



Université ABBES LAGHROUR Khenchela  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Industriel  
جامعة عباس لغزور خنشلة  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم الهندسة الصناعية



N° Série : .....

***Mémoire de fin d'étude***  
*Pour l'obtention du diplôme de Master*

***Filière : Electrotechnique***  
***Spécialité : Commande Electrique***

*Présentés par :*  
*Mecheri Samiha*

**THEME**

Etude et simulation de la commande  
MPPT d'un système de conversion  
d'énergie photovoltaïque  
DC/DC sous Matlab

*Soutenu le 20/06 /2018 devant la commission d'examen composée de :*

- *Mr. BOUOUDEN Sofiane*      *Président*
- *Mr. BERKANI Abdelhakim*      *Encadreur*
- *Mr. BOUTABBA Tarek*      *Examineur*

*Promotion 2017/2018*

## *Remerciement :*

*Je remercie en premier lieu Dieu qui m'a donné ce bien là et pour que je vie ce jour et la force et la patience pour terminer ce travail .Tout-Puissant, de nous avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.*

*A mes très chers parents, que dieu les garde et les protèges pour leurs soutien moral et financier, pour Leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont.*

*Je tiens à exprimer mes remerciements à mon encadreur Mr. Berkani Abd-hakim, qui a proposé et a dirigé ce travail, et sa disponibilité et la confiance qu'il nous accordée. Ainsi que le corps enseignant et Administratif qui ont contribué à notre formation Universitaire.*

*Le travail de mémoire que j'ai effectué doit beaucoup à certaines personnes que je tiens à les remercier sincèrement.*

*A la fin nous tenons à remercier tous nos collègues, particulièrement les gents qui nous donne le vrais sens de compagnon et d'amitié.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes chères Parents : Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mes amours éternels et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. J'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices. Qu'Allah vous accorde la santé, bonheur et longue vie.*

*Ma cher Mari: Mouhamed*

*Mes chers frères : Phaher et Samir et Aymen*

*Mes chers Sœurs : Waliba et Amel*

*Pour leur grand amour et leur soutient qu'ils trouvent ici l'expression de ma haute gratitude.*

*Mes chers amis : qui sans leur encouragement ce travail n'aura jamais vu le jour.*

*Et à toute ma famille et à tous ceux que j'aime.*

*Samiha Mecheri*

## Sommaire

### Introduction générale

#### Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque

|  |     |
|--|-----|
| I. 1 INTRODUCTION  | 01  |
| I.2 CELLULE SOLAIRE  | 01  |
| I. 2. 1 STRUCTURE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT                              | 02  |
| I. 2. 2 INFLUENCE DE LA TEMPERATURE ET DU RAYONNEMENT                        | 03  |
| I. 2. 2. 1 INFLUENCE DE LA TEMPERATURE                                       | .03 |
| I. 2. 3. 2 INFLUENCE DU RAYONNEMENT  | 04  |
| I. 3 LE PANNEAU SOLAIRE.   | 05  |
| I. 3. 1 CELLULES EN SERIE  | 06  |
| SCHEMA ELECTRIQUE  | 07  |
| CARACTERISTIQUES COURANT - TENSION   | 07  |
| I. 3. 2 CELLULES EN PARALLELE  | 07  |
| SCHEMA ELECTRIQUE  | 08  |
| CARACTERISTIQUES I(V) COURANT – TENSION                                      | 08  |
| I. 4 LE GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE  | 09  |
| I. 5 MODELE ELECTRIQUE DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE                          | 09  |
| I. 5. 1 SCHEMA ELECTRIQUE EQUIVALENT   | 10  |
| I. 5. 2 CARACTERISTIQUES <i>COURANT – TENSION</i>                            | 11  |
| I. 5. 3 CARACTERISTIQUES PUISSANCE – TENSION                                 | 13  |
| I. 6 ENSEMBLE PANNEAU – BATTERIE   | 13  |
| I. 6. 1 CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES (I(V) ET P(V))                          | 14  |
| I.6. 2 LIAISON DIRECTE SOURCE-CHARGE   | 15  |
| I. 6. 3 LIAISON A TRAVERS UN ETAGE D'ADAPTATION GENERATEUR<br>PV CHARGE      | 17  |
| I. 6. 4 LIAISON A TRAVERS UN CONVERTISSEUR STATIQUE CONTROLE PAR<br>UNE MPPT | 19  |
| CONCLUSION   | 21  |

#### Chapitre II : Généralité sur la commande MPPT

|  |     |
|--|-----|
| II.1 INTRODUCTION                          | 22  |
| II. 2 THEORIE DE LA COMMANDE MPPT          | 23  |
| II. 2. 1 PRINCIPE DE LA COMMANDE MPPT      | 23  |
| II. 2. 2 EXEMPLE ILLUSTRATIF               | 27  |
| II. 3 DIFFERENTS TYPES DE LA COMMANDE MPPT | 27  |
| II. 3. 1 METHODE ANALYTIQUE                | 27  |
| II. 3.2 METHODE DE RECHERCHE Numérique     | 29  |
| II. 3.3 METHODE DE RECHERCHE ANALOGIQU     | 29  |
| II. 4. 1 PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE            | 32  |
| II. 4. 2. LE CONVERTISSEUR DC/DC           | .33 |
| II. 4. 4 ETAGE DE COMMANDE                 | 36  |
| CONCLUSION                                 | 37  |

#### Chapitre III : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

|  |     |
|--|-----|
| III.1 Introduction   | .42 |
| III.2 Modélisation des Alliages à Mémoire de Forme Magnétiques | 43  |

|   |    |
|---|----|
| III. 3 Système photovoltaïque                                       | 39 |
| III.4.Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque       | 40 |
| III.4.1 Modélisation du GPV.  | 40 |
| III.4.2 Simulation du générateur PV                                 | 44 |
| III.5 Modélisation et simulation du hacheur survolteur              | 50 |
| III.5.1 Modélisation de hacheur survolteur                          | 50 |
| III.5.2 Simulation de hacheur survolteur                            | 51 |
| III.6 Structure et simulation de la commande MPPT numérique « P&O » | 54 |
| III.6.1. structure de la commande « perturbation et observation »   | 54 |
| III.6.2. Simulation de la méthode MPPT                              | 55 |
| Conclusion  | 59 |
| <b>Conclusion générale</b>  |    |
| Référence bibliographique   |    |

## Liste des figures

### Chapitre I

|  |    |
|--|----|
| Figure I.1 : structure d'une cellule solaire   | 02 |
| Figure I.2 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque   | 02 |
| Figure I.3 : L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$                                     | 03 |
| Figure I.4 : L'influence de la température sur la caractéristique $p=f(V)$                                     | 04 |
| Figure I.5 : Caractéristique $I/V$ d'une cellule PV pour différents niveaux de rayonnement                     | 04 |
| Figure I.6 : Caractéristique $P/V$ d'une cellule PV pour différents niveaux de rayonnement                     | 05 |
| Figure I.7 : représente les différentes composantes d'un champ photovoltaïque                                  | 06 |
| Figure I.8 : schéma électrique d'un cellule en série   | 07 |
| Figure I.09 : Caractéristique de nombre des modules en série   | 07 |
| Figure I.10 : schéma électrique d'un cellule en Parallèle  | 08 |
| Figure I.11 : Caractéristique de nombre des modules en parallèle.  | 08 |
| Figure I.12: Schéma équivalent d'une cellule idéale  | 09 |
| Figure I.13 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle  | 10 |
| Figure I.14 : Caractéristique $I =f (V)$ d'un module photovoltaïque  | 12 |
| Figure I.15 : Caractéristique $I =f (V)$ d'un schéma Electrique Equivalent de la cellule PV                    | 12 |
| Figure I.16 : Caractéristique $I =f (V)$ d'un schéma Electrique Equivalent de la cellule PV                    | 13 |
| Figure I.17 : Couplage directe entre un GPV et une batterie  | 13 |
| Figure I.18 : Caractéristiques $I/V$ d'un GPV et d'une batterie  | 14 |
| Figure I.19 : Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ établissant le principe du point de puissance maximal (MPPT)    | 15 |
| Figure I.20 : liaison directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour                                  | 15 |
| Figure I.21 : Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion directe                  | 16 |
| Figure I.22 : Schéma électrique d'une liaison directe PV-charge  | 16 |
| Figure I.23 : Etage d'adaptation d'un générateur PV-charge   | 17 |
| Figure I.24 : Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation                                  | 18 |
| Figure I.25 : chaîne élémentaire de conversion PV à base d'un transformateur DC contrôlé par une commande MPPT | 19 |
| Figure I.26 : Incorporation d'un convertisseur statique commandé par un contrôleur MPPT                        | 20 |

### Chapitre II

|   |    |
|---|----|
| Figure II.1 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque           | 22 |
| Figure II.2 : Courbe caractéristique de puissance d'un GPV              | 23 |
| Figure II.3 : La caractéristique $I-V$ , $P-V$ et la trajectoire de PPM | 24 |
| Figure II.4 : Principe de fonctionnement de la commande MPPT            | 24 |
| Figure II.5 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque           | 25 |

|   |    |
|---|----|
| Figure II.6 : Exemple de réalisation d'un étage d'adaptation abaisseur d'un GPV avec fonction MPPT fonctionnant sur batterie ayant $V_{bat} < V_{0c}$ | 27 |
| Figure II.7 : Schéma synoptique de commande MPPT analogique   | 30 |
| Figure II.8 : Génération d'un signal carré à la sortie du comparateur   | 30 |
| Figure II.9 : Circuit équivalent du panneau photovoltaïque  | 33 |
| Figure II.10 : Symbole et signaux du convertisseur DC/DC  | 33 |
| Figure II.11 : Principe du convertisseur réalisant l'adaptation d'impédance   | 34 |
| Figure II.12 : Convertisseur avec $\alpha = 1$ , puissance transmise:68W  | 35 |
| Figure II.13 : Convertisseur avec $\alpha = 0,76$ , PS = 84 W, soit un gain de 23% par rapport à la connexion directe                                 | 35 |

### **Chapitre III**

|  |    |
|--|----|
| Figure III.1 : Bibliothèque SIMULINK   | 39 |
| Figure III.2 : schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) sur charge (DC)                  | 40 |
| Figure III.3 : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque  | 40 |
| Figure III.4 : caractéristique I(V) et P (V) de la cellule PV idéale   | 41 |
| Figure III.5 : Schéma bloc du générateur photovoltaïque  | 41 |
| Figure III.6 : Schéma de Simulation de la connexion direct GPV-Charge  | 42 |
| Figure III.7 : Schéma de générateur PV en MATLAB-SIMULINK  | 45 |
| Figure III.8 : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension, Pour différentes températures et le rayonnement $G=1000W/m^2$   | 46 |
| Figure III.9 : Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension, Pour différentes températures et le rayonnement $G=1000W/m^2$ | 46 |
| Figure III.10 : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension Pour différents éclairement et une température $T=25^\circ C$   | 47 |
| Figure III.11 : Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension Pour différents Eclairement et une température $T=25^\circ C$ | 47 |
| Figure III.12 : Résultats de simulation des caractéristiques Tension optimale-Eclairement pour différentes températures                      | 48 |
| Figure III.13 : Résultats de simulation des caractéristiques courant optimal-Eclairement   | 49 |
| Figure III.14 : Résultats de simulation des caractéristiques Puissance maximale- Eclairement pour différentes températures                   | 49 |
| Figure III.15 : Résultats de simulation des caractéristiques Résistance optimale-Eclairement pour différentes températures                   | 50 |

|  |    |
|--|----|
| Figure III.16 : Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type boost)   | 50 |
| Figure III.17 : Schéma block d'un convertisseur survolteur   | 52 |
| Figure III.18 : Signal commande DC/DC (gâchette- d'hacheur)  | 52 |
| Figure III.19 : Résultats de simulation de la tension d'entrée du hacheur survolteur   | 53 |
| Figure III.20 : Résultats de simulation de la valeur moyenne de la tension de sortie du hacheur survolteur   | 53 |
| Figure III.21 : Résultats de simulation de la valeur moyenne du courant de sortie du hacheur survolteur  | 54 |
| Figure III.22 : Algorithme de la méthode MPPT « perturbation-observation ». (p&o)  | 55 |
| Figure III.23 : Schéma block de la commande MPPT   | 55 |
| Figure III.24 : Résultats de simulation de la tension générée par le générateur photovoltaïque pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$             | 56 |
| Figure III.25 : Résultats de simulation du courant généré par le générateur photovoltaïque pour $E=1000\text{W/m}^2$ et Tension (V) et $T=25^\circ\text{C}$  | 56 |
| Figure III.26 : Résultats de simulation de la puissance générée par le générateur photovoltaïque pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$           | 57 |
| Figure III.27 : Résultats de simulation de la tension de sortie du système pour photovoltaïque pour $E=1000\text{W/m}^2$ Tension (V) et $T=25^\circ\text{C}$ | 57 |
| Figure III.28 : Résultats de simulation du courant de sortie du système pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$                                    | 58 |
| Figure III.29 : Résultats de simulation de la puissance de sortie du système pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$                               | 58 |

# *Liste des symboles*

**S** : Surface du module photovoltaïque (m<sup>2</sup>).

**E** : Eclairement (W/m<sup>2</sup>).

**I<sub>ph</sub>** : Le photo-courant (A).

**I<sub>sat</sub>**: Courant de saturation (A).

**T<sub>c</sub>** : Température de jonction (°K).

**G** : L'éclairement de référence (1000 W/m<sup>2</sup>).

**T<sub>ref</sub>**: La température de référence (298 °K).

**α** : Le coefficient de courant en fonction de température (A/°C).

**I<sub>cc</sub>** : Le courant de court-circuit (A).

**V<sub>co</sub>** : La tension de circuit ouvert (V).

**P<sub>max</sub>** : La puissance maximale produite PV (W).

**V<sub>max</sub>** : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

**I<sub>max</sub>**: Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

**V<sub>opt</sub>** : Tension optimale (V).

**I<sub>opt</sub>** : Courant optimum (A).

**V<sub>co</sub>** : Tension à circuit ouvert (V).

**I<sub>cc</sub>** : Courant de court-circuit (A).

**K** : coefficient de Boltzman (1.38.10<sup>-23</sup> J / K).

**T<sub>c</sub>** : Température de la cellule (C°).

# *Liste des Abréviations*

**PV:** Photovoltaïque.

**GPV:** Générateur Photovoltaïque.

**MPPT:** Maximum Power Point Tracking.

**DC:** Courant Continu (Direct Current).

**AC:** Courant Alternatif (Alternative Current).

**P&O:** Perturbation et Observation.

### Introduction Générale:

L'énergie photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des panneaux ou des centrales solaires photovoltaïques. Elle est dite renouvelable, car sa source (le Soleil) est considérée comme inépuisable à l'échelle du temps humain. En fin de vie, le panneau photovoltaïque aura produit 20 à 40 fois l'énergie nécessaire à sa fabrication et à son recyclage électrique.

Le soleil est aujourd'hui réduit au statut d'énergie, qu'il fallait la capter, la transformer et la stocker pour la transformation électrique par effet photovoltaïque, la conversion de la lumière du soleil en électricité basé sur des matériaux semi-conducteurs comme le silicium. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique.

Le problème du couplage parfait entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continue n'est pas encore réellement résolu. Un des verrous technologique qui existe dans ce type de couplage est le problème du transfert de la puissance maximale du générateur photovoltaïque (GPV) à la charge qui souffre souvent d'une mauvaise adaptation. Le point de fonctionnement qui en découle est alors parfois très éloigné du point de puissance maximale (PPM). La littérature propose une grande quantité de solutions sur l'algorithme de contrôle qui effectue une recherche de point de puissance maximale lorsque le GPV est couplé à une charge à travers un convertisseur statique.

Dans ce mémoire, on analyse la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque.

L'objectif de ce travail est de contribuer à une meilleure

Compréhension des performances de convertisseur DC-DC adapté par la commande numérique lors qu'il est couplé à un générateur photovoltaïque et améliorer sa tension de sortie afin d'obtenir une bonne source qu'on peu utiliser comme un générateur d'électricité.

Pour décrire cela, ce mémoire est présenté en trois chapitres :

- ✚ Dans le premier chapitre, on fait une généralité sur les générateurs photovoltaïques. On présente le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres.

- ✚ Dans le deuxième chapitre, on étudie quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Ainsi, on décrit la commande MPPT des convertisseurs DC-DC basée sur contre réaction de puissance.
- ✚ Dans le chapitre trois, on étudie une modélisation et une simulation par MATLAB-SIMULINK

A la fin, on termine ce mémoire par une conclusion générale.

# Chapitre I

## Généralité sur les générateurs photovoltaïques

## I.1. Introduction :

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

Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 10 000 w/m<sup>2</sup> crête dans les zones tempérées et jusqu'à 14 000 W/m<sup>2</sup> lorsque l'atmosphère est faiblement polluée [1-3].

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi le générateur solaire photovoltaïque.

Actuellement, il existe deux voies principales d'exploitation de l'énergie solaire: le solaire photovoltaïque qui transforme directement le rayonnement en électricité ; le solaire thermique qui transforme directement le rayonnement en chaleur. Dans ce chapitre nous présenterons l'énergie photovoltaïque [4].

## Historique :

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par Antoine Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

L'énergie photovoltaïque s'est développée dans les années 50 pour l'équipement de vaisseaux spatiaux et le premier a été lancé dans l'espace en 1958. C'était le seul procédé non nucléaire d'alimenter des satellites en énergie. Les images satellites reçues par votre téléviseur ne vous parviennent que grâce à l'énergie photovoltaïque. Pendant les années 70 et 80, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. La croissance de l'industrie fut spectaculaire. Depuis le début des années 80, la quantité de modules photovoltaïques réalisés par an (mesurés en MW-Crêtes) a augmenté et le prix des modules (par Watt-Crête) diminuait au fur et à mesure que le nombre de modules fabriqués augmentait [5].

## I.2. La cellule solaire :

### I.2.1 STRUCTURE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

Les cellules ou les plaques solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », qui a été découvert par le physicien français Edmond Becquerel en 1839.

Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs des laboratoires Bell, aux Etats-Unis, parvinrent à fabriquer la première cellule photovoltaïque, l'élément primaire d'un système photovoltaïque.

Les cellules se branchent en série, ce qui permet aux électrons générés par une cellule d'être repris par la suivante. Le but est d'avoir une différence de potentiel normalement entre 6 et 24 V, la figure (I.1) représente le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

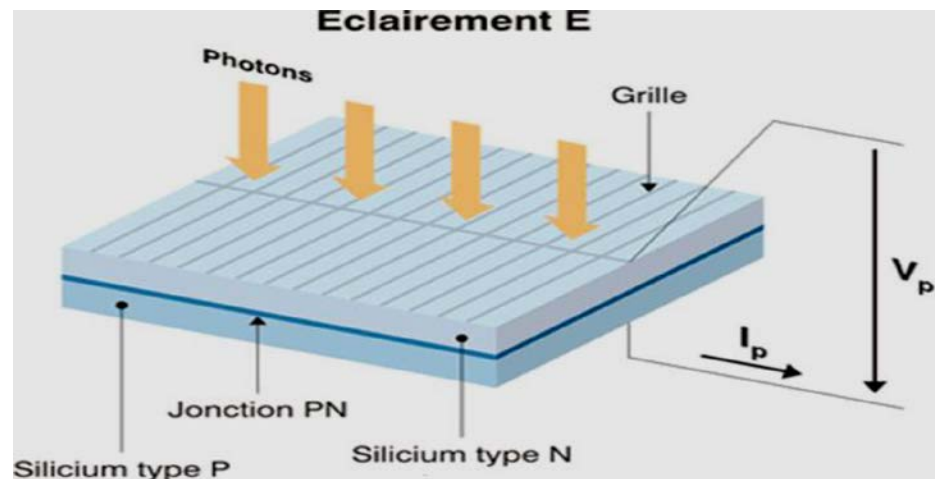


Figure (I.1): structure d'une cellule solaire [6].

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "excités" par les photons constituant la lumière, sous l'action de cette excitation, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés". Ce principe est illustré sur la figure I.2.

Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique, sinon les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible qui varie entre 0.3V et 0.7V en fonction du matériau et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule. [7]

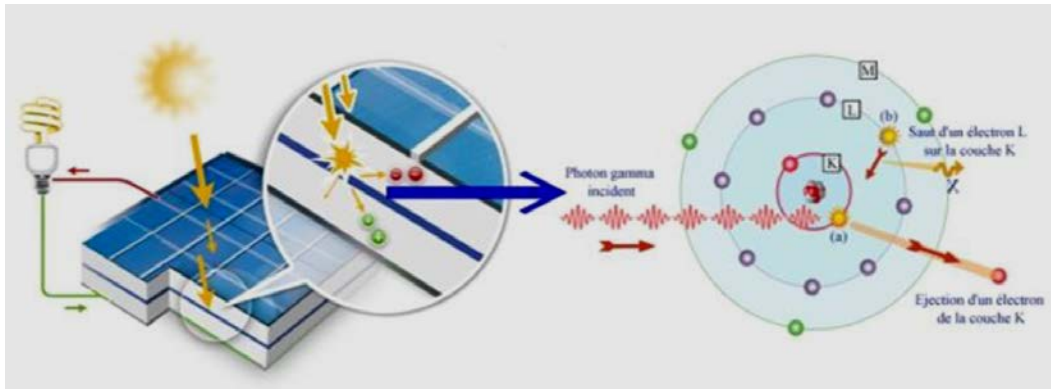


Fig. (I.2) : Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

## I.2. 2 Influence De La Température Et Du Rayonnement :

### I.2. 2.1 Influence De La Température :

La figure (I.3) montre l'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$ . Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique  $I=f(V)$ .

Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de Circuit ouvre. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution [8].

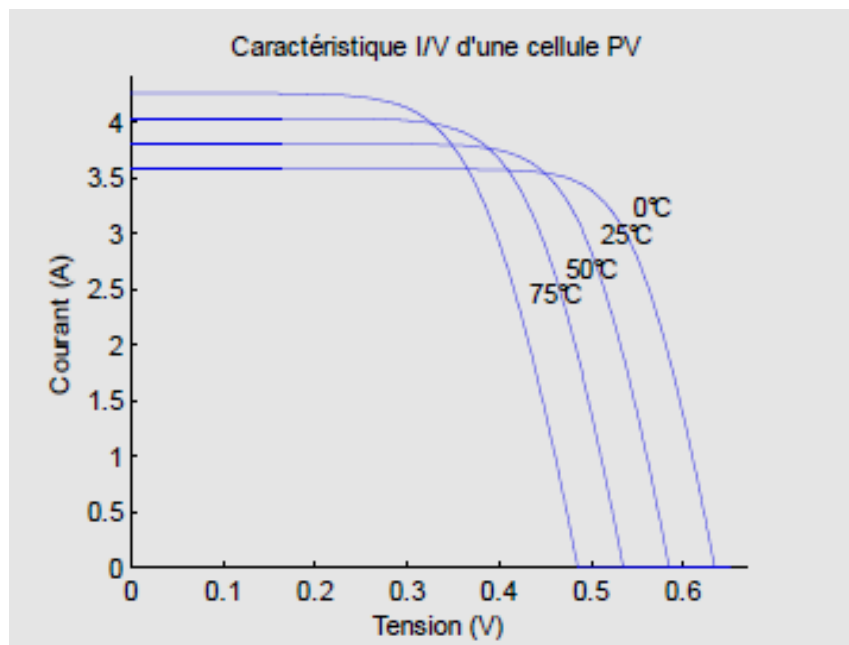


Figure (I.3) : L'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$ .

La figure (I.4) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence

de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$  [9].

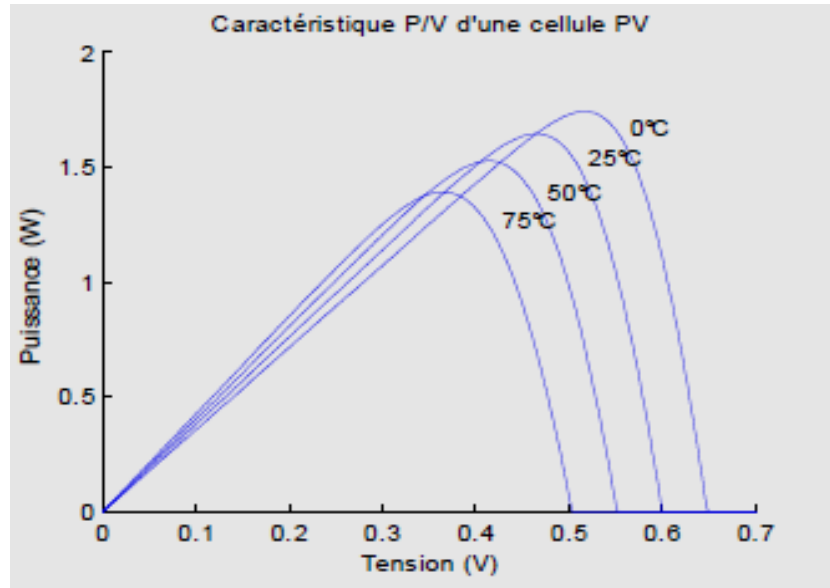


Figure (I.4) : L'influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$ .

### Le rayonnement solaire :

Le soleil émet, d'une manière uniforme, d'énormes quantités d'énergie dans l'espace. La puissance émise par le soleil est d'environ 63 500 kW par m<sup>2</sup>. Du fait de la distance entre la terre et le soleil, qui est en moyenne de 150 millions de kilomètres, cette puissance se réduit à environ 1370 W par m<sup>2</sup> à la limite de notre atmosphère. Comme cette valeur ne varie pratiquement pas [10].

### I. 2. 3. 2 Influence du Rayonnement Solaire :

La figure (I.5) montre l'influence de Rayonnement sur la caractéristique  $I=f(V)$ .

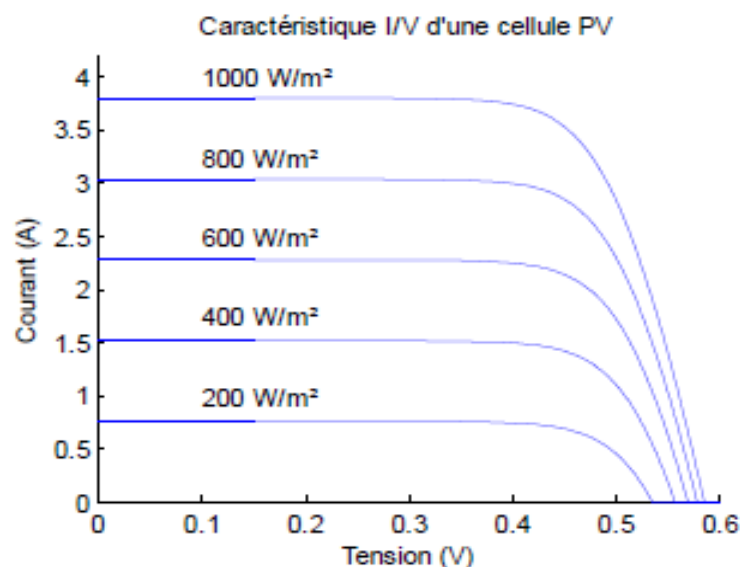


Figure (I.5) : Caractéristique  $I/V$  d'une cellule PV pour différents niveaux de rayonnement.

La figure (I.6) montre l'influence de Rayonnement sur la caractéristique  $P=f(V)$ .

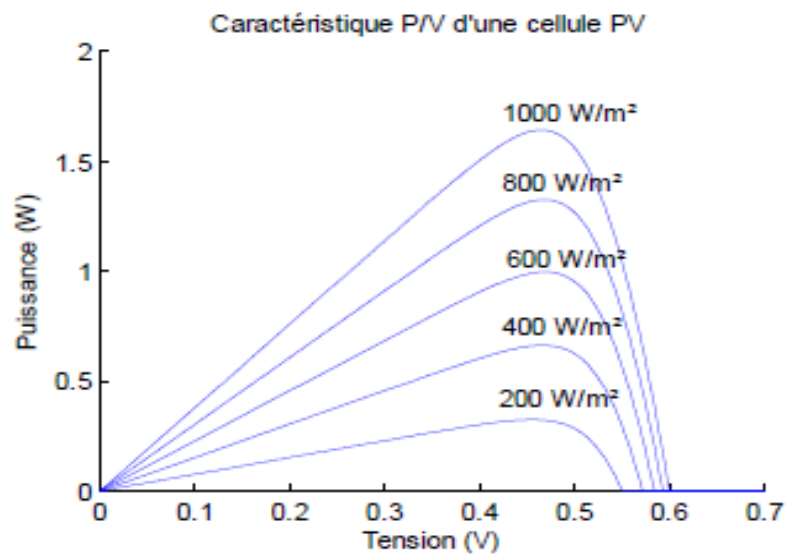


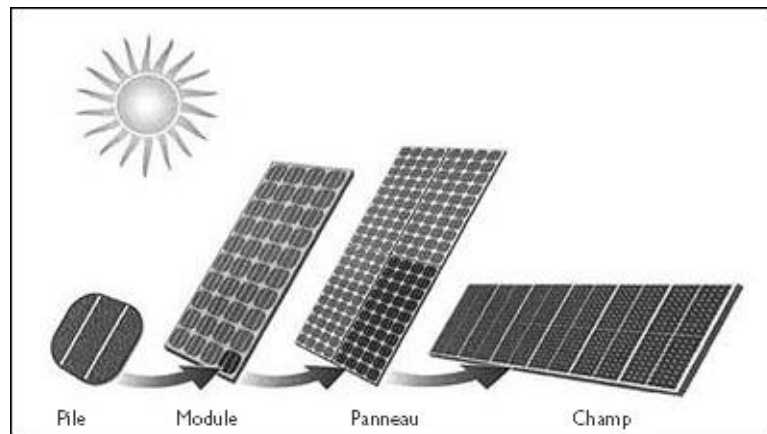
Figure (I.6): Caractéristique P/V d'une cellule PV pour différents niveaux de rayonnement.

### I. 3 Panneau photovoltaïque :

Le panneau PV ou (champ PV) sur la figure I.7 se compose de plusieurs modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement et température. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [11].

L'orientation plein Sud des modules permet de capter un maximum de lumière au cours de la journée et résulte en un pic de production autour de midi. L'inclinaison joue un rôle très important pour attirer le maximum de flux solaire, les expériences ont montré qu'il suffit incliner le module d'un angle de 30 degrés pour obtenir un meilleur rendement. [12]

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 tous, Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie [13-16].



La figure (I.7) représente les différentes composantes d'un champ photovoltaïque.

### I. 3. 1 Cellules PV en série :

- SCHEMA ELECTRIQUE :

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 [17].

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 [17].

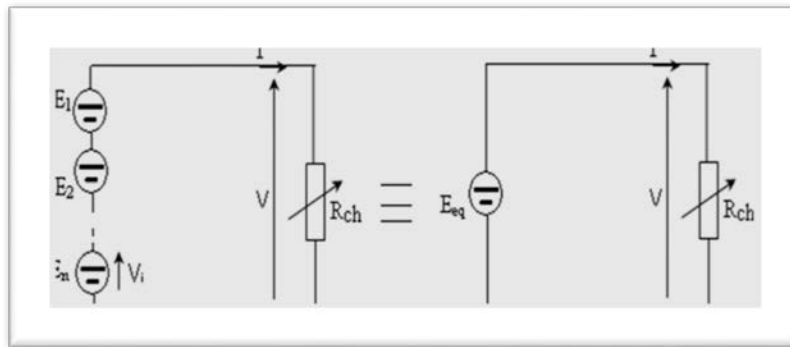


Figure (I.8) : schéma électrique d'une cellule en série.

- **Caractéristique Courant – Tension:**

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

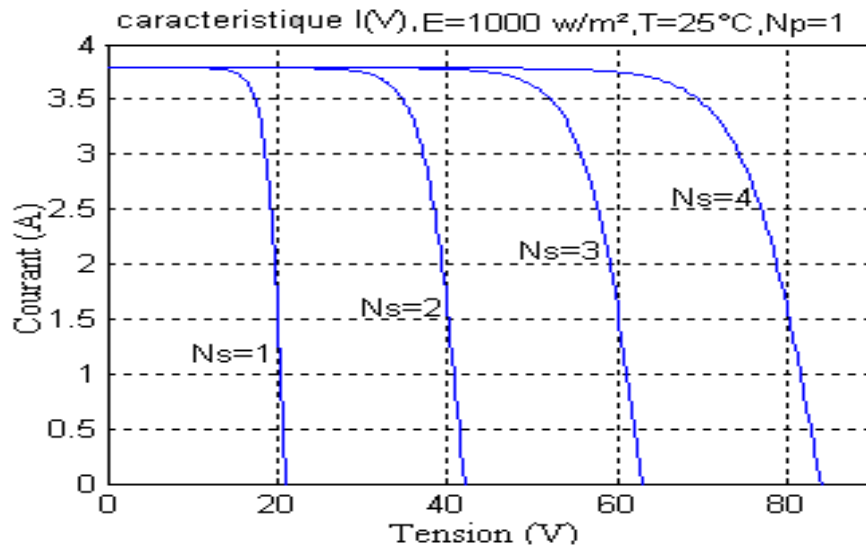


Figure (I.9) : Caractéristique de nombre des modules en série.

### I. 3. 2 Cellules En Parallèles:

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[17].

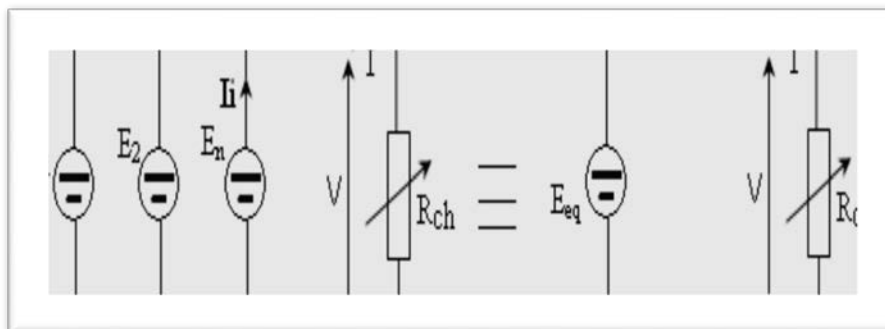


Figure (I.10): schéma électrique d'une cellule en Parallèle.

- **Caractéristique Courant– Tension:**

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

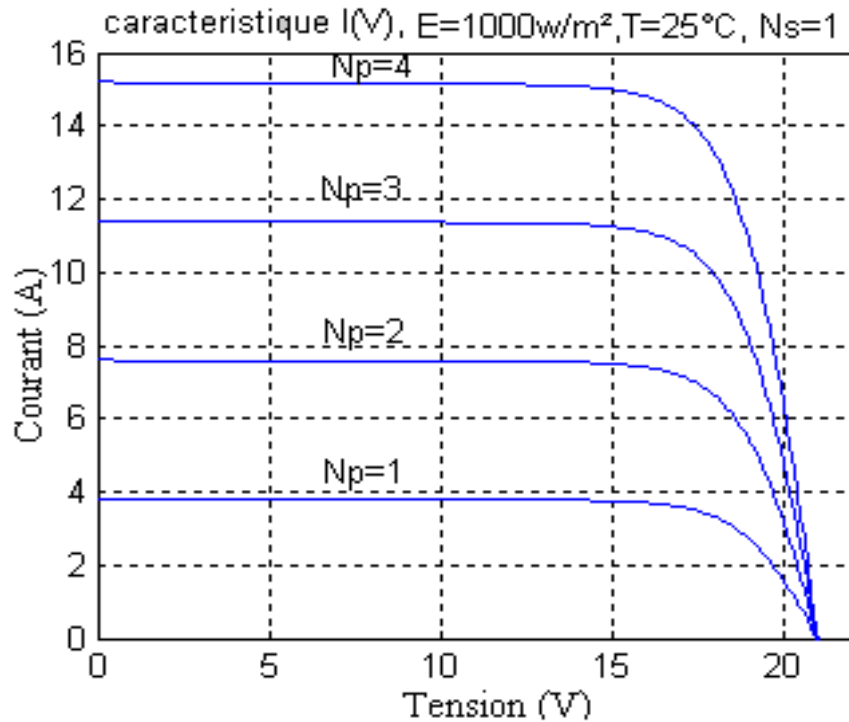


Figure (I.11) : Caractéristique de nombre des modules en parallèle.

#### I.4. Générateur photovoltaïque et ses performances :

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement.

Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle nuit.

Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le Système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu [18].

Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est converti à l'aide d'un onduleur en courant alternatif.

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que: la puissance, le courant de court-circuit  $I_{CC}$  ou la tension en circuit ouvert  $V_{c0}$

Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules PV en série et / ou en parallèle pour obtenir une puissance, un  $I_{CC}$  et un  $V_{c0}$  désirés [18].

## I.5.MODELE ELECTRIQUE DU CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE :

### I. 5. 1 SCHEMA ELECTRIQUE EQUIVALENT :

#### Modèle Cellule idéale :

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (I.12), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire e idéale [19].

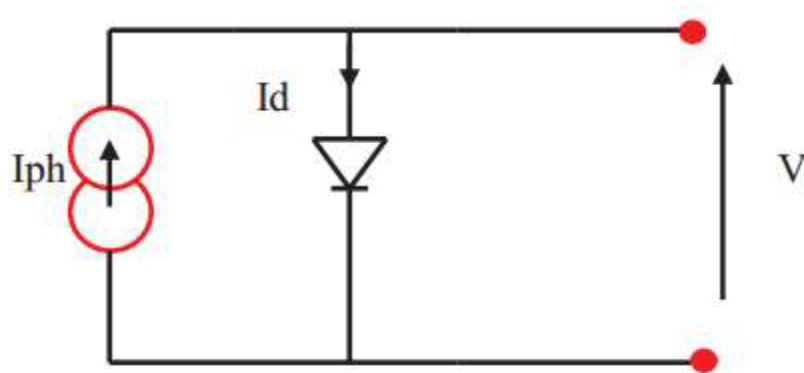


Fig. (I.12): Schéma équivalent d'une cellule idéale.

- Les équations retenues de ce modèle sont:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad \text{I.1}$$

- Le courant  $I_{ph}$  est assimilé au courant  $I_{sc}$  avec  $V_{pv} = 0$ , courant de court-circuit obtenu en court ci cuitant la charge.

$$I_{ph} = I_{sc} = E/E_{ref} \quad \text{I.2}$$

E: L'éclairement absorbé par la cellule

$E_{ref}$  : L'éclairement de référence (1000 w/m<sup>2</sup>)

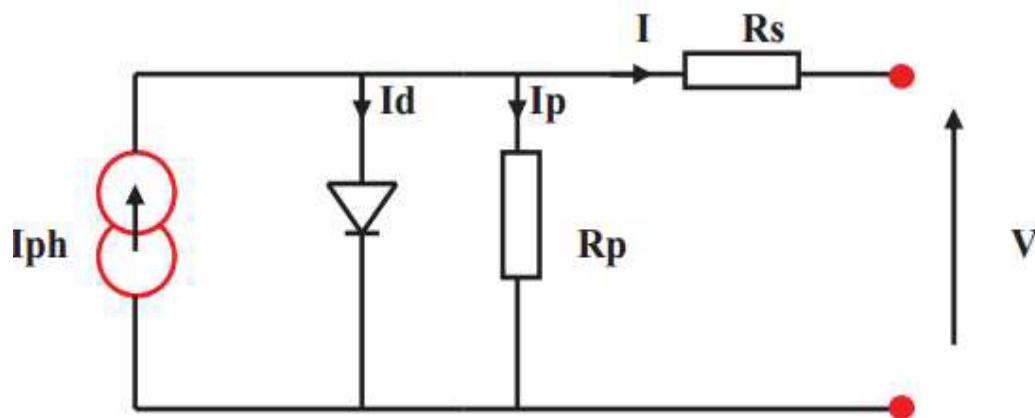
$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right)$$

I.3

$I_0$  : Courant de saturation inverse de la diode

**Modèle Cellule réelle :**

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure (I.13). Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant ( $I_{ph}$ ) caractérisant le photo-courant, une résistance série ( $R_s$ ) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte ( $R_{sh}$ ) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à ( $R_s$ ) [20].



**Fig. (I.13): Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.**

Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à exponentiel simple.

- Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \quad \text{I.4}$$

$I_{pv}$ : Courant généré par la cellule photovoltaïque

$I_{ph}$ : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

$I_d$ : Le courant circulant dans la diode.

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{v_d}{v_t}} - 1 \right)$$

**I.5**

$$I_0 = I_{0r} \left( \frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left[ \frac{E_g}{BK} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] - 1} \quad \text{I.6}$$

$I_{0r}$  : est le courant de court-circuit de la cellule à la température de référence  $T_n$  et l'éclairement de référence

$T$  : Température de la jonction des cellules PV [°K]

$T_n$  : Température de référence des cellules PV [°K]

$B$  : facteur d'idéalité de la jonction

$E_g$  : Énergie de gap [ev]

$R_s$  : résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, Ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules.

$V_{pv}$  : La tension de sortie.

$I_p$  : Le courant circulant dans la résistance  $R_p$ .

$R_p$  : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les

Les résistances  $R_s$  et  $R_p$  sont calculées par une boucle de programmation voir l'annexe (A.1)

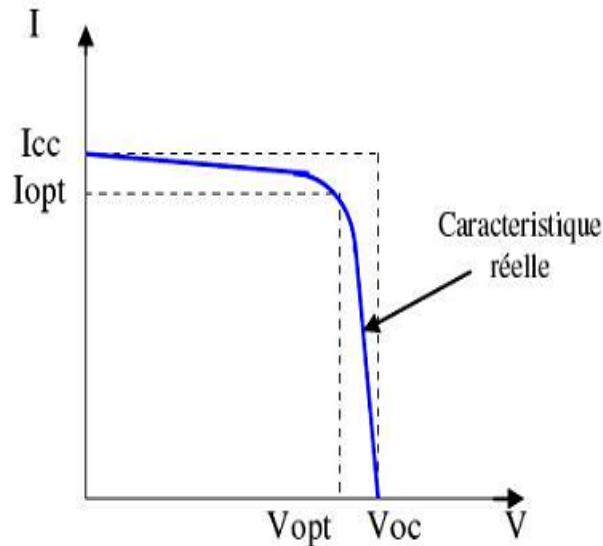
En substituant les équations (I.5 ; I.6) dans l'équation (I.4) le courant IPV devient Donc :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\left( \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t} \right) - 1} \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_p} \quad \text{I.7}$$

### I. 5. 2 CARACTERISTIQUES *COURANT – TENSION* :

La figure (I.14) représente la courbe  $I = f(V)$  d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $250\text{C}$ .



**Figure (I.14) : Caractéristique  $I = f(V)$  d'un module photovoltaïque.**

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point  $P_m$  où la puissance se trouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée.

Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point  $P_m$  [21].

La figure (I.15) présente la caractéristique  $I=f(v)$  d'un schéma Equivalent de la cellule photovoltaïque.

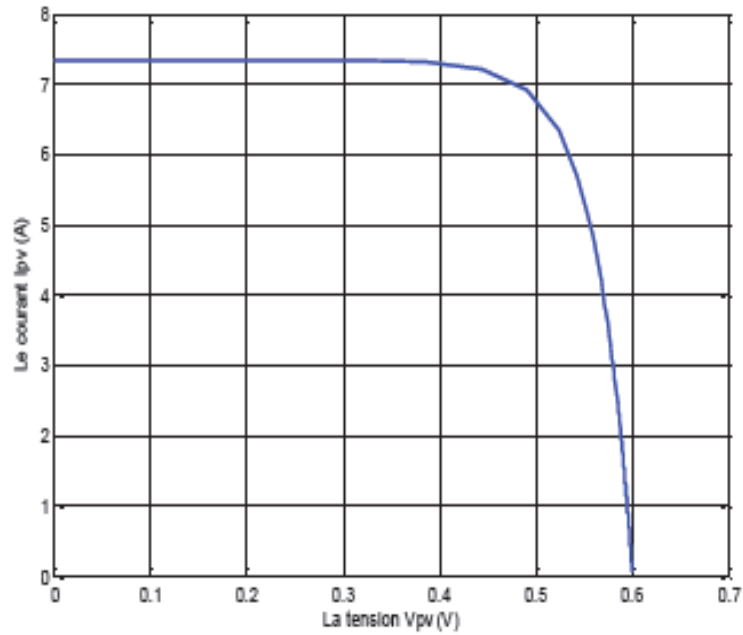


Figure (I.15) : Caractéristique  $I = f(V)$  d'un schéma Electrique Equivalent de la cellule PV.

### I. 5. 3 CARACTERISTIQUES PUISSANCE – TENSION :

La figure (I.16) présente la caractéristique  $I=f(v)$  d'un schéma Equivalent de la cellule photovoltaïque.

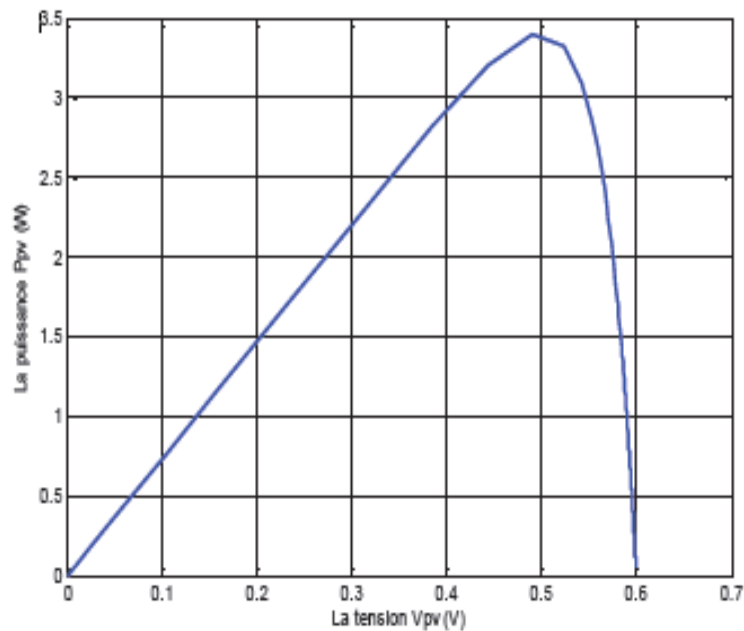


Figure (I.16) : Caractéristique  $I = f(V)$  d'un schéma Electrique Equivalent de la cellule PV.

## I. 6 ENSEMBLE PANNEAU – BATTERIE :

### I. 6. 1 Caractéristiques électriques (I(V) et P(V)) :

La figure (I.17) illustre un couplage direct entre un GPV et une batterie. Une diode de blocage est utilisée pour empêcher la batterie de se décharger sur le GPV si la tension de ce dernier est inférieure à la tension de la batterie ou pendant la nuit [22] [23].

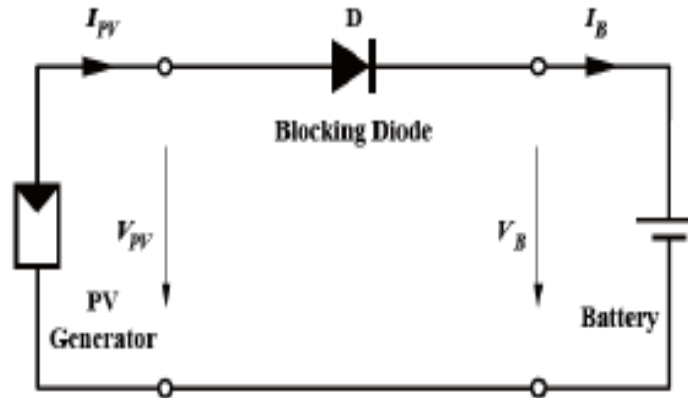


Figure (I.17): Couplage directe entre un GPV et une batterie.

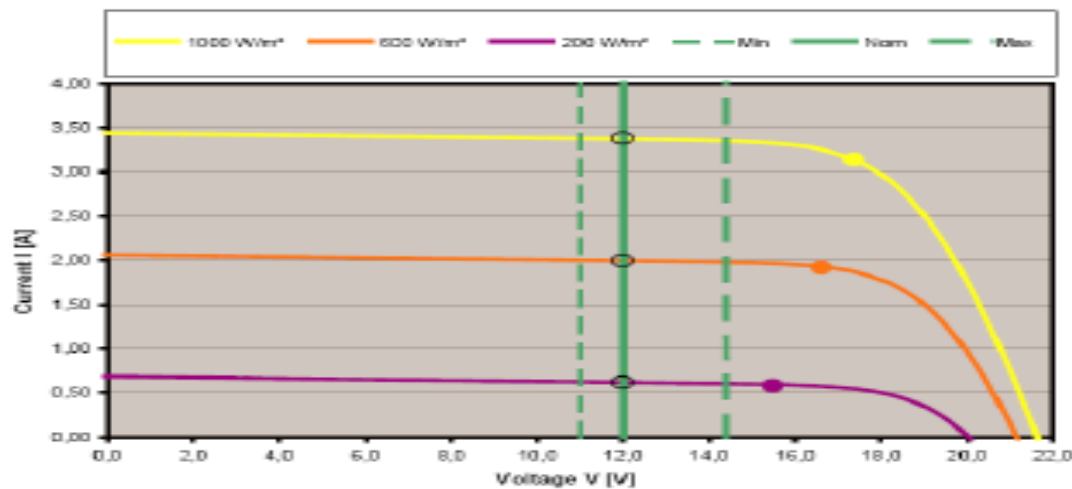


Figure (I.18): Caractéristiques I/V d'un GPV et d'une batterie.

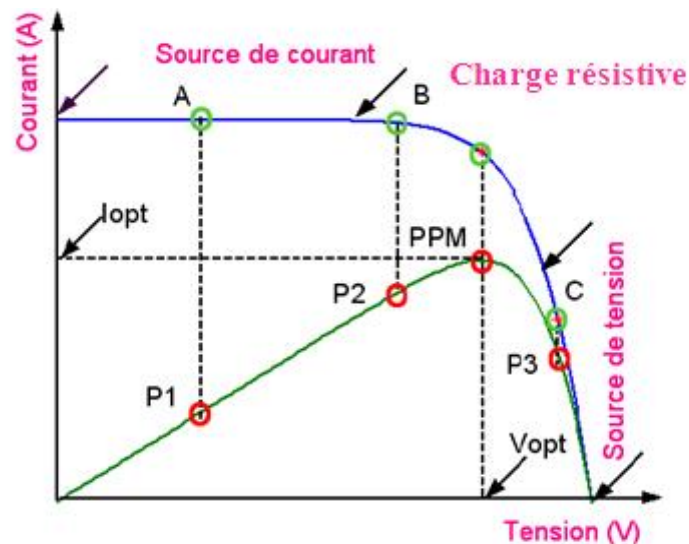
La courbe caractéristique d'une batterie idéale peut être représentée par une ligne droite (source de tension). Elle varie en fonction d'état de charge sur une certaine plage de tension, par exemple entre 11.7V et 14.4V dans le cas d'une batterie au plomb d'une tension nominale de 12V. La Figure 4.7 représente les courbes caractéristiques d'un GPV ainsi que celle d'une batterie pour trois niveaux d'éclairage. On remarque que les trois points de fonctionnement sont loin du MPP. Dans ce cas, un étage d'adaptation est requis (en d'occurrence un convertisseur buck) pour pouvoir tirer le maximum de puissance que le GPV est apte à fournir.

Trois types de charges DC typiques existent : une charge purement résistive, une charge de type source de tension et une charge de type source de courant. Sur la figure (1. 14), nous avons représenté les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'un générateur PV ainsi que les caractéristiques  $I(V)$  des trois types de charges [5].24

Tout d'abord, nous pouvons identifier le point de fonctionnement où la puissance fournie par le générateur est maximale pour un courant optimal et une tension optimale. Ce point est nommé MPP (Maximum Power point). Ensuite, nous remarquons le point d'intersection entre les caractéristiques  $I(V)$  du générateur et celles des trois types de charges :

1. point A pour une charge en source de courant,
2. point B pour une charge résistive,
3. point C pour une charge de type source de tension,

Pour ces trois points, la puissance fournie par le générateur est respectivement  $P1$ ,  $P2$  et  $P3$ , comme l'illustre-la figure (I.17), correspondant à des valeurs de puissance inférieures à la puissance maximale disponible. Donc une perte d'une partie de la puissance délivrée par le générateur PV implique, des pertes de production énergétique importantes.



**Fig. (I.19) : Caractéristique  $I(V)$  et  $P(V)$  établissant le principe du point de puissance maximal (MPPT).**

### I.6. 2 Liaison direct source-Charge :

Actuellement, il reste encore beaucoup d'applications où une connexion directe entre un GPV et une charge est effectuée.

Ce choix est principalement lié à sa simplicité de mise en œuvre, son coût minimal et sa fiabilité. En termes de rendement, même si la Puissance du GPV est choisie judicieusement par rapport à la charge, ce type de connexion souffre souvent d'une mauvaise adaptation électrique et présente des pertes importantes de production d'énergie.

En effet Si cette charge était une batterie, lorsque le module n'est pas éclairé, celui-ci pourrait fonctionner en tant que récepteur, la batterie pourrait donc se décharger sur le générateur PV et en plus l'endommager irréversiblement. Ainsi, pour éviter cette situation, la connexion doit être assurée à l'aide d'une diode anti-retour placée entre le GPV et la charge, comme illustrée en figure (II.18).

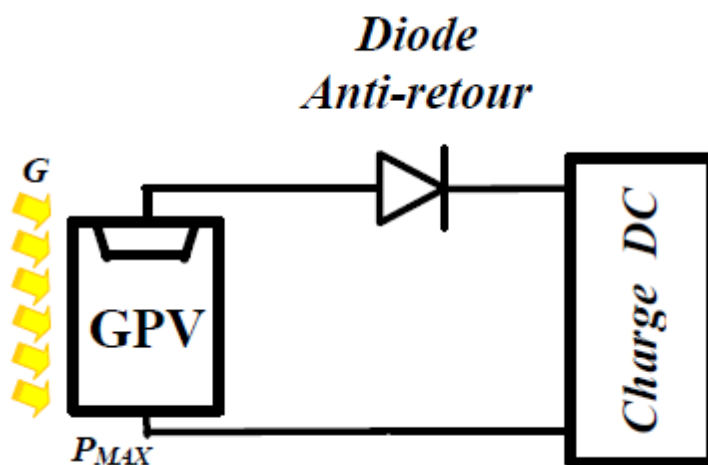


Fig. (I. 20) : liaison directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour.

L'autre inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de limitation et/ou réglage de la tension de la batterie. Le transfert de  $P_{max}$  disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti. [25-29]

Bien sûr, il faut s'assurer auparavant que la charge accepte bien la connexion directe au générateur de puissance. Car, le GPV est une source d'énergie continue qui ne peut être connectée qu'à une charge de nature continu (DC). Pour la connexion d'un GPV à une charge alternative, nous avons obligatoirement besoin d'un étage d'adaptation de convertisseur (DC/DC). [30]

Un GPV peut être connecté directement à trois types de charges DC :

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

La figure II.2 représente les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'un GPV en fonction des 3 types de charges DC, ainsi que de leur caractéristique  $I(V)$  :

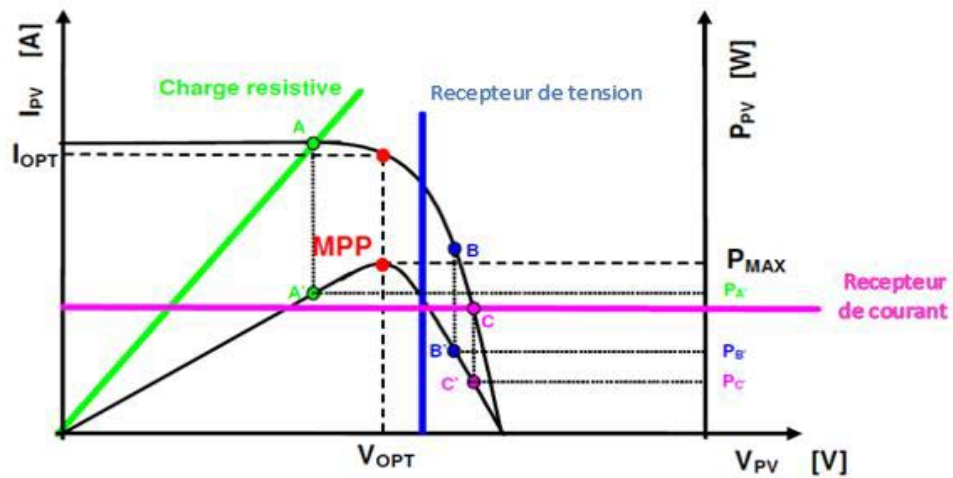


Fig. (I. 21) : Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion directe.

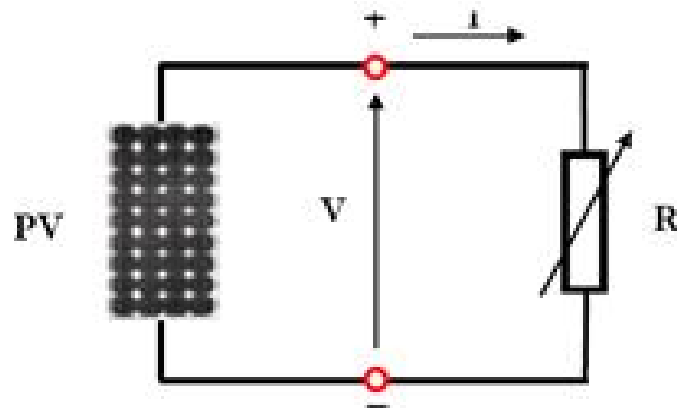


Fig. (I.22) : Schéma électrique d'une liaison directe PV-charge.

L'inconvénient de cette configuration est qu'elle n'offre aucun type de limitation et/ou réglage de la tension de la batterie. Le transfert de Puissance maximale disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti.

### I. 6. 3 LIAISON A TRAVERS un étage d'adaptation GPV-Charge:

Nous avons vu plus tôt qu'un GPV présente des caractéristiques non linéaires. Ces caractéristiques dépendent entre autres du niveau de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. [29]

Ainsi, l'un des intérêts à introduire un étage d'adaptation comme indiqué sur la figure I.21 est d'assurer que le transfert d'énergie est toujours possible et qu'il peut s'effectuer dans des conditions de fonctionnement optimales pour la source PV et la charge. L'autre intérêt est d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge. [31]

La technique adoptée classiquement consiste à utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge comme décrit dans la figure (I.21), ci-dessous. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale disponible.

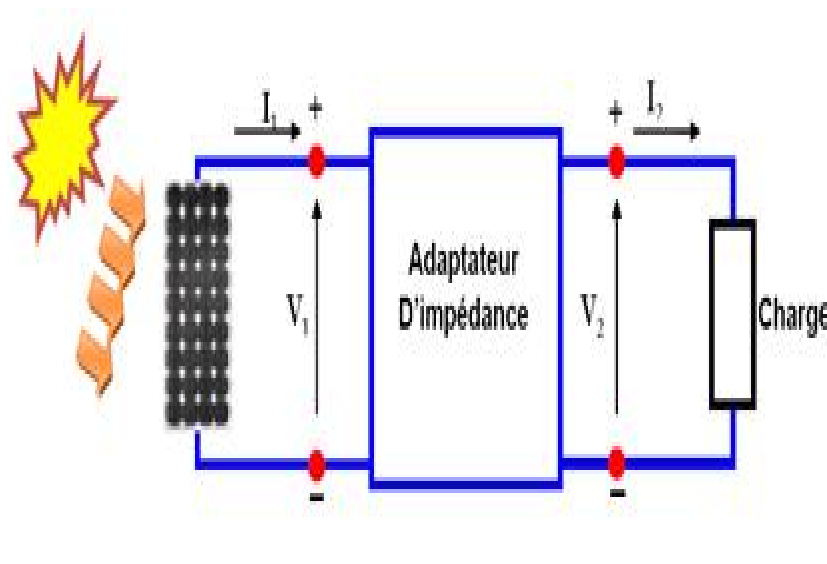


Fig.(I.23) : Etage d'adaptation d'un générateur PV-charge.

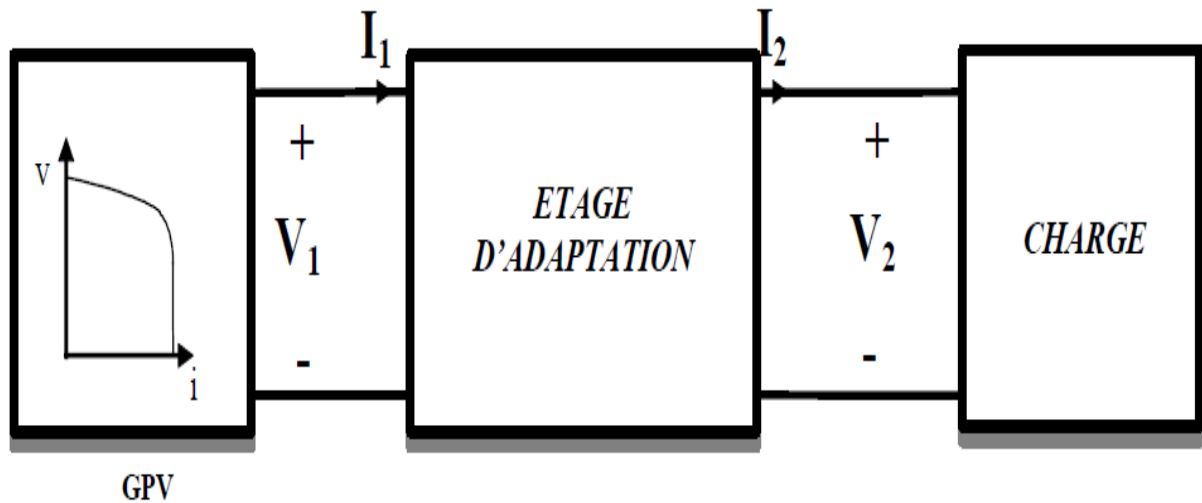


Fig. (I. 24) : Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.

Aujourd'hui, on peut trouver deux types d'étages d'adaptation électroniques distincts commercialisés :

✓Le premier type permet de connecter le GPV à une charge continue telle qu'une batterie. Il fait appel à des convertisseurs DC-DC. Ce type d'architecture est la plupart du temps utilisé pour un fonctionnement en site isolé (hors réseau, Off-Grid en anglais).

✓Le deuxième type, c'est le cas de toutes les charges ayant besoin des tensions alternatives. Dans ce cas, on fait appel à un second type d'architecture permettant d'effectuer une conversion continu-alternatif (DC-AC), généralement un onduleur.

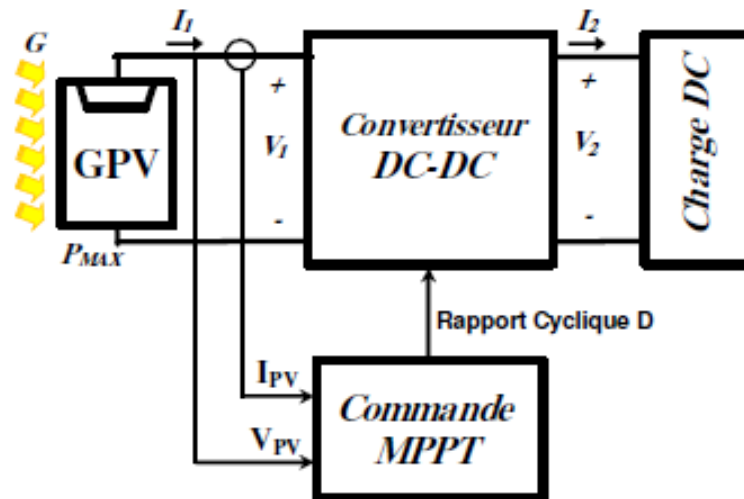
En pratique, pour que l'étage d'adaptation joue le rôle d'interface idéale (sans pertes) entre les deux éléments, plusieurs conditions sont à respecter :

✓Le type d'action de contrôle sur le port d'entrée ne doit pas générer des pertes en régime statique ou transitoire.

✓Le transfert de la puissance du PV ne doit pas être minimisé par les diverses pertes liées au fonctionnement de l'étage d'adaptation.

L'étage d'adaptateur est le plus souvent un hacheur, grâce à sa commande, on peut à chaque instant ouvrir ou fermer l'interrupteur pour changer le point de fonctionnement, l'adaptation se fait par la variation du rapport cyclique de la commande de l'interrupteur du convertisseur. [25-30]

Pour que le générateur PV fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge (voir la figure I.22).



**Fig. (I.25) : chaîne élémentaire de conversion PV à base d'un transformateur DC contrôlé par une commande MPPT [33].**

La figure(I.23) montre le schéma de principe décrivant les fonctions présentes dans un étage d'adaptation pour GPV réel conçu. Le principe de la commande MPPT délivre l'action de contrôle appropriée afin de suivre le point de puissance maximal en chaque instant.

Le choix de la structure de conversion est effectué en fonction de la charge DC à alimenter. Nous avons besoin de structures de conversion en fonction de la caractéristique de cette charge [32]. Par exemple, si nous supposons que la charge est une batterie au plomb, ce sont ses plages de tension de charge et de décharge qui vont établir la structure la plus adéquate.

#### **I. 6.4 Liaison à travers un convertisseur statique contrôlé par une MPPT :**

Pour assurer le fonctionnement d'un générateur GPV à son point de puissance maximale MPP, on incorpore un hacheur entre le générateur photovoltaïque et la batterie. Des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés pour minimiser l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence qui est variable en fonction des conditions climatiques.

Cela permettra d'une part d'extraire la puissance maximale du générateur photovoltaïque, et d'autre part de modifier l'impédance d'entrée du générateur pour qu'il y ait adaptation d'impédance entre la source et la charge.

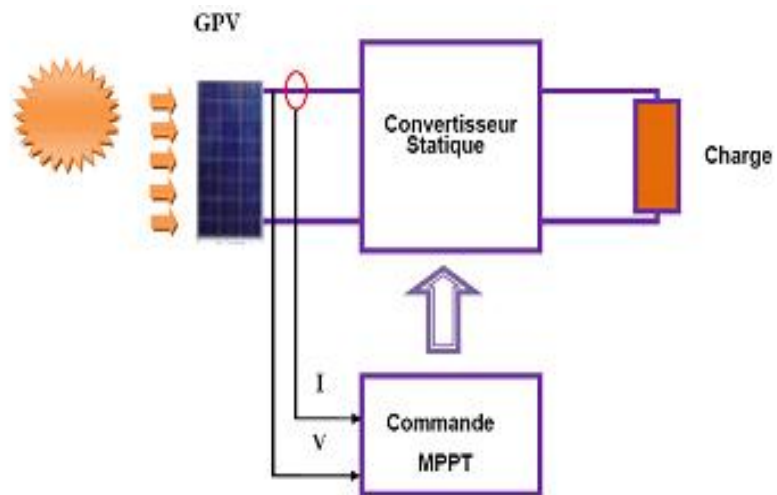


Fig. (I.26) : Incorporation d'un convertisseur statique commandé par un contrôleur MPPT.

**CONCLUSION :**

Ce chapitre s'est consacré à présenter les différents composants d'un système photovoltaïque. On a étudié le principe de fonctionnement d'une cellule PV et ces paramètres. En suite on fait un rappel sur le générateur PV et leurs performances.

Dans le chapitre prochain, on présentera une étude sur les convertisseurs DC-DC et leurs commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

# Chapitre II

## Généralité sur la commande MPPT

## II.1. Introduction :

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un *Maximum Power Point Tracker* est utilisé pour contrôler les variations de la caractéristique courante tension des cellules. Nous avons vu la caractéristique d'une cellule, et l'évolution de cette caractéristique en fonction de l'éclairement ou de la température.

Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes du MPPT selon le type d'implémentation électronique: analogique, numérique ou mixte.

Dans ce chapitre nous présenterons le principe et les différents types de la commande MPPT.

La figure (II.1) présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant de stocke l'énergie pour une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension.

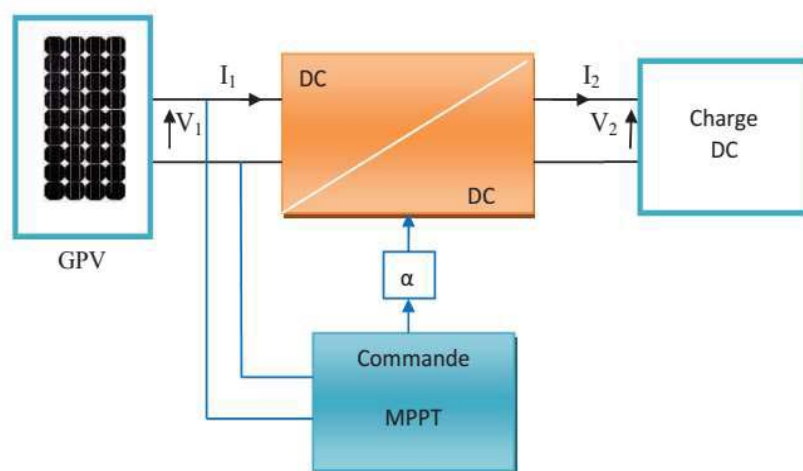


Fig. (II.1) : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé [34].

## II. 2 Théorie de la commande MPPT :

La théorie relative à la maximisation de la puissance produite d'un panneau solaire grâce aux grandeurs physiques agissant sur la caractéristique électrique courant tension (I-V), nous permet de créer une technique d'utilisation plus performante, et plus efficace pour extraire un point de puissance maximale d'une manière permanente sans perte dans l'énergie transférée du générateur photovoltaïque vers la charge. Pour obtenir ce résultat on utilise un système d'adaptation basé sur la commande MPPT.

Dans ce troisième chapitre on donnera une présentation et description du système MPPT.

Les premières utilisations du MPPT remontent à 1968 dans le cadre d'applications spatiales ayant pour générateur électrique des panneaux photovoltaïques. Le développement du MPPT a constitué un thème techniquement attrayant, si bien que finalement, un grand nombre de procédures et techniques ont été développés. Elles varient en complexité, capteurs nécessaires, vitesse de convergence, coût, efficacité, matériel pour la réalisation, etc.

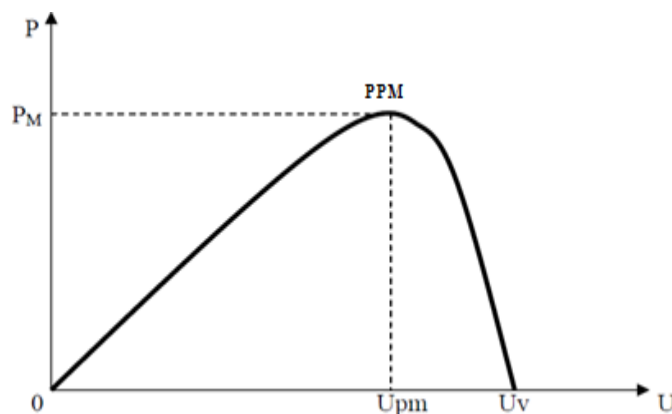


Figure (II.2) : Courbe caractéristique de puissance d'un GPV [35].

### II. 2. 1 principe de la commande MPPT :

Un MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant.

La figure (II.3) représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur.

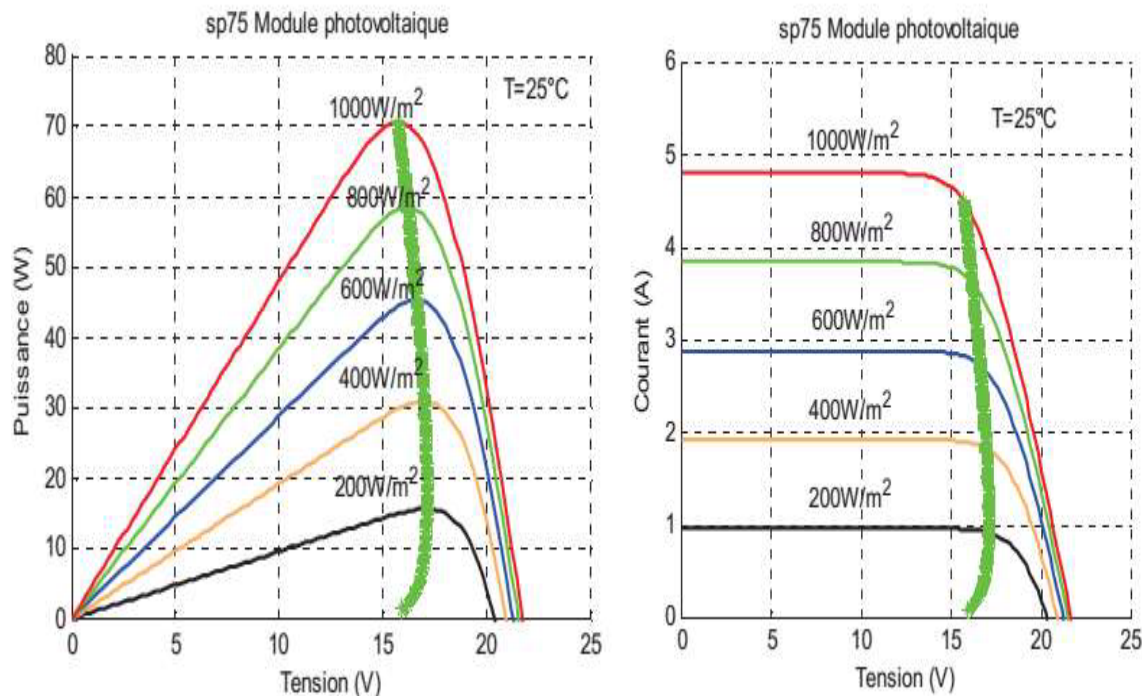


Fig (II.3) : La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM.

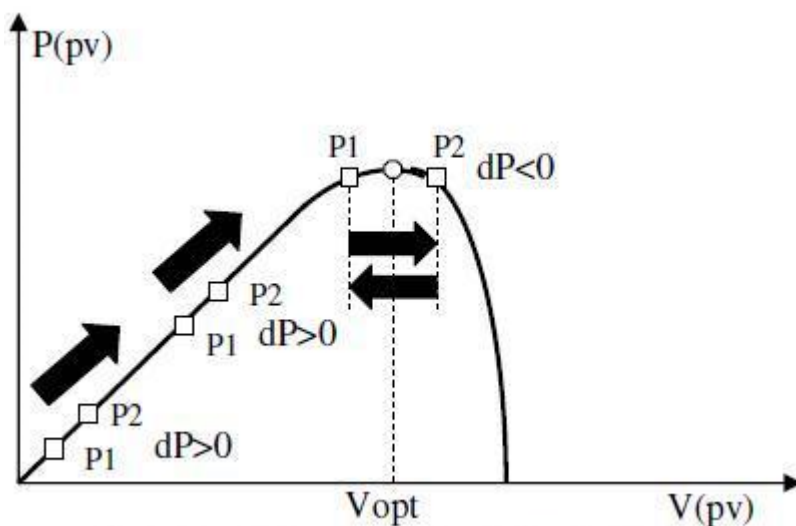


Fig. (II.4) : Principe de fonctionnement de la commande MPPT.

**Principe de recherche du point de puissance maximale (MPPT) d'un GPV :**

Des méthodes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximaux de leurs caractéristiques sans qu'à priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni quelles sont les raisons de ce changement. Pour le cas de sources énergétiques comme notre panneau solaire cela se traduit

par des points de puissance maximale. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglais (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximale (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

La figure II.5 représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT. Comme présenté sur la figure, la commande MPPT est associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de faire une adaptation entre le GPV et la batterie. Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC, pour que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale ( $P_{max}$ ) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la batterie. La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le GPV à sa valeur optimale de fonctionnement quelles que soient les fluctuations atmosphériques [44].

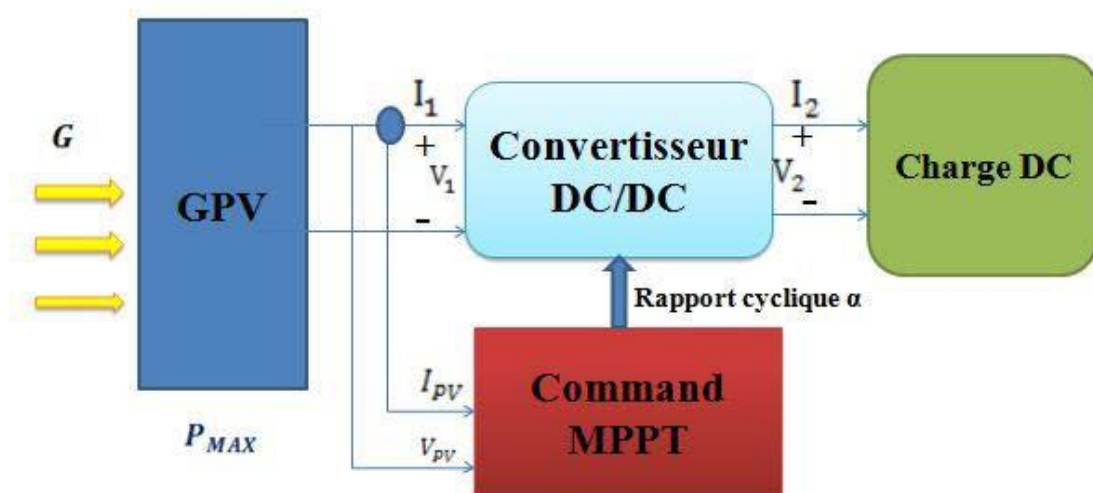


Figure (II.5) : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

Par définition, une commande MPPT permet de piloter le convertisseur statique (CS) reliant la charge (Exemple : une batterie) et le GPV de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge à chaque instant, induisant une amélioration globale du rendement du système. En effet, lorsque le GPV est connecté à une charge, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de sa caractéristique électrique courant-tension ( $I-V$ ) avec celle de la charge. Ce point de fonctionnement varie car les conditions de travail varient et/ou la charge varie à tout moment. Car, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. La figure II.4 représente la trajectoire du point de puissance maximale (MPP) produite par le générateur [35-46].

**Classification des Commandes MPPT :**

Il est possible de classer d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles exécutent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT [46].

**Classification des commandes MPPT selon le type de recherche :****A/ MPPT Indirect :**

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées ( $I_{cc}$  ou  $V_{co}$ ), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur.

Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques.

**B/ MPPT Direct :**

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation.

Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui, est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables.

D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction.

### II. 2. 2 Exemple illustratif :

La figure (II.6) montre un générateur photovoltaïque avec son étage d'adaptation constitué d'un convertisseur abaisseur (buck). Pour assurer la protection du GPV, nous devons inclure la diode anti-retour  $D_1$ , celle-ci empêche la batterie de se décharger pendant la nuit à travers la diode parasite  $D_p$  du MOSFET  $M$ .

Par la commande MLI, le convertisseur buck génère des courants pulsés sur le port d'entrée. Afin d'éviter que les courants pulsés affectent le GPV et pour assurer que le courant délivré par le générateur photovoltaïque soit continu, il est nécessaire de placer un condensateur de Filtrage  $C_1$  entre le générateur photovoltaïque et le convertisseur. Un compromis doit être fait sur la valeur de ce condensateur devant assurer d'un côté un filtrage suffisant et, de l'autre, ne devant pas avoir une valeur trop élevée pour ne pas ralentir trop

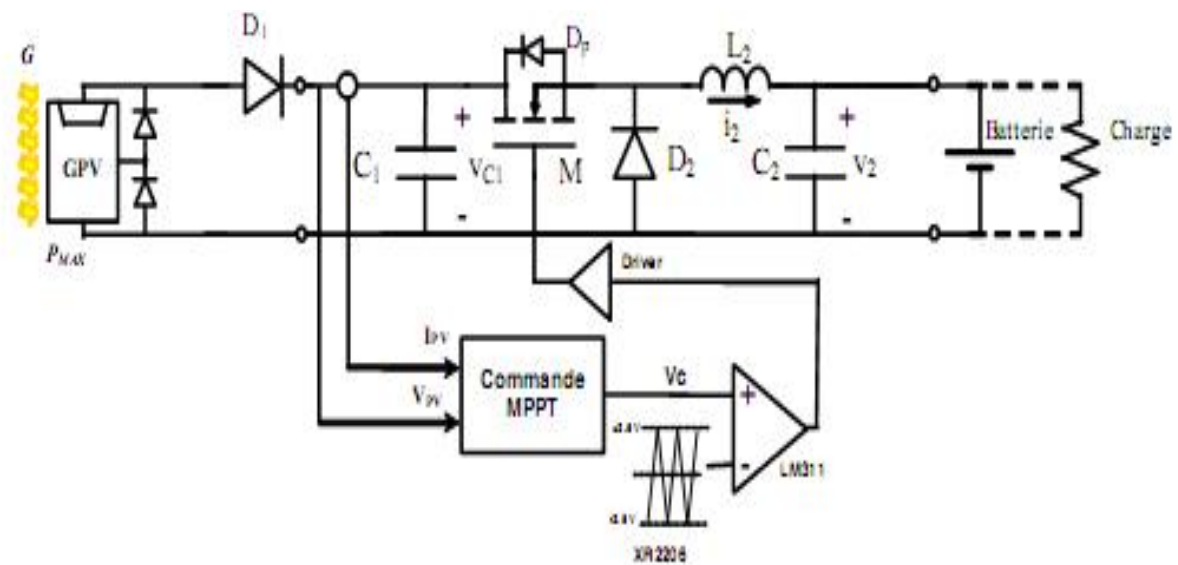


Fig. (II.6) : Exemple de réalisation d'un étage d'adaptation abaisseur d'un GPV avec fonction MPPT fonctionnant sur batterie ayant  $V_{bat} < V_{0c}$ .

## II. 3 Différents types de la commande MPPT :

Dans la recherche du point de fonctionnement optimal (Maximum Power Point Tracking – ‘MPPT’-) il s’agit de suivre continûment l’optimum de la puissance délivrée par le générateur PV.

Dans la commande MPPT Il ya trois méthodes: analytique, analogique et numérique.

### II. 3. 1 Méthode analytique :

L’expression analytique de la puissance délivrée par le G.PV est donnée par:

$$P = IV = I_{sc} \left[ 1 - C_1 \left\{ \exp\left(\frac{V}{C_2 V_{co}}\right) - 1 \right\} \right]$$

Avec:

C1 ET C2: des constantes calculées à chaque simulation.

En dérivant l’expression (2.7) par rapport à V, on obtient alors l’équation suivante :

$$\frac{dP}{dV} = I_{sc} + C_1 \left[ 1 - I_{sc} \left( 1 + \frac{V}{C_2 V_{co}} \right) \exp\left(\frac{V}{C_2 V_{co}}\right) \right].$$

Ces points optimaux sont obtenus en résolvant l’équation (2.8) pour  $V=V_{max}$

$$I = I_{sc} \left[ 1 - C_1 \left[ \exp\left(\frac{V}{C_2 V_{co}}\right) - 1 \right] \right].$$

$$C_1 = \left( 1 - \frac{I_m}{I_{cc}} \right) \exp\left(\frac{-V_m}{C_2 V_{co}}\right) \dots\dots\dots$$

$$C_2 = \frac{\frac{V_m}{V_{co}} - 1}{\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}}\right)} \dots\dots\dots$$

$$\frac{dP}{dV} \Big|_{V=V_{max}} = 0$$

$$\Rightarrow I_{sc} + C_1 \left[ 1 - I_{sc} \left( 1 + \frac{V_{max}}{C V_{oc}} \right) \exp\left(\frac{V_{max}}{C V_{oc}}\right) \right] = 0$$

Une fois les valeurs de  $V_{max}$  obtenu, les valeurs de  $I_{max}$  et  $P_{max}$  seront calculées en utilisant les expressions (2. 11) et (2. 12).

Avec:

$I_m$ : Le courant max délivré par le générateur.

$V_m$ : La tension max du générateur.

$V_c$ : La tension de circuit ouvert du générateur

### II. 3. 2 Méthode de recherche numérique :

Cette méthode est itérative, elle est basée sur le principe suivant:

A partir d'un certain point initial de fonctionnement ( $V_o$ ,  $P_o$ ), on fait varier la tension  $V$  d'une valeur  $\Delta V$  relativement grossière. Après un laps de temps  $\Delta t$ , afin de permettre la stabilisation du nouveau point de fonctionnement, on mesure la puissance  $P$  et on calcule la différence  $\Delta P$  entre la nouvelle valeur et la valeur précédente:

1. Si  $\Delta P < 0$ , on procède dans la même direction avec le même pas  $\Delta V$ ,
2. Si  $\Delta V < 0$ , il faut changer la direction de variation de la tension continue en partageant par 2 le pas de la gradian.

Cette procédure est poursuivie jusqu'à ce que le pas  $\Delta V$  soit devenu suffisamment petit, et dans ce cas, le point de fonctionnement optimal est atteint.

### II. 3. 3 Méthode de recherche analogique :

Dans cette méthode, on impose une tension initiale  $V$  à laquelle sera superposée une petite variation  $\Delta V$  de forme sinusoïdale. La puissance  $P$  obtenue présente aussi une variation

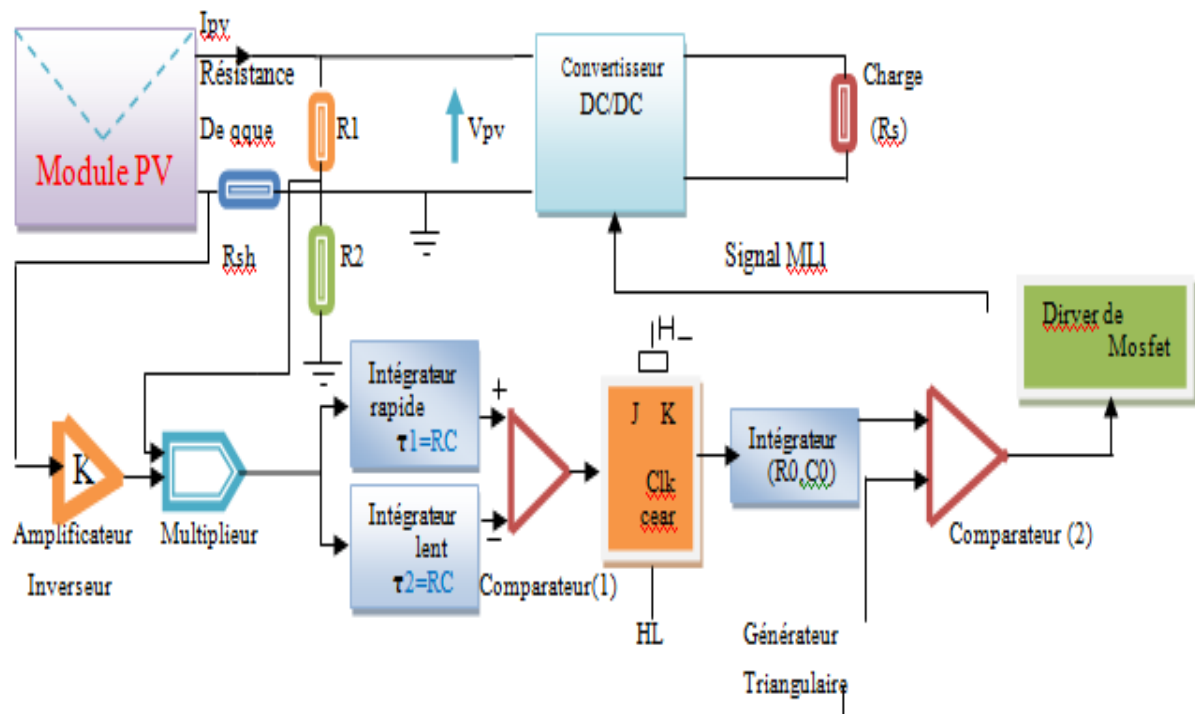
$\Delta P$ . Trois cas peuvent avoir lieu:

1. Lorsque  $V$  se trouve à gauche du point de fonctionnement optimal, le produit  $\Delta V \cdot \Delta P$  est supérieur à zéro ( $\Delta V \cdot \Delta P > 0$ ), il faut alors augmenter la valeur de  $V$ ,

2. Lorsque  $V$  se trouve à droite du point de fonctionnement optimal, le produit  $\Delta V \cdot \Delta P$  est inférieur à zéro ( $\Delta V \cdot \Delta P < 0$ ), il faut alors réduire la valeur de  $V$ ,
3. Enfin, au point de fonctionnement optimal, le produit  $\Delta V \cdot \Delta P$  s'annule ( $\Delta V \cdot \Delta P = 0$ ), la tension  $V$  représente alors la tension optimale.

Cette stratégie de recherche convient particulièrement si les circuits de commande et de réglage sont réalisés analogiquement

Sur la figure(II.7), est représenté le schéma synoptique de la commande MPPT analogique répondant à notre cahier de charge .Cette commande MPPT analogique utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale Aussi, sur la figure (II.7) est représentée la forme du signal, généré par la commande MPPT (sortie du copareteur2).



Figure(II.7) : Schéma synoptique de commande MPPT analogique.

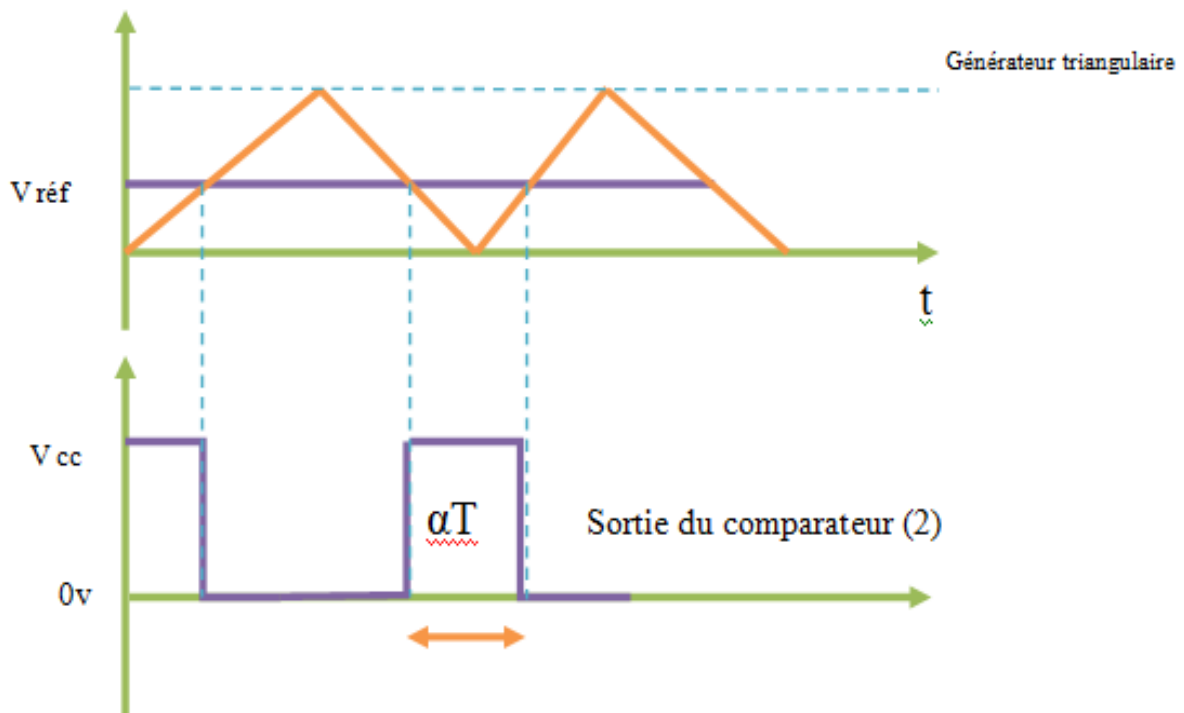


Figure (II.8) : Génération d'un signal carré à la sortie du comparateur.

**Les différents composants qui constituent cette commande MPPT sont les suivantes :**

1. **Une résistance shunt** de quelques milliohms connectée entre la masse et le pôle (-) du panneau. Cette résistance doit supporter un courant de 4,41A. La puissance dissipée à ses bornes est alors de quelques milliwatts. La tension à ses bornes l'image du courant  $I_{pv}$  fourni par le générateur PV. Vu la faible valeur de cette résistance, la chute de la tension à ses bornes est très faible. D'où la nécessité d'utiliser un amplificateur opérationnel pour amplifier cette chute de tension.
2. **Un amplificateur opérationnel** monté en inverseur de gain  $K$  de l'ordre 20, pour ramener la tension  $V$  presque à 1 V pour qu'elle soit accessible à l'entrée du multiplieur analogique.
3. **Un Pont de deux résistances  $R1$  et  $R2$**  qui permettent de prélever une fraction de la tension  $V_{pv}$  du générateur PV (une fraction de 1 V est généralement suffisante). La tension maximale du panneau ne peut dépasser 22V. Nous prenons donc le pont diviseur dans un rapport 1/12.
4. **Un multiplieur analogique** qui délivre à sa sortie, à un constant pré  $C$ , le produit du courant  $I_{pv}$  et de la tension  $V_{pv}$ . Ce produit est donc l'image de la puissance instantanée du panneau PV. Ce multiplieur doit être choisi de façon qu'il soit de borne réfection des deux signaux d'entrée et que seul le produit apparaisse à la sortie.

- 5. Deux intégrateurs RC:** un rapide de constante de temps  $\tau_1$  et l'autre lent de constante de temps  $\tau_2$ . A un instant  $t$  quelconque, la puissance, intégrateur rapide produit à sa sortie une tension  $P_r$  homogène à la puissance fournie par le panneau et l'intégrateur lent produit à sa sortie la puissance  $P_l$  qui est la même que  $P_r$  mais à un instant  $t+dt$  (puissance retardée). Donc, à d'une augmentation (diminution) de puissance à la sortie du panneau.
- 6. Un comparateur (1):** qui compare à chaque instant  $t$  la puissance  $P_r$  à celle retardée  $P_l$ . Si la puissance à la sortie du panneau augmente (diminue), le comparateur bascule vers sont état haut (bas).
- 7. Une bascule JK:** montée en bascule T (flip-flop) dont la sortie Q change d'état à chaque front descendant du signal d'horloge qui est la sortie du comparateur. dans l'environnement Orcad-Pspice, l'amplitude de la tension de sortie des circuits numérique n'attient pas la valeur d'alimentation ( $+V_{cc}$ ). Pour ce faire, nous avons intercalé à la sortie de bascule un amplificateur opérationnel en montage non-inverseur pour que la tension de la sortie varie entre 0 et  $+V_{cc}$ .
- 8. Un intégrateur (R0, C0)** dont le condensateur se charge et décharge lentement. Lorsque la bascule T bascule à l'état haut (bas), la tension à la sortie de l'intégrateur augmente (diminue) lentement.
- 9. Un comparateur(2)** permettant de générer à sa sortie une tension rectangulaire modulée en largeur (rapport cyclique variable: signal MLI). Ceci est le résultat de la comparaison entre le signal à la sortie de l'intégrateur et celui généré par un générateur triangulaire, ou en dent de scie, de fréquence fixée par le fonctionnement du convertisseur. Lorsque la tension  $V_{ref}$  augmente (diminue), le rapport cyclique  $\alpha$  augmente (diminue). Les variations de la tension  $V_{ref}$  induisent, pour un éclairement et température donnés, le déplacement du point de fonctionnement sur la caractéristique puissance – tension.
- 10. Un driver** dont le rôle est de transmettre, sans déformation, le signal modulé en largeur à l'interrupteur (transistor Mosfet) commandant le convertisseur d'énergie.

L'implantation de cette commande ne fait intervenir que des composants analogique et logique sans aucun calcul ne soit nécessaire. La dynamique du système ne dépend que du temps de retard des composants analogique qui est généralement très faible. Nous tenons à préciser que la conception de cette commande est indépendante de la structure du convertisseur abaisseurs.

**II. 4.1. Panneau photovoltaïque :**

Nous présentons ici un modèle à deux diodes d'un générateur PV (et non d'une cellule), plus fidèle qu'un modèle équivalent à une seule diode et résistances .La figure (II.9) présente les constituants de ce modèle qui permet une approximation par trois segments de droites de la caractéristique I(V) du générateur solaire.

La détermination des paramètres du modèle peut se faire comme suit. Prenons par exemple un générateur solaire de caractéristiques :  $V_{oc} = 44V$ ;  $V_{opt} = 36V$ ;

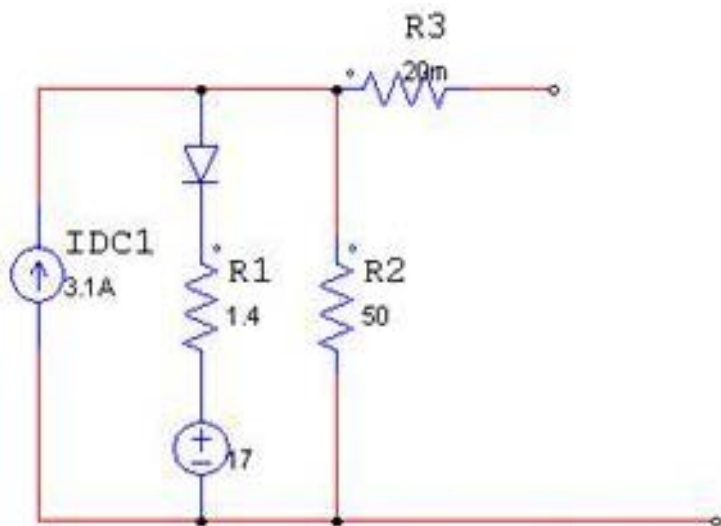
$I_{opt} = 4,5A$ ;  $IDC = 5A$  et  $R_3 = 20\ m\Omega$ .

Les générateurs V1 et V2 qui sont fixés respectivement à 32V et 40V, de part et d'autre du point  $V_{opt} = 36V$ . Les lois des circuits permettent d'aboutir aux équations (II.1) et (II.2), d'où peuvent être aisément calculées les valeurs de résistances R1 et R2.

$$V_{opt} = R_1 I_{DC} + V_1 - (R_1 - R_s) I_{opt} \dots \dots \dots (II.1)$$

$$V_{oc} = R_1 // R_2 \cdot \left( I_{cc1} + \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right) \dots \dots \dots (II.2)$$

Les perturbations sont prises en compte grâce au générateur de courant Delta\_Icc qui simule une variation d'éclairement tandis que le générateur Delta\_V1 simule une variation de température.



**Fig. (II.9) : Circuit équivalent du panneau photovoltaïque.**

### II. 4. 2. LE CONVERTISSEUR DC/DC :

Un convertisseur statique est un dispositif, à base de semi-conducteurs, qui transforme de l'énergie électrique disponible, en une forme appropriée pour alimenter une charge [39].

Les convertisseurs statiques sont les dispositifs à composants électroniques capables de modifier la tension et/ou la fréquence de l'onde électrique.

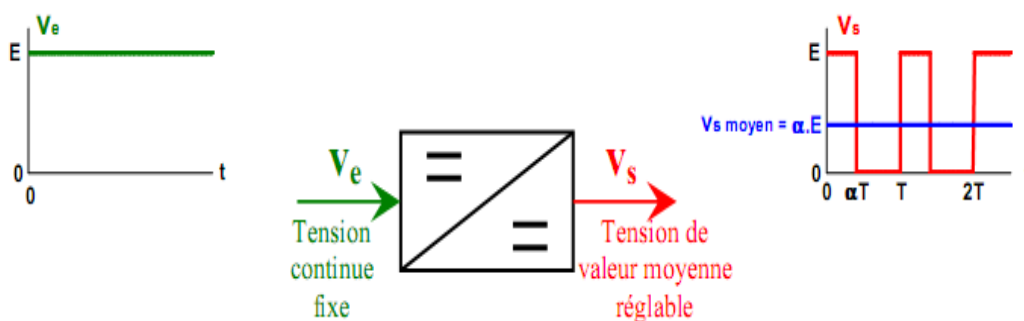


Figure (II.10): Symbole et signaux du convertisseur DC/DC [42].

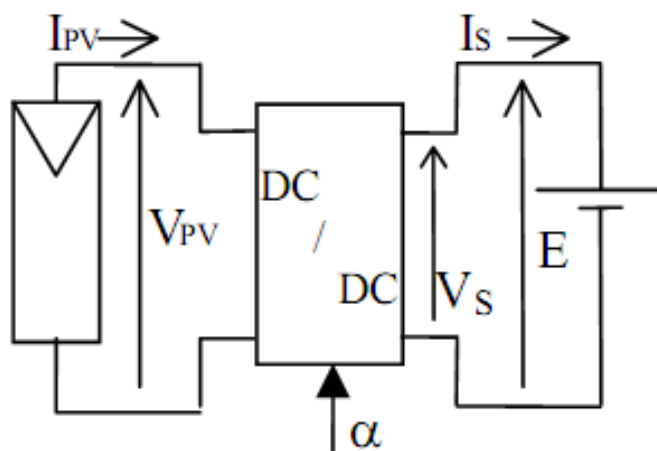


Fig. (II.11) : Principe du convertisseur réalisant l'adaptation d'impédance.

Dans le cas d'un convertisseur de rapport cyclique  $\alpha$ , la relation moyenne liant la tension de la batterie  $E$  à celle du panneau  $V_{pv}$  s'écrit :

$$E = V_s = \alpha V_{pv} \tag{II.1}$$

Ainsi, en fixant  $\alpha$  tel que :

$$\alpha = \alpha_{OPT} = \frac{E}{V_{OPT}} \tag{II.2}$$

On obtient :  $V_{pv} = V_{opt}$

II.3

En conséquence :  $P_{pv} = P_{MPP}$

II.4

La modification de l'impédance de la source est induite par le rapport cyclique

$V_s = \alpha V_{pv}$  et  $I_s = \frac{I_{pv}}{\alpha}$ . On peut alors déterminer le gain réalisé ou non suivant le point

de fonctionnement choisi.

Les figures (II.12) et (II.13) présentent pour une batterie de 13V, respectivement les cas  $\alpha=1$  (transfert non optimal,) et  $\alpha=0,76$  (transfert optimal).

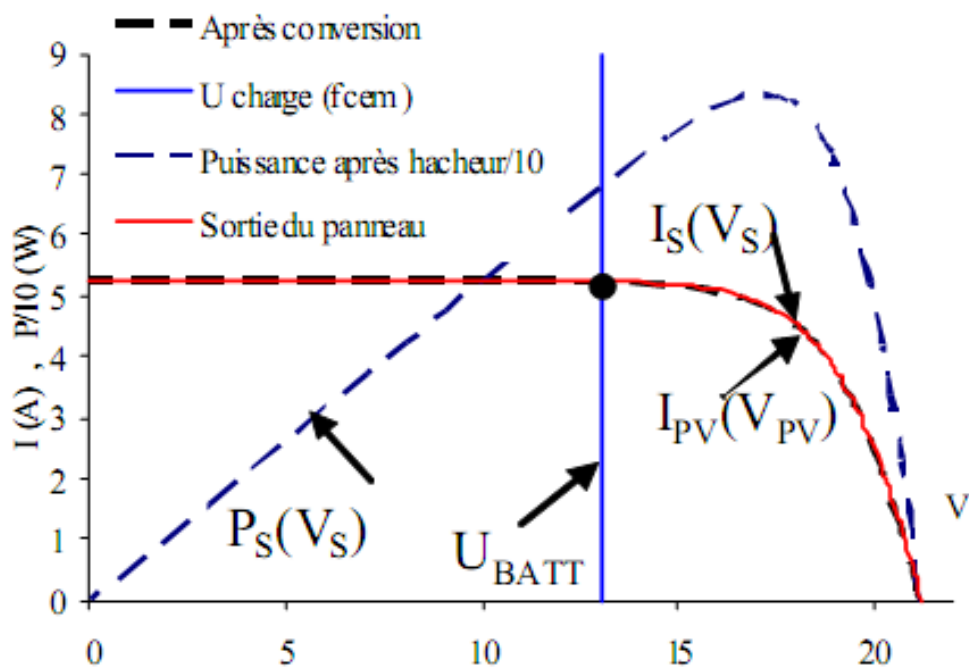


Fig. (II.12) : Convertisseur avec  $\alpha=1$ , puissance transmise:68W.

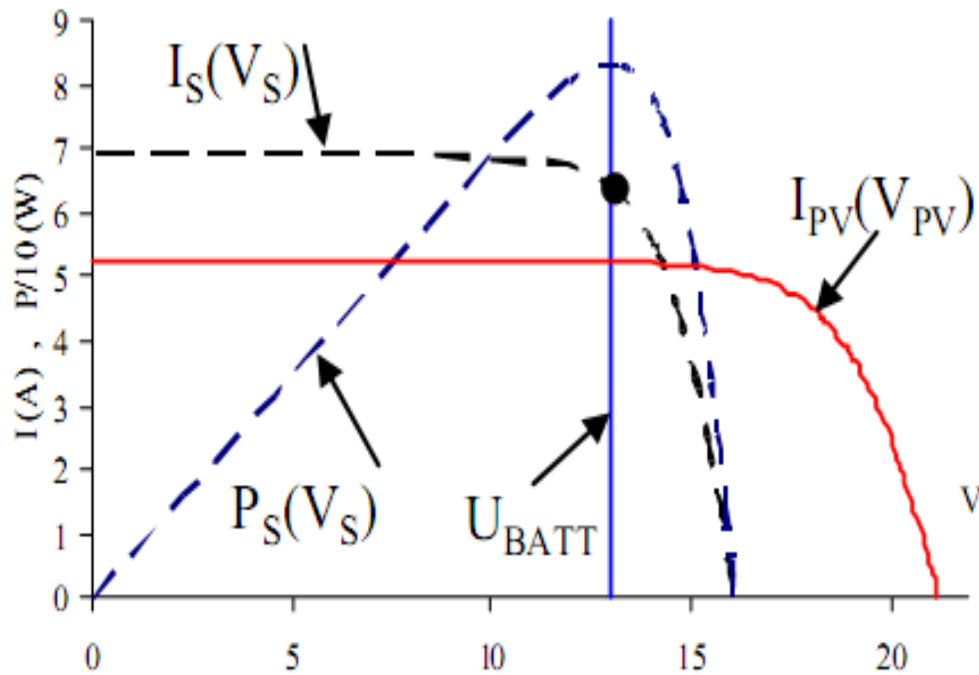


Fig. (II.13) : Convertisseur avec  $\alpha = 0,76$ ,  $P_S = 84$  W, soit un gain de 23% par rapport à la connexion directe.

## II. 4. 4 Etage de commande :

### 1-Le multiplieur analogique :

Il délivre à sa sortie, le produit du courant  $I_{pv}$  et de la tension  $V_{pv}$ . Ce produit est donc l'image de la puissance instantanée du panneau PV.

### 2- Le dérivateur:

Il permet de dériver la puissance pour rechercher le point de fonctionnement optimal (puissance maximale).

### 3-Signe:

Permet de tester le signe de la dérivée de puissance. Si le signe est positif l'intégrateur diminue le rapport cyclique si non faire le contraire.

### 4-Un intégrateur:

Il permet de varier le rapport cyclique. Le rôle de cet intégrateur est de fournir une tension de référence au générateur MLI. Cette tension de référence va être comparée à un signal triangulaire afin de fournir, à chaque instant, une tension à rapport cyclique variable pour alimenter le driver du MOS et donc les hacheurs et adapter la tension et l'intensité en sortie.

**5-Bloqueur d'ordre zéro:**

Il permet d'avoir un signal échantillonné (discret) à partir d'un signal continu.

**6-Un comparateur:**

Il permet de générer à sa sortie une tension rectangulaire modulée en largeur (rapport cyclique variable: signal MLI). Ceci est le résultat de la comparaison entre le signal à la sortie de l'intégrateur et celui généré par un générateur triangulaire, ou en dent de scie, de fréquence fixée par le fonctionnement du convertisseur. Lorsque la tension  $V_{ref}$  augmente (diminue), le rapport cyclique  $\alpha$  augmente (diminue). Les variations de la tension  $V_{ref}$  induisent, pour un éclairement et température donnés, le déplacement du point de fonctionnement sur la caractéristique puissance – tension.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, On a présenté la commande MPPT des convertisseurs DC-DC pour rechercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale aussi les déférente type de la commande MPPT, et on a étudié le principe de fonctionnement de la commande du point de puissance maximal d'un GPV.

# Chapitre III

## Modélisation et simulation du système

### III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on présentera une étude de modélisation et de simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT numérique « perturbation et observation ». Ce système est composé d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur «BOOST », une commande MPPT « perturbation et observation » ainsi qu'une charge.

Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/ SIMULINK.

### III.2. L'outil MATLAB/ SIMULINK :

MATLAB est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple. Avec ses fonctions spécialisées,

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

- SIMULINK Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (TOOLBOXES), un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulations spécialisés (BLOCK SETS).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques.

Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal [47].

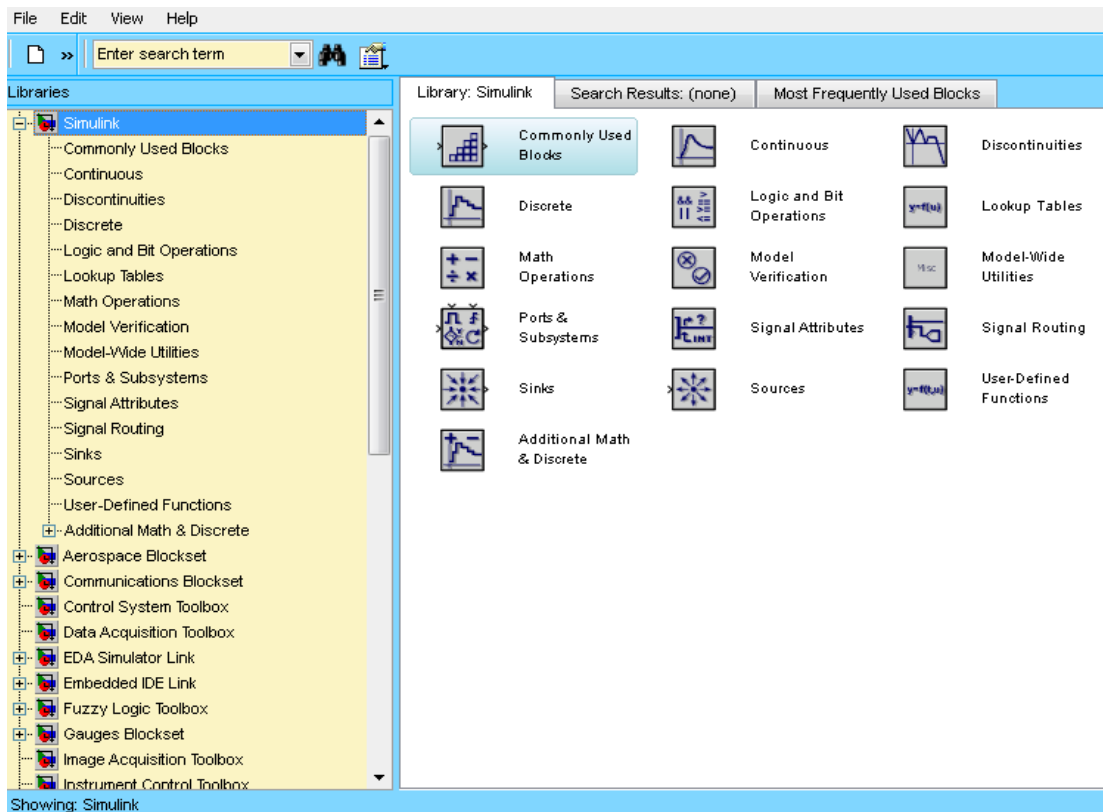


Figure (III.1) : Bibliothèque SIMULINK.

### III.3. Système photovoltaïque proposée :

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

- Le générateur PV (MSX60) est en silicium monocristallin est constitué de 36 cellules photovoltaïques élémentaires. Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST) une puissance de 60 W, un courant de 3.5A sous une tension optimale de 17.1V. ) :
- Le quadripôle d'adaptation est un convertisseur d'énergie de type survolteur pour des applications nécessitant des tensions supérieures à 17V.
- La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV qui dépend des conditions météorologiques et de la variation de la charge stables. Son principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$  à la valeur adéquate de manière à maximiser Continuellement la puissance à la sortie du panneau PV.

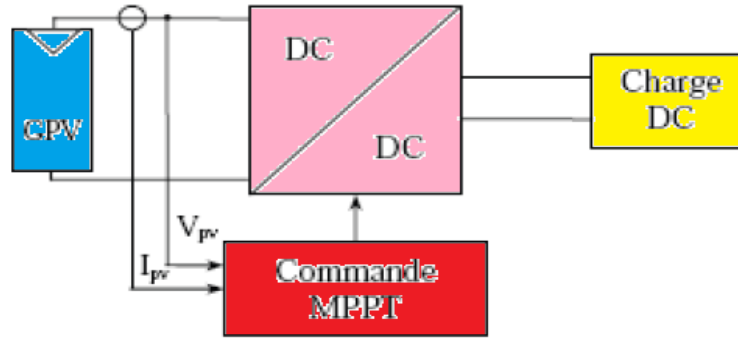


Figure (III.2) : schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) sur charge (DC).

### III.4. Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque :

#### III.4.1. Modélisation du GPV :

##### Cellule solaire :

Pour trouver le modèle de ce générateur, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

Le module fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation d'une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, une résistance série  $R_s$  représentant les diverses résistances de contacts et de connexions et une résistance parallèle  $R_p$  caractérisant les divers courants de fuites dus à la diode et aux effets de bords de la jonction.

Le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle standard à une seule diode, pour une seule cellule PV, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle.

On présente le schéma du circuit électrique par la figure (III.3) :

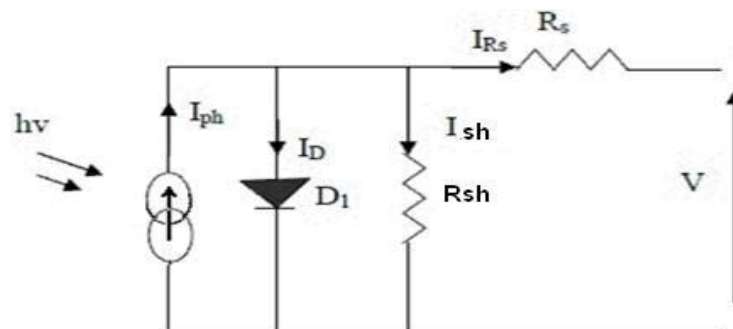
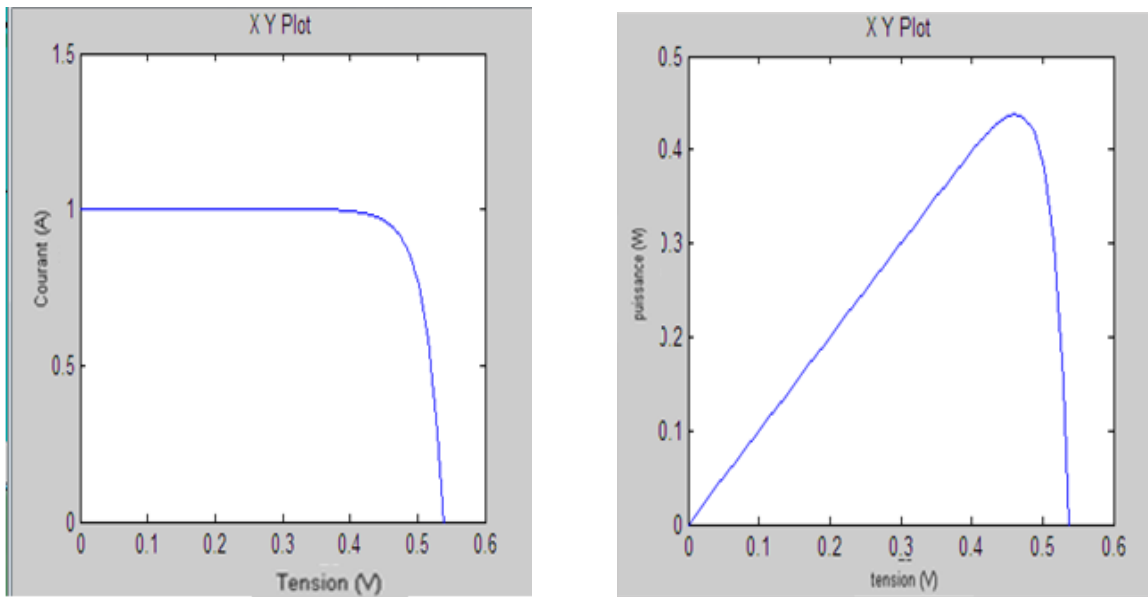


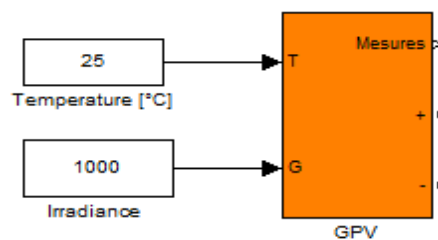
Figure (III.3) : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

D'après les conditions initiale : ( $\Psi = 1000W/m^2$ ,  $T= 25C^\circ$ ).On trouve les résultats de simulation suivants :



**Fig. (III.4) : caractéristique I(V) et P (V) de la cellule PV idéale.**

Alors, on peut présenter le schéma électrique équivalent du générateur photovoltaïque (GPV) par un schéma bloc Figure (III.4) comportant quatre paramètres. Deux variables d'entrées qui sont [48] : l'ensoleillement dans le plan des panneaux  $E_s$  (W/m<sup>2</sup>), température de jonction des cellules  $T_j$  (°C) et deux variables de sortie : courant fourni par le GPV  $I_s$ (A), tension aux bornes du GPV  $V_s$ (V).



**Figure (III.5) : Schéma bloc du générateur photovoltaïque.**

La connexion directe du GPV à une charge reste actuellement le mode de fonctionnement le moins cher. L'inconvénient majeur de ce fonctionnement est la dépendance directe de la puissance fournie par le générateur avec la charge ainsi que la variation de l'ensoleillement.

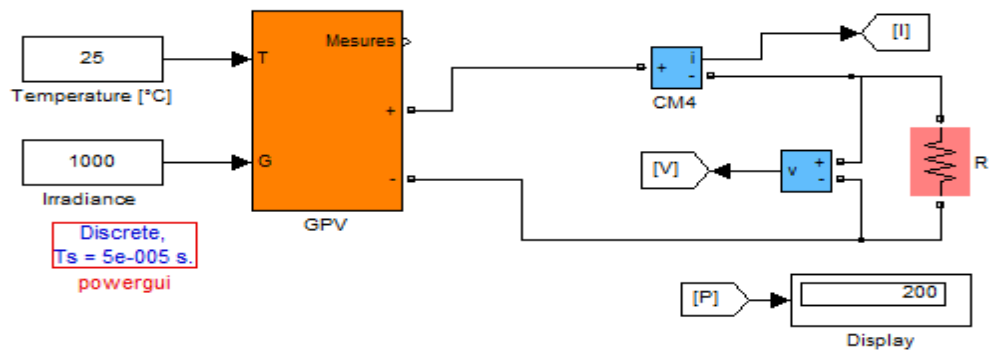


Fig. (III.6) : Schéma de Simulation de la connexion direct GPV-Charge [49].

Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau suivant [50]:

|   |                      |
|---|----------------------|
| éclairage standard, G                                 | 1000W/m <sup>2</sup> |
| Température standard, T                               | 25°C                 |
| Puissance maximale $P_{max}$                          | 60W                  |
| Tension à $P_{max}$ ou tension optimale ( $V_{opt}$ ) | 17.1 V               |
| Courant à $P_{max}$ ou courant optimal ( $I_{opt}$ )  | 3.5 A                |
| Courant de court-circuit $I_{sc}$                     | 3.8 A                |
| Tension à circuit ouvert $V_{CO}$                     | 21.1 V               |
| Nombre des cellules en séries                         | 36                   |
| Energie de la bande interdite                         | 1.12ev               |

|   |                  |
|---|------------------|
| Coefficient de température de $I_{sc}$  | 65 mA/ °C        |
| Coefficient de température de $V_{co}$  | -80mV/ °C        |
| Coefficient de température de puissance | (0.5±0.005)% /°C |
| Courant de saturation $I_{sat}$         | 20 nA            |

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

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

Dans ce cas, on a choisi un modèle simple ne nécessitant que les paramètres donnés par le fabricant, la caractéristique I-V de ce modèle est donnée par (chapitre I-équation (I.1)):

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{q(V_{pv} + (I_{pv} * R_s))}{n k T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} * R_s)}{R_p} \tag{III.1}$$

Où  $V_{pv}$ ,  $I_{pv}$  sont la tension (V) et le courant (A) de sortie du panneau,  $I_{ph}$  est le photocourant en ampère,  $I_{sat}$  Courant dans la diode en ampère,  $R_s$  est la résistance série en ohm,  $R_h$  est la résistance shunt en ohm, q est la charge de l'électron  $q=1.602.10^{-19}$  coulomb, k est la constante de Boltzmann  $k=1.381.10^{-23}$  J/K, n est le facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

Si l'on suppose que la résistance parallèle (shunte) est infinie ( $R_p = \infty$ ), l'équation (III.1) devienne :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left( \exp \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{n V_T} \right) - 1 \right) \tag{III.2}$$

Où  $I_{pppp}$  est le courant fourni par la cellule PV et  $V_{pv}$  est la tension aux bornes de la cellule PV.

On peut calculer la résistance série dans le point  $VCO$ :

$$dI_{pv} = 0 - I_{sat} \left( \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{nV_T}\right) \right) \left( \frac{dV_{pv} + R_s dI_{pv}}{nV_T} \right) \quad (III.3)$$

La résistance série influe largement sur la pente de la courbe des caractéristique (I-V) au voisinage de  $VCO$ .

Elle peut être calculée par la formule suivante :

$$R_s = - \frac{dV_{pv}}{dI_{pv}} = \frac{nV_T}{I_{sat} \left( \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{nV_T}\right) \right)} \quad (III.4)$$

L'équation de la caractéristique  $I=f(V)$  (III.1) non linéaire est résolue par des méthodes d'itération simple. Généralement la méthode de Newton-Raphson est choisie pour la convergence rapide de la réponse. La méthode de Newton-Raphson est décrite comme suit:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (III.5)$$

Où  $f'(x_n)$  est la dérivée de la fonction  $f(x_n)$ ,  $x_n$  est la présente itération et  $x_{n+1}$  est l'itération suivante.

La réécriture de l'équation (III.5) donne la fonction suivante :

$$f(I_{pv}) = I_{cc} - I_{pv} - I_{sat} \left( \exp\left(\frac{V_{pv} + R_{ser} I_{pv}}{nV_T}\right) - 1 \right) = 0 \quad (III.6)$$

En remplaçant dans l'équation (III.5), on calcule le courant (I) par les itérations [50] :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{cc} - I_{sat} \left( \exp\left(\frac{V_{pv} + R_{ser} I_n}{nV_T}\right) - 1 \right) - I_n}{-1 - I_{sat} \left( \left( \frac{R_{ser}}{nV_T} \right) \exp\left(\frac{V_{pv} + R_{ser} I_n}{nV_T}\right) \right)} \quad (III.7)$$

Les équations précédentes ne sont valables que pour un mode de fonctionnement optimal. Pour généraliser notre calcul pour différents éclairagements et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements [51].

$$I_{cc}(T) = I_{cc}(T_{ref}) \cdot [1 + \alpha(T - T_{ref})] \quad (III.8)$$

$$I_{ph} = I_{cc} \left( \frac{G}{1000} \right) \quad (III.9)$$

$$I_{sat}(T) = I_{sat}(T_{ref}) \cdot \left( \frac{T_{ref}}{T} \right)^{\frac{3}{n}} \left[ \exp \left( \frac{q \cdot E_g}{nk} \right) \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (III.10)$$

Où  $\alpha$  est le coefficient de variation du courant en fonction de la température,  $T_{ref}$  est la température de référence, 298k (25°C) et G est l'irradiation solaire.

### III.4.2. Simulation du générateur PV :

Le schéma de générateur photovoltaïque en l'environnement MATLAB- SIMULINK est représenté par :

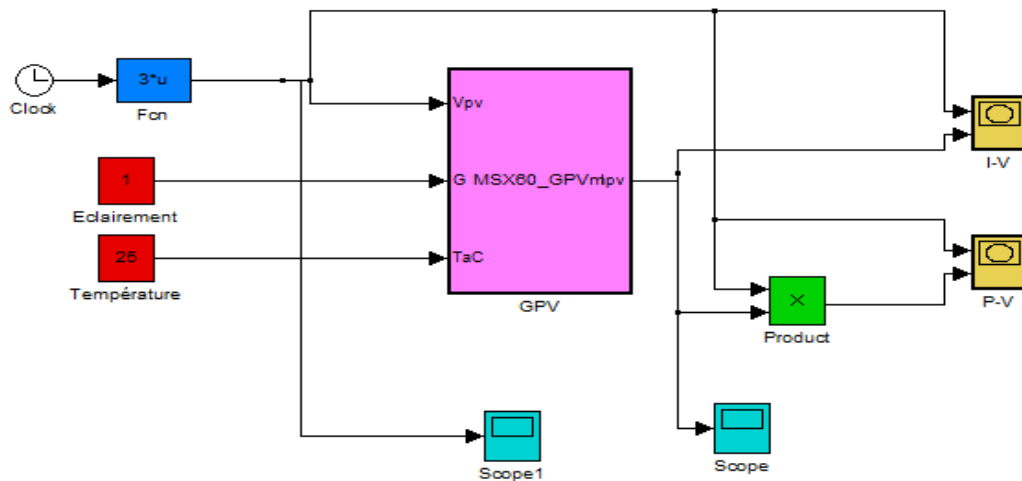


Figure (III.7) : Schéma de générateur PV en MATLAB-SIMULINK.

Les résultats de simulation du générateur photovoltaïque représentés par les figures (III.6) à (III.9). Ces figures représentent les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension pour différents températures et différents éclairagements.

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

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

Les figures (III.8) et (III.9) montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. A une température constante, on constate que le courant

subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

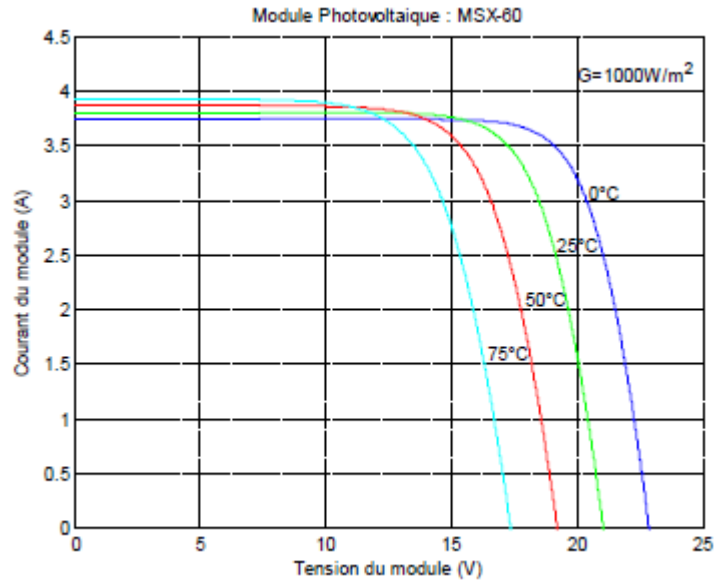


Figure (III.8) : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension, Pour différentes températures et le rayonnement  $G=1000W/m^2$ .

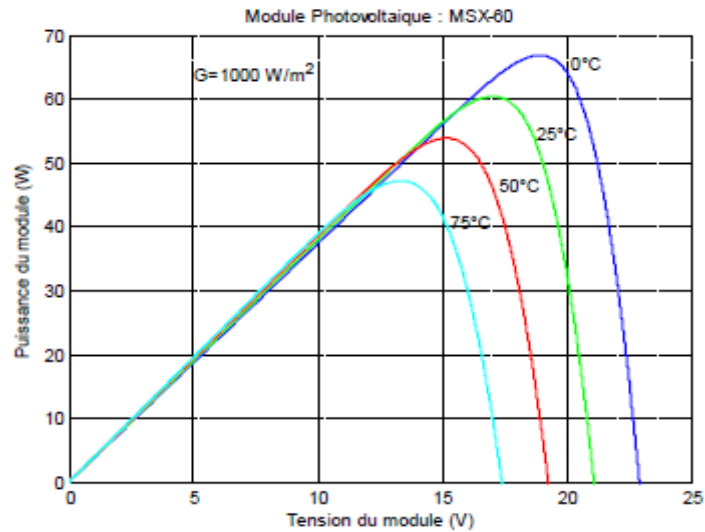
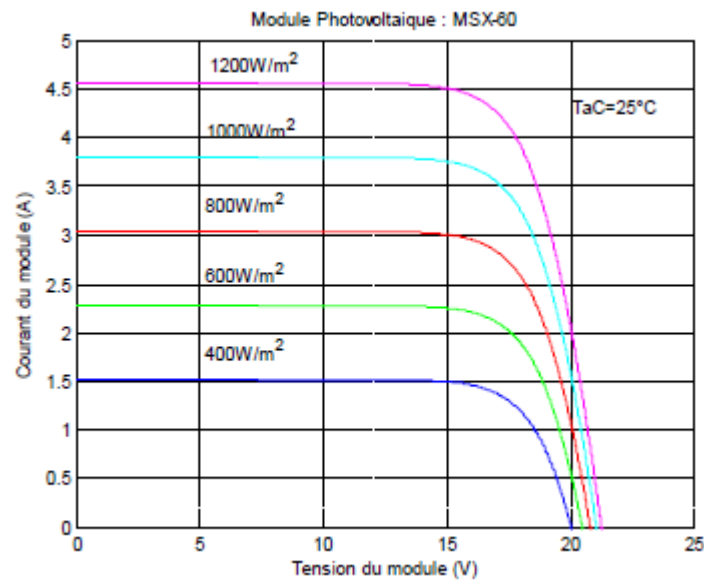
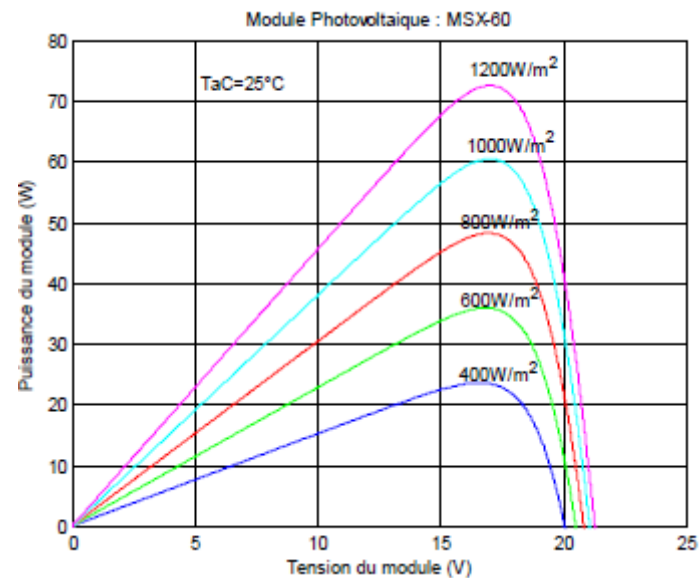


Figure (III.9) : Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension, Pour différentes températures et le rayonnement  $G=1000W/m^2$ .



**Figure (III.10) : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension Pour différents éclairment et une température  $T=25^{\circ}\text{C}$ .**



**Figure (III.11) : Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension Pour différents Eclairment et une température  $T=25^{\circ}\text{C}$ .**

Dans ce travail, à partir de la symbolisation du module MSX60 dans l'environnement MATLAB- SIMULINK, on a déduit les différentes grandeurs électriques du générateur PV : tension optimale  $V_{\text{opt}}$ , courant optimal  $I_{\text{opt}}$ , puissance maximale  $P_{\text{max}}$  et résistance optimale  $R_{\text{opt}}$  en fonction de la température et de l'éclairement. Les résultats de simulation obtenus sont représentés sur les figures (III.10) à (III.13).

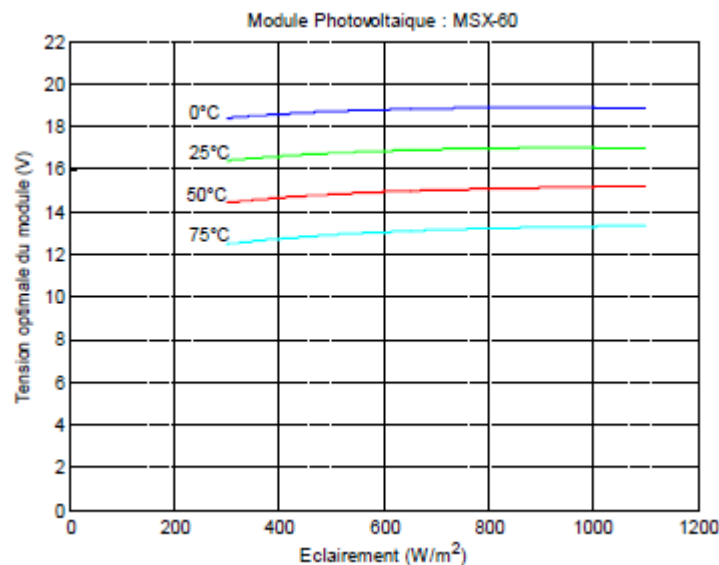
On remarque que le courant optimal est très sensible à l'éclairement. Par contre la tension optimal varie très peu avec l'éclairement et diminue légèrement avec la température.

Aussi, on considère en première approximation que le fonctionnement optimal du générateur PV correspond sensiblement à un fonctionnement à tension optimale constante.

A partir la figure (III.12), on peut remarquer que la puissance maximale est très sensible à l'éclairement.

Par contre, cette puissance maximale diminue légèrement avec la température en particulier pour les forts éclairagements.

La résistance optimale, figure (III.13), est très sensible à l'éclairement en p En examinant les caractéristiques obtenues, nous pouvons conclure que des fortes variations du niveau de l'éclairement provoquent des variations relativement importantes du courant optimal. Alors que, les variations relatives de la tension optimale restent faibles. Particulier pour les faibles éclairagements.



**Figure (III.12) : Résultats de simulation des caractéristiques Tension optimale-Eclairement pour différentes températures.**

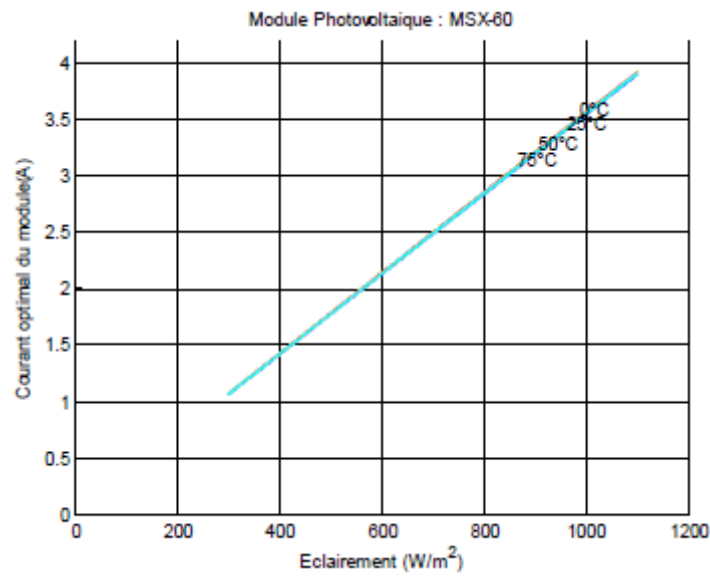


Figure (III.13) : Résultats de simulation des caractéristiques courant optimal-Eclairement.

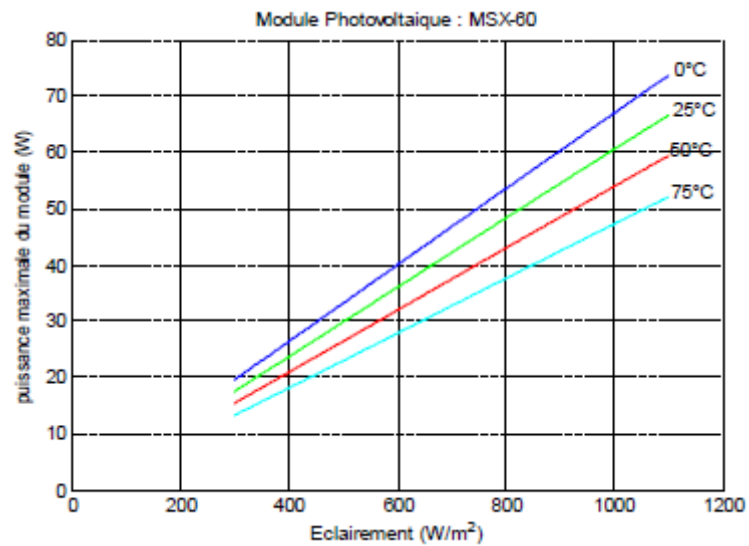


Figure (III.14) : Résultats de simulation des caractéristiques Puissance maximale- Eclairement pour différentes températures.

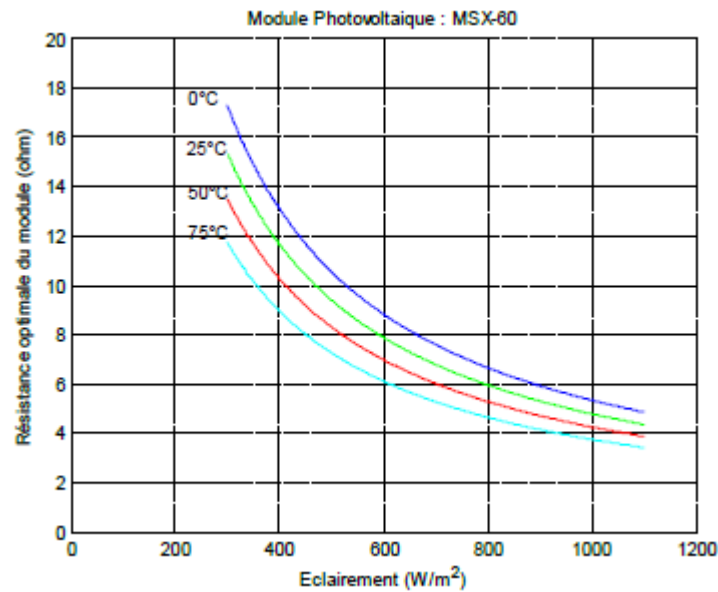


Figure (III.15) : Résultats de simulation des caractéristiques Résistance optimale-Eclairement pour différentes températures [7].

### III.5. Modélisation et simulation du hacheur survolteur :

#### III.5.1. Modélisation de hacheur survolteur :

C'est un convertisseur DC/DC parallèle inséré entre le générateur photovoltaïque GPV et le reste de la chaîne de conversion. Il est caractérisé par son rapport cyclique  $dd$  ( $0 < dd < 1$ ) avec lequel on peut exprimer les valeurs moyennes des grandeurs de sortie avec celles de l'entrée. Le schéma électrique du hacheur survolteur est donné par la figure (III.14) [52].

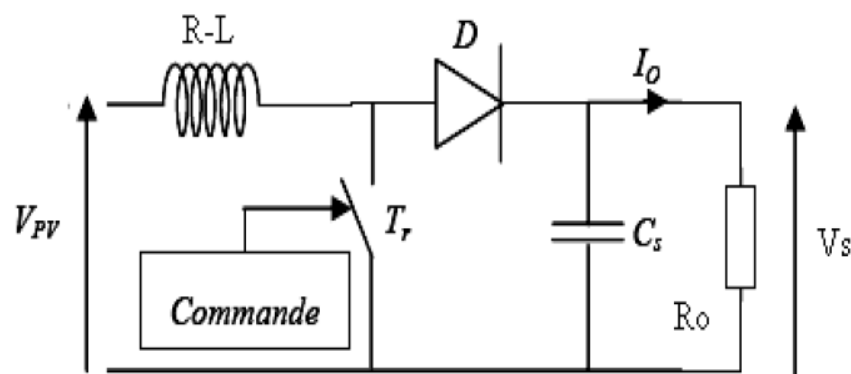


Figure (III.16) : Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type boost).

Pour une étude en régime continu, en éliminant les dérivées des variables dynamiques, dans le système d'équations (II.7) du chapitre précédent, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes. Le système d'équations devient :

$$\begin{cases} I_L = I_e \\ I_s = (1 - d)I_L \\ V_e = (1 - d)V_s \end{cases}$$

Alors, les grandeurs électriques de sorties (VS et IS) dans le convertisseur survolteur sont liées à celles d'entrées (Vpv et Ipv) en fonction du rapport cyclique d du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur (Figure(III.2)) par le système d'équations:

$$\begin{cases} V_s = \frac{V_e}{1-d} = \frac{V_{pv}}{1-d} \\ I_s = (1 - d)I_e = (1 - d)I_{pv} \end{cases}$$

A partir le système d'équations (III.12), on peut déduire la résistance à la sortie du panneau PV ( $R_{pv}$ ) en fonction de  $\alpha$  et  $R_s$  :

$$R_{pv} = \frac{V_{pv}}{I_{pv}} = \frac{(1-d)V_s}{I_s/(1-d)} = R_s(1-d)^2$$

Alors, le rapport cyclique  $\alpha$  s'écrit en fonction des résistances  $R_{pv}$  et  $R_s$  :

$$\frac{R_{pv}}{R_s} = (1-d)^2 \Rightarrow d = 1 - \sqrt{\frac{R_{pv}}{R_s}}$$

Puisque le rapport  $\alpha$  est vérifié l'inégalité  $0 < d < 1$ , le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge  $R_s$  remplit la condition suivante :

$$R_s > R_{pv}$$

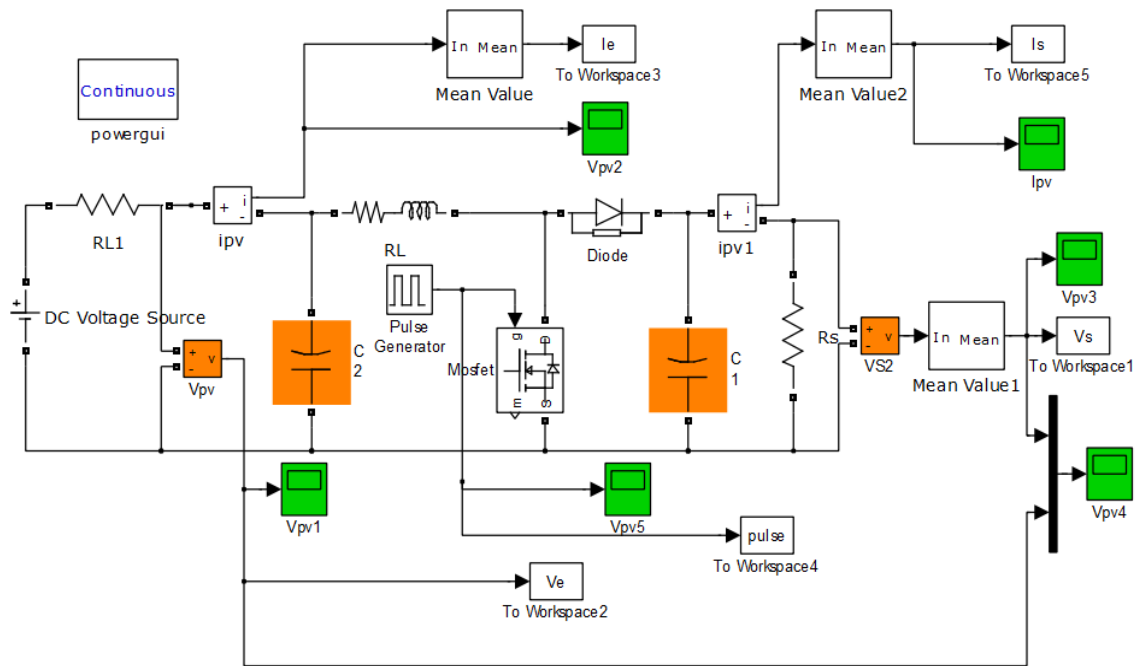
Dans les conditions optimales et pour une charge  $R_s$  donnée, la résistance interne du panneau ( $R_{pv} = R_{opt}$ ) et le rapport cyclique ( $d = d_{opt}$ ) obéissent donc à l'équation:

$$R_{opt} = (1 - d_{opt})^2 R_s$$

La relation (III.16) montre que, pour une puissance incidente P, la puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que pour un rapport cyclique bien défini ( $d_{opt}$ ) (Point PPM).

### III.5.2. Simulation de hacheur survolteur :

La figure (III.15) représente le schéma block d'un convertisseur survolteur.



Figure(III.17) : Schéma block d'un convertisseur survolteur.

On commande le rapport cyclique (d) à partir la valeur  $V_{pv} = V_s$  à l'aide d'un comparateur on fait la comparaison avec signal de la porteuse et un autre en dent de scie figure (III.15), on obtient en sortie le signal de commande illustré dans la figure (III.16).

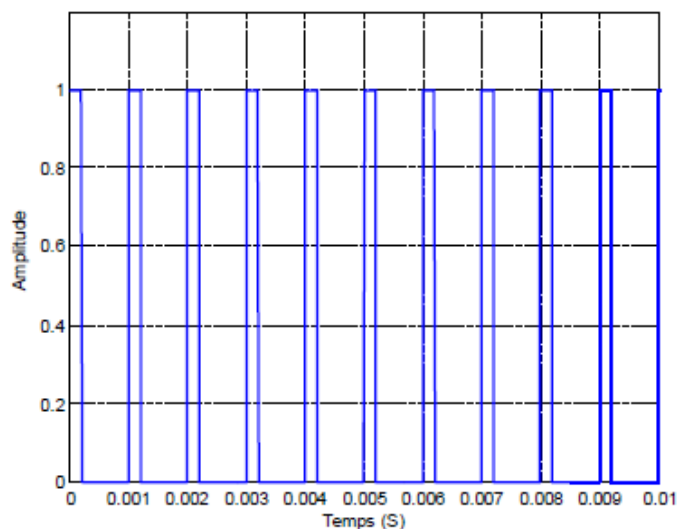


Figure (III.18) : Signal commande DC/DC (gâchette- d'hacheur).

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

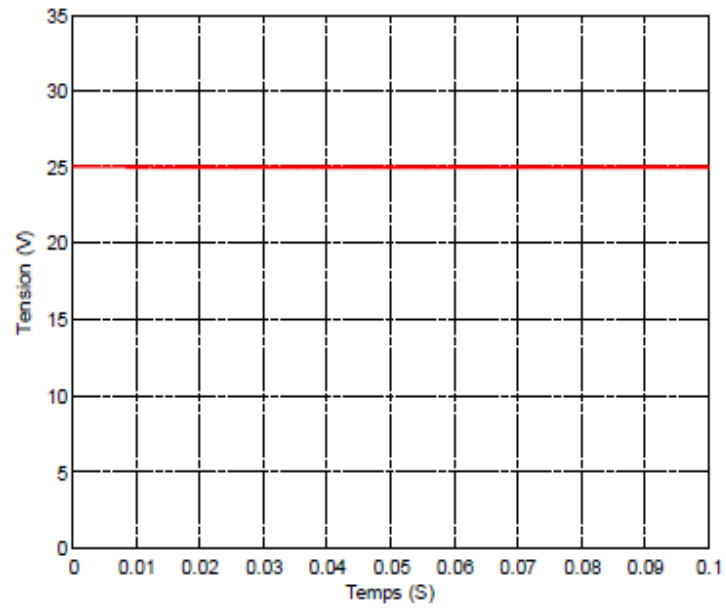


Figure (III.19) : Résultats de simulation de la tension d'entrée du hacheur survolteur.

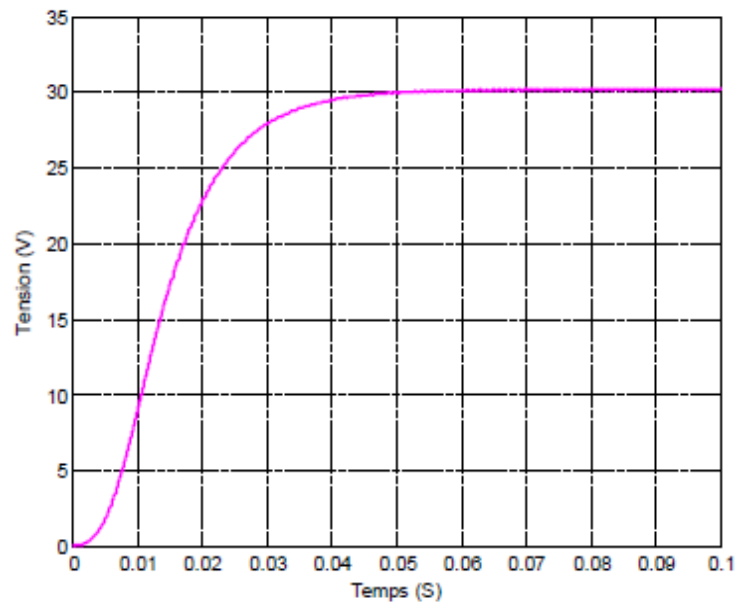


Figure (III.20) : Résultats de simulation de la valeur moyenne de la tension de sortie du hacheur survolteur.

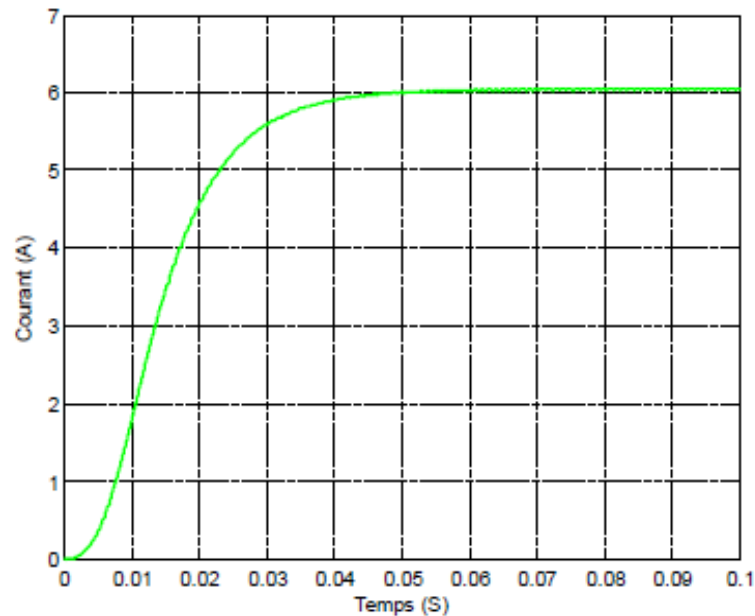


Figure (III.21) : Résultats de simulation de la valeur moyenne du courant de sortie du hacheur survolteur.

### III.6. Structure et simulation de la commande MPPT numérique « P&O » :

#### III.6.1 structure de la commande « perturbation et observation » :

Pour avoir la meilleure connexion entre le « GPV » une source non linéaire et une charge pour produire la meilleure puissance, le Maximum Power Point Tracking (MPPT) est développé. Il forcera le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP), induisant une amélioration globale du rendement du système. Le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de sa caractéristique électrique (I-V) avec celle de la charge.

Ce point de fonctionnement varie car les conditions de travail varient ou/et la charge varie à tout moment. C'est pourquoi, souvent, on n'opère pas au MPP, et la puissance fournie à la charge est inférieure à la puissance maximale [47].

La méthode de perturbation et d'observation « P&O » est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  respectivement.

Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température. Sur la figure (III.18), on a représenté le schéma synoptique de la méthode de perturbation et d'observation.

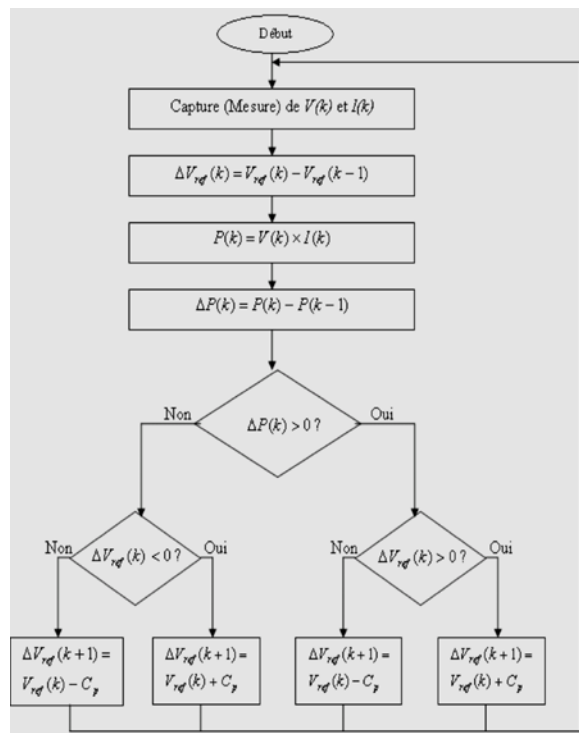


Figure (II.22) : Algorithme de la méthode MPPT « perturbation-observation ». (p&o).

Dans le cadre de ce travail, on analyse la conception et la simulation d’une commande MPPT numérique « perturbation-observation » qu’on applique aux convertisseurs DC-DC survolteur.

**III.6.2. Simulation de la méthode MPPT:**

La figure (III.19) illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande de poursuite MPPT :

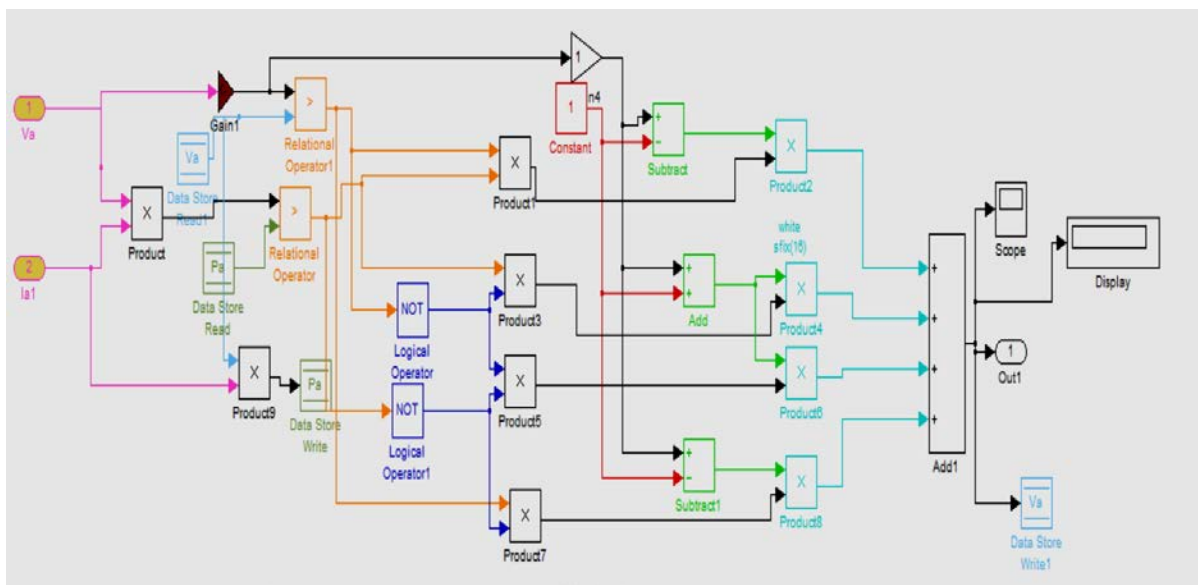


Figure (III.23) : Schéma block de la commande MPPT.

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la Commande MPPT « perturbation et observation » représentent par les figures (III.21) à (III.26). Ces figures représentent la tension, le courant et la puissance générées par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la tension, le courant et la puissance à la sortie du système photovoltaïque. Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles.

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

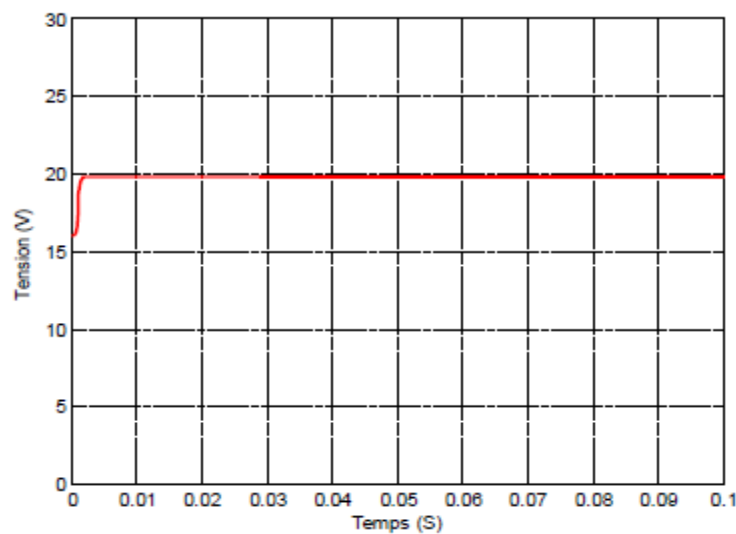


Figure (III.24) : Résultats de simulation de la tension générée par le générateur photovoltaïque pour  $E=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ .

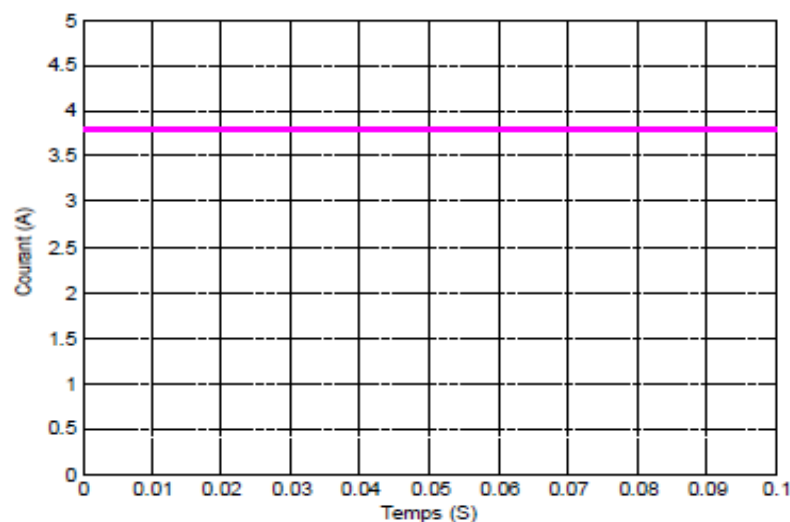


Figure (III.25) : Résultats de simulation du courant généré par le générateur photovoltaïque pour  $E=1000\text{W/m}^2$  et Tension (V) et  $T=25^\circ\text{C}$ .

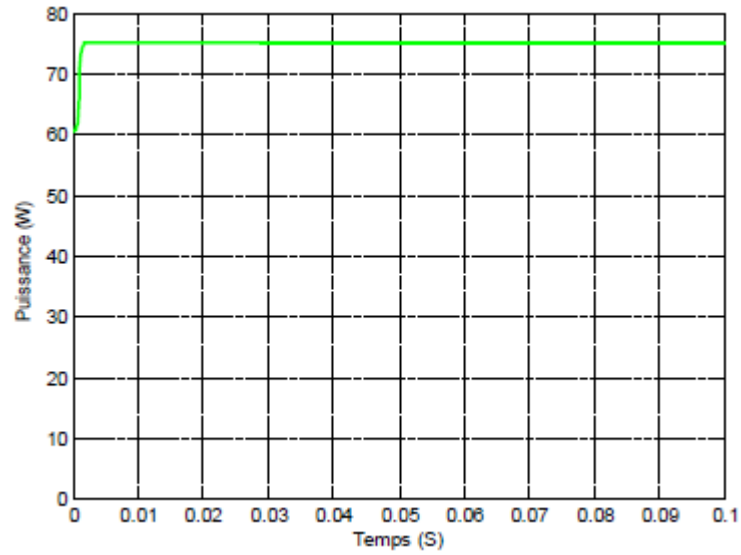


Figure (III.26) : Résultats de simulation de la puissance générée par le générateur photovoltaïque pour  $E=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ .

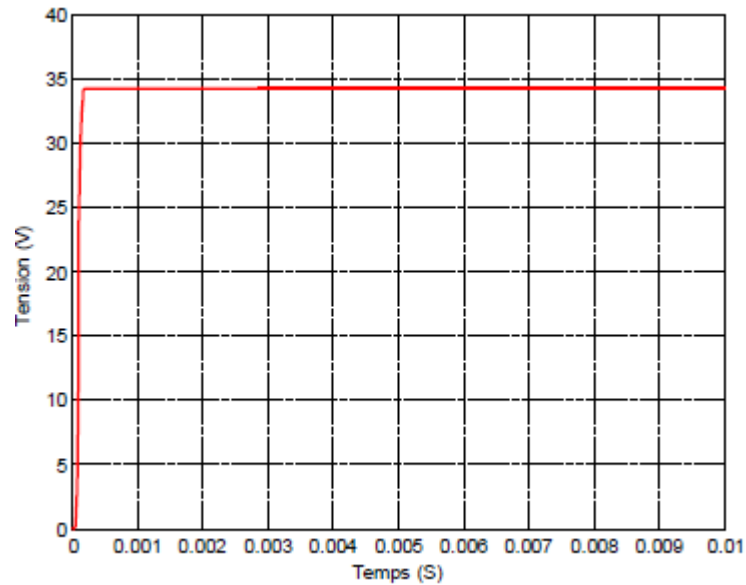


Figure (III.27) : Résultats de simulation de la tension de sortie du système pour photovoltaïque pour  $E=1000\text{W/m}^2$  Tension (V) et  $T=25^\circ\text{C}$ .

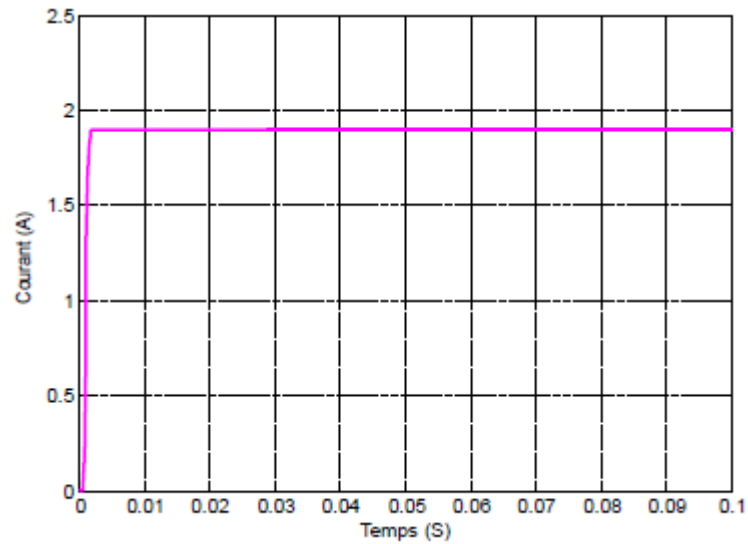


Figure (III.28) : Résultats de simulation du courant de sortie du système pour  $E=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ .

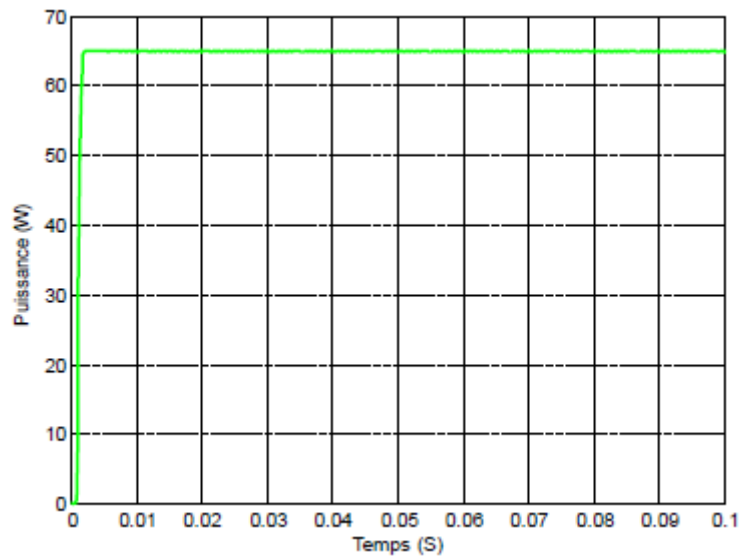


Figure (III.29) : Résultats de simulation de la puissance de sortie du système pour  $E=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ .

**Conclusion:**

Dans ce chapitre, la modélisation de l'ensemble composé de : générateur photovoltaïque, hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation » est présentée. Les modèles SIMULINK sont construits pour les différentes composantes du système photovoltaïque.

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

- Les performances du générateur PV se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et les variations de la charge. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement 1000W/m<sup>2</sup>
- Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV. Température 25°C.
- La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

### Conclusion Générale :

Le travail qu'on a présenté porte sur l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV. Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes PV, principe de l'effet PV, cellule PV. Ainsi le générateur photovoltaïque et leurs performances.

On a étudié, dans un deuxième temps, quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme l'hacheur dévolteur, l'hacheur survolteur et l'hacheur mixte (dévolteur-survolteur). Ainsi, on a décrit le mécanisme de la poursuite pour l'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement. On a présenté les méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrément de l'inductance et la méthode de perturbation et observation. Cette dernière méthode est utilisée dans ce travail cause de sa simplicité, et son exigence seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque

Finalement, on a étudié la modélisation du système photovoltaïque. Pour ce la, on a étudié d'abord la modélisation du générateur PV (MSX60) par la résolution de l'équation caractéristique non linéaire d'une cellule PV en utilisant la méthode de Newton-Raphson.

On a étudié l'adaptation par le convertisseur DC-DC survolteur et on trouve les relations relient les grandeurs du convertisseur et le rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur.

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

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

- Les performances du générateur se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et les variations de la charge. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement 1000W/m<sup>2</sup>
- Le convertisseur CC-CC et la commande MPPT effectuent correctement leurs

Rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie

Supérieure à celle fournie par le générateur PV. La commande MPPT adapte le Générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le Générateur PV.

- Ces résultats, forts intéressants, montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques.

Comme perspective nous proposons de développer notre système pour des puissances assai élevée en utilisant cette méthode « perturbation et observation ».

Ainsi, l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle comme la logique floue, les réseaux de neurones artificiels et les réseaux Neuro-flous pour la commande du convertisseur.

**Référence :**

- [1] S. M. Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d’algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d’état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [2] S. Issaadi, « Commande d’une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par *les Réseaux de Neurones* », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006.
- [3] M. Adouane, «*Etude et conception d’une stratégie de commande d’un onduleur connecté au réseau électrique*», Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique,
- [4]:<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire-exploitation>
- [5]:R.MERAHI, Modélisation d’un dispositif MPPT pour l’étude de l’augmentation de la puissance.
- [6]: B .Youcef, «Modélisation et Simulation D’un Système Photovoltaïque», Mémoire de mastère, Université A. MIRA-BEJAIA, Algérie 2016.
- [7] B. Wafa, “ Modélisation Et Simulation D’un Système Photovoltaïque Adapté Par Une Commande MPPT ”, Diplôme De Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2012.
- [8] B. Ibrahim, “ Modélisation et commande d’un système De stockage photovoltaïque ”, UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID –TLEMCEM--*Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables- ECOLE DOCTORALE : énergies renouvelables*
- [9] N. Abouchabana, « *Etude d’une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT* », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [10] L. Abbassen, «*Etude de la connexion au réseau électrique d’une centrale photovoltaïque*», Mémoire de Magistère, Université de Tizi Ouzou, Algérie, 2011.
- [11] B. Mohammed, Mémoire DE Magister, “ Modélisation D’un Système De Captage Photovoltaïque Autonome”, Mémoire De Magister, Centre Universitaire De Bechar, 2008.
- [12] M. Reda, “ Modélisation D’un Dispositif MPPT Pour L’étude De L’augmentation De La Puissance Produite Par Les Générateur Photovoltaïques”, Diplôme De Magister, Université Badji Mokhtar Annaba, 2010.
- [13] M. Med Nadjib, H. Charaf Eddine, “ Modélisation Et Simulation D’un Système Photovoltaïque En Fonctionnement Autonome Et Connecté Au Réseau”, Mémoire Master, Université Kasdi Merbah – Ouargla, 2013.
- [14] H. Fatiha, R. Aicha, “Modélisation Et Simulation D’un Système Photovoltaïque”, Mémoire Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2014.
- [15] H. Kamelia, “Modélisation D’une Cellule PV : Etude Comparative”, Mémoire De Magister, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou,2012.

- 
- [16] B. Mohammed, Mémoire DE Magister, “ Modélisation D’un Système De Captage Photovoltaïque Autonome”, Mémoire De Magister, Centre Universitaire De Bechar, 2008.
- [17] M. Makhoulf, «Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application au pompage», mémoire de magister, université Mentouri Constantine, Algérie, 2006.
- [18] F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [19] M. Z. F.Z. Zerhoun, "Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique," revue des énergies renouvelables, vol. 11, no. N°1, p. 41–49, 2008.
- [20] MEKHOLOUFI M.A, Dr. K. Dris, Dr. A. Salem, “Optimisation De La Production D’un GPV Par Différent Techniques MPPT”, Département Electrotechnique Université Ammar Teliji Laghouat, 2009.
- [22] Antonio Luque and Steven Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [23] F. Kininger, "Photovoltaic Systems Technology", University of Kassel, 2003.
- [25] M. Reda, “ Modélisation D’un Dispositif Mppt Pour L’étude De L’augmentation De La Puissance Produite Par Les Générateur Photovoltaïques”, Diplôme De Magister, Université Badji Mokhtar Annaba, 2010.
- [26] M. Slama Fateh, “Modélisation D’un Système Multi Générateurs Photovoltaïques Interconnectés Au Réseau Electrique”, Mémoire De Magister, Université Abbas –Ferhat Setif, 2011.
- [27] B. Tarek, B. AMAR Radhia, “Étude D’un Système D’énergie Renouvelable Avec Système De Stockage”, Diplôme De Master, Université D’el-Oued, 2014.
- [28] A. Said, “Caractérisation Et Optimisation De Puissance Des Systèmes Photovoltaïques”, Thèse Doctorat, Université A. Mira-Bejaia, 2016.
- [29] M. Angel Cid Pastor, “Conception Et Réalisation De Modules Photovoltaïques Electriques”, Thèse Doctorat, L’institut National Des Sciences Appliquées De Toulouse, 2006.
- [30] A. Mohamed, “Contribution A L’optimisation D’une Chaine De Conversion D’énergie Photovoltaïque”, Thèse Doctorat, Université Constantine 1, 2014.
- [31] B. Tarek, B. AMAR Radhia, “Étude D’un Système D’énergie Renouvelable Avec Système De Stockage”, Diplôme De Master, Université D’el-Oued, 2014.
- [32] M. Angel Cid Pastor, “Etude l’intégrabilité d’une loi de commande MPPT pour générateur photovoltaïque ”stage effectué au laboratoire d’Analyse et d’architecture des systèmes, juin 2003.
- [33] Singer. S. and Braustein A... “Maximum power transfer from a nonlinear energy source to an arbitrary load ” IEEE Proceeding, Pt G, 1987 pp 1-7

- [34] .S.ABADA ,, Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic" Mémoire Maître es Sciences, Université laval, 2011.
- [35] S. PETIBON « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », université de Toulouse, 2009.
- [36] L. ABBASSEN ‘ Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque’ Mémoire de magister, université mouloud Mammeri Tizi ouzzo, 2011.
- [37] S.BELAKEHAL « Conception & commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables’ »thèse de doctorats, université de Constantine, 2010.
- [38] M.S.rodriquez « Réalisation d'un étage d'adaptation pour générateur photovoltaïque a partir d'un girateur de puissance » université revirsivirgili ingénieur, juin 2008.
- [39] : Dr.F.Bouchafaa, « Cours Électronique de puissance », [http : //www.usthb.com](http://www.usthb.com),2008/2009.
- [40] Guy Séguier, Philippe Delarue, Francis Labrique, « Électronique de puissance : Structures, fonctions de base, principales applications », Edition Dunod, 2006.
- [41] Michel Piou, « Génie Electrique (conversion statique d'énergie), chapitre I », [http : www.iutenligne.net](http://www.iutenligne.net), 2010.
- [42] Christian BISSIERES, « Conversion statiques des énergies, Physique Appliquée », <http://www.cbissprof.free.fr>.
- [43] : Philippe LETENNEUR, « Les alimentations électrique », 2003-2004.
- [44]: W.Xiao, « A Modifed Adaptative Hill Climbing Maximum Power Point Tracking (MPPT) Control Method for Photovoltaic Power Systems», université de Columbia, 2003
- [45] Antonio Luque and Steven Hegedus, «Handbook of Photovoltaic Science and
- [46] J. P.Ferrieux,F.Forest. Dunod (alimentations à découpage, convertisseurs à résonance).
- [47] A. Meflah, “*Modélisation et commande d'une chine de pompage photovoltaïque*”, Mémoire de Magistère, Université de Tlemcen, Algérie, 2011.
- [48] I. Yassine, “Système Hybride Photovoltaïque – Eolien –Diesel Sans Stockage ”, Projet De Fin D'études, Université Libanaise, 2013.
- [49] AIT MAHDI M. Amine, “ Modélisation et Simulation D'un Système Photovoltaïque ”, Université A. MIRA-BEJAIA, Algérie, 2017.
- [50] M. Djarallah, « Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique », Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie, 2008.
- [51] B. Gori, « modélisation et simulation d'un système PV adapté par une commande MPPT analogique », Mémoire d'Ingéniorat, université Ouargla, 2011.
- [52] L. Abbassen, «Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque», Mémoire de Magistère, Université de Tizi Ouzou, Algérie, 2011.

### الملخص :

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

في هذا التحليل قمنا باخذ النظام الكهروضوئي او المولد الكهروضوئي ذو الصنف MSX60 المنتج في الشروط النظامية للتجربة, استطاعة اعلا 6 واط, و تيار قيمته 3.5 امبير بجهد 17.1 فولط. نتائج المحاكاة المتحصل عليها تمت بواسطة Matlab/Simulink الذي دل علي المراقبة في السير الديناميكي ل لنظام الكهروضوئي.

**الكلمات المفتاحية:** نظام الكهروضوئي, المحول الرفع , آلية التحكم, MPPT , التصميم, المحاكاة.

### Résumé :

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

**Mots clés:** Système PV – Convertisseur survolteur - Commande MPPT –Modélisation – Simulation.

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

### Keywords :

PV systeme, Boost converter, MPPT command, Modelisation, Simulation