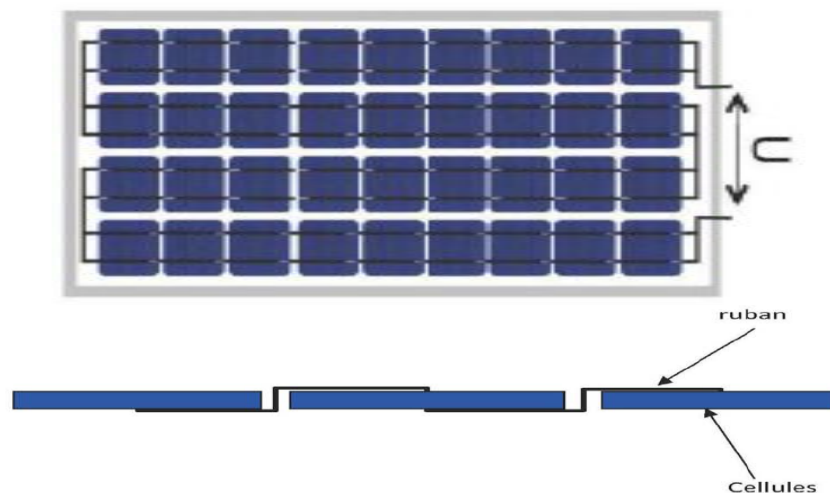


Figure (1.8): Câblage des cellules dans un module

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

1.8.1. Principales caractéristiques d'un module

1.8.1.1. Puissance crête :

La puissance électrique produite par un module varie en fonction de l'ensoleillement. La puissance crête d'un module est la puissance délivrée sous un éclairement de 1000W/m^2 et pour une température de jonction de la cellule de 25°C . En France l'éclairement maximum reçu, la puissance crête correspond donc à une puissance maximum que le module peut fournir.

1.8.1.2. Rendement:

Le rendement dépend des conditions de fonctionnement électrique (intensité, tension) des cellules. Il passe par un maximum à ce que l'on appelle le point de puissance maximale.

1.8.1.3. Facteur de forme :

Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : V_{co} , I_{cc} .

1.8.1.4. Caractéristique courant-tension d'un module :

Le courant produit par un module varie conformément aux diagrammes courant/tension. Il dépend de l'éclairement solaire et de la température des cellules [11].

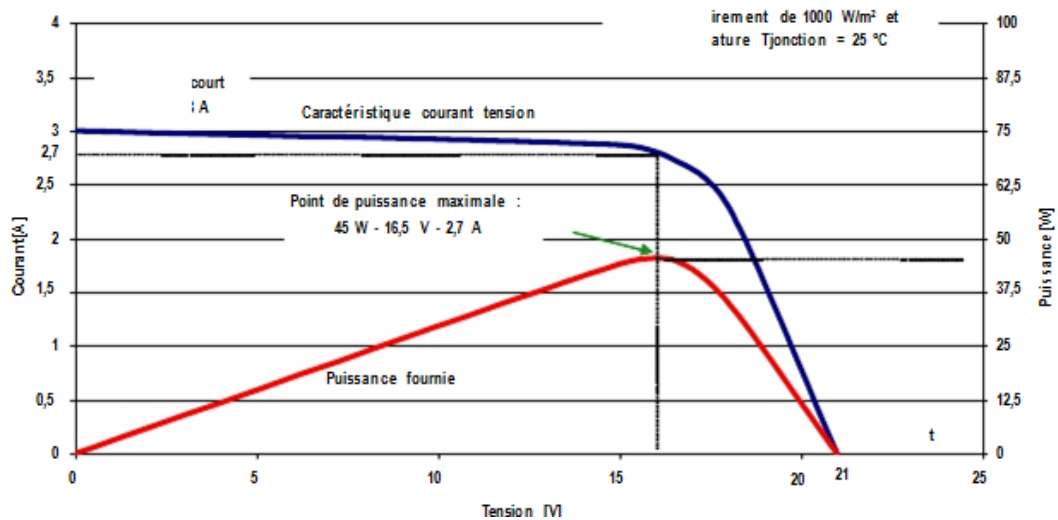


Figure (1.9): Exemple de caractéristique courant-tension d'un module.

1.8.1.5. Influence de l'Éclairement :

La figure (1.10) présente un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement:

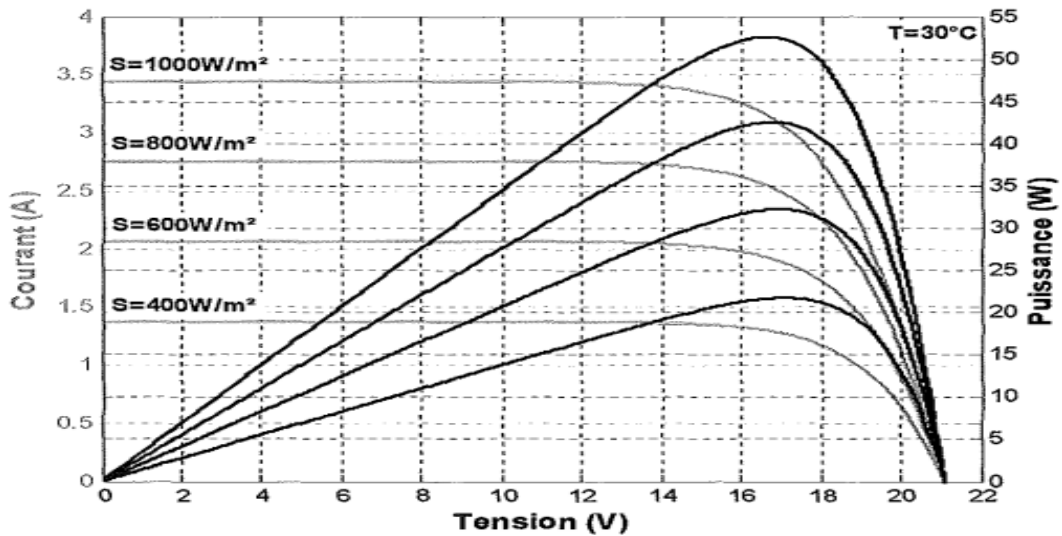


Figure (1.10): Caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$ d'un panneau solaire constitué de 36 cellules en série pour différents ensoleillements S avec $T=30^{\circ}\text{C}$.

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement [9]. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement. L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de 25°C [1].

1.8.1.6. Influence de la Température :

La figure (1.11) présente des courbes courant-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule PV:

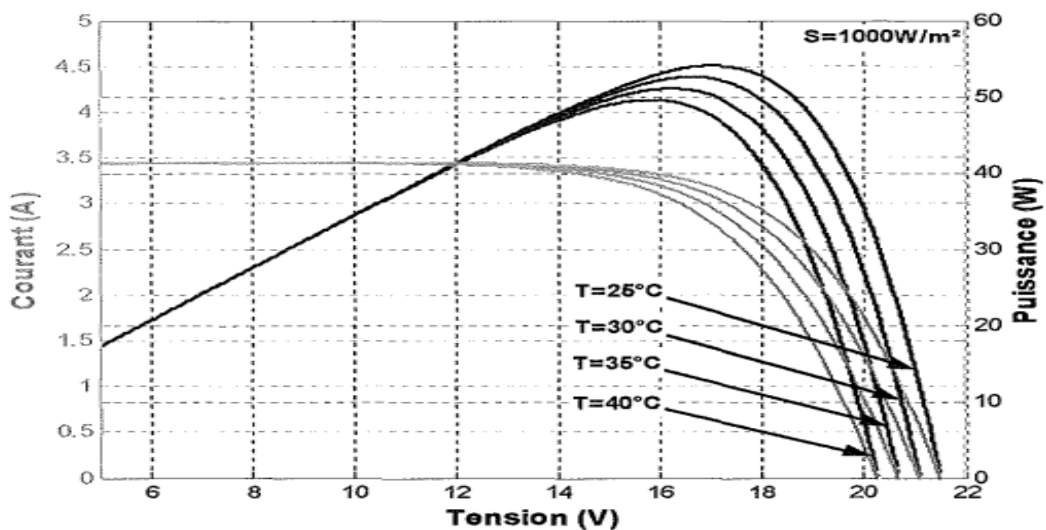


Figure (1.11): Caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$ d'un panneau solaire constitué de 36 cellules en série pour différentes températures T $s=1000\text{w/m}^2$

On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant

de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au dessus de 25 °C [1].

1.8.1.7. Influence de l'association série des cellules PV :

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Un module de 36 cellules en série (Type GTO136 - 80/2) est suffisant pour obtenir une tension compatible avec la charge. Pour avoir plus de tension, il faut assembler N_s modules en série, par contre pour le courant généré, un nombre N_p de modules en parallèle permet d'en ajouter, les diodes de protection série et parallèles protègent le circuit contre le retour de courant. L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule [12].

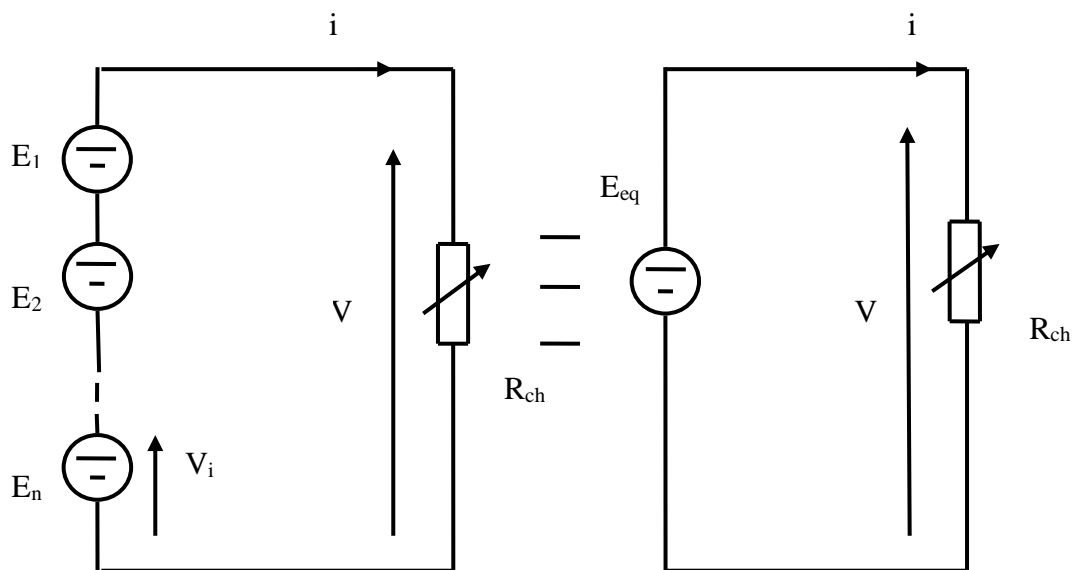


Figure (1.12): Association de N modules solaires en série.

1.8.1.8. Influence de l'association parallèle des cellules PV :

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.

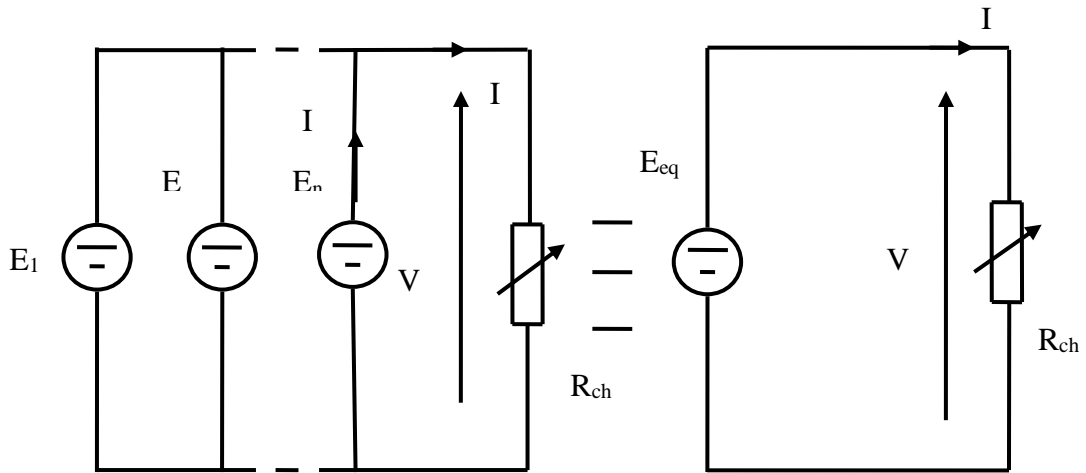


Figure (1.13): Association de N_p modules solaires en parallèle.

1.8.1.9. Influence de l'association mixte (Série +Parallèle) des cellules PV :

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est-à-dire Série-Parallèle [12].

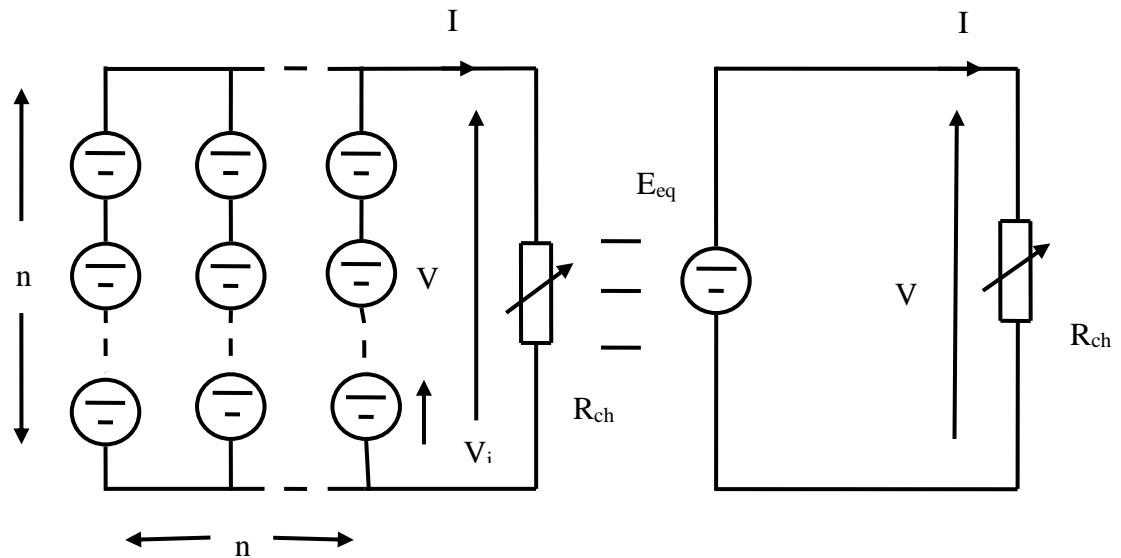


Figure (1.14): Association mixte $N_s \times N_p$ modules solaires.

1.9. Panneau photovoltaïque :

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules

sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [3].



Figure (1.15): Panneau photovoltaïque.

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce que fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui regroupe le tout, Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connexions entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie. Les principaux avantages de l'énergie PV sont optimale en sortie.

1.10. Avantages et Inconvénients de l'énergie PV

- **Avantage de l'énergie PV sont :**
 - ❖ L'énergie PV est renouvelable et fiable car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles
 - ❖ Le caractère modulaire des panneaux PV permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt aux centaines de mégawatts.
 - ❖ Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
 - ❖ La technologie PV présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
 - ❖ Longue durée de vie des panneaux solaires et pas de risques électriques pour les usagers.
- **Les inconvénients de l'énergie PV sont :**
 - ❖ La fabrication du module PV relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
 - ❖ Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs PV ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

- ❖ Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- ❖ Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

1.11. Conclusion

Une étude de la production d'énergie directe par irradiation solaire est décrite dans ce chapitre. En commençant par la définition de l'effet PV et en progressant dans la formulation et l'installation du GPV. Pour cette occurrence physique, un modèle mathématique a été développé. En conséquence, les caractéristiques de la cellule PV peuvent être tracées pour différents paramètres influents (effets résistifs et conditions climatiques). La caractéristique courant-tension est sévèrement non linéaire, avec un seul point de fonctionnement. Convertisseurs statiques avec contrôle approprié installé entre le générateur et sa charge maximisent le transfert d'énergie.

Les différentes topologies de ces convertisseurs, ainsi que l'état de l'art sur la plupart des techniques MPPT existantes, en particulier la technique P&O, seront abordés dans le deuxième chapitre.

Chapitre Deux

Les convertisseurs statiques et la commande MPPT "P&O"

2.1. Introduction

Afin de construire une interface de puissance plus efficace, une analyse détaillée des convertisseurs statiques DC-DC non isolés en mode de conduction continue est effectuée. Le gain les contraintes sur les semi-conducteurs, sont également étudiés.

Nous n'examinerons que les convertisseurs de type élévateur (**Boost**) dans le cadre de cette étude. Après avoir déterminé la structure du convertisseur utilisé, nous examinerons différentes techniques MPPT disponibles qui permettent au GPV de fonctionner à sa puissance maximale. La construction d'un étage d'adaptation avec un algorithme MPPT devient une tâche nécessaire pour maximiser la conversion d'énergie et connecter un GPV à sa charge.

2.2. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Les hacheurs présentent une partie essentielle dans le dispositif de commande d'un champ photovoltaïque. Ils permettent de délivrer une tension continue variable à partir d'une source de tension continue constante [13].

2.2.1. Les type des convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont [14]:

- ❖ convertisseur survolteur (hacheur survolteur ou parallèle).
- ❖ convertisseur dévolteur (ou série).
- ❖ convertisseur dévolteur- survolteur (hacheur série-parallèle).

Dans notre travail, on se limite au convertisseur type survolteur qui est également connu sous le nom d'élévateur de tension

2.2.2. Hacheur survolteur (ou Boost)

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie V_s est supérieure à celle de l'entrée V_e . Cette structure demande un interrupteur commandé et en parallèle avec la source, voir (Figure 2. 1). Le montage le plus simple consiste à mettre périodiquement en court-circuit la résistance R

pendant une durée $t = \alpha \cdot t_f$ bien déterminée ; cette mise en court-circuit est assurée par un hacheur branché en parallèle avec la résistance.

Ce hacheur comporte trois composants essentiels : Une inductance L , une capacité C et un interrupteur qui peut prendre deux états, $U=1$ et $U=0$ [13].

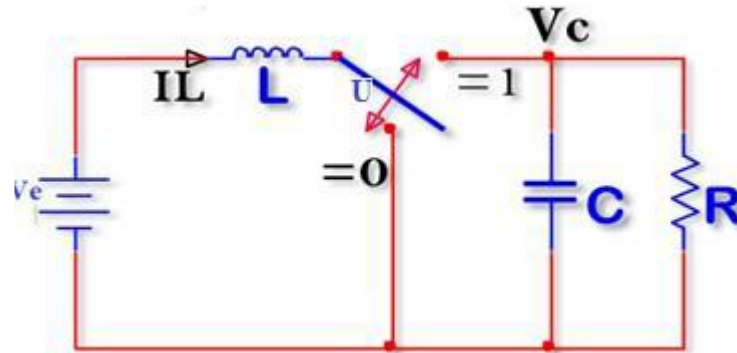


Figure (2.1): Schéma de principe d'un hacheur parallèle (boost)

Pour un rapport cyclique « α » donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne et le courant à la sortie sont donnés par [14].

$$V_s = \frac{V_e}{1-\alpha} \quad (2.1)$$

$$I_s = (1 - \alpha)I_e \quad (2.2)$$

Le rapport cyclique α est compris entre 0 et 1 donc la tension de sortie V_s est nécessairement supérieure à la tension d'entrée V_e .

Les équations (III.14) et (III.15) donnent respectivement l'expression de la capacité (qui a pour rôle respectif de diminuer l'ondulation de la tension d'entrée et de sortie du convertisseur (ou de lisser)) et de l'inductance du filtre [15].

$$C = \frac{\alpha V_s}{f_s R \Delta V} \quad (2.3)$$

$$L = \frac{\alpha V_e}{f_s R \Delta I} \quad (2.4)$$

Dans ces relations :

α : le rapport de cycle.

f_s : la fréquence du mosfet.

ΔV : la limite de tension tolérable.

ΔI : la limite de courant tolérable.

R : la résistance de la charge.

On s'aperçoit que le convertisseur Boost est le sujet de nombreuses réflexions et ressort le plus fréquemment dans la littérature pour une conversion DC/DC. En effet en prenant en compte les caractéristiques des différents convertisseurs DC/DC, le Boost, de par sa simplicité, son faible coût et son rendement élevé, est la structure retenue pour réaliser la plupart des convertisseurs DC/DC photovoltaïques.

Dans le cas où la puissance générée du générateur photovoltaïque est plus forte il faut intéresser à ce type d'hacheur pour augmenter la tension d'entrée de l'onduleur. Egalement la fréquence du MOSFET utilisée dans la littérature est généralement 50 kHz [15].

2.2.3. Etude du hacheur survolteur d'un système photovoltaïque

2.2.3.1. Représentation d'un hacheur survolteur PV

Dans ce cas, la tension d'entrée du hacheur boost représente la tension du module photovoltaïque (la Figure 2. 2).

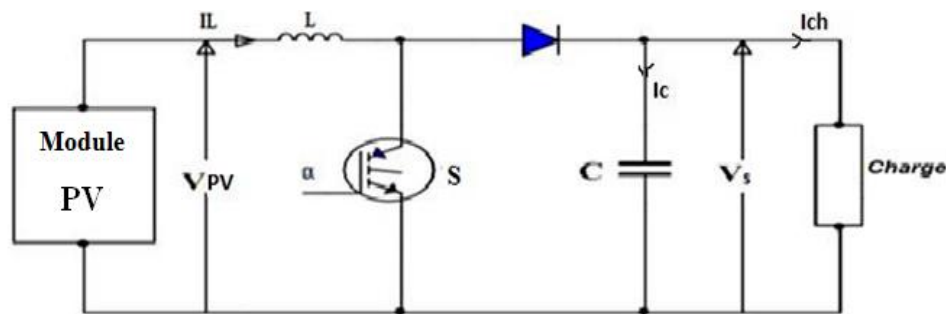


Figure (2.2): Schéma d'un hacheur parallèle (boost) raccordé au GPV

L'étude qui suit est basée sur les hypothèses suivantes [13]:

- ✓ La tension d'alimentation V_{PV} est parfaitement continue et constante.
- ✓ La valeur du condensateur C est suffisamment grande afin de pouvoir considérer la tension de sortie V_S comme continue et constante.
- ✓ Les composants sont idéaux.

La résistance à la sortie du panneau PV (R_{pv}) en fonction de α et R_{ch} :

$$R_{ch} = \frac{R_{pv}}{(1-\alpha)^2} \quad (2.5)$$

Dans les conditions optimales et pour une charge R_{ch} égale la résistance de l'entrée R_{pv} , le rapport cyclique ($\alpha = 0$).

Aussi, le rapport cyclique α s'écrit en fonction des résistances R_{pv} et R_{ch} :

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{R_{pv}}{R_{ch}}} \quad (2.6)$$

Puisque le rapport α est inférieur à 1 ($\alpha < 1$), le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge R_{ch} remplit la condition suivante: $R_{ch} > R_{pv}$

Les différents signaux des grandeurs de convertisseur boost sont illustrés dans la figure (2.3).

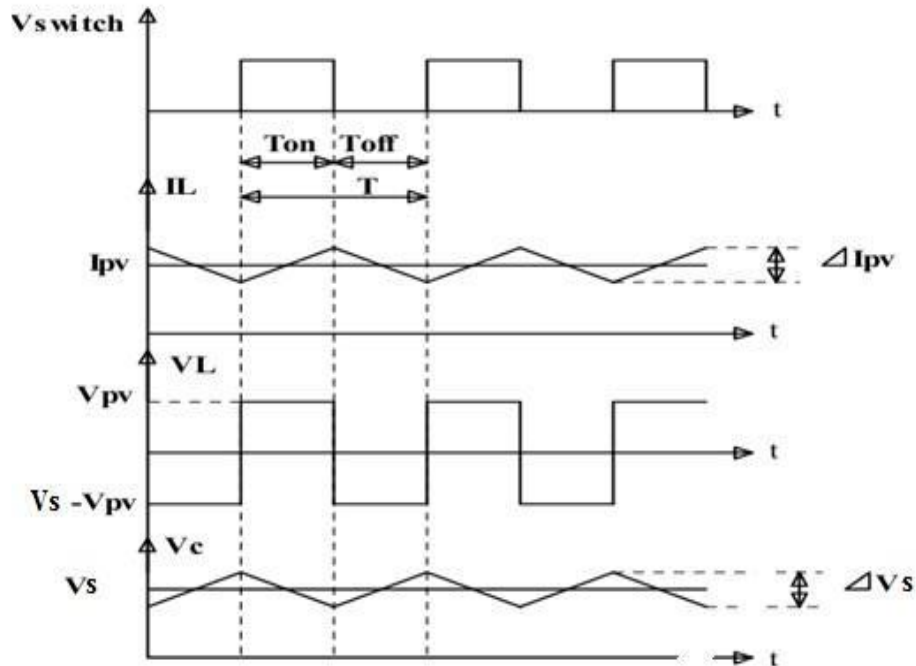


Figure (2.3): Formes typiques des ondes du convertisseur boost.

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f_s avec un temps de fermeture $t_{on} = \alpha T_s$ et un temps d'ouvertures $t_{off} = (1-\alpha)T_s$, où:

- $T_s = 1/f_s$: est la période de commutation.
- α : le rapport cyclique du commutateur.

2.2.3.2. Modélisation d'un hacheur survolteur : [15]

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande α .

Selon l'état de l'interrupteur S, on peut distinguer deux séquences de fonctionnement :

- **Première séquence de conduction [0 à αT]:** lorsque l'interrupteur S est fermé et la diode est polarisée en inverse ($V_{diode} = -V_s$). Durant cette séquence, le courant traversant l'inductance L va augmenter linéairement et une énergie stockée dans l'inductance. La charge est totalement isolée du module PV.

- **Deuxième séquence de conduction [αT à T]** : lorsque l'interrupteur S est ouvert et la diode est fermée. Durant cette séquence, la charge est reliée directement au module PV à travers de l'inductance L.

Selon sa capacité de stockage de l'énergie et la durée relative de la période de commutation, on peut distinguer trois régimes de conduction pour le hacheur :

- ✓ La conduction continue qui correspond au cas où le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais.
- ✓ La conduction discontinue qui correspond au cas où le courant I_L traversant l'inductance s'annule avant la prochaine phase active.
- ✓ La conduction critique qui définit la limite entre les deux modes de fonctionnement précédents.

Dans la suite de cette étude seulement, le régime de conduction continue est envisagé.

2.3. Commande MLI du hacheur

Le signal de contrôle de l'interrupteur S par la technique MLI (modulation de largeur d'impulsion) est le résultat de la comparaison entre le rapport cyclique α et celui généré par un générateur triangulaire, ou en dent de scie, de fréquence fixée par le fonctionnement du convertisseur comme le montre la figure (2. 4).

La génération des impulsions de commande s'effectue comme suit :

- ✓ Si $\alpha > V_{ds}$ alors $S_B = 1$, l'interrupteur S est fermé (séquence 1).
- ✓ Si $\alpha < V_{ds}$ alors $S_B = 0$, l'interrupteur S est ouvert (séquence 2).

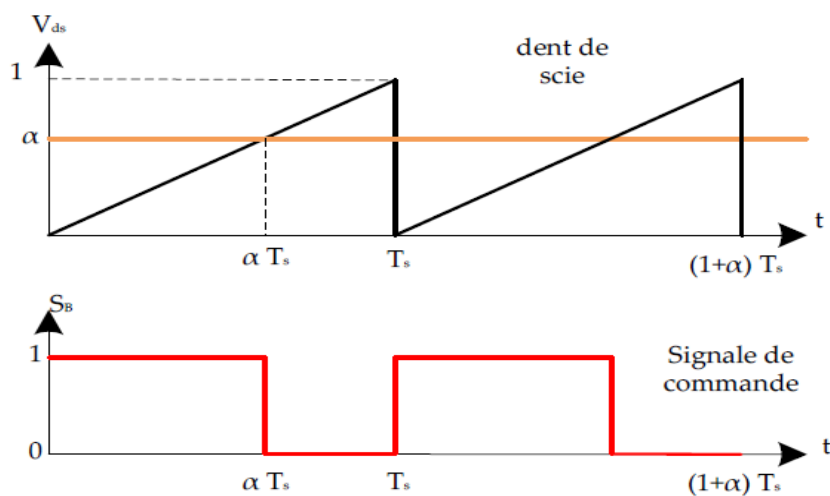


Figure (2.4): Génération des impulsions de commande du hacheur.

2.4. Technique de commande de l'MPPT

2.4.1. Définition

Dans un système photovoltaïque comprenant une source photovoltaïque et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation représente une étape importante. Cette technique de commande est souvent nommée dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » (Maximum Power Point Tracking, MPPT) [14].

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, quelque soient les conditions météorologiques (température et irradiation), et quelle que soit la tension de la batterie, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum.

2.4.2. Convertisseur Pour la poursuite du point de puissance maximum (MPPT)

Pour la maximisation de puissance de la source PV, en intercalant un quadripôle d'adaptation qui est un convertisseur d'énergie DC-DC entre la source PV et la charge et avec le contrôle rigoureux du rapport cyclique de ce dernier, Cette adaptation se réalise en cherchant de façon automatique le PPM du panneau PV et un suivi continu de la puissance maximale est assuré. Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95% [16].

La Figure (2. 5) représente la chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT.

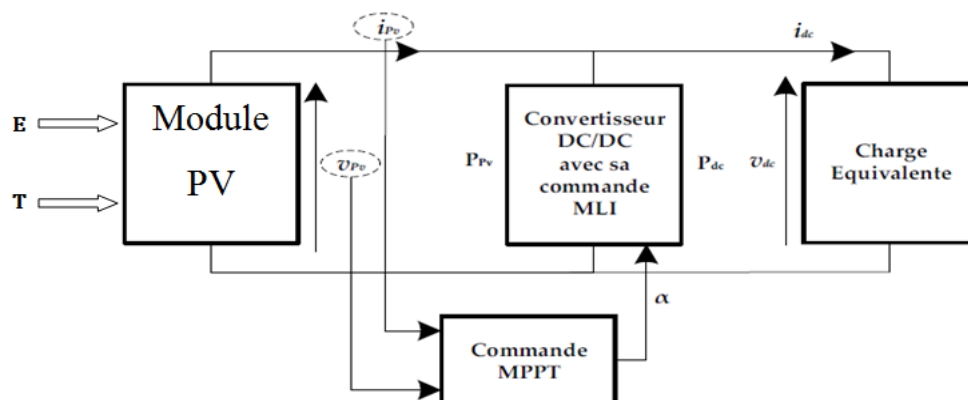


Figure (2.5): Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT.

On utilise le convertisseur de type DC/DC dans la partie Contrôle du système photovoltaïque car il est facile à contrôler par leurs rapports cyclique en utilisant un signal MLI. Ici, on utilise le hacheur Boost comme interface de puissance à contrôler par le régulateur MPPT, afin d'adapter la tension de sortie du hacheur à la tension requise par la charge [17].

Du fait du non linéarité de la caractéristique I-V, le circuit MPPT oblige le système à fonctionner en permanence sur le point à puissance maximale du générateur, une fois l'éclairement ou la température change. Le hacheur capte alors la puissance électrique absorbée selon une période d'échantillonnage, et commence à incrémenter ou décrémente le rapport cyclique α pour annuler le gradient de la puissance.

En effet, ces dispositifs permettent aujourd'hui d'adapter et d'optimiser la production photovoltaïque par le biais de convertisseurs de puissance DC-DC insérés entre les modules photovoltaïques et l'entrée de l'onduleur. Généralement, ces étages disposent de commandes de gestion électrique plus ou moins complexes permettant d'adapter la tension PV à la tension d'entrée de l'onduleur [17].

2.4.3. Le principe de fonctionnement du MPPT d'un générateur PV

La commande MPPT permet de chercher le point de fonctionnement optimal du module photovoltaïque dans les conditions météorologiques variables. Ceci est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α du signal qui commande le convertisseur d'énergie, à une valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du module [18].

Pour savoir l'efficacité de la technique du MPPT, on définit le rendement MPPT (η_{MPPT}) comme suit :

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{in}}{P_{Max}} \quad (2.7)$$

Il donne le % de pertes de puissance d'un module PV (P_{IN}), qui correspond à l'entrée de l'étage d'adaptation, par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire (P_{MAX}). Pour transférer la puissance électrique produite, le mode de transfert utilisé peut présenter plus ou moins un taux de pertes lié à sa constitution. Nous définissons pour qualifier ces étages de conversion électrique-électrique et de transfert, le rendement de conversion d'un étage d'adaptation noté (η_{conv}) permettant d'évaluer les pertes liées à la conversion de puissance associée à l'étage d'adaptation.

Ce type de rendement dépend du temps et des conditions de fonctionnement. Il est nécessaire, pour obtenir une grande précision sur cette grandeur, d'effectuer les mesures de

courant et de tension en entrée et en sortie de l'étage au même instant garantissant ainsi la connaissance précise du transfert de puissance effectué à un instant donné.

$$\eta_{\text{conv}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{pv}}} \quad (2.8)$$

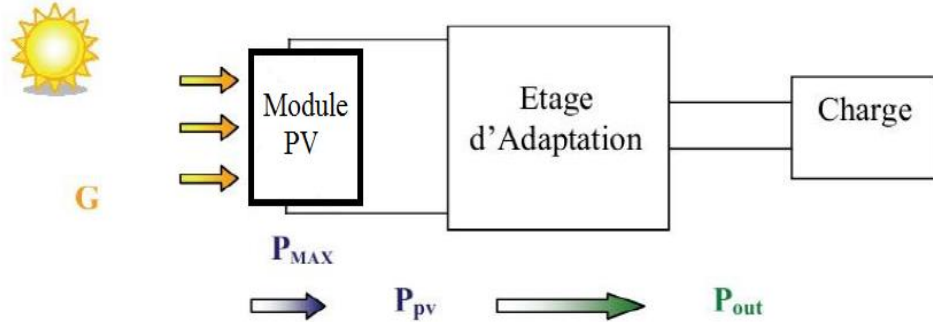


Figure (2.6): Chaîne de conversion photovoltaïque

Le rendement global de la chaîne de conversion photovoltaïque, noté (η_{total}), peut donc être défini comme le produit des trois rendements précédemment définis sur le même intervalle de temps.

$$\eta_{\text{tot}} = \frac{P_{\text{max}}}{G \times S} \times \frac{P_{\text{pv}}}{P_{\text{max}}} \times \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{pv}}} \quad (2.9)$$

Ce rendement traduit la capacité de la totalité d'une chaîne PV à produire plus ou moins de l'énergie électrique. Cela permet également de comprendre la différence entre un rendement effectué en laboratoire sur des matériaux et des cellules PV sous température et irradiation contrôlées et le rendement réel des GPV installés fonctionnant en conditions réelles [17].

2.4.4. Différentes techniques d'MPPT

Afin d'extraire Le maximum de puissance d'un panneau solaire, on peut raisonner sur plusieurs et différentes méthodes de commandes MPPT existent et font appel à des algorithmes plus ou moins complexes en fonction des critères de précision et de rapidité exigés.

Certains systèmes sont précis mais peu rapides, d'autres sont plus rapides mais moins efficaces. Les différentes méthodes de maximisation de puissance sont classées en deux catégories : les méthodes indirectes et les méthodes directes [18].

2.4.4.1. Les méthodes indirectes

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques du champ photovoltaïque dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement, etc.)

mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum.

Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser. Parmi elles, on peut citer :

- la méthode d'ajustement de courbe ;
- la méthode « look-up table » ;
- la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur ;
- la méthode de court-circuit.

2.4.4.2. Les méthodes directes

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant du champ et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques du champ PV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbation & Observation (P&O) et l'incrémentation de conductance.

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

Toutes ces méthodes sont présentées dans la référence [19]. Dans notre travail, on se limite à la méthode de Perturbation et observation (P&O), qui est facile, très simple à implanter, et de bon rendement.

2.4.4.2.1. Méthode Perturbation & Observation (P&O)

a. Définition

C'est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de V_{ref} en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC/DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du Panneau est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$, alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent.

b. Le fonctionnement de l'algorithme P&O

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

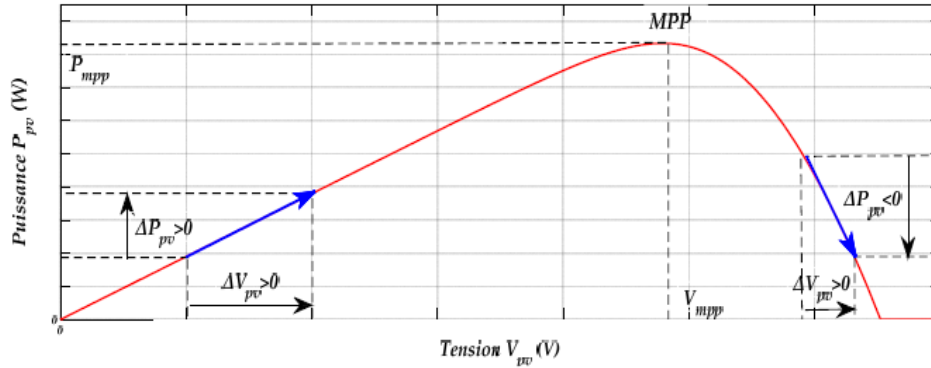


Figure (2.7): Caractéristiques de fonctionnement de la méthode de P&O.

Ainsi, comme l'illustre la figure (2. 7) pour différentes zones de fonctionnement, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le MPP. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au MPP, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande [13]. On résume cette figure dans quatre cas:

➤ **Premier cas : $\Delta P_{pv} > 0$ et $\Delta V_{pv} > 0$**

Dans ce cas le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP ; en plus ΔV_{pv} est positive, on est donc dans la bonne direction. Pour la prochaine itération, on augmente la tension du champ photovoltaïque. Ceci peut être réalisé par une diminution du rapport cyclique. Soit donc,

$$\alpha(k) = \alpha(k - 1) - \Delta\alpha \quad (2.10)$$

➤ **Deuxième cas : $\Delta P_{pv} > 0$ et $\Delta V_{pv} < 0$**

Le point de fonctionnement se trouve à droite du MPP ; en plus ΔV_{pv} est négative, la recherche du MPP se fait dans la bonne direction. On va donc pour la prochaine itération continuer à diminuer la tension (donc à augmenter le rapport cyclique). Soit donc,

$$\alpha(k) = \alpha(k - 1) + \Delta\alpha \quad (2.11)$$

➤ **Troisième cas : $\Delta P_{pv} < 0$ et $\Delta V_{pv} < 0$**

Le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP ; et comme ΔV_{pv} est négative on se dirige dans le mauvais sens. Lors de la prochaine itération on doit corriger le sens de la recherche en augmentant la tension. Soit donc,

$$\alpha(k) = \alpha(k - 1) - \Delta\alpha \quad (2.12)$$

➤ **Quatrième cas : $\Delta P_{pv} < 0$ et $\Delta V_{pv} > 0$**

Le point de fonctionnement actuel est à droite du MPP ; en plus ΔV_{pv} est positive, la recherche se fait donc dans la mauvaise direction. Pour la prochaine itération, on va diminuer la tension (donc augmenter le rapport cyclique). Soit donc:

$$\alpha(k) = \alpha(k - 1) + \Delta\alpha \quad (2.13)$$

La figure (2. 8) représente l'algorithme de la commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du champ PV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du champ PV à chaque instant. Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V_{pv} est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint, V_{pv} oscillera autour de la tension idéale V_{mpp} de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple [19].

2.5. Modélisation d'un générateur photovoltaïque

Soit un GPV composé de N_p branches en parallèles, chaque branche contient N_s modules en série. Généralement, un module PV est constitué d'un ensemble de cellules en série. Si On suppose que toutes les cellules sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, alors le modèle mathématique du GPV peut être donné par l'équations suivante:

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_{sat} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + \frac{N_p}{N_s} I_{pv} R_s}{\eta V_T} \right) - 1 \right) \quad (2.14)$$

2.6. Simulation du système PV

Après avoir modélisé le champ PV et connecté celui-ci au convertisseur boost, nous avons effectué la simulation de son fonctionnement. Pour cela nous avons implémenté les modèles obtenus dans Simulink. Une commande MPPT a été insérée à l'aide des blocs programmés sous Simulink.

La commande MPPT permet de se situer à tout moment de l'ensoleillement à la puissance maximale de notre système PV [19].

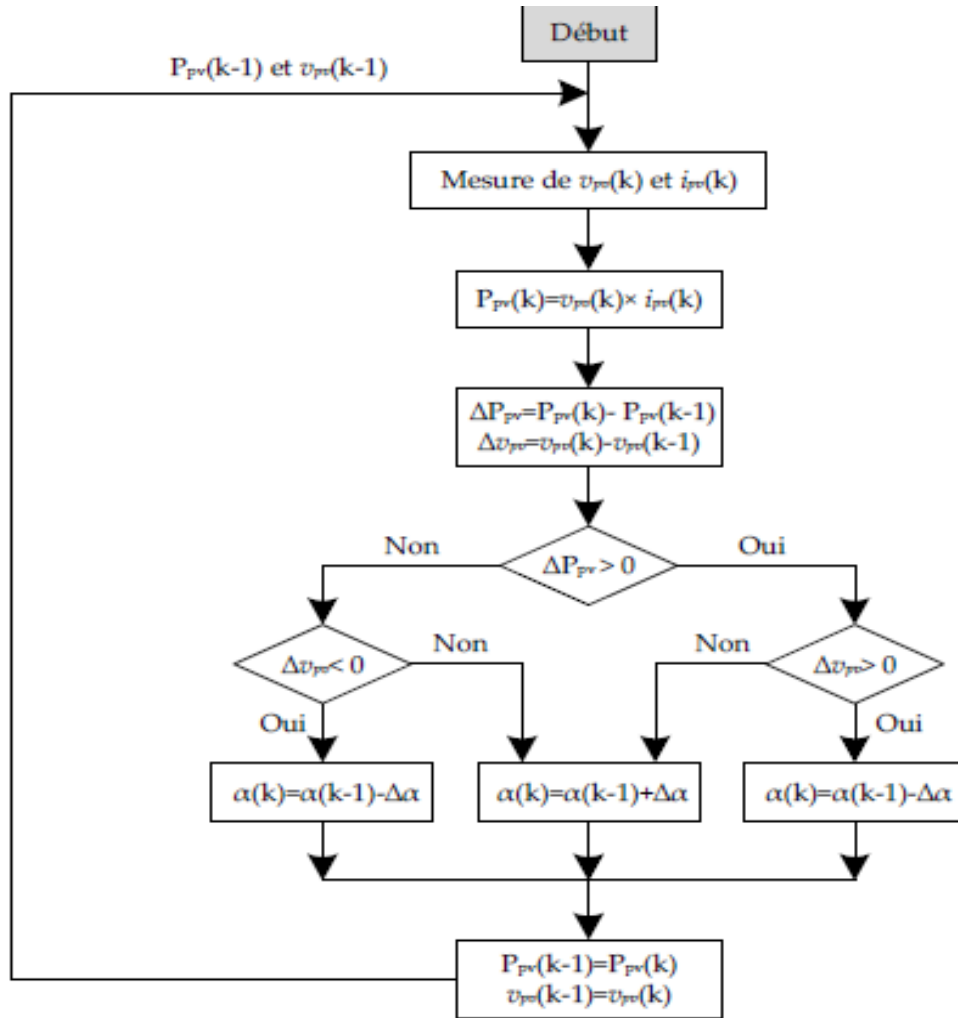


Figure (2.8): Organigramme de l’algorithme perturbation et observation (P&O).

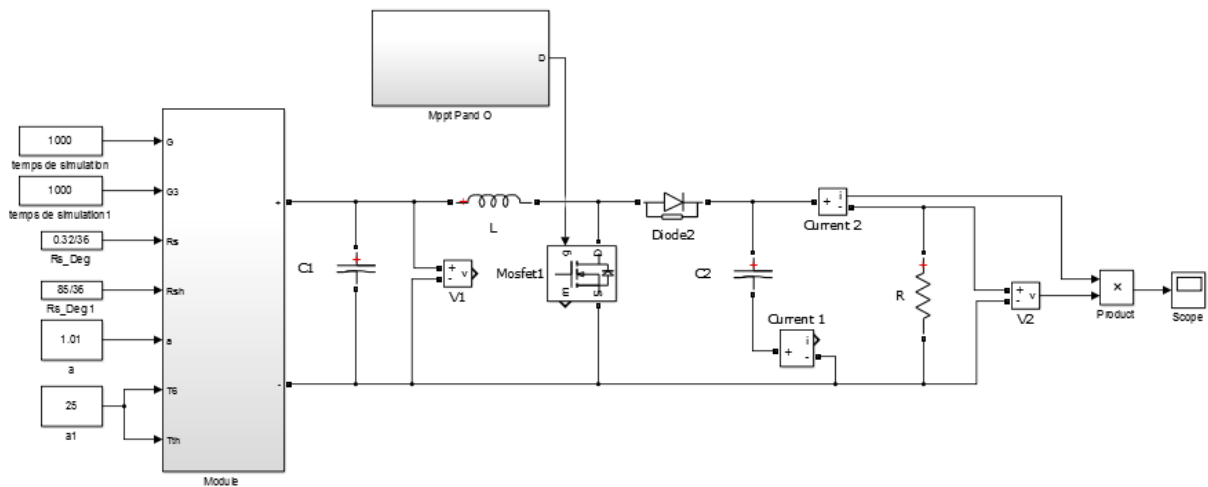


Figure (2.9): Schéma de simulation du système globale en Matlab

La figure (2. 10) illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande de pour suite MPPT et le schéma bloc de modulation à largeur d’impulsion PWM (Pulse Width Modulation).

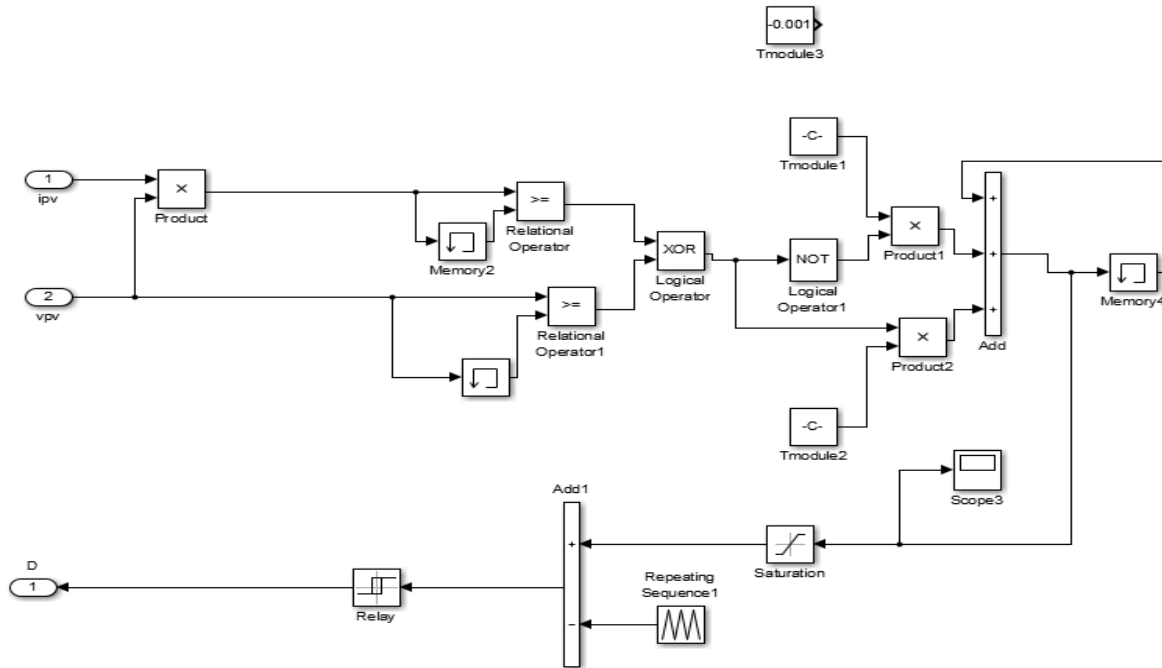


Figure (2.10): Schéma bloc de la commande MPPT « P&O » et PWM.

2.6.1. Résultats et analyses

✓ **Profil fixe :**

On effectue la simulation du système dans les conditions standards ($G=1000W/m^2$, $T=25C^\circ$, $R=10\Omega$) pour extraire la puissance optimale de notre système. Donc la tension du module PV après l’utilisation de la technique de recherche de l’MPPT représente la tension maximale (17.26 V).

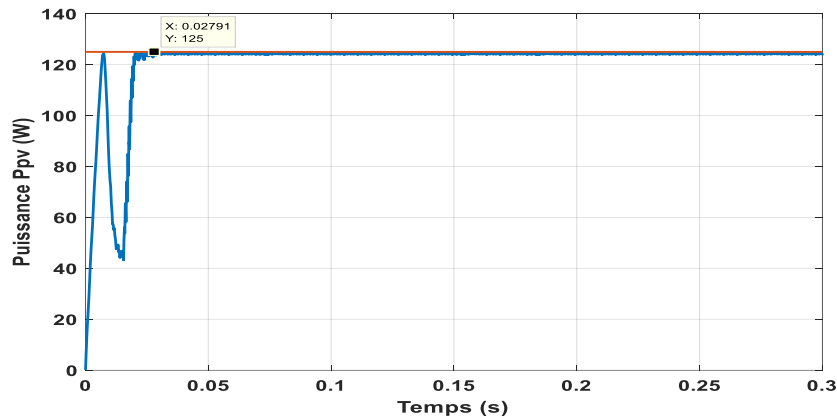


Figure (2.11): Résultats de simulation de la puissance maximale générée par le module photovoltaïque pour ($G=1000W/m^2$, $T=25^\circ C$, $R=10\Omega$).

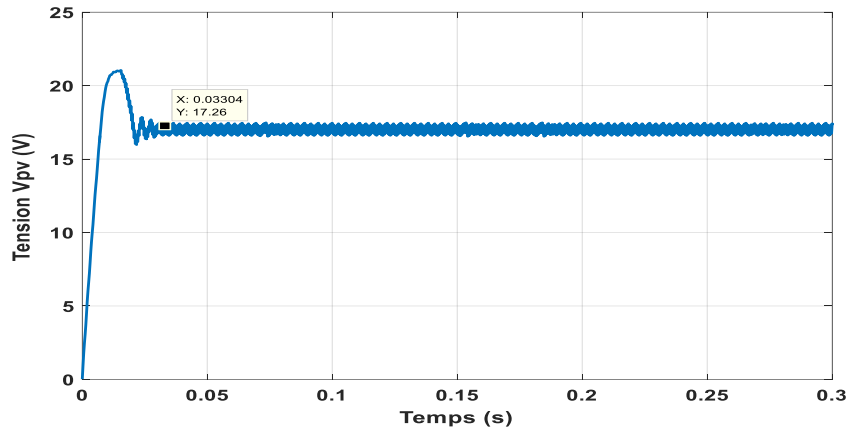


Figure (2.12): Résultats de simulation de la tension générée par le module photovoltaïque pour ($G=1000W/m^2$, $T=25^\circ C$, $R=10\Omega$).

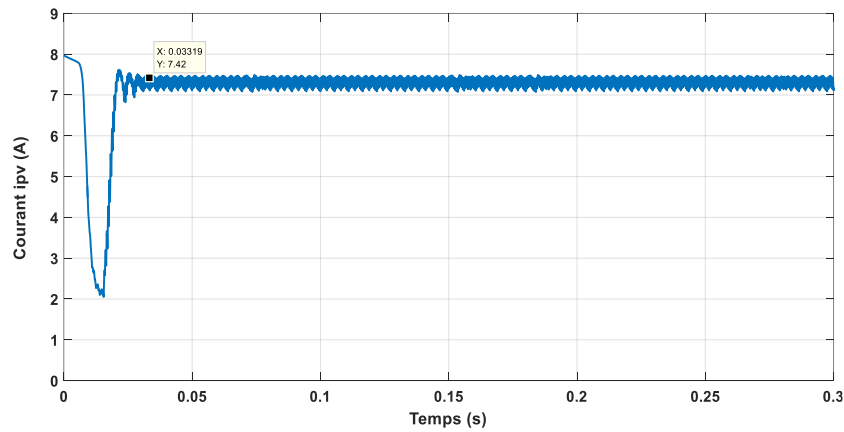


Figure (2.13): Résultats de simulation du courant généré par le module photovoltaïque pour ($G=1000W/m^2$, $T=25^\circ C$, $R=10\Omega$).

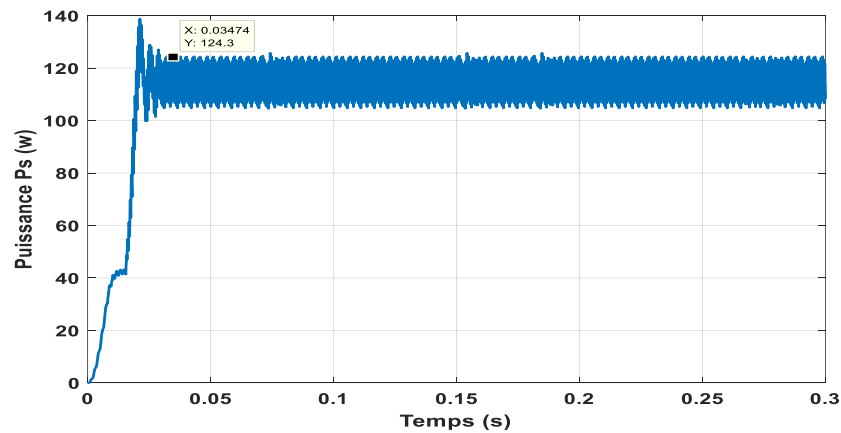


Figure (2.14): Résultats de simulation de la puissance du hacheur survolteur pour ($G=1000W/m^2$, $T=25^\circ C$, $R=10\Omega$).

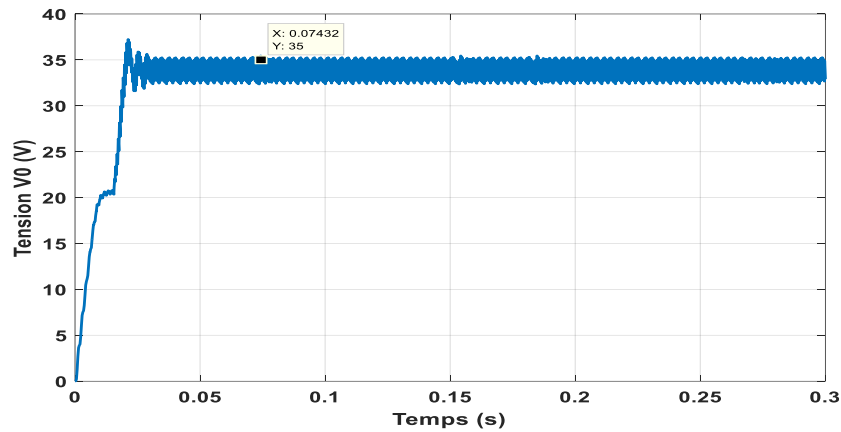


Figure (2.15): Résultats de simulation de la tension du hacheur survolteur pour $G=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$, $R=10\Omega$.

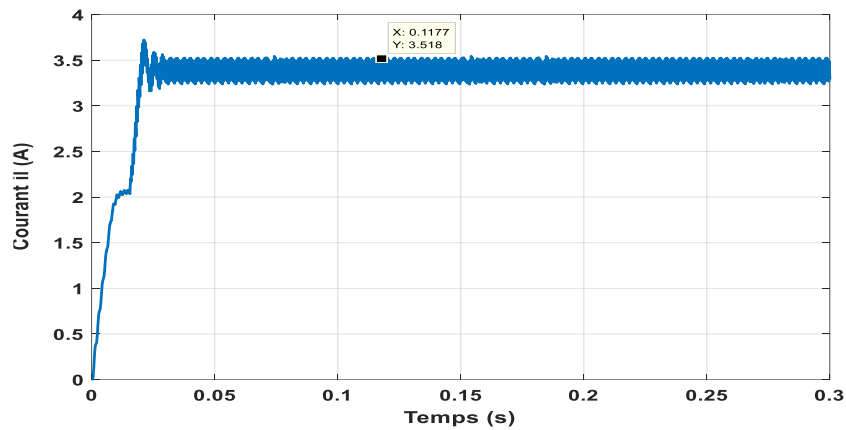


Figure (2.16): Résultats de simulation du courant du hacheur survolteur pour $(G=1000\text{W/m}^2, T=25^\circ\text{C}, R=10\Omega)$.

On remarque que Le hacheur survolteur fournit une tension supérieure à celle fournie par le module photovoltaïque.

✓ **Profil variable :**

Pour avoir l'efficacité de la commande MPPT et la relation entre l'éclairement et la puissance du module PV, on a simulé notre système à $G=1000\text{W/m}^2$, $G=500\text{W/m}^2$ avec une température et une résistance fixe $T=25^\circ\text{C}$ / $R=10\Omega$ avec le MPPT. Les résultats obtenus sont représentés à la Figure (II.17) et la Figure (III. 31).

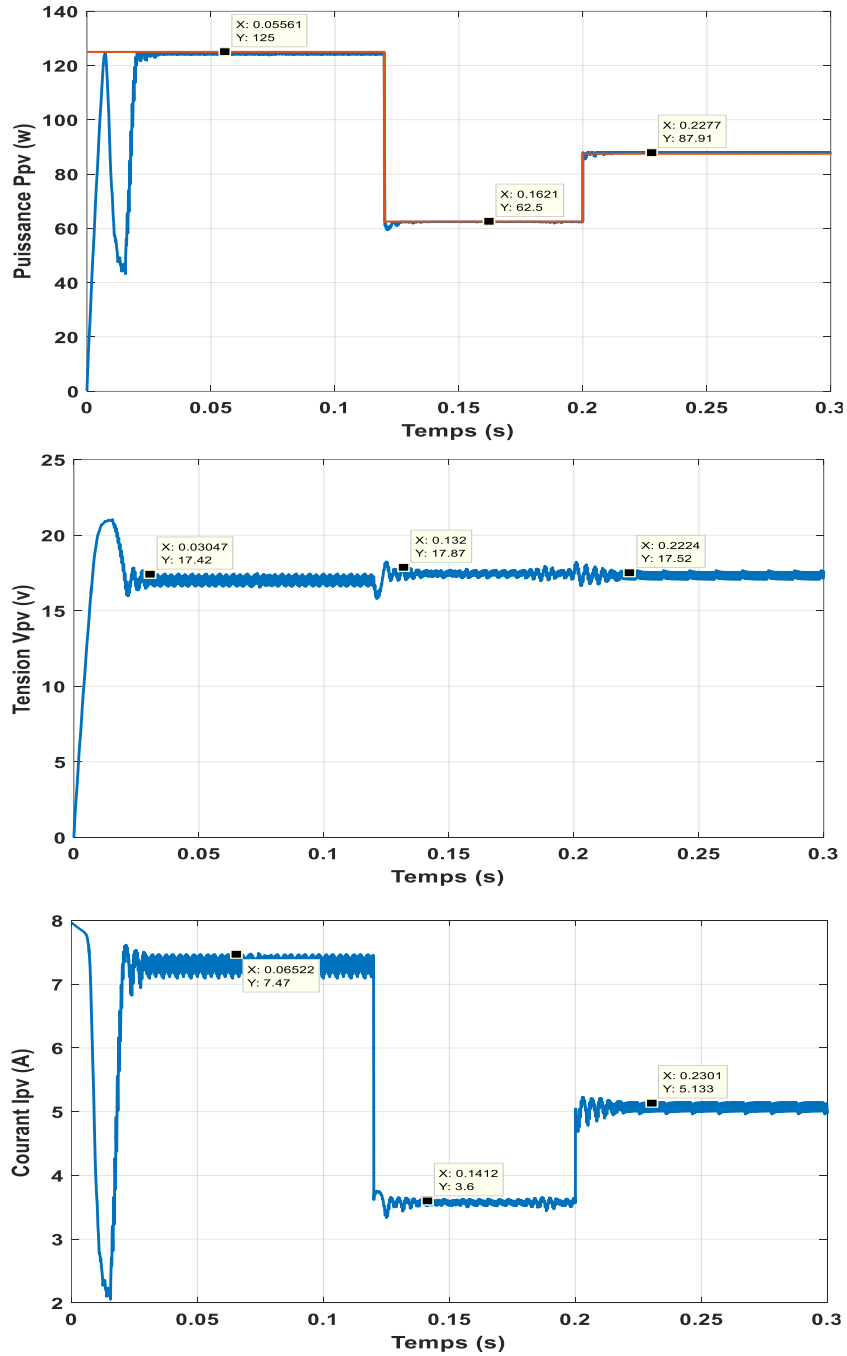


Figure (2.17): Résultats de simulation de $I(t)$, $V(t)$, $P(t)$ générée par le module photovoltaïque pour différents éclaircements ($G=1000W/m^2$, $G=500W/m^2$) et une température fixe ($T=25^\circ C$).

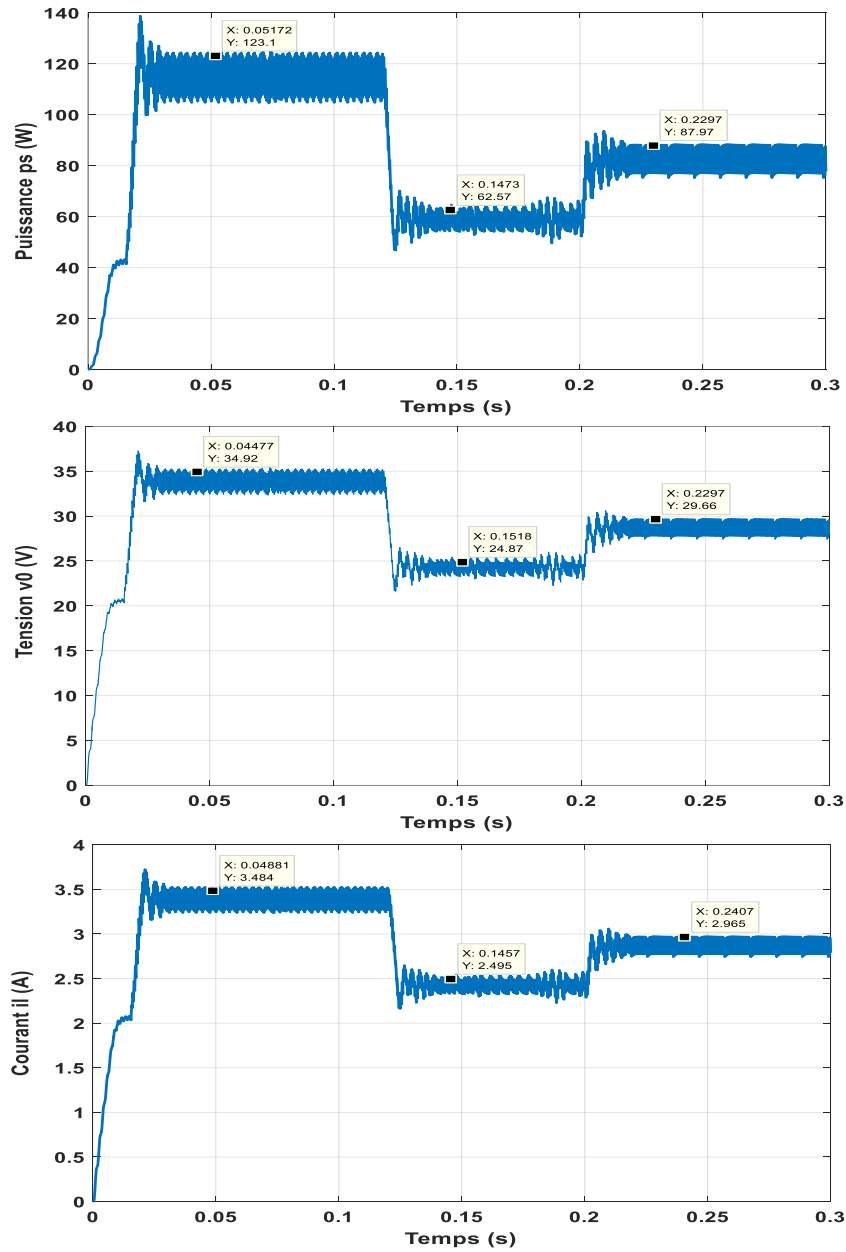


Figure (2.18): Résultats de simulation de $I(t)$, $V(t)$, $P(t)$ du hacheur survolteur pour différents éclairagements ($G=1000\text{W/m}^2$, $G=500\text{W/m}^2$) et une température fixe ($T=25^\circ\text{C}$).

D'après ces résultats on peut conclure que :

- notre système est efficace et l'algorithme du MPPT est bien fonctionnel.
- la variation de l'éclairément a un effet remarquable sur le fonctionnement du système.

✓ Profil fixe (variation de charge) : $G=1000\text{W/m}^2$ $T=25\text{C}^\circ$ $R=100\Omega$

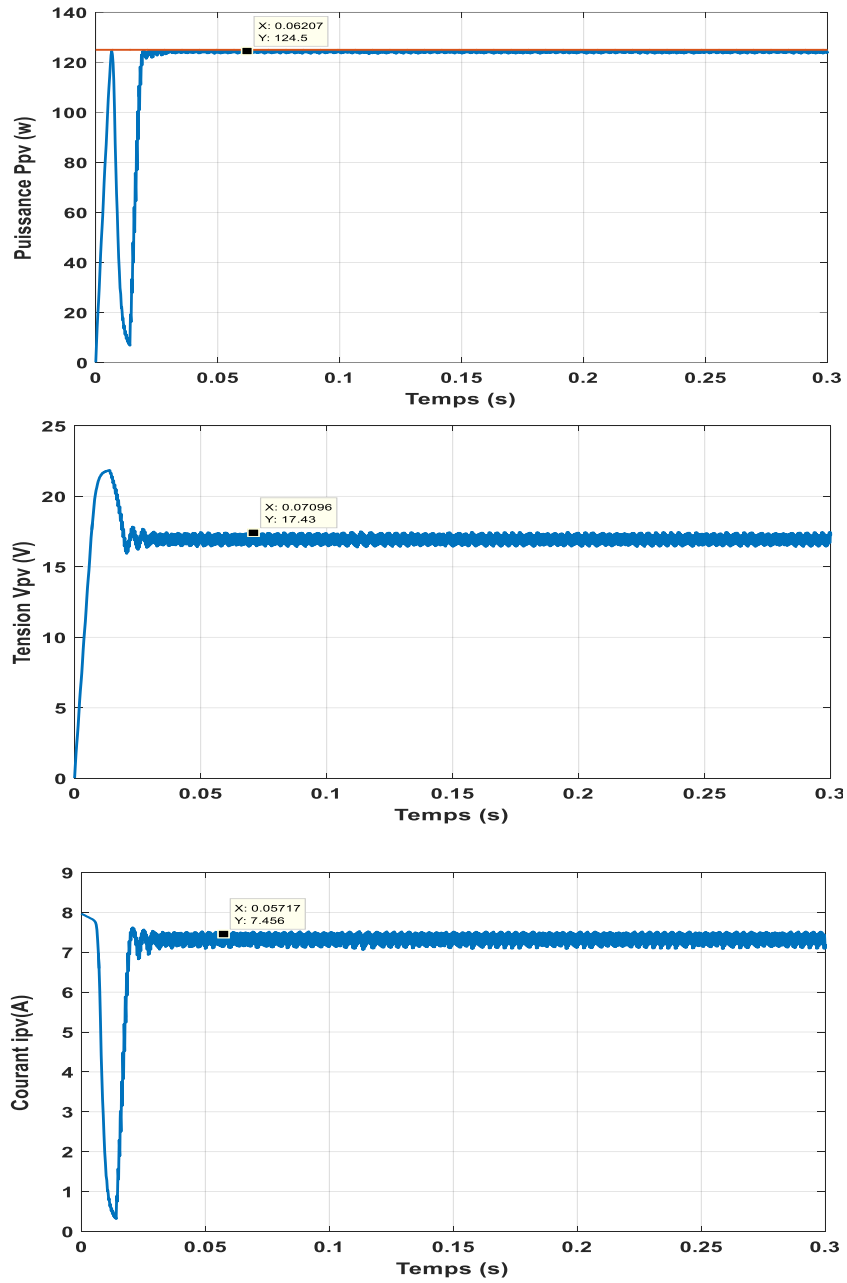


Figure (2.19): Résultats de simulation de $(I(t), V(t), P(t))$ de module photovoltaïque pour $(G=1000\text{W/m}^2, T=25\text{C}^\circ, R=100\Omega)$.

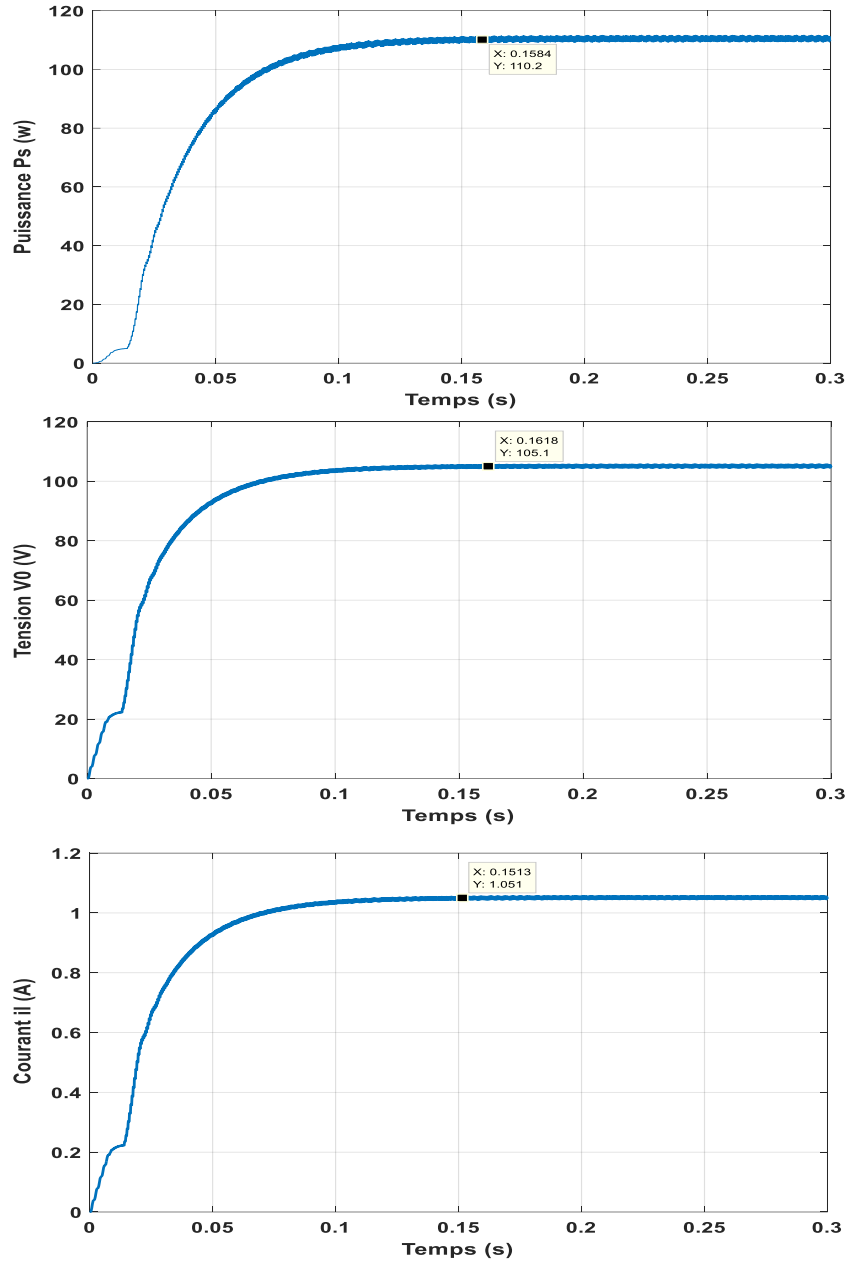


Figure (2.20): Résultats de simulation de $(I(t), V(t), P(t))$ du hacheur survolteur pour $(G=1000\text{W/m}^2, T=25^\circ\text{C}, R=100\Omega)$.

2.7. Données techniques

2.7.1. Module SCHOTT Solar ASE-100-GT-FT/MC

Ces valeurs s'appliquent dans les conditions de test standard STC (masse d'air AM 1,5; irradiation de 1000 W/m^2 ; température de cellule 25°C).

Puissance nominale MPP (W_c)	105
Écart maximum par rapport au MPP (%)	± 5
Tension à MPP (V)	23,5
Courant au MPP (A)	4,47
Tension en circuit ouvert V_{co} (V)	29,5
Courant de court-circuit I_{cs} (A)	4,92
Coefficient de température MPP (% / $^\circ\text{C}$)	-0,47

2.8. Conclusion

L'importance de l'étape d'adaptation dans la chaîne de conversion PV a été soulignée dans ce chapitre. Un convertisseur DC/DC avec un algorithme de contrôle constitue ce niveau. Différentes topologies de convertisseurs DC/DC non isolés ont été évoquées. En raison de sa simplicité et de son gain de tension nettement plus important, la structure du type Boost a été choisie. En plus, quelques algorithmes de suivi de puissance maximale ont été cités. L'approche MPPT P&O « Perturbation et observation » a été utilisée pour réaliser des tests de simulation. Par ce que le contrôle MPPT basé sur le mode glissant a de meilleures performances que les autres, le prochain chapitre se concentrera sur cet aspect.

Chapitre Trois

Commande MPPT basée sur le mode glissant

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'application de la commande MPPT basée sur le mode glissant sur les systèmes photovoltaïques. L'intérêt de cette commande ne cesse d'augmenter en raison de sa simplicité d'élaboration et ses multiples applications dans l'automatique ou de l'électronique de puissance. Le but de cette commande est d'extraire le maximum de puissance des panneaux PV.

3.2. Système à structure variable (SSV):

Un SSV est le système dont la structure change pendant son fonctionnement. Dans la commande des SSV par mode de glissement, la trajectoire d'état est amenée vers une surface, puis à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface de glissement [20][21].

Dans les SSV, on peut trouver deux configurations de base différentes :

La première change la structure par commutation entre deux retours d'état différents (Figure 3.1).

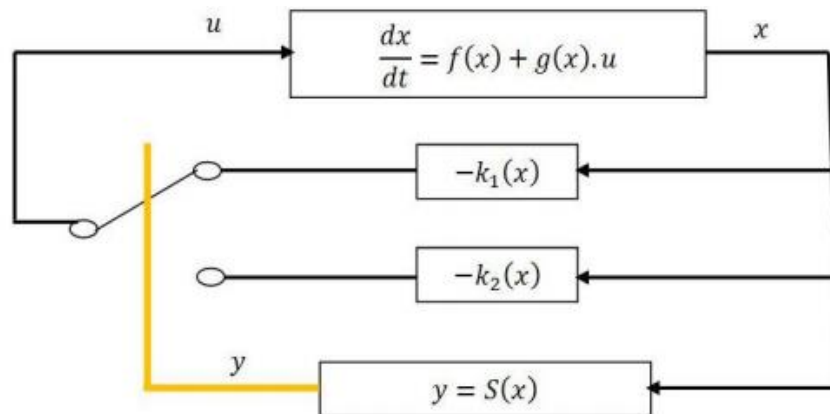


Figure (3.1): Configuration par commutation au niveau de la contre-réaction d'état

La deuxième configuration appelée configuration par commutation au niveau de l'organe de commande, Elle modifie la structure du système par simple commutation d'interrupteurs (Figure 3.2).

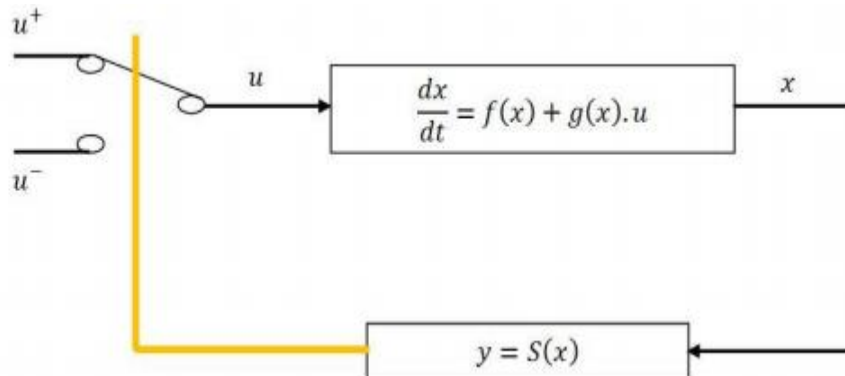


Figure (3.2): Configuration par commutation au niveau de l'organe de Commande

Ce qui est le cas de tous les convertisseurs statiques [22]. Pour la première configuration, la commande est donnée par :

$$u = \begin{cases} -k_1(x) & \text{si } S(x) > 0 \\ -k_2(x) & \text{si } S(x) < 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

En mode glissant, le système évolue sur la surface de glissement, par conséquent $S(x) = 0$. La seconde configuration nécessite un organe de commande qui possède une action à deux positions avec une commutation rapide d'une position à l'autre. La commutation entre ces deux valeurs est imposée par la loi de commutation selon :

$$u = \begin{cases} u^+ & \text{si } S(x) > 0 \\ u^- & \text{si } S(x) < 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

3.3. Commande par mode de glissement

3.3.1. Principe

La technique de la commande par modes glissant consiste à ramener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée jusqu'au point d'équilibre. Cette trajectoire est constituée de trois parties distinctes (voir figure 3.3) :

➤ **Mode de convergence (MC)**

ans le mode de convergence (reaching mode), la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial x_0 dans le plan de phase et tend vers la surface de commutation $S(x) = 0$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.

➤ **Mode de glissement (MG)**

Pour le mode de glissement (sliding mode), la variable d'état atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique dans ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $S(x)$.

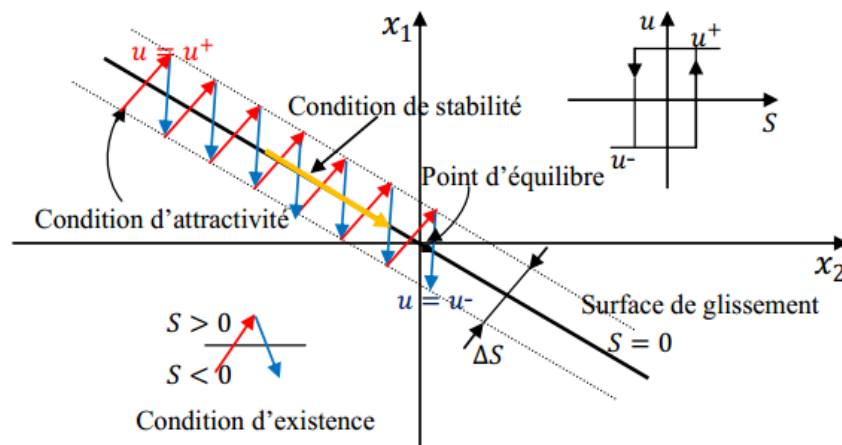


Figure (3.3): Principe de la commande par mode glissant.

Pour chaque interrupteur, la commande est effectuée par un comparateur à hystérésis. Le sens de l'hystérésis doit être choisi de manière à ce que le changement d'état ramène la trajectoire à l'intérieur de la fourchette. Ainsi, on peut être amené à choisir :

$$u = \begin{cases} 1 & \text{si } S(x) > +\frac{1}{2}\Delta S \\ 0 & \text{si } S(x) < -\frac{1}{2}\Delta S \end{cases} \quad (3.3)$$

Théorème 1 :

Soit $V(x)$ une fonction différentiable de \mathbb{R}^n dans \mathbb{R}^n , dite fonction de LYAPUNOV, qui satisfait les conditions suivantes [23] :

$$\begin{cases} V(0) = 0 \\ V(x) > 0 & \forall x \neq 0 \\ V'(x) \leq 0 & \forall x \neq 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

3.3.2. Objectif de la commande par mode glissant

L'objectif de la commande par mode glissant se résume en deux points essentiels:

- ❖ Synthétiser une surface $S(x,t)$ telle que toutes les trajectoires du système obéissent à un comportement désiré de poursuite, régulation et stabilité .
- ❖ Déterminer une loi de commande (commutation) $u(x,t)$ qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface.

3.3.3. Choix de la surface de glissement

La surface $S(x)$ représente le comportement dynamique désiré du système. SLOTINE propose une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable vers sa valeur désirée [24]:

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda_x \right)^{r-1} e(x) \quad (3.5)$$

Où: $e(x)$: Écart de la variable à régler

λ_x : Constante positive qui interprète la bande passante du contrôle désiré.

r : Degré relatif, égal au nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

$S(x) = 0$: est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x)=0$.

3.3.4. Condition d'existence du glissement

La condition d'existence du régime glissant $S(x,t)=0$ se traduit par [25][26] :

$$\lim_{S \rightarrow 0} S * \dot{S} < 0 \quad (3.6)$$

Ces conditions sont déduites du théorème (1) en appliquant le critère de stabilité de LYAPUNOV dans un voisinage de la surface de glissement et en prenant $V(x) = S^2 / 2$ comme fonction candidate de LYAPUNOV. Dans ce cas, la dérivée de la fonction de LYAPUNOV V est égale à $S * \dot{S}$. Les conditions de LYAPUNOV énoncées dans le théorème 1 sont vérifiées si S et \dot{S} sont de signes opposés. A noter que ces dernières conditions deviennent des conditions suffisantes pour assurer l'attractivité de la surface si elles sont valables sur tout l'espace d'état et non seulement dans une région proche de la surface de glissement.

3.3.5. Méthode de la commande équivalente

La courbe en zig-zag entre u^- et u^+ illustrée dans la figure 3.3 est la trajectoire d'état réelle (pratique) du système. Elle entoure la droite $S=0$ qui est la trajectoire d'état idéale (théorique) ou de référence. Il est possible de subdiviser le déplacement de la trajectoire réelle en deux composantes ; une composante à haute fréquence et une composante à basse fréquence. La composante à haute fréquence est une trajectoire discontinue qui alterne entre u^- et u^+ , alors que la composante basse fréquence forme une trajectoire continue qui se déplace le long de la surface de glissement. Négligeant la composante de commutation rapide souvent filtrée, la trajectoire d'état sera alors déterminée par la composante de commutation lente. C'est ce qu'on appelle la commande équivalente, qu'on peut interpréter comme la valeur moyenne que prend la grandeur de commande lors de la commutation rapide entre u^+ et u^- comme représenté schématiquement à la figure 3.4. La commande équivalente rend la surface de commutation invariante dans le temps $S' = 0$ [27].

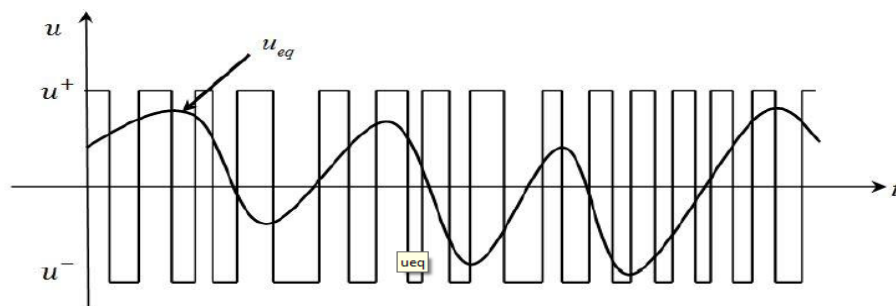


Figure (3.4): Commande équivalente comme valeur moyenne de commutation entre u^+ et u^-

Considérons à titre d'exemple le système régi par l'équation différentielle suivante :

$$\dot{x} = f(x, t) + g(x, t)u \quad (3.7)$$

Admettons que le régime de glissement existe sur la surface de commutation $S(x, t)=0$, sa dérivée est donnée par:

$$\dot{S} = \frac{dS(x,t)}{dt} = \frac{1}{dt} \left(\frac{\partial S}{\partial x} dx + \frac{\partial S}{\partial t} dt \right) = \frac{\partial S}{\partial x} \dot{x} + \frac{\partial S}{\partial t} \quad (3.8)$$

Soit ∇S le gradient de S , alors :

$$\dot{S} = \nabla S \cdot \dot{x} + \frac{\partial S}{\partial t} = \nabla S \cdot f(x,t) + \nabla S \cdot g(x,t)u + \frac{\partial S}{\partial t} \quad (3.9)$$

En mode de glissement et en régime permanent, la dérivée de la surface est nulle (car sa primitive est égale à zéro). Cette condition permet de déterminer la commande équivalente pour maintenir la trajectoire d'état sur cette surface. Il faut donc résoudre :

$$\nabla S \cdot f(x,t) + \nabla S \cdot g(x,t)u_{eq} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad (3.10)$$

Ainsi, nous obtenons :

$$u_{eq} = - \left[\nabla S \cdot g(x,t) \right]^{-1} \cdot \left[\nabla S \cdot f(x,t) + \frac{\partial S}{\partial t} \right] \quad (3.11)$$

Ou, nous pouvons l'exprimer de la façon suivante:

$$u_{eq} = \frac{\langle \nabla S(x) \cdot f(x,t) \rangle}{\langle \nabla S(x) \cdot g(x,t) \rangle} \quad (3.12)$$

Il est alors possible d'exprimer la dynamique du système sur la surface de glissement par :

$$\dot{x} = f(x,t) - g(x,t) \cdot \left[\nabla S \cdot g(x,t) \right]^{-1} \cdot \left[\nabla S \cdot f(x,t) + \frac{\partial S}{\partial t} \right] \quad (3.13)$$

La commande par mode glissant se compose de deux termes, une commande discontinue en fonction du signe de la surface de glissement u_n une commande dite équivalente u_{eq} caractérisant la dynamique du système sur la surface de glissement.

$$u = u_n + u_{eq} \quad (3.14)$$

u_n : correspond à la composante non linéaire. Elle est déterminée pour garantir l'attractivité de la variable à contrôler vers la surface de glissement et satisfaire la condition de convergence.

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0 \quad (3.15)$$

De (3.7), (3.8) et (3.14) on peut écrire:

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} (f(x,t) + g(x,t)u_{eq}) + \frac{\partial S}{\partial x} (g(x,t)u_n) + \frac{\partial S}{\partial t} \quad (3.16)$$

En utilisant la condition du mode de glissement, l'expression (3.16) devient :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} (g(x,t)u_n) \quad (3.17)$$

Le problème revient à trouver (u_n) tel que :

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) = S(x) \cdot \frac{\partial S}{\partial x} (g(x,t) u_n) < 0 \quad (3.18)$$

La solution la plus simple vérifiant cette condition est donnée par la fonction signe « sign » illustrée à la figure 3.5:

$$u_n = -k \operatorname{sign}(S(x)) \quad (3.19)$$

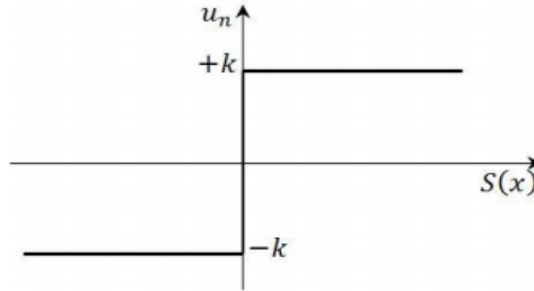


Figure (3.5): Représentation de la fonction signe

En remplaçant l'expression (3.19) dans (3.18), on obtient :

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) = S(x) \cdot \frac{\partial S}{\partial x} (g(x,t) k \operatorname{sign}(S(x))) < 0 \quad (3.20)$$

Où: le facteur $\frac{\partial S}{\partial x} \cdot g(x,t)$ est toujours négatif pour la classe de système que nous considérons.

Le gain k est choisi positif pour satisfaire la condition (3.20). Le choix de ce gain est très influent car, s'il est très petit le temps de réponse sera très long et, s'il est choisi très grand, nous aurons de fortes oscillations au niveau de l'organe de commande. Ces oscillations peuvent exciter les dynamiques négligées, ou même détériorer l'organe de commande [25].

3.4. Commande MPPT par mode glissant du système photovoltaïque

Le système photovoltaïque étudié dans notre mémoire est donné au deuxième chapitre (3.21) :

Il peut être réécrit sous la forme (3.7) où :

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = f(x,t) + g(x,t)u \quad (3.22)$$

Avec :

$$f(x,t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} I_{pv} \\ -\frac{1-\alpha}{L} V_s \\ \frac{1-\alpha}{C_2} I_L - \frac{1}{RC_2} V_s \end{bmatrix}, g(x,t) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_1} I_L \\ \frac{1}{L} V_{pv} \\ 0 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{pv} \\ I_L \\ V_s \end{bmatrix}, u = \alpha = \alpha_{eq} + \alpha_n \quad (3.23)$$

3.4.1. Choix de la surface de glissement

Comme nous avons vu dans le chapitre précédent, la condition du point de puissance maximale PPM est donnée par :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \quad (3.24)$$

Puisque la commande MPPT a pour objectif de faire fonctionner le système photovoltaïque à son point de puissance maximale, La première étape consiste à choisir la surface de glissement $S(x)$ est choisie de la façon suivante :

$$S(x) = \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} V_{pv} \quad (3.25)$$

L'expression (II. 23) donne la relation entre le courant I_{pv} et la tension V_{pv} . Pour qu'on puisse rendre utile cette expression, on fait quelques hypothèses simplificatrices.

Dans le cas idéal, R_s étant négligeable, l'expression (2. 14) devient:

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_{sat} \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{\eta V_T}\right) - 1 \right) \quad (3.26)$$

En court-circuit, $V_{pv} = 0$ et $I_{pv} = N_p I_{cc}$, on remplace dans (3.26), on aura :

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (3.27)$$

Où I_{cc} est le courant de court-circuit du module PV.

Si on suppose que $\exp\left(\frac{V_{pv}}{\eta V_T}\right) \gg 1$, on peut écrire:

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_{sat} \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{\eta V_T}\right) \right) \quad (3.28)$$

En circuit ouvert, $I_{pv} = 0$ et $V_{pv} = N_s V_{co}$. On remplace dans (3.28), on aura:

$$I_{sat} = I_{cc} \left(\exp\left(\frac{-N_s V_{co}}{\eta V_T}\right) \right) \quad (3.29)$$

En remplaçant (3.29) dans (3.28), on aura une nouvelle expression du courant I_{pv} .

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_{sat} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} - N_s V_{co}}{\eta V_T}\right) \right) \quad (3.29)$$

Ainsi, la dérivée du courant par rapport à la tension est donnée par :

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = -\frac{N_p I_{cc}}{\eta V} \exp\left(\frac{V_{pv} - N_s V_{co}}{\eta V_T}\right) \quad (3.30)$$

Substituant (3.29) et (3.30) dans (3.25) on trouve :

$$S(x) = \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} V_{pv} = N_p I_{cc} - \left(N_p I_{cc} + \frac{N_p I_{cc}}{\eta V} \right) \exp\left(\frac{V_{pv} - N_s V_{co}}{\eta V_T}\right) \quad (3.31)$$

3.4.2. Détermination de la commande équivalente: [16]

Pour déterminer la condition de stabilité sur la surface de glissement, on se sert de la notion de la commande équivalente. En utilisant les conditions d'invariance $S(x)=0$ et $\dot{S}(x)=0$, on calcule l'expression de la commande équivalente u_{eq} donnée par (3.11) :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} = \frac{dS}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{dS}{dx} \cdot \dot{x} = \frac{\partial S}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial S}{\partial x_2} \dot{x}_2 + \frac{\partial S}{\partial x_3} \dot{x}_3 \quad (3.31)$$

L'expression (3.31) montre que $S(x)$ est fonction de V_{pv} et non de I_L et V_s , alors:

$$\frac{\partial S}{\partial x_2} \dot{x}_2 = \frac{\partial S}{\partial x_3} \dot{x}_3 = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial S}{\partial x_1} \dot{x}_1 \neq 0 \quad (3.32)$$

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x_1} \dot{x}_1 = 0 \quad (3.33)$$

D'ou:
$$\dot{x}_1 = \dot{V}_{pv} = \frac{I_{pv}}{C_1} - \frac{I_L}{C_1} u_{eq} = 0 \quad (3.34)$$

Donc, l'expression de la commande équivalente est la suivante :

$$u_{eq} = \frac{I_{pv}}{I_L} \quad (3.35)$$

On conclut que le régime de glissement existera si le convertisseur fonctionne en mode de conduction continue (MCC) ($I_L > 0$).

3.4.3. Détermination de la commande discontinue

Une approche de commande explicite doit être formulée pour amener la trajectoire sur la surface de glissement pendant le mode de convergence. Cette approche est appelée la loi d'atteinte. La loi d'atteinte à taux constant donnée par :

$$u_n = -k \operatorname{sign}(S(x)) \quad (3.36)$$

Si on adopte pour la première loi d'atteinte, la commande par mode de glissement devient [16]:

$$u = u_{eq} - k \operatorname{sign}(S(x)) = \frac{I_{pv}}{I_L} - k \operatorname{sign} \left(I_{pv} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} V_{pv} \right) \quad (3.37)$$

3.5. Résultats de simulation

L'objectif de ce paragraphe est de présenter les résultats de simulation de la technique de commande par mode de glissement (SMC) et de la comparer à la technique P&O. La simulation a été faite grâce au logiciel Matlab/Simulink. Elle consiste à faire varier le paramètres influant sur les chaines de conversion PV, à savoir la condition climatique G (voir figure 3.6).

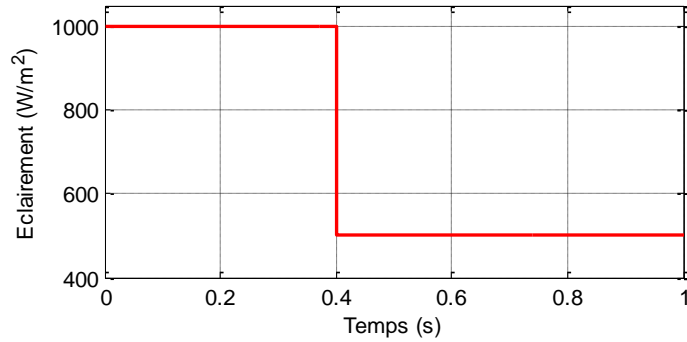


Figure (3.6): Profil de l'éclairement G

Premièrement, la commande du système solaire SMC est testée pour des éclairements successives de 1000 W/m² à 0 s, 500 W/m² à 0,4 s, tout en fixant une charge de 25 Ω, et la température à 25°C. Les résultats de simulation correspondants sont montrés à la figure 3.7. On constate qu'au démarrage du profil, le SMC traque le PPM avant P&O. De plus, à chaque variation, P&O perd quelques joule d'énergie par rapport à SMC. En plus, les résultats de la commande P&O ont une bande d'oscillations d'épaisseur grand par rapport à la méthode SMC.

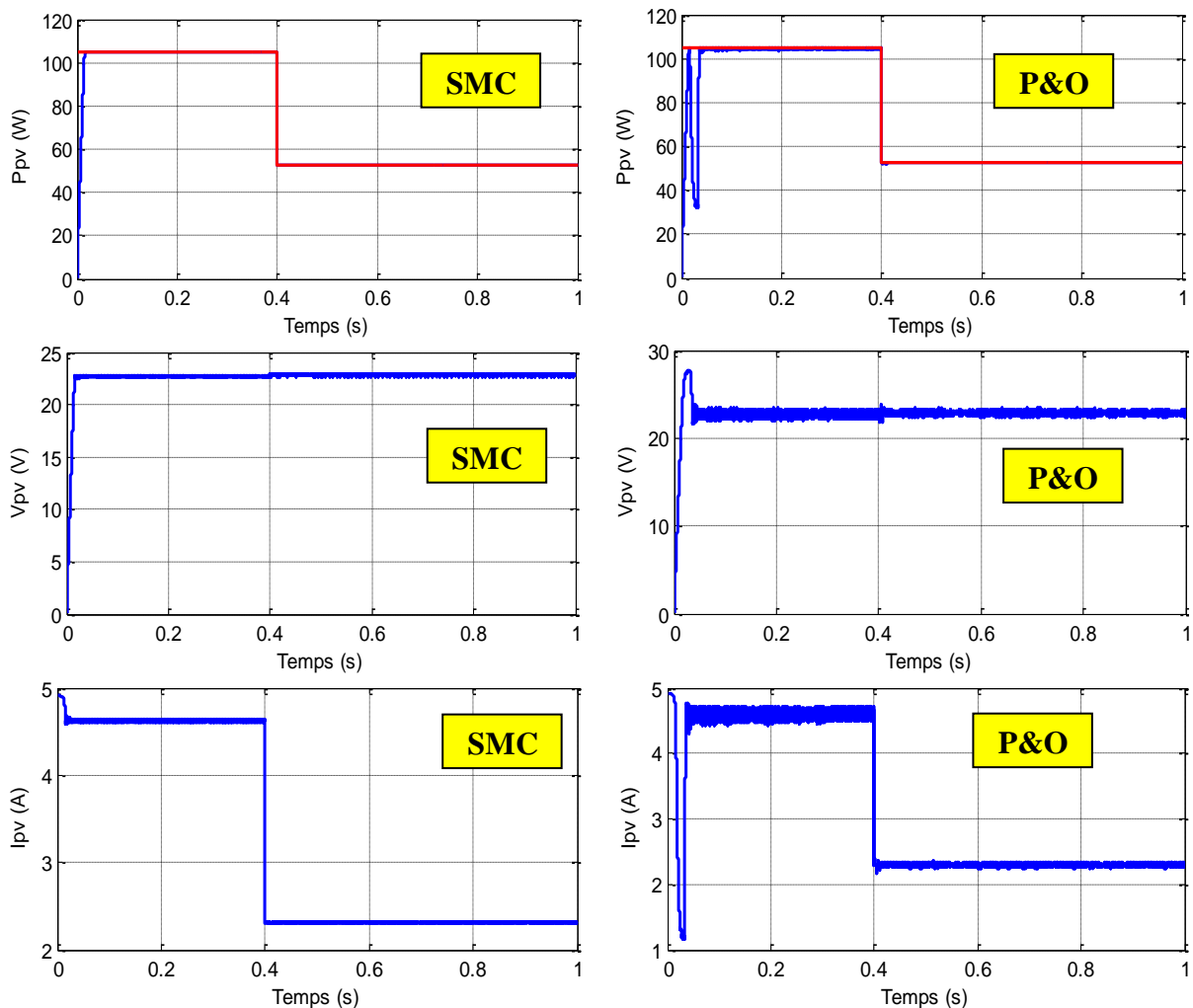


Figure (3.7) Comparaison de la puissance PV, la tension V_{pv} et le courant I_{pv} entre SMC et P&O sous un éclairement variable

3.6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, l'application de la commande MPPT basée sur le mode glissant sur le système photovoltaïque que nous étudions. Comparant avec la méthode P&O, cette commande est très robuste et permet au système de rejoindre son PPM rapidement même face aux changements rapides de l'éclairement.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Travail Accompli

*Le travail présenté dans ce mémoire a essentiellement porté sur Modélisation et simulation d'un système PV adapté par une commande MPPT basé sur un mode glissant. L'énergie produite est utilisée pour alimenter des charges à courant-continu à travers un convertisseur DC-DC. Ce convertisseur est appelé convertisseur de **Boost**. Premièrement, A l'issue de ce présent travail, on peut dire qu'on a une vue d'ensemble sur la Modélisation et la simulation d'un système PV adapté par des commandes MPPT. l'une des méthodes conventionnelle a été d'abord introduite : **Perturber et Observer (P&O)**. Nous avons remarqué que le problème de la technique P&O est la déviation du vrai point de puissance maximale lors d'un changement brusque de l'ensoleillement. Finalement, à travers le dernier chapitre, on a présenté l'application de la commande **MPPT** basée sur le mode glissant sur les systèmes photovoltaïques. Cette commande permet d'assurer un fonctionnement au PPM et une robustesse vis-à-vis des variations de l'éclairement. Les résultats de simulation exposés montrent que l'utilisation de la commande **MPPT** permet d'améliorer le rendement des installations photovoltaïques.*

Difficultés et Problèmes Rencontrés

Durant notre travail nous avons rencontré plusieurs problèmes. Le premier est le manque de temps accordé pour réaliser ce travail, manque d'informations sur l'utilisation du logiciel MATLAB (coté programmation, simulation...etc).

Suggestions et Perspectives

Dans ce mémoire, nous sommes conscients de n'avoir étudié que certains points d'un sujet d'étude très vaste qui nécessitera une investigation plus poussée et une meilleure compréhension sur les domaines de l'énergie renouvelables et les différents types de commandes utilisées dans ce domaine. Dans ce constat, on peut envisager de quelques tâches à traiter ultérieurement, comme :

- *Effectuer des essais expérimentaux avec des panneaux solaires réels et non avec une source programmable ;*
- *Etendre le principe de la technique MPPT proposée sur d'autres topologies de convertisseurs plus efficaces ;*
- *Tester le système MPPT développé pour un éclairement non homogène en tenant compte du phénomène d'ombrage.*

Références Bibliographiques

"A un bon ouvrir un bon ouvrage".

Bibliographies

- [1] A. B. Ibarreta, "Réalisation de commandes MPPT Numériques", Rapport de stage Projet Fin d'Etudes Université Rovira Virgili 2006 .
- [2] " Dossier technique" , «Eolienne et photovoltaïque» PDF.
- [3] M.N. Mchaliq et Ch. Hmada''Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau''Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013.
- [4] M. Blhadj''Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome''Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar 2007-2008.
- [5] O. Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Thèse de Doctorat de l'ENS de Cachan (France), 09 décembre 2002.
- [6] A. B. Arostegi, "New Optimized Electrical Architectures of Photovoltaic Generators with High Conversion Efficiency", Thèse Doctorat de l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier, France, 2013, pp. 167.
- [7] D. Narimene , "Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque ", Mémoire De Magister ,2015.
- [8] M.L. Louazane ''Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla ''Mémoire de Magister Université El Hadj Lakhdar-Batna 16/06/2008 .
- [9] K. Sobaihi '' étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction '' Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique 10 , Avenue Hassen Badi El –Harrach Alger
- [10] K. Helali ''Modélisation d'une cellule photovoltaïque ''Etude comparative '' Mémoire de Magister Université Mouloud Mammeri de Tizi –Ouzou 25/06/2012 .
- [11] M. A. Deves '' énergie photovoltaïque (Application au traitement de l'eau potable et des eaux usées en rurales)'' document technique Réédition 2003 FNDAE n 12 .

- [12] S. Lhlah " Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incrémental Conductance (Inc.CoN) et Hill climbing (H.C)" Mémoire Magister université El hadj Lakhdar Batna 2007.
- [13] B. Abdelkader" Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph "Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF 02/12/2009 .
- [14] F. Slama " Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique" Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF-01/04/2011 .
- [15] A. Meflah, "Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque Mémoire de Magister UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEM 2011
- [16] B. Messaoud et L. M. Islam, "Commande par mode glissant des systèmes photovoltaïques : Mémoire Master en Automatique , Université Mohammed Seddik Benyahia – Jijel 2018.
- [17] S. Diaf « Intégration des systèmes à sources renouvelables d'énergie pour la production décentralisée d'électricité en site isolé », Thèse de Doctorat, École Nationale Polytechnique, Alger 2009
- [18] G. Obeidi, « Commande des hacheurs MPPT par la logique floue », Mémoire de Magister, École Nationale Polytechnique, Alger 2006.
- [19] H. Rezzouk, « Simulation et implémentation d'algorithmes de recherche du point de maximum de puissance pour un système PV sur un circuit FPGA », Mémoire de Magister, Université de Jijel 2010
- [20] S. V. Emelyanov, "Variable Structure Control Systems", Moscow:Nauka, 1967
- [21] V. I. Utkin, "Variable structure systems with sliding mode", IEEE Trans. Automat. Conir., vol. AC-22, no. 2, 1977, pp. 212-222
- [22] P. Liutanakul, "Stabilité des réseaux embarqués : Intéraction puissance-structure-commande", Thèse Doctorat de l'institut national polytechnique de Lorraine, France, 2007.

- [23] M. Loucif, « Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur », Thèse de doctorat, université ABOU-BAKR BELKAID de Tlemcen, 2016.
- [24] A. Belkaid, « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas - Setif 1, 2015.
- [25] V.I. Utkin "Sliding modes in control and optimization", vol. 2, Springer Verlag Berlin, 1992.
- [26] H. Komurcugil, "Adaptive terminal sliding-mode control strategy for DC-DC buck converters", ISA Transactions vol.51, 2012, pp.673-681.
- [27] R. Husson, «Méthodes de commande des machines électriques», Lavoisier, Paris, France, 2003