

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

## MÉMOIRE

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

**Électrotechnique**

*Option : énergie renouvelable en Électrotechnique*

Intitulé :

---

### MODÉLISATION ET SIMULATION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE ADAPTÉ PAR DES COMMANDES MPPT ET FLOUE

---

Présenté par :

- BERRAMDANE Lakhdar
- BENGUITTOUN Halima
- DADI Hakoum

*Soutenu le : ... /06/2021.....devant le Jury :*

***M. SekkalmohammedchakibeMAA Centre Universitaire Naâma Président***

***M. Khessam MedjdoubMCB Centre Universitaire Naâma Encadreur***

***M. Brahimi MohamedMCB Centre Universitaire Naâma Examineur***

Naama – Algérie - 2021



## REMERCIEMENTS

Nous remercions Dieu Le Tout Puissant qui nous adonné le courage et la volonté pour réaliser ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à Monsieur

**Dr. KHASSAM MEJDOUB** et Monsieur

**Dr. MEZIANE Mohammed Amin** d'abord pour avoir proposé ce thème, ensuite pour avoir assumé la responsabilité de notre encadrement, enfin pour nous avoir orienté et nous avoir conseillé tout au long de la réalisation de ce travail ainsi que pour la confiance qu'il nous a accordée.

Nous remercions très chaleureusement les membres du jury pour

L'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être lecteurs et

Critiques de notre mémoire.



## LISTE DES SYMBOLES :

T : température °C

Q: charge de l'électron

$\gamma$ : facteur de qualité de la jonction

E<sub>g</sub>: énergie de la bande interdite (V)

N<sub>S</sub>: nombre de cellules en série

N<sub>P</sub> : nombre de cellules en parallèle

G: éclairement (W/m<sup>2</sup>)

I<sub>L</sub>: courant photonique (A)

I<sub>01</sub> et I<sub>02</sub>: courants de saturation des diodes 1 et 2 (A)

$\gamma_1$  et  $\gamma_2$  : facteurs de qualité des diodes 1 et 2

R<sub>s</sub> : résistance série ( $\Omega$ )

R<sub>sh</sub>: résistance shunt ( $\Omega$ )

I<sub>D1</sub> et I<sub>D2</sub>: courants des diodes 1 et 2 (A)

I<sub>CC</sub>: courant de court-circuit (A)

V<sub>CO</sub> : tension du circuit ouvert (V)

T: période (V)

d : rapport cyclique

K: interrupteur

C: capacité

I<sub>C1</sub> et I<sub>C2</sub>: courants des capacités 1 et 2 (A)

V<sub>I</sub> et V<sub>O</sub>: tensions d'entrée et de sortie du hacheur (V)

I<sub>i</sub> et I<sub>O</sub>: courant d'entrée et de sortie (A)

V<sub>L</sub>: tension aux bornes de la bobine (V)

# Abréviations utilisées

PV : Panneau

Photovoltaïque. GPV : Générateur P

hotovoltaïque. FF : Facteur

de forme.

MPPT : Maximum Power Point Tracking. P

& O : Perturbation et Observation.

DC : Courant Continu (Direct Current).

AC : Courant Alternatif (Alternative Current).

# LISTE DE TABLEAU

## ❖ *CHAPITRE I: L'Énergie Solaire Photovoltaïques PV*

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau I.1</b> Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques ..... | 6  |
| <b>Tableau I.2</b> caractéristique électrique d'un module photovoltaïque MSX60.....             | 10 |

## ❖ *CHAPITRE II: Poursuite du point de puissance maximale*

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau II.1</b> Comparaison des principaux convertisseurs DC-DC..... | 27 |
|--|----|

## ❖ *CHAPITRE III : simulation, résultat et discussions*

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau III.1</b> Base de règles du contrôleur flou .....    | 64 |
| <b>Tableau III.2</b> Base de règles du MPPT flou (type II)..... | 64 |

# LISTE DES FIGURES

## ❖ CHAPITRE I: L'Énergie Solaire Photovoltaïques PV

|  |    |
|--|----|
| ✓ <b>Figure (I.1)</b> : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.....               | 3  |
| ✓ <b>Figure(I.2)</b> : Cellule photovoltaïque .....  | 4  |
| ✓ <b>Figure(I.3)</b> : Description d'une cellule .....   | 5  |
| ✓ <b>Figure(I.4)</b> Structured'une cellule photovoltaïque au silicium.....                                    | 7  |
| ✓ <b>Figure(I.5)</b> : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque .....                                    | 8  |
| ✓ <b>Figure(I.6)</b> : Caractéristique courant-tension .....   | 10 |
| ✓ <b>Figure(I.7)</b> : caractéristique Puissance-courant.....  | 13 |
| ✓ <b>Figure(I.8)</b> : caractéristique Puissance-tension. ....   | 13 |
| ✓ <b>Figure(I.9)</b> : Effet de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ .....                            | 13 |
| ✓ <b>Figure(I.10)</b> Effet de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$ .....                             | 14 |
| ✓ <b>Figure(I.11)</b> Effet de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ .....                            | 15 |
| ✓ <b>Figure(I.12)</b> : Effet de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ .....                          | 15 |
| ✓ <b>Figure(I.13)</b> Effet de la variation de $R_s$ sur la caractéristique $I=f(V)$ .....                     | 17 |
| ✓ <b>Figure(I.14)</b> Effet de la variation de $R_s$ sur la caractéristique $P=f(V)$ .....                     | 17 |
| ✓ <b>Figure(I.15)</b> Effet de la variation de $R_s$ sur la caractéristique $P=f(I)$ .....                     | 17 |
| ✓ <b>Figure(I.16)</b> Effet de la variation de $R_p$ sur la caractéristique $P=f(V)$ .....                     | 18 |
| ✓ <b>Figure(I.17)</b> Effet de la variation de $R_p$ sur la caractéristique $I=f(V)$ .....                     | 18 |
| ✓ <b>Figure(I.18)</b> Effet de la variation de $R_p$ sur la caractéristique $P=f(I)$ .....                     | 18 |
| ✓ <b>Figure(I.19)</b> : Association des modules en série.....  | 19 |
| ✓ <b>Figure (I.20)</b> : Caractéristique résultante d'un groupement en série de $n_s$ cellules identiques..... | 19 |

|  |    |
|--|----|
| ✓ <b>Figure(I.21):</b> Association des modules en parallèle.....   | 20 |
| ✓ <b>Figure (I.22) :</b> Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de $n$ cellules identiques .....      | 20 |
| ✓ <b>Figure(I.23):</b> Associations série et parallèle des modules .....   | 21 |
| ✓ <b>Figure (I.24) :</b> Caractéristique résultante d'un groupement hybride de $(n_p + n_s)$ cellules identiques ..... | 21 |

## ❖ CHAPITRE II Poursuite du point de puissance maximale

|  |    |
|--|----|
| ✓ <b>Figure(II.1):</b> Schéma d'un convertisseur DC-DC .....                                       | 23 |
| ✓ <b>Figure(II.2):</b> Schéma électrique d'un hacheur boost .....                                  | 25 |
| ✓ <b>Figure(II.3):</b> Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.....                 | 26 |
| ✓ <b>Figure(II.4):</b> Schéma électrique d'un hacheur boost fermé .....                            | 26 |
| ✓ <b>Figure(II.5)</b> Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.....                             | 27 |
| ✓ <b>Figure(II.6)</b> schéma bloc d'un hacheur boost .....   | 28 |
| ✓ <b>Figure(II.7)</b> Tension d'entrée de l'hacheur .....  | 28 |
| ✓ <b>Figure(II.8)</b> Tension de sortie de l'hacheur .....   | 28 |
| ✓ <b>Figure(II.9)</b> courant de sortie de l'hacheur .....   | 29 |
| ✓ <b>Figure(II.10)</b> la puissance de sortie de l'hacheur .....                                   | 29 |
| ✓ <b>Figure (II.11) :</b> Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT..... | 32 |
| ✓ <b>Figure(II.12)</b> Principe de la commande MPPT.....   | 33 |
| ✓ <b>Figure(II.13)</b> Recherche du PPM par la méthode (P&O).....                                  | 35 |
| ✓ <b>Figure(II.14)</b> l'algorithme de P&O classique .....   | 36 |
| ✓ <b>Figure(II.15)</b> Divergence de la méthode P&O.....   | 37 |
| ✓ <b>Figure(II.16)</b> structure de base de la commande floue.....                                 | 39 |
| ✓ <b>Figure(II.17)</b> Schéma de simulation de panneaux photovoltaïques avec un hacheur            | 41 |
| ✓ <b>Figure(II.18)</b> variation temporelle du courant. ....                                       | 41 |
| ✓ <b>Figure(II.19)</b> variation temporelle de la tension .....                                    | 41 |

|   |    |
|---|----|
| ✓ <b>Figure (II.20)</b> variation temporeale de la puissance..... | 42 |
| ✓ <b>Figure(II.21)</b> caractéristique I-V .....                  | 42 |
| ✓ <b>Figure (II.22)</b> Caractéristique P-V .....                 | 42 |
| ✓ <b>Figure (II.23)</b> variation temporeale du courant. ....     | 43 |
| ✓ <b>Figure (II.24)</b> variation temporeale de la tension.....   | 43 |
| ✓ <b>Figure (II.25)</b> variation temporeale de la puissance..... | 43 |

❖ **CHAPITRE III : simulation, résultat et discussions**

|   |    |
|---|----|
| ✓ <b>Figure (III.1)</b> Schéma de simulation du panneau PV.....   | 46 |
| ✓ <b>Figure(III.2)</b> Caractéristique Courant-Tension du panneau PV.....   | 48 |
| ✓ <b>Figure(III.3)</b> Caractéristique Puissance-Tension du panneau PV .....  | 48 |
| ✓ <b>Figure (III.4)</b> Simulink de panneau photovoltaïque exposé<br>à différents éclairagements.....   | 49 |
| ✓ <b>Figure(III.5)</b> Résultats de simulation des caractéristiques $I=f(V)$<br>pour différents éclairagement et une température $T_c = 25^\circ\text{C}$ .....                         | 50 |
| ✓ <b>Figure (III.6)</b> Résultats de simulation des caractéristiques $P=f(V)$<br>pour différents éclairagement et une température $T_c = 25^\circ\text{C}$ .....                        | 50 |
| ✓ <b>Figure( III.7)</b> Résultats de simulation des caractéristiques $I=f(V)$<br>pour différentes températures et un éclairagement $=1000\text{W/m}$ .....                              | 51 |
| ✓ <b>Figure (III.8)</b> Résultats de simulation des caractéristiques $P=f(V)$<br>pour différentes températures et un et un éclairagement $G=1000\text{W/m}^2$ .....                     | 52 |
| ✓ <b>Figure (III.9)</b> Schéma de simulation du hacheur boost.....  | 53 |
| ✓ <b>Figure (III.10)</b> Tension de sortie du hacheur boost.....  | 54 |
| ✓ <b>Figure (III.11)</b> Courant de sortie du hacheur boost.....  | 54 |
| ✓ <b>Figure (III.12)</b> Schéma de structure du système.....  | 55 |
| ✓ <b>Figure (III. 13)</b> Tension de sortie du système (panneau+hacheur).....   | 56 |
| ✓ <b>Figure (III.14)</b> Courant de sortie du système (panneau+hacheur).....  | 56 |
| ✓ <b>Figure (III.15)</b> Puissance de sortie.....   | 56 |
| ✓ <b>Figure (III.16)</b> Tension du panneau PV et la tension de sortie<br>du convertisseur avec une variation de température de $25^\circ\text{C}$ jusqu'à $40^\circ\text{C}$ .....     | 57 |
| ✓ <b>Figure (III.17)</b> Puissance du panneau PV et la Puissance de sortie du convertisseur<br>avec une variation de température de $25^\circ\text{C}$ jusqu'à $40^\circ\text{C}$ ..... | 57 |



|   |   |    |
|---|---|----|
| ✓ | <b>Figure (III.18)</b> Schéma block de la commande MPPT P&O).....   | 58 |
| ✓ | <b>Figure (III. 19)</b> Modèle SIMPOWER du panneau PV +hacheur avec<br>une commande MPPT (P&O).....   | 59 |
| ✓ | <b>Figure (III.20)</b> tension de sortie du convertisseur et la tension<br>du panneau PV.....   | 60 |
| ✓ | <b>Figure (III.21)</b> Puissance de sortie du convertisseur et la puissance<br>du panneau PV .....  | 61 |
| ✓ | <b>Figure (III.22)</b> Tension du panneau PV et la tension de sortie du convertisseur<br>avec une variation de température de 25°C jusqu'à 40°C.....            | 61 |
| ✓ | <b>Figure (III.23)</b> Puissance du panneau PV et la puissance de sortie<br>du convertisseur avec une variation de température de 25°c jusqu'à 40°c .....       | 62 |
| ✓ | <b>Figure (III.24)</b> Schéma de block de la commande MPPT flou.....  | 63 |
| ✓ | <b>Figure( III.25):</b> Fonctions d'appartenance de E-(a) et $\Delta E$ -(b) .....  | 64 |
| ✓ | <b>Figure(III.26):</b> Fonctions d'appartenance de $\Delta D$ .....   | 65 |
| ✓ | <b>Figure(III.27)</b> Approched'optimisation d'une commande MPPT floue.....   | 67 |
| ✓ | <b>Figure.(III.28)</b> Schéma synoptique de contrôleur MPPT floue type I.....   | 67 |
| ✓ | <b>Figure(III.29)</b> ynoSchémasptiquedecontrôleurMPPTfloue typeII.....   | 68 |
| ✓ | <b>Figure(III.30)</b> Réponses des deux contrôleurs pour les conditions standards :<br>la température T= 25°C et l'ensoleillement E= 1000W /m2.....             | 69 |
| ✓ | <b>Figure(III.30)</b> Réponses des trois contrôleurs pour une augmentation d'ensoleillement<br>(échelon E= 500 a 1000 w/m2) à température constante T 25°C..... | 69 |

# SOMMAIRE

|  |    |
|--|----|
| ✓ Introduction Générale.....   | 1  |
| ❖ <b>CHAPITRE I      L'Énergie Solaire Photovoltaïques PV</b>                    |    |
| ✓ Introduction .....   | 3  |
| ✓ Modélisation et Simulation d'une cellule photovoltaïque.....                   | 3  |
| ✓ Cellule photovoltaïque.....  | 3  |
| <i>a)</i> Constitution d'une cellule photovoltaïque.....                         | 4  |
| <i>b)</i> Différents types de cellules photovoltaïques.....                      | 6  |
| <i>c)</i> Principe de fonctionnement .....                                       | 7  |
| <i>d)</i> Circuit équivalent et modèle mathématique.....                         | 8  |
| <i>e)</i> Simulation d'un système photovoltaïque .....                           | 9  |
| ✓ Caractéristique tension-courant .....  | 10 |
| ✓ Caractéristique puissance-tension et puissance-courant .....                   | 13 |
| ✓ Effet extérieur et intérieur sur les grandeurs électriques de la cellule ..... | 13 |
| <i>a)</i> Effet extérieur .....  | 13 |
| <i>b)</i> Effet intérieur.....   | 17 |
| ✓ Association des cellules photovoltaïques .....                                 | 19 |
| <i>a)</i> Association Série.....   | 19 |
| <i>b)</i> Association Parallèle.....   | 20 |
| <i>c)</i> Associations série et parallèle .....                                  | 21 |
| ✓ Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque .....           | 22 |
| <i>a)</i> <i>Avantage</i> .....  | 22 |
| <i>b)</i> <i>Inconvénients</i> .....   | 22 |
| ✓ conclusion.....  | 23 |

## ❖ CHAPITRE II Poursuite du point de puissance maximale

|   |    |
|---|----|
| ✓ Introduction.....   | 25 |
| ✓ Hacheur.....  | 26 |
| ✓ Différents types de convertisseur DC-DC.....  | 26 |
| ✓ Hacheur boost.....  | 27 |
| a) Fonctionnement.....  | 28 |
| b) Modèle mathématique équivalent.....  | 29 |
| c) Simulation .....   | 31 |
| ✓ Principe De La Commande MPPT .....  | 32 |
| ✓ Différents Techniques de la commande MPPT.....  | 33 |
| a) Algorithme perturbation et observation (P&O) .....   | 34 |
| ✓ La Commande Mppt Flou.....  | 38 |
| ✓ Autres Méthodes.....  | 40 |
| ✓ Simulation du système PV-Hacheur avec la commande MPPT .....                                  | 41 |
| ✓ Modèle avec irradiation et température constante ( $G=1000\text{w/m}^2, T=25\text{c}^\circ$ ) | 34 |
| ✓ Conclusion .....  | 44 |

## ❖ CHAPITRE III simulation, résultat et discussions

|   |    |
|---|----|
| ✓ Introduction.....   | 46 |
| ✓ Simulation du panneau photovoltaïque.....                                       | 47 |
| ✓ Éclairement fixe $G = 1000\text{W/m}^2$ et pour des différentes températures... | 49 |
| ✓ simulation du convertisseur Boost.....  | 53 |
| ✓ Simulation du système (panneau+hacheur).....                                    | 54 |
| ✓ Programme de simulation de l'algorithme<br>perturbation et observation P&O..... | 58 |

|  |    |
|--|----|
| ✓ Simulation du système global.....  | 58 |
| ✓ Simulation du MPPT flou.....   | 63 |
| ✓ Variables du MPPT flou.....  | 63 |
| ✓ Fonctions d'appartenance.....  | 64 |
| ✓ Règles floues.....   | 65 |
| ✓ Conception du contrôleur MPPT flou.....  | 67 |
| ✓ Résultats de Simulation.....   | 68 |
| ✓ Fonctionnement sous des Conditions Constantes.....                                     | 68 |
| ✓ Comportement du système face à un changement de les conditions<br>météorologiques..... | 70 |
| ✓ conclusion .....   | 72 |
| ✓ <b>Conclusion générale</b> .....   | 70 |
| ✓ Bibliographie.....   | 73 |

# **Introduction générale**

## Introduction générale

La production d'énergies est un défi de grande importance pour les années à venir, en effet les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter, par ailleurs les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergies pour mener à bien leur développement de nos jours une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles, la consommation de ces sources donne lieu à de émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution, le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive des stocks de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Aujourd'hui, l'énergie renouvelable devient progressivement l'énergie à part entière, rivalisant avec des énergies fossiles du point de vue coût et performance de production.

L'énergie photovoltaïque connaît actuellement un fort développement dans le monde, vu son caractère écologique, elle apparaît comme une source importante et telle que la quantité d'énergie solaire qui arrive à la surface de la terre dans un jour est dix fois plus grande que celle consommée.

L'électricité photovoltaïque peut être produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur, ce qui la rend accessible à une grande partie de la population mondiale, mais il faudra notamment s'affranchir du caractère intermittent de la fourniture d'énergie.

Les générateurs photovoltaïques, sont couplés généralement à un système de stockage assurant une disponibilité d'énergie de façon continue, le type de stockage généralement utilisé dans ces systèmes est la batterie au plomb. La maturité dont cette technologie fait preuve et son faible coût sont les raisons principales de l'utilisation de ces batteries.

# Introduction générale

---

Pour cela nous intéressons, dans le cadre de ce travail, à l'étude d'un système photovoltaïque avec des batteries de stockage.

Le présent travail est subdivisé en 3 chapitres:

- Le premier chapitre est consacré à quelques généralités sur la production de l'énergie photovoltaïque et la recherche du MPPT du système photovoltaïque-hacheur avec l'équipement de commande et la simulation d'un système photovoltaïque, fonctionnant en MPPT.
- Dans le deuxième chapitre, on présente la poursuite du point de puissance maximale.
- Dans le troisième chapitre, quant à lui sera détaillée la simulation du système photovoltaïque tout en donnant les principaux résultats. Et les règles de conception du contrôleur MPPT. À la fin de ce chapitre nous avons fait une étude comparative de quel que type MPPT.

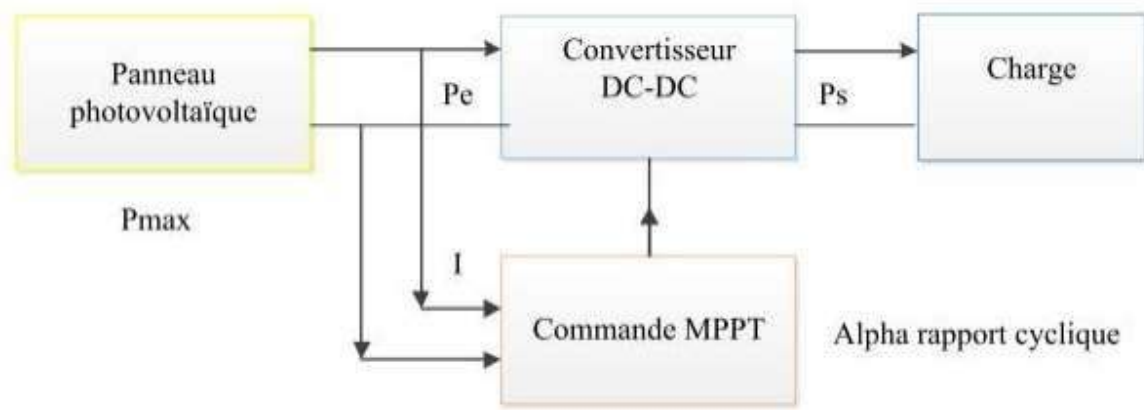
# *CHAPITRE I*

L'Énergie Solaire  
Photovoltaïques PV



## I-1/Introduction

Pour assurer le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque (GPV), un équipement de commande doit être mis entre le GPV et la charge Figure (I.1), dont le but est l'adaptation des deux équipements (générateur photovoltaïque - charge) pour un meilleur transfert d'énergie vers la charge. Ce dernier peut augmenter d'une manière significative le rendement en puissance de GPV, nous utilisons pour cela un convertisseur DC-DC (hacheur) muni d'une commande de poursuite de point de puissance maximale (MPPT).



**Figure (I.1):** Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

Dans ce chapitre nous nous intéresserons :

- En première lieu à la modélisation et la simulation du panneau photovoltaïque
- En deuxième lieu à la recherche du MPPT du système photovoltaïque-hacheur avec l'équipement de commande.

## I-2/Modélisation et Simulation d'une cellule photovoltaïque

### Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est également un composant électronique qui est, exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est

à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est proportionnel à la puissance lumineuse incidente, La cellule photovoltaïque délivre un courant continu [1].



Figure (I.2): Cellule photovoltaïque.

### I-3/Constitution d'une cellule photovoltaïque

C'est l'élément de base qui grâce à lui la conservation est faite par l'assemblage de plusieurs cellules, on peut atteindre la puissance que l'on veut, les photopiles ou cellules photovoltaïques. Sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs ayant des propriétés intermédiaires entre conducteur et isolants.

Le matériau de base est dans la plupart des cas le silicium. Selon les procédés de fabrications, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, poly cristalline ou monocristalline. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de gallium (AsGa), Tellure de cadmium (CdTe) [4].

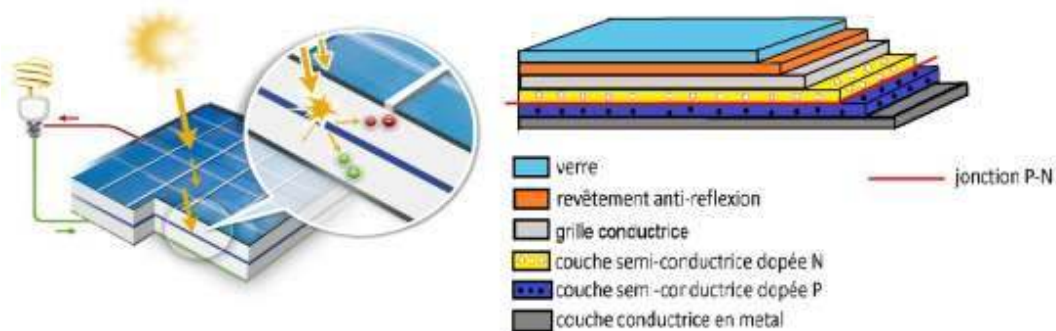
Le fonctionnement des photopiles est basé sur la propriété électronique acquise par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des "impuretés") sont substitués à des atomes de silicium dans un réseau cristallin : c'est ce que l'on appelle le dopage :

- Si l'atome d'impuretés contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type « N » (ex : dopage au phosphore).

- Si l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le Silicium, le matériau sera déficitaire en électrons: il sera dit de type "P" (ex: dopage au bore).

Une cellule solaire sera obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposées (jonction PN). Au voisinage de la jonction ; un champ électrique apparaît provoqué par le déséquilibre de charges. Il va contribuer à drainer les électrons qui auront été détachés par l'énergie des photons (grains de lumière) incidents. Pratiquement, la cellule PV est composée de plusieurs couches minces Figure (I.3) à savoir:

- Une couche "antireflet" sur la face avant dont le but est de faciliter au maximum la pénétration d'un maximum de photons à travers la surface et de réduire les pertes par réflexion.
- Une grille conductrice avant « collectrice des électrons » qui doit également être liée au silicium et ne pas être sensible à la corrosion.
- Une couche dopée N avec porteurs de charge libres négatifs (électrons).
- Une couche dopée P avec porteurs de charge positifs (trous).
- Une surface de contact conductrice en métal (collectrice des électrons), ayant une bonne conductivité ainsi qu'un bon accrochage sur le silicium.



**Figure (I.3):** Description d'une cellule.

### I-4/Différents types de cellules photovoltaïques

Il existe plusieurs types des panneaux photovoltaïques selon le type de matériaux utilisés dans les constructions:

- Silicium monocristallin
- Silicium polycristallin
- Silicium amorphe
- Arséniure de gallium
- Tellure de cadmium
- Silicium ruban

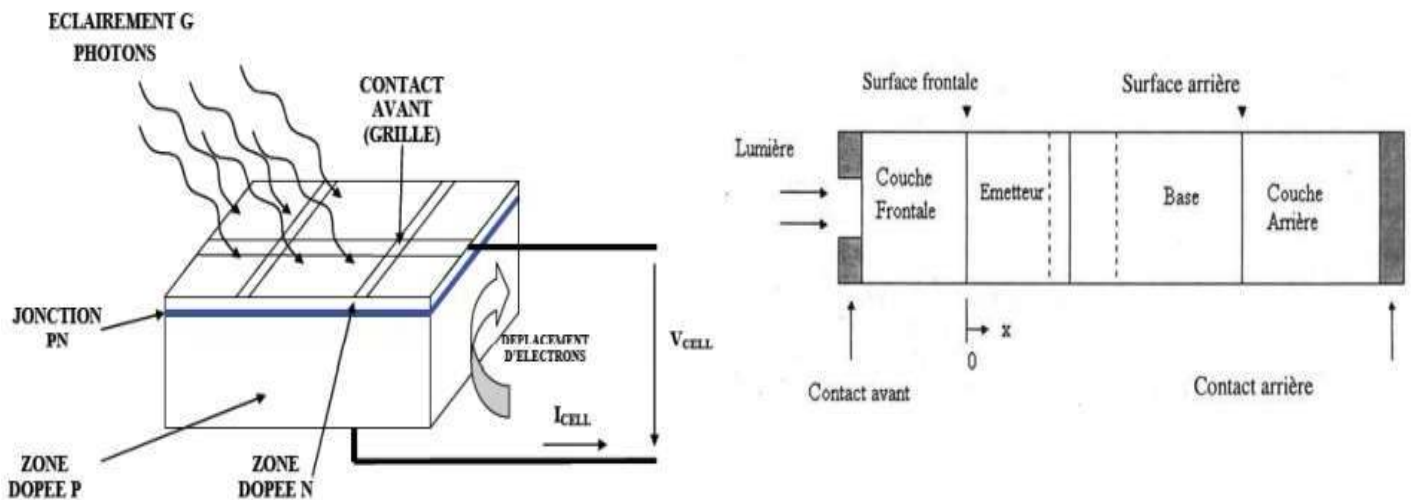
Une comparaison entre les différents types de cellules photovoltaïques est illustrée par le tableau suivant:

| Type de cellule         | Rendement des cellules PV |                |             | Domaines d'applications  |
|-------------------------|---------------------------|----------------|-------------|--|
|                         | Théorique                 | En laboratoire | Disponibles |  |
| Silicium monocristallin | 27,0%                     | 24,7%          | 14,0-16,0%  | Modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)                |
| Silicium polycristallin | 27,0%                     | 19,8%          | 12,0-14,0%  | Modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)       |
| Silicium amorphe        | 25,0%                     | 13,0%          | 6,0-8,0%    | Appareils de faible puissance de production d'énergie embarquée (calculatrice, montres...) modules de grandes dimensions |
| Arséniure de gallium    | 29,0%                     | 27,5%          | 18,0-20,0%  | Systèmes de concentrateur, espace (satellites).  |
| Tellure de cadmium      | 28,5%                     | 16,0%          | 8,0%        | Modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)  |
| Silicium ruban          | 27,0%                     | 27,0%          | 9,0-11,0%   | Module non spécifique  |

**Tableau I.1** Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques

## I-5/Principe de fonctionnement

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium. Une dopée P « dopée au bore » et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel, lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons ((charges N)) et des trous ((charges P)). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. À travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ (0.6V) pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (VOC). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (ICC). [7]



a. Schéma de principe

b. Coupe transversale d'une cellule solaire

**Figure (I.4)** Structure d'une cellule photovoltaïque au silicium [16]

Si l'énergie du photon  $E_{ph}$  correspond pas (inférieur) au gap du semi-conducteur la cellule ne fonctionne pas, mais si elle est supérieure ou égale au gap il y a une conversion et la cellule fonctionne.

### I-6/Circuit équivalent et modèle mathématique:

La figure (I.5) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque. Il correspond à un générateur de courant  $I$  monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

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

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

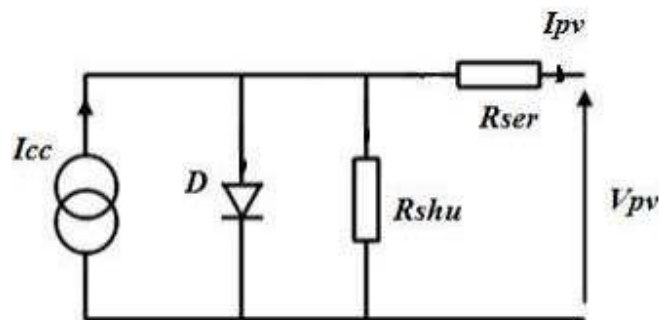


Figure (I.5): Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par [8]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{e (V_{pv} + (I_{pv} R_{ser}))}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} R_{ser})}{R_{shu}} \quad (I.1)$$

Avec

$I_{sat}$ : le courant de saturation;

$K$ : la constante de Boltzmann ( $1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ),

**T**: la température effective des cellules en Kelvin (K),

**e**: la charge de l'électron ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ ),

**n**: le facteur d'idéalité de la jonction ( $1 < n < 3$ ), lorsqu'elle fonctionne en générateur,

**V<sub>pv</sub>**: la tension aux bornes de cette même cellule,

**I<sub>ph</sub>** est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de court-circuit),

**R<sub>shu</sub>** est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction,

**R<sub>ser</sub>** est la résistance série représentant les diverses résistances de contact et de connexions.

### ***I-6/Simulation d'un système photovoltaïque***

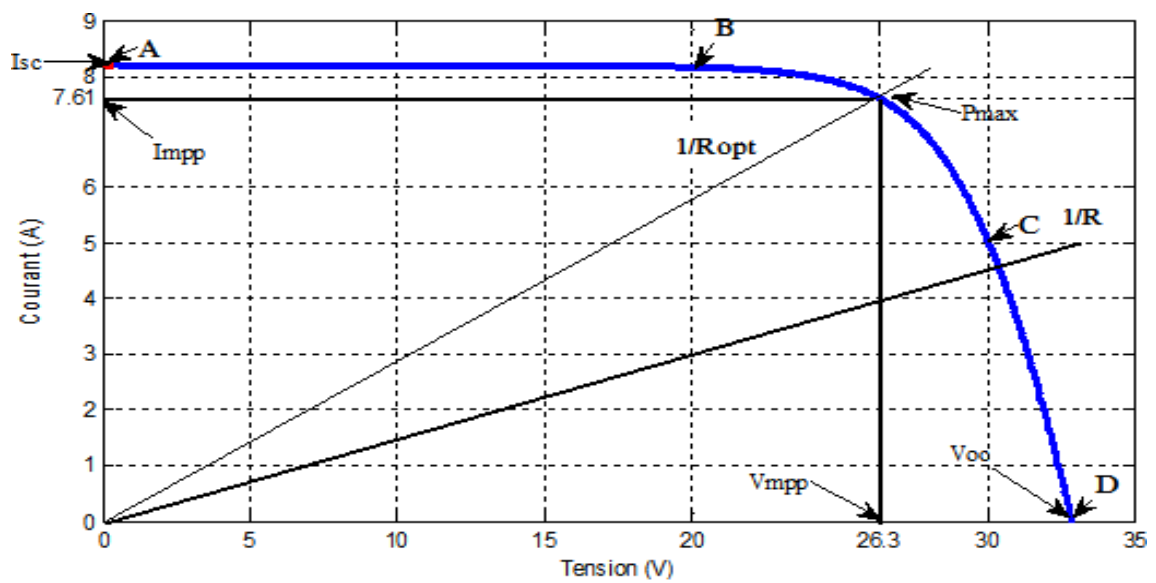
Dans cette simulation on a utilisé un module photovoltaïque MSX60 (Tableau 05), et, un Hacheur Boost caractérisé par:

$$C_1 = 2200 \cdot e^{-6} F, C_2 = 2200 \cdot e^{-6} F, L = 250 \cdot e^{-6} H, R_{ch} = 20 \text{ ohms}$$

| Caractéristiques                             | Spécification   |
|--|-----------------|
| NombredescellulesNs                          | 36              |
| Puissance maximalePmax                       | 60W             |
| TensionàPmaxVmpp                             | 17.1V           |
| Courant àPmaxImpp                            | 3.5A            |
| Puissance minimumgarantie                    | 58W             |
| Courantdecourt-circuitIcc                    | 3.8A            |
| Tensiondecircuitouvert                       | 21.1V           |
| CoefficientdelatempératuredeVco              | -80±10Mv/°C     |
| CoefficientdelatempératuredeIcc              | 0.065±0.015%/°C |
| Coefficient de la température de lapuissance | -0.5±0.05%/°C   |

Tableau.02:caractéristiqueélectrique dumodule photovoltaïqueMSX60

Caractéristiquetension-courant



Figure(I.6):Caractéristiquecourant-tension.



Figure (I.6) montre la caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule PV à une température fixée ( $T_c$ ) et à une certaine ambiante irradiation ( $G_a$ ).

Si une résistance série variable ( $R_{chopt}$ ) connectée à la terminale de la cellule, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de la courbe courant-tension et la caractéristique courant-tension de la charge. La caractéristique de la charge résistive est une droite avec  $I/V = 1/R_{chopt}$ . Si la résistance est petite la cellule fonctionne dans la région A vers B seulement (comme une source de courant constant) et si la résistance est grande, la cellule fonctionne dans la région C vers D de la courbe (comme une source de tension constant) [5].

Les paramètres caractéristiques peuvent être déterminés à partir de la courbe courant-tension.

- **Courant de court-circuit  $I_{cc}$**

C'est la plus grande valeur de courant générée par la cellule sous les conditions de court-circuit où  $V=0$ . (Pratiquement  $I_{cc} = I_{ph}$ )

- **Tension de circuit-ouvert ( $V_{co}$ )**

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

$$V_{co} = \frac{(m \cdot k \cdot T_c)}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) = V_{th} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) \quad (\text{I.2})$$

Avec:

$$V_{th} = \frac{(m \cdot k \cdot T_c)}{q} \quad : \text{tension thermique.}$$

- **Puissance maximale**

C'est la puissance électrique maximale que peut fournir le module, qui est associée à une tension maximale  $V_m$  et à une intensité maximale  $I_m$ . Lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement

STC standard (25° et un éclairement de 1000 w/m<sup>2</sup>, on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête.

- **Facteur de forme (FF)**

C'est le rapport de la puissance maximale qui peut être délivrée à la charge sur le produit de ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ )

$$FF = \frac{P_{max} = I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (I.3)$$

Pour les cellules ayant un rendement moyen, le FF prend des valeurs d'ordre 0.7 à 0.85. Le facteur de forme FF diminue si la température augmente.

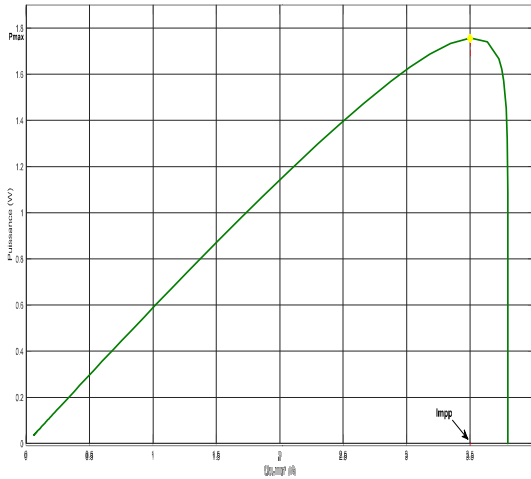
- **Rendement de la conversion**

C'est le rapport de la puissance électrique maximale pouvant être extraite, à la puissance de rayonnement incident ( $P_{inc}$ ) sur la surface  $X$  de la cellule.

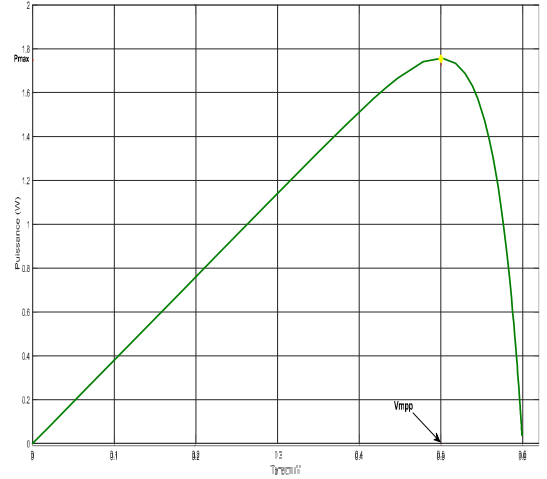
$$\eta = \frac{P_{max} = I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{P_{inc}} = \frac{V_{co} \cdot I_{cc} \cdot FF}{S \cdot G_a} \quad (I.4)$$

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

**I-7/Caractéristiquepuissance-tensionetpuissance-courant**



**Figure(I.7):** caractéristique Puissance-courant.



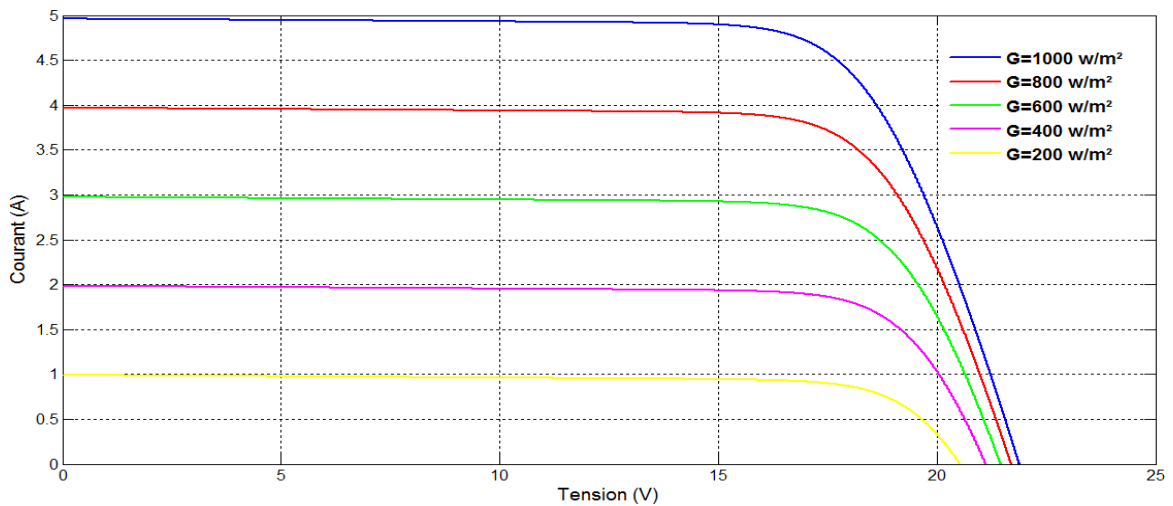
**Figure(I.8):** caractéristique Puissance-tension.

**I-**

**8/Effetsexterieursetintérieursurlesgrandeurselectriquesdelacellule**

**a) Effetsexterieurs**

- Effetdevariationdel'éclairément



**Figure(I.9):** Effetdel'éclairémentsur lacaractéristique  $I=f(V)$

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. Figure (I.9) représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température constante. Le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement [6].

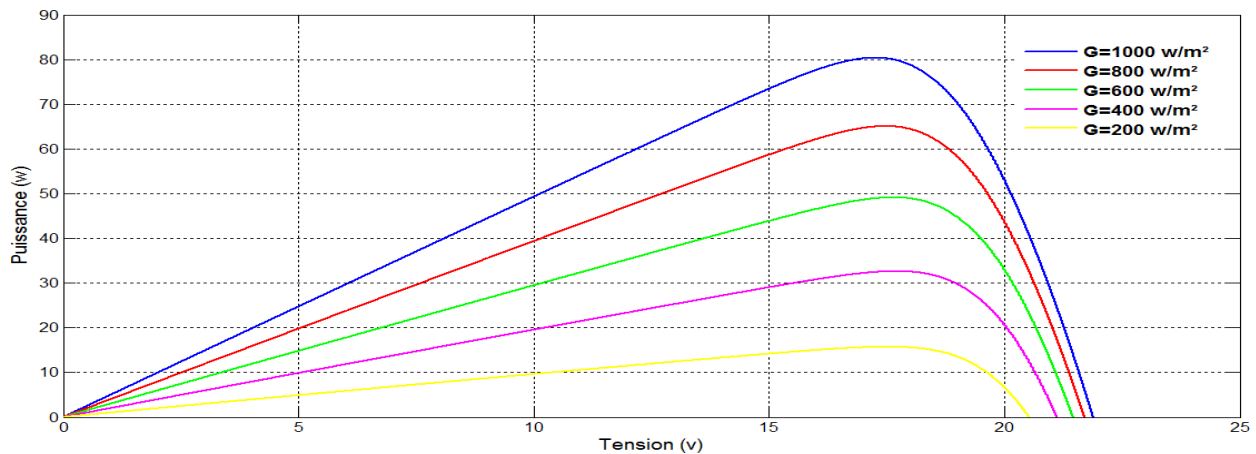


Figure (I.10) Effet de l'éclairement sur la caractéristique  $P=f(V)$

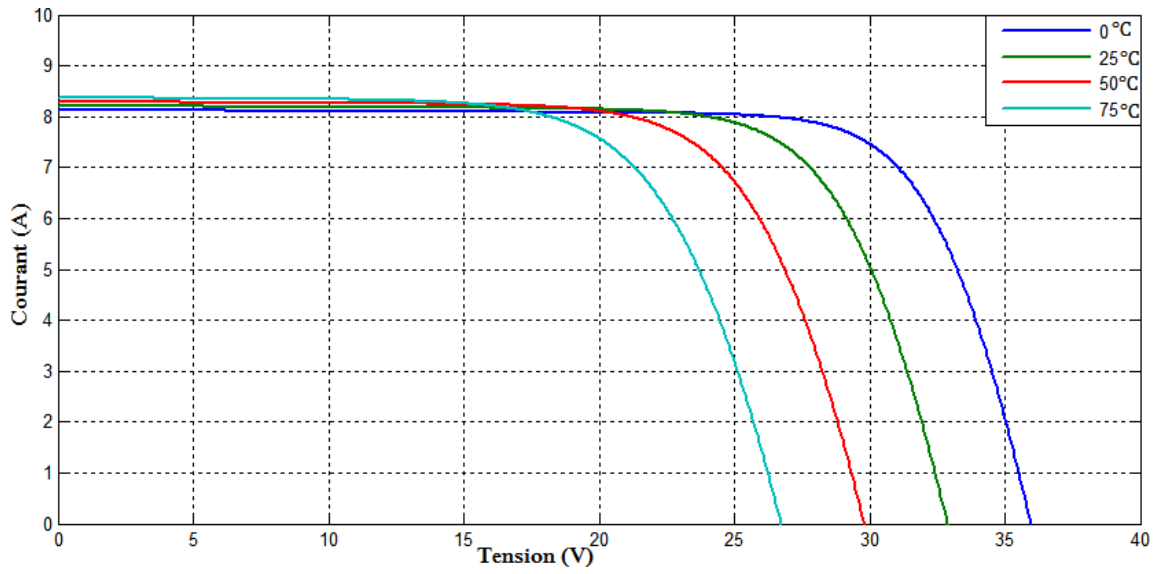
Figure (I.10) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'effet de l'éclairement sur la caractéristique  $P(V)$ .

- **Effet de la température**

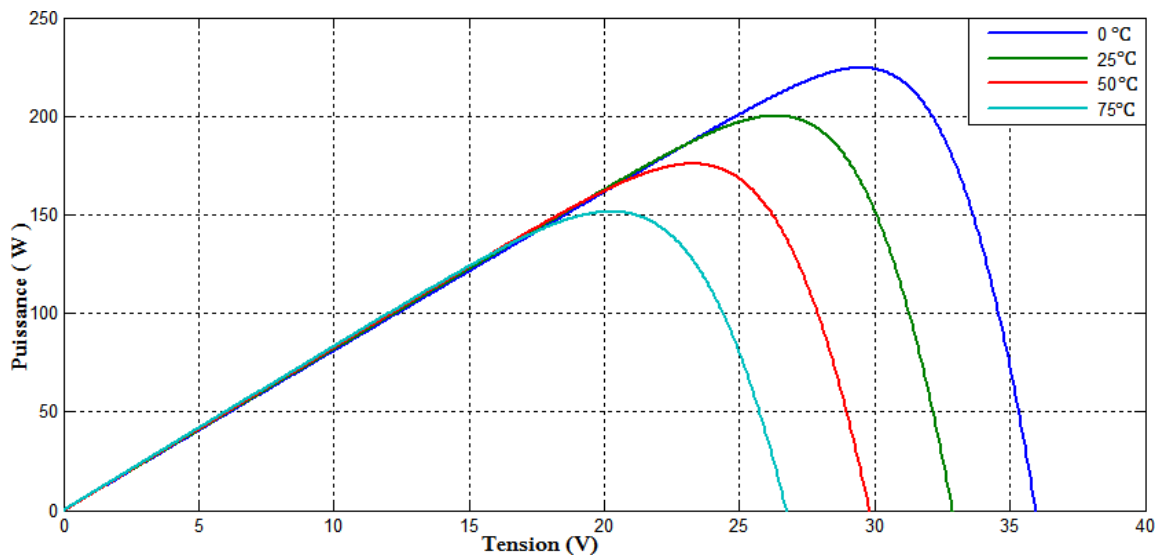
L'effet de la température est important et a des conséquences pour la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques.

La température est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires, susceptibles de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique, il se dissipe sous forme de chaleur ; c'est pourquoi la température de la cellule ( $T_c$ ) est toujours plus élevée que la température ambiante ( $T_a$ ).

$$T_c = T_a + \frac{\epsilon_m}{100} (T_{uc} - 25) \quad (I.5)$$



Figure(I.11) Effet de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$



Figure(I.12): Effet de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$

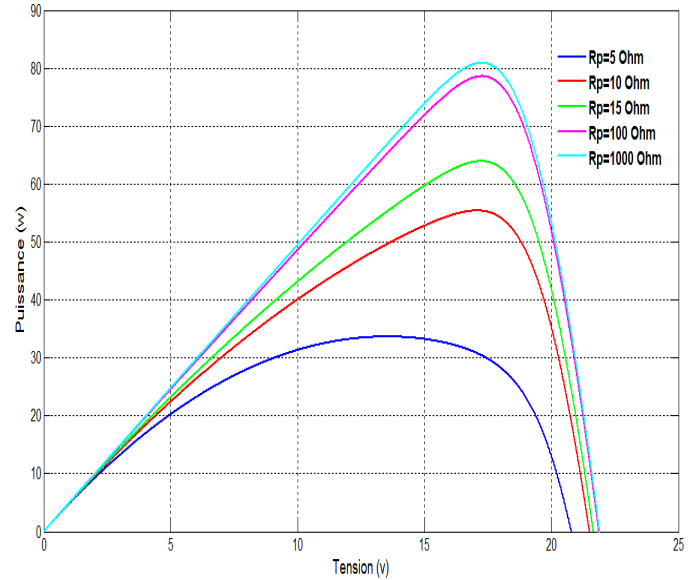
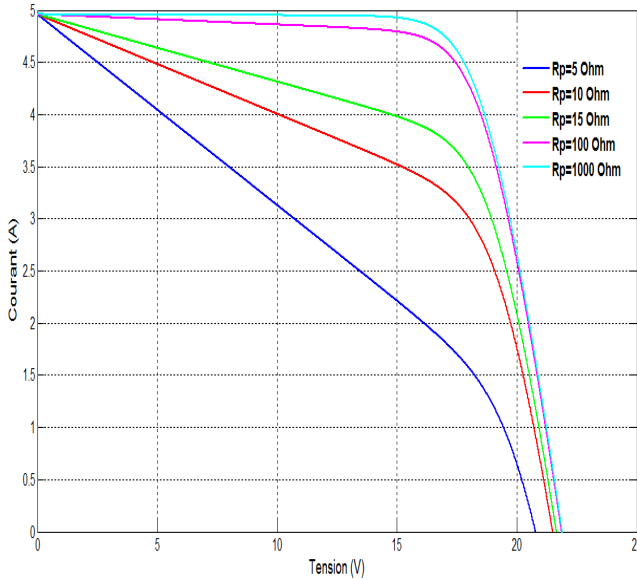
Figure (I.11), montre l'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$ . Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique  $I=f(V)$ .

Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influence négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution [6] [21].

Figure (I.12) 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  $P=f(V)$ .

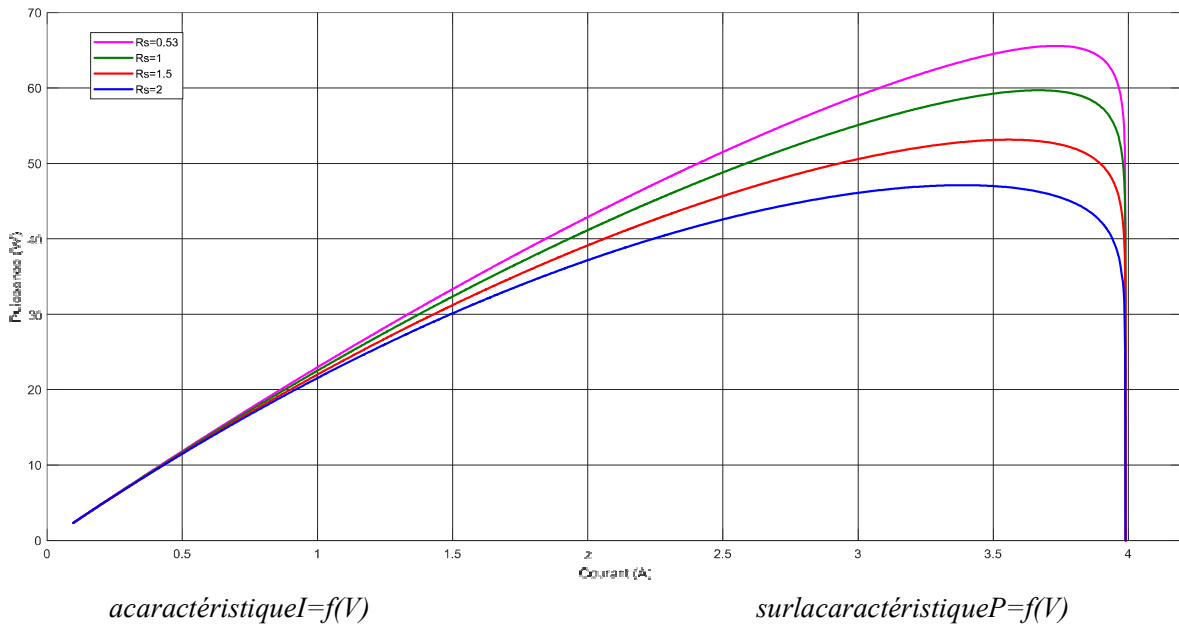
**b) Effetsintérieurs**

• **Variationdelarésistancesérie**



**Figure(I.13)EffetdelavariationdeRs**

**Figure(I.14)EffetdelavariationdeRsurl**



**Figure(I.15)EffetdelavariationdeRsurlacaractéristique  $P=f(I)$**

• Variation de la résistance parallèle ( $R_p$ )

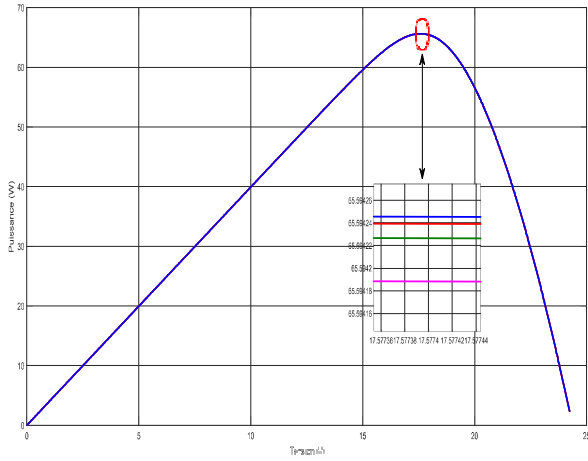


Figure (I.16) Effet de la variation de  $R_p$  sur la caractéristique  $P=f(V)$

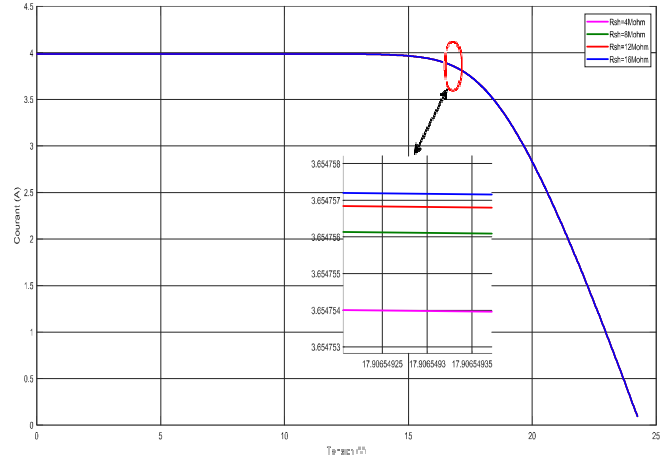


Figure (I.17) Effet de la variation de  $R_p$  sur la caractéristique  $I=f(V)$

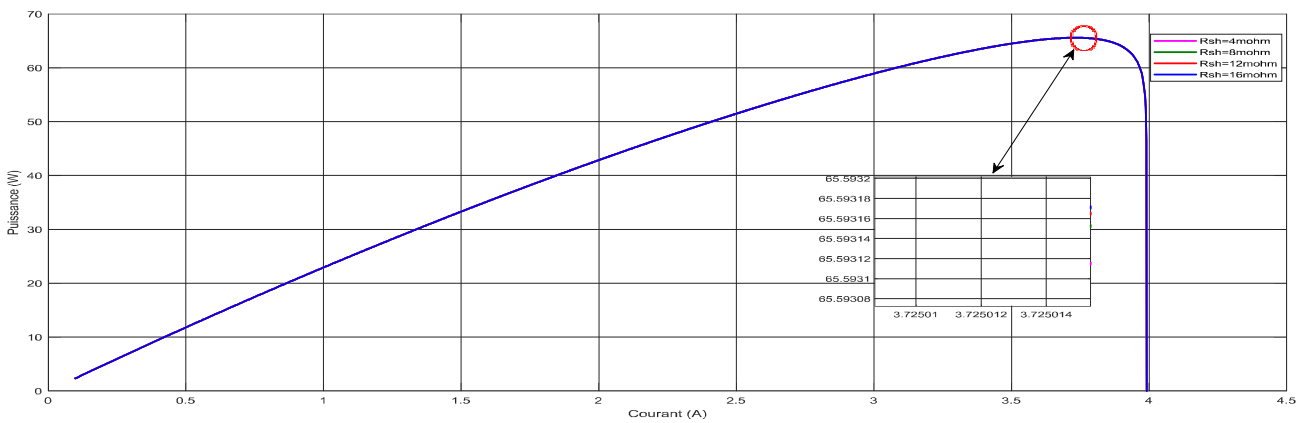


Figure (I.18) Effet de la variation de  $R_p$  sur la caractéristique  $P=f(I)$

On remarque une légère influence de la variation de  $R_p$  sur les grandeurs électriques de la cellule photovoltaïque.

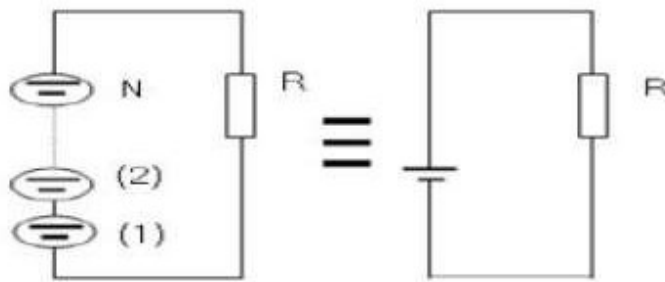


***I-9/Association des cellules photovoltaïque:***

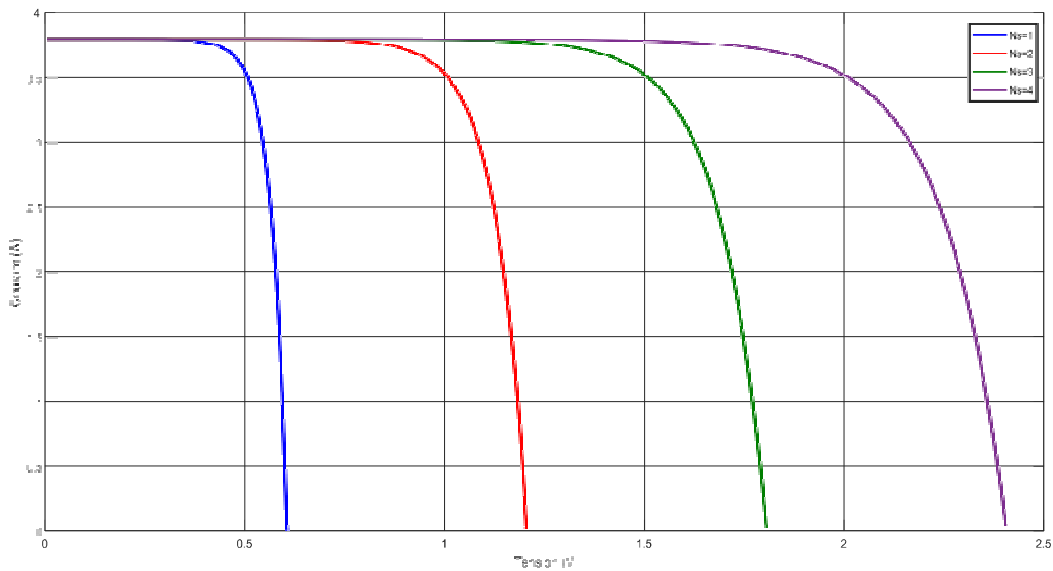
Afin d'adapter la source à la charge du point de vue de puissance nous utilisons trois types de montages des cellules photovoltaïque:

***a) Association Série***

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné.



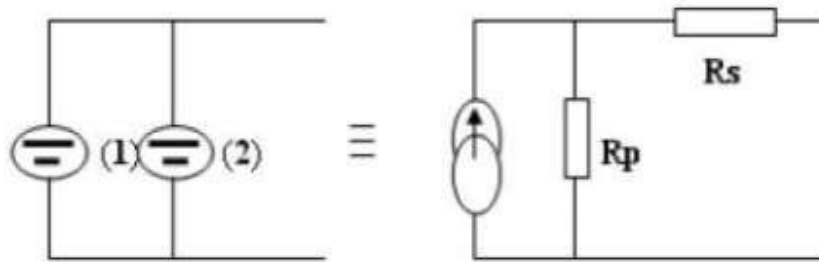
**Figure(I.19):** Association des modules en série.



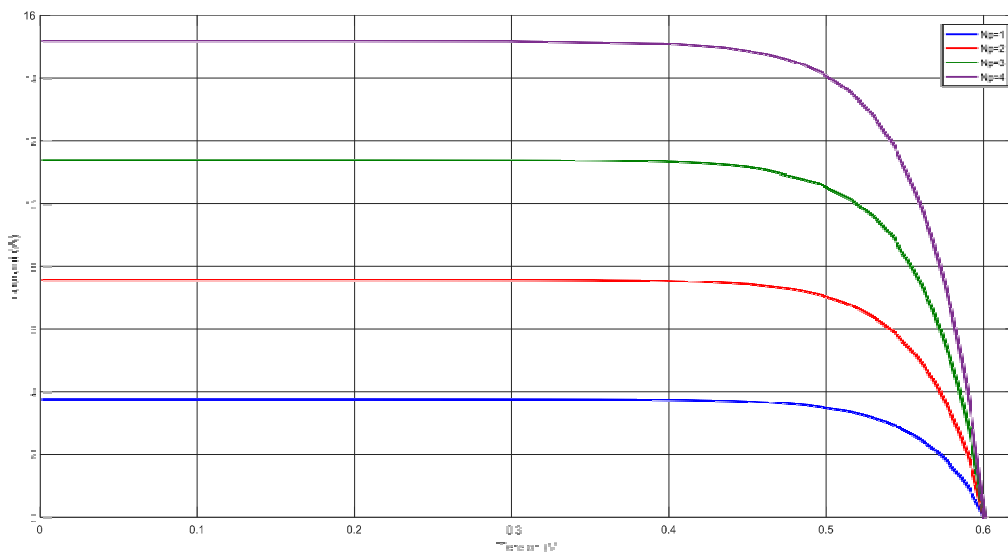
**Figure(I.20):** Caractéristique résultante d'un groupement en série de cellules identiques

**b) Association Parallèle**

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont du a la mémé celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée.



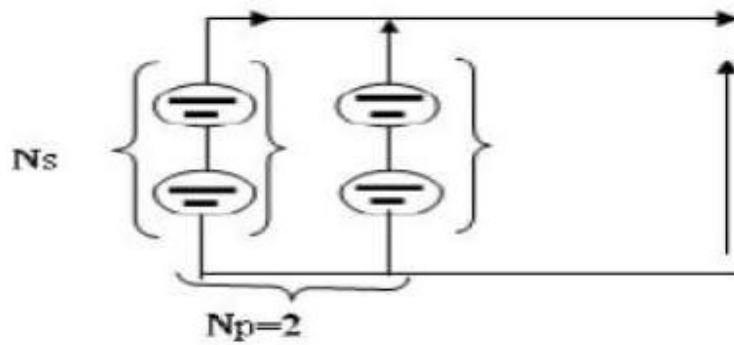
**Figure(I.21):** Association des modules en parallèle.



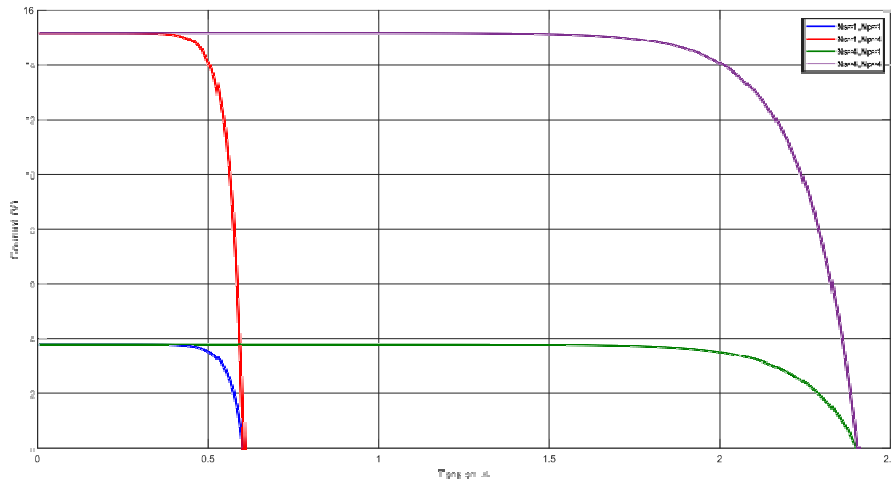
**Figure(I.22):** Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de  $n$  cellules identiques

**c) Associationsérieetparallèle**

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant decourt-circuit  $I_{cc}$  et de la tension à vide  $V_{oc}$  sont plus ou moins importantes Figure(I.23) La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules à uneallure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'yait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation ettempératureuniformes).



**Figure(I.23):**Associationsérie etparallèle desmodules.



**Figure(I.24):**Caractéristiquerésultanted'ungroupementhybridede( $n_p+n_s$ )cellulesidentiques

***I-10/Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque:***

Tout système de production d'énergie photovoltaïque a ses avantages et ses inconvénients.

***a) Avantage:***

d'abord, une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au mégawatt.

Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est pas l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

***b) Inconvénients:***

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15%, avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport au générateur diesel que pour les faibles demandes d'énergie en régions isolées.

Le faible rendement des panneaux photovoltaïque s'explique par le fonctionnement même des cellules pour arriver adéplaces un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale a 1ev. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. de même, les rayons

lumineux dont l'énergie est supérieure a 1ev perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

Tributaire des conditions météorologiques.

Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le cout du générateur est accru. Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes [17].

### **I-11/Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, l'énergie solaire et l' énergie photovoltaïque .Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que leur type avec à la fin un aperçu de cette énergie en Algérie

---

# CHAPITRE II

Poursuite du point de  
puissance maximale

## II-1/Introduction

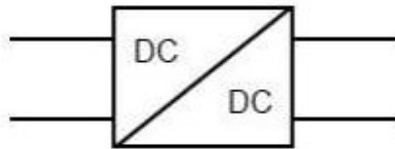
Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, sans que l'on sache à quel moments ils ont été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissances maximum, Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum» ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT). Le principe de ce commande est d'effectuer une recherche du point de puissances maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

## II-2/Hacheur

L'hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue [13].

L'hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [16].

Les hacheurs sont des convertisseurs continus qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation [12] [20].



Figure(II.1): Symbole d'un convertisseur DC-DC.

### a) Différents types de convertisseur DC-DC

Il existe plusieurs types de hacheurs DC-DC. (Tableau) Parmi lesquels, on présente le principe des trois types de convertisseurs à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), (buck, boost, buck\_boost) utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer la tension et le courant souhaités afin de permettre l'adaptation des panneaux solaires avec des charges différentes [14].



| Type d'hacheur                       | Schéma équivalent | Rapport de transformation | Application   |
|--------------------------------------|-------------------|---------------------------|---|
| Hacheur série (buck)                 |                   | $\alpha$                  | Convertie sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure   |
| Hacheur parallèle (boost)            |                   | $\frac{1}{1-\alpha}$      | Convertie une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur   |
| Hacheur série-parallèle (buck-boost) |                   | $-\alpha$<br>$1-\alpha$   | Lorsque la machine fonctionne en moteur lorsqu'elle est alimentée par l'hacheur série ou génératrice La machine fonctionne en génératrice |

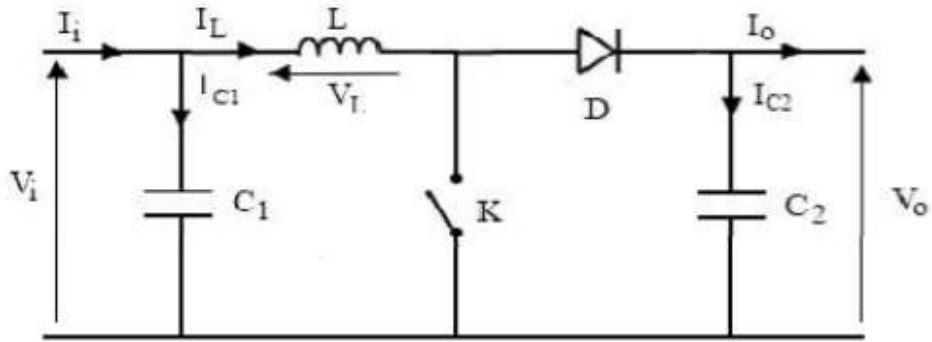
Tableau II.1 Comparaison des principaux convertisseurs DC-DC

**b) Hacheur boost**

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours

positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [3].

Connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (II.2). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [14].

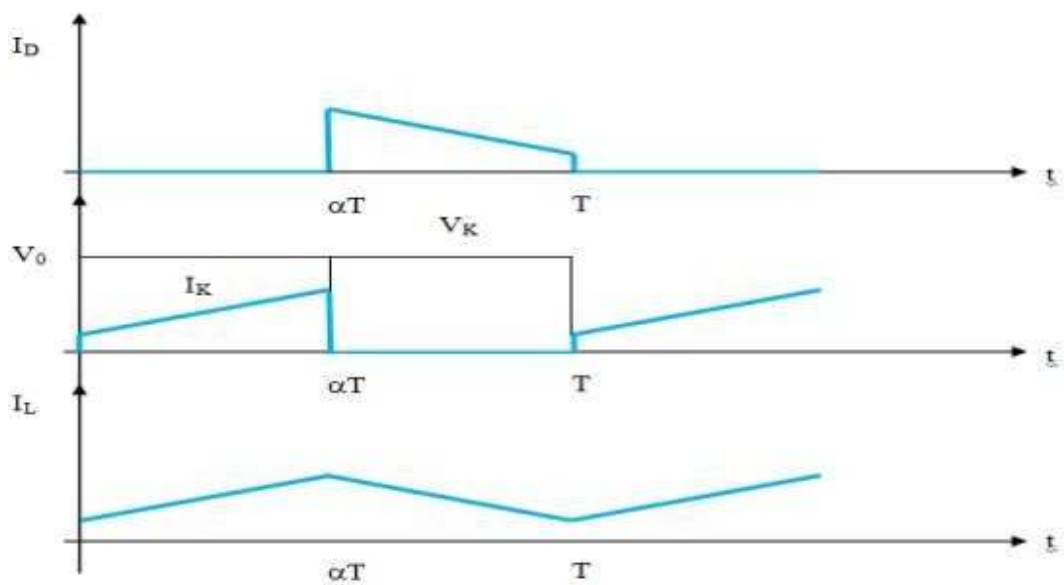


Figure(II.2):Schéma électrique d'un hacheur boost

a) **Fonctionnement:**

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée, le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [14] [19]

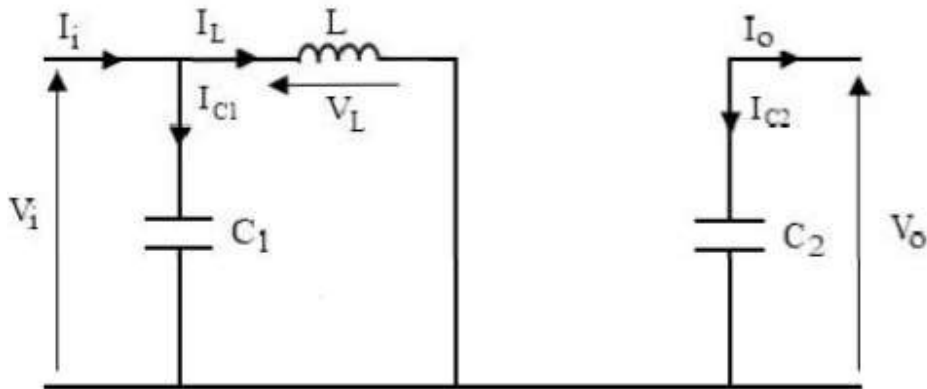
$$V_o (1 - \alpha) = V_i \tag{II.1}$$



**Figure(II.3):**Chronogrammesdecourantettensiond'unhacheurboost.**b) Modèlemathématiqueéquivalent:**

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions de l'hacheur sur volteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de représenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K.

celui de la Figure (II.4) présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c-à-d entre  $[0, \alpha T_e]$  [14].

**Figure(II.4):**Schémaélectriqued'unhacheurboostfermé.

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donnent les calculs suivantes :

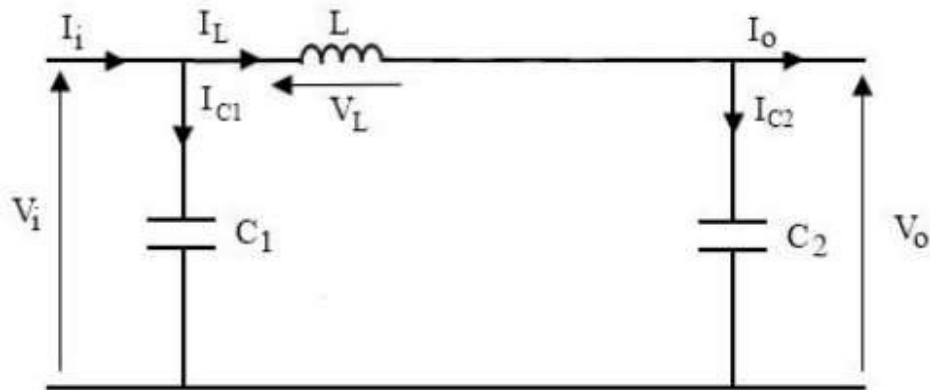
$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \quad (\text{II.2})$$

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (\text{II.3})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (\text{II.4})$$

L'état ouvert de l'interrupteur

K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant:



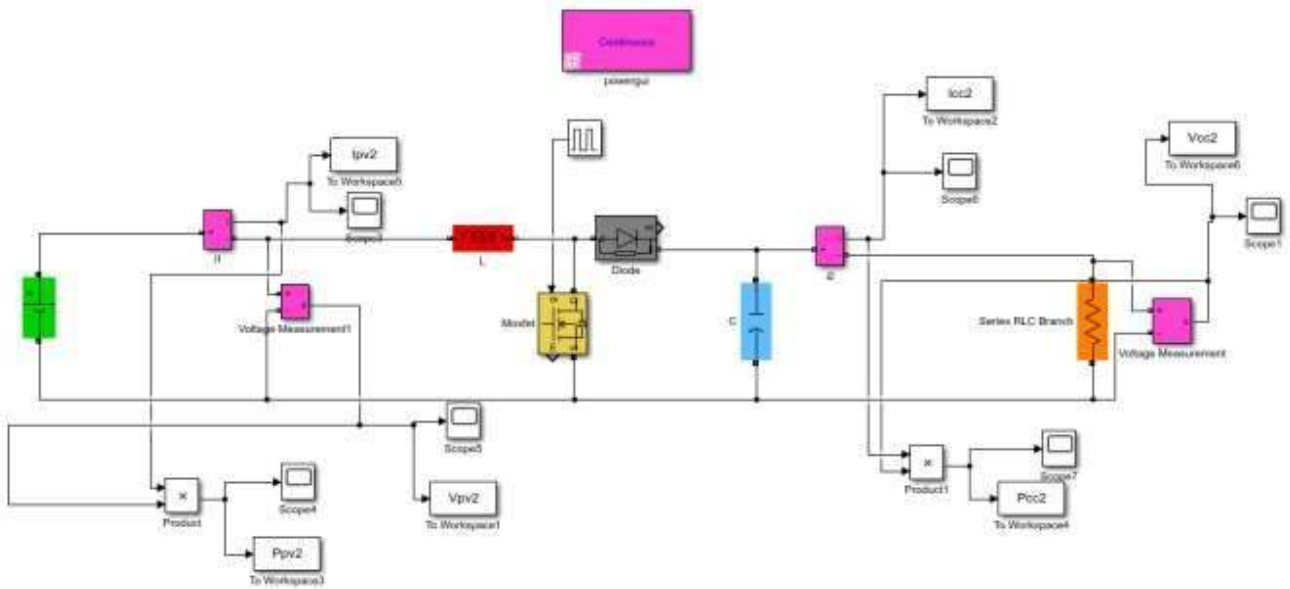
**Figure(II.5)** Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert

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

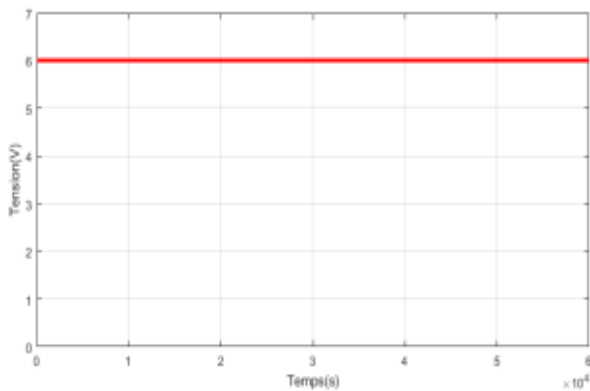
$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \quad (\text{II.7})$$

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (\text{II.8})$$

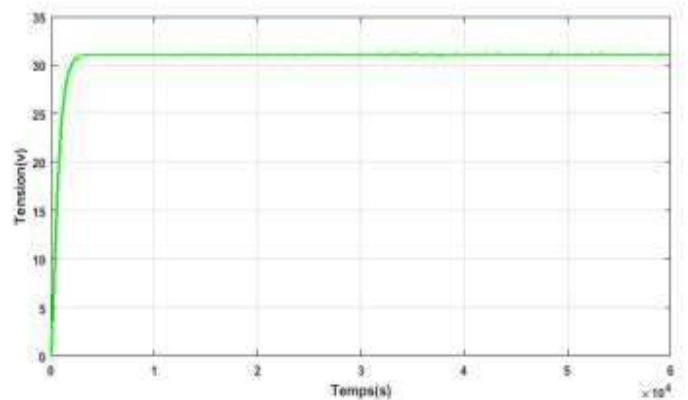
c) Simulation



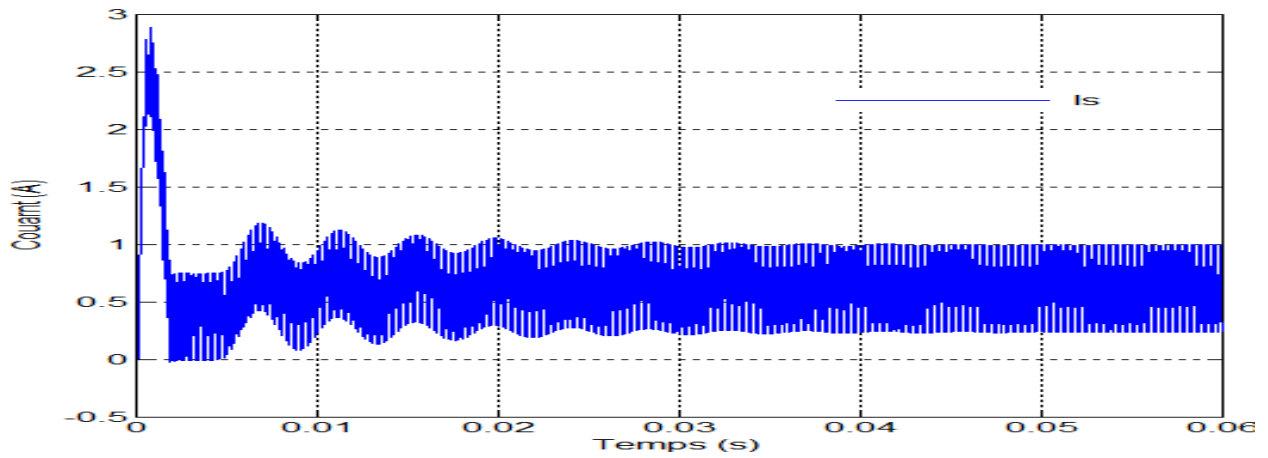
Figure(II.6)schémablocd'unhacheurboost.



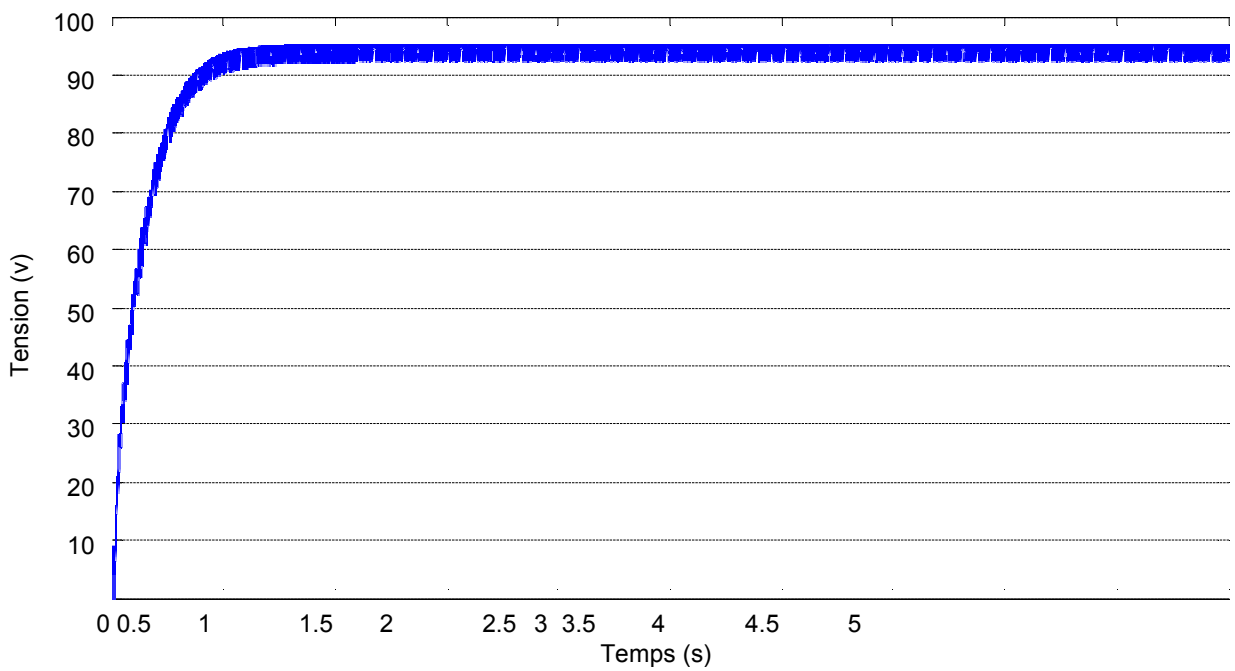
Figure(II.7)Tensiond'entréedel'hacheur.



Figure(II.8)Tensiondesortiedel'hacheur.



Figure(II.9) courant desortiedel'hacheur.



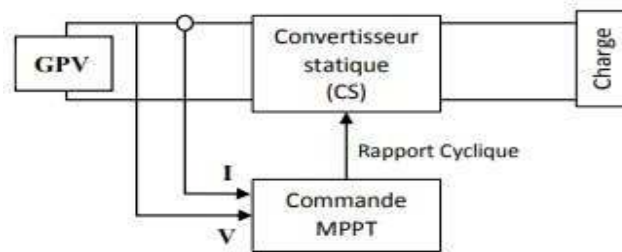
Figure(II.10) lapuissancedesortiedel'hacheur.

D'après les figures(II.6.7.8.9) on remarque que le circuit effectué correctement son rôle car la tension de sortie est supérieure à celle de l'entrée car la commande impose un rapport cyclique  $\alpha$ .

### II-3/Principe De La Commande MPPT

Par définition une commande MPPT associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de puissance. Ainsi, quel

que soient les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT [8]. Il peut être représenté par le schéma de la Figure (II.11).



**Figure (II.11):** Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) à l'aide d'un signal électrique approprié. Pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP [3].

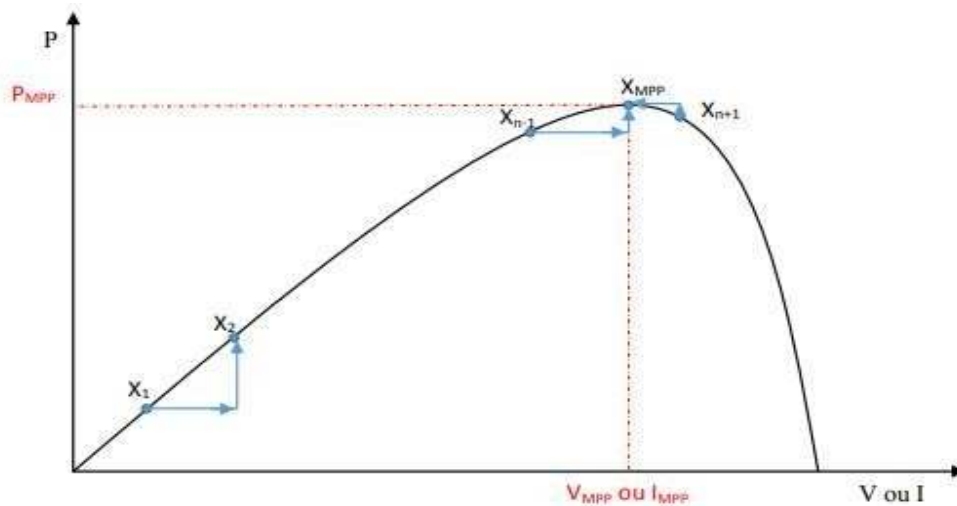


Figure II.12 Principe de la commande MPPT

#### II-4/Différents Techniques de la commande MPPT

La définition mathématique de l'optimum d'une fonction est le point par lequel sa dérivée par rapport à une variable donnée s'annule. Tous les algorithmes de calcul du point de puissance maximum consultés se basent sur ce principe. Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM :

- **Algorithme de perturbation et observation (P&O)**
- **Algorithme incrémental de la conductance (INC)**
- **la logique floue**
- **Les algorithmes à base de réseaux de neurones**
- **les algorithmes d'identification en temps réel du MPP**



Dans notre travailons'intéresseparlaméthode

**II-5/Perturb & Observ (P&O)**, nous rappelons brièvement le principe de cette méthode.

**a) Algorithme perturbation et observation (P&O)**

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension  $V_{ref}$ , ou du courant  $I_{ref}$ , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ( $P=VI$ ) [4]. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite, Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV [2].

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension  $V_{PV}$ , ce qui engendre une variation de la puissance [2]. Figure montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_p$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{pv}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire la puissance décroît cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lors que la tension décroît. À partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tensions sur les caractéristiques  $P(V)$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM. Et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

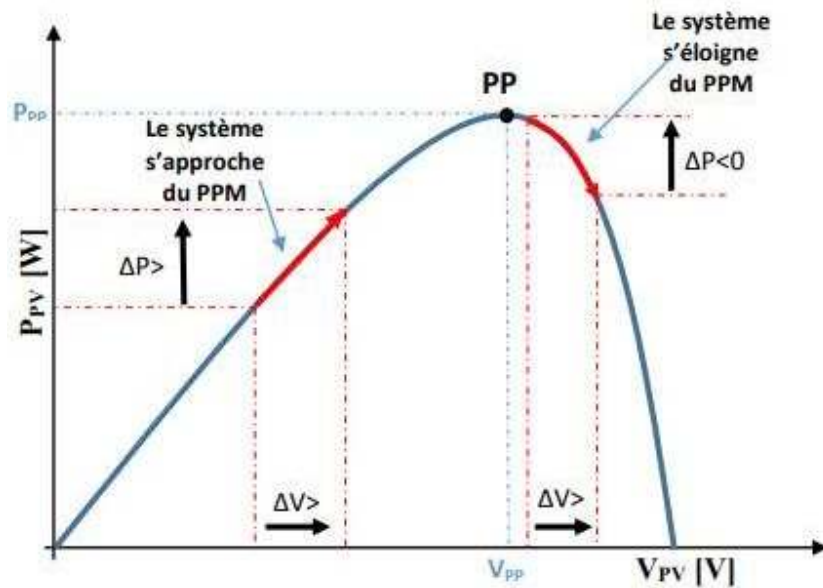


Figure II.13 Recherche du PPM par la méthode (P&O)

À partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $p(v)$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM. Et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant. L'utilisation d'un microprocesseur est plus appropriée pour la réalisation de la méthode P&O, même si des circuits analogiques peuvent être utilisés [18].

La Figure II.14 représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

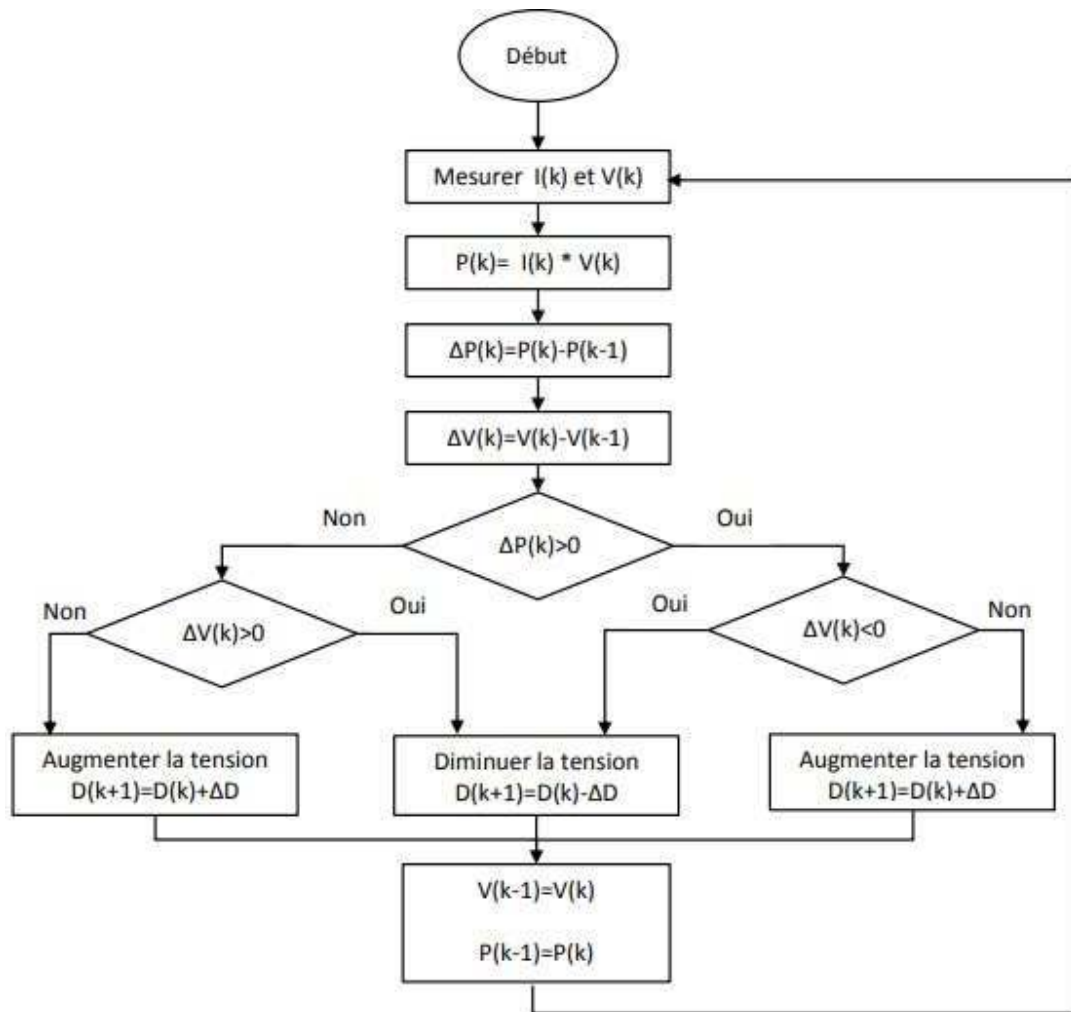


Figure II.14 l'algorithmede P&O classique

La méthode P&O est largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint [5]. Ces oscillations dépendent de la largeur du pas de la perturbation :

- Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.

- Si la largeur du pas est très petite les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend

cette commande difficile à optimiser. Un autre inconvénient de la méthode P&O est d'un changement rapide des conditions atmosphériques. Figure (II.15) Commencant par un point de fonctionnement A, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation  $\Delta V$  dans la tension  $V$  amènera le point de fonctionnement au point B, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance. Par contre, si par exemple l'éclairement augmente et déplace la courbe de puissance de  $P_1$  à  $P_2$ , sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C. Cela représente une augmentation de la puissance, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qu'il éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance.

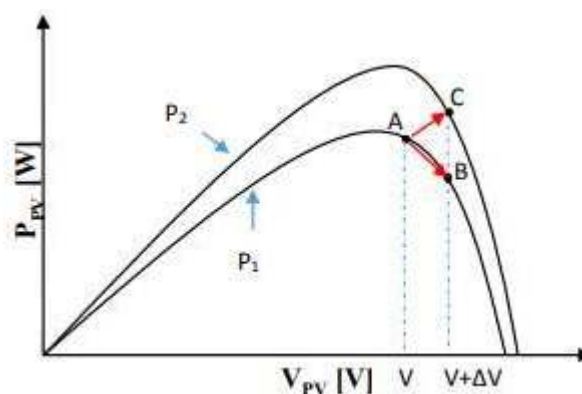


Figure II.15 Divergence de la méthode P&O

## II-6/La Commande Mppt Flou

La commande basée sur la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Luzy logique Control) est de plus en plus populaire grâce à l'évolution des microcontrôleurs [8-9]. L'avantage de cette technique est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elle n'a pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elle peut traiter des non linéarités. Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur  $E$  et le changement d'erreur  $\Delta E$  et une variable de sortie  $\Delta\alpha$  (variation du rapport cyclique). La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée[17].

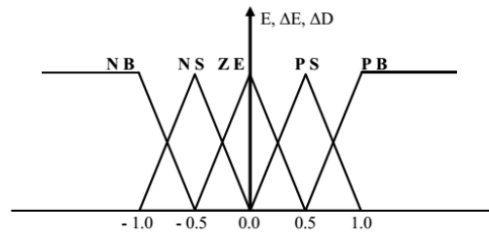
En général, la commande logique floue comprend donc trois étapes communément nommées dans la littérature :

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

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

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

Comme le montre la structure de base de la commande logique floue illustrée en Figure II.6



**Figure II.16** structure de base de la commande floue

Les paramètres d'entrées  $E$  et  $\Delta E$  sont liées aux équations suivantes :

$$E(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \quad (\text{II.1})$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \quad (\text{II.2})$$

En résumé, cette méthode s'avère être très performante lors de changement des conditions climatiques, cependant sa précision en statique est fortement liée à la complexité de la table de vérité employée entraînant la nécessité du choix obligatoire d'un microcontrôleur ayant une grande capacité de calculs tenant compte des nombreuses disparités des paramètres électriques du panneau. Ici, typiquement, cette commande peut présenter les meilleures performances en termes de précision et de rapidité de recouvrement de PPM mais elle entraîne obligatoirement une consommation énergétique non négligeable liée au microprocesseur ainsi qu'un surcoût [11-12].

## II-7/Autres Méthodes

Il existe dans la littérature d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui font parfois appel à des techniques nouvelles, On peut citer [9-10]:

Les algorithmes à base de réseau de neurones .

Méthode de look-up table .

Les algorithmes d'identification en temps réel du MPP .

Méthode de  $\beta$  .

L'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance).

La méthode de balayage du courant (Current Sweeper) .

### II-8/Simulation d'un système PV-Hacheur avec la commande MPPT

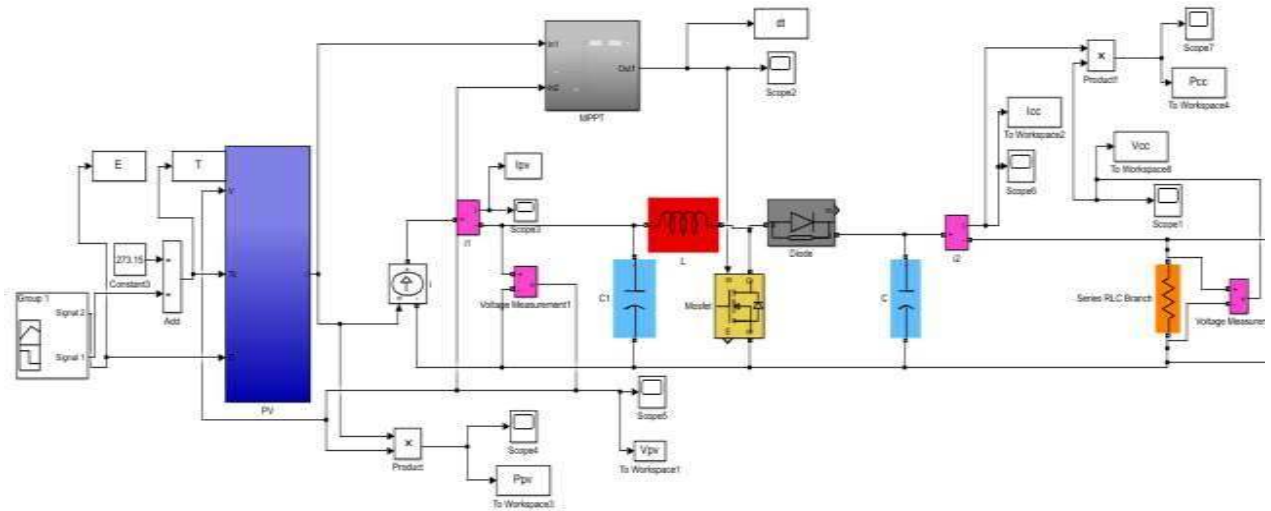


Figure II.17 Schéma de simulation de panneaux photovoltaïques avec un hacheur boost.

### II-9/Modèle avec irradiation et température constante ( $G=1000\text{w/m}^2, T=25\text{c}^\circ$ )

#### a) Sortie de photovoltaïque

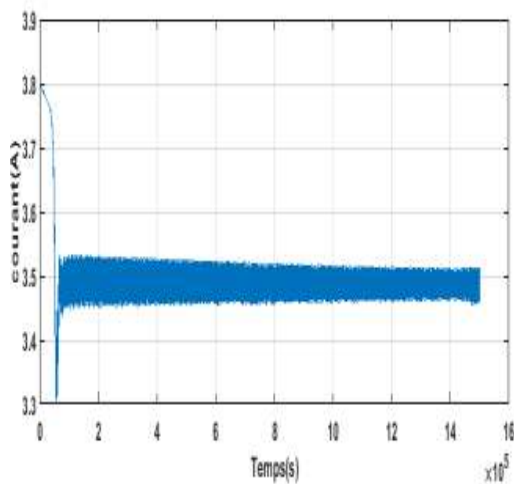


Figure II.18 variation temporelle du courant.

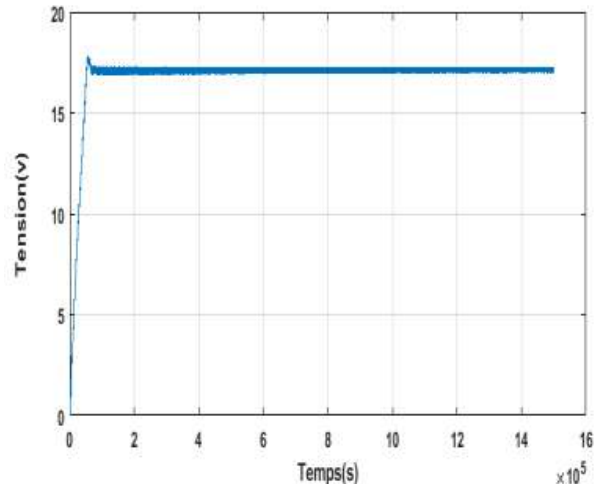


Figure II.19 variation temporelle de la tension.



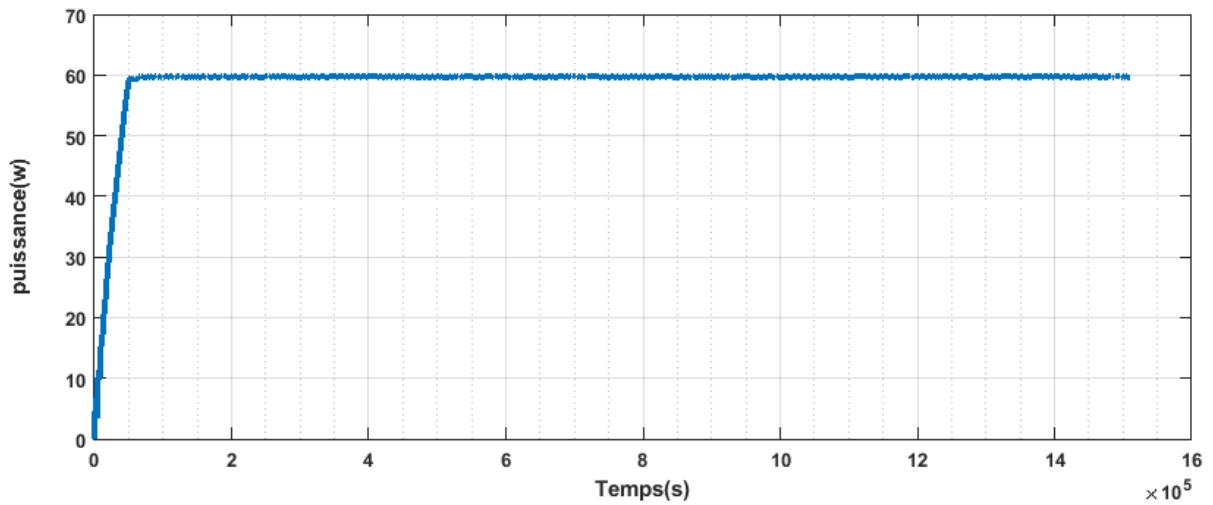


Figure II.20 variation temporelle de la puissance.

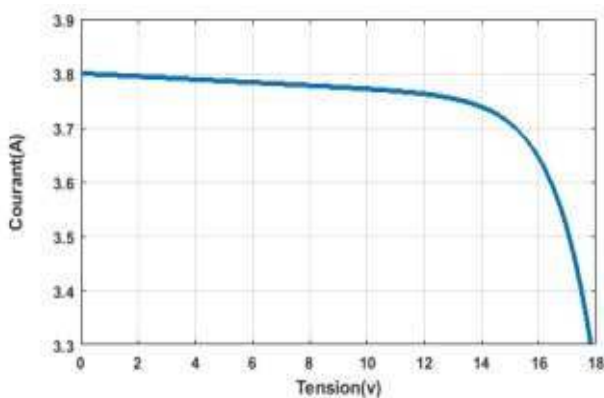


Figure II.21 caractéristique I-V

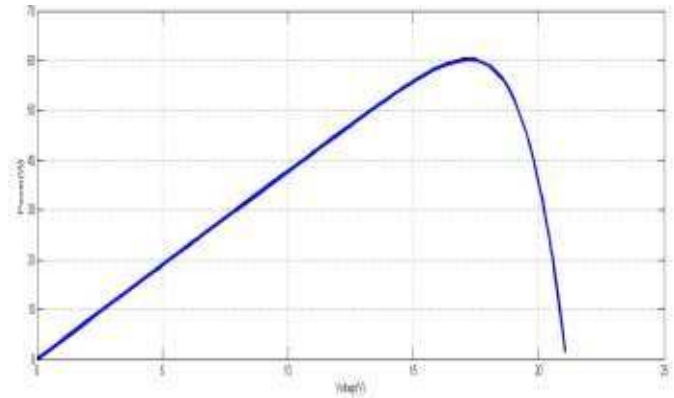
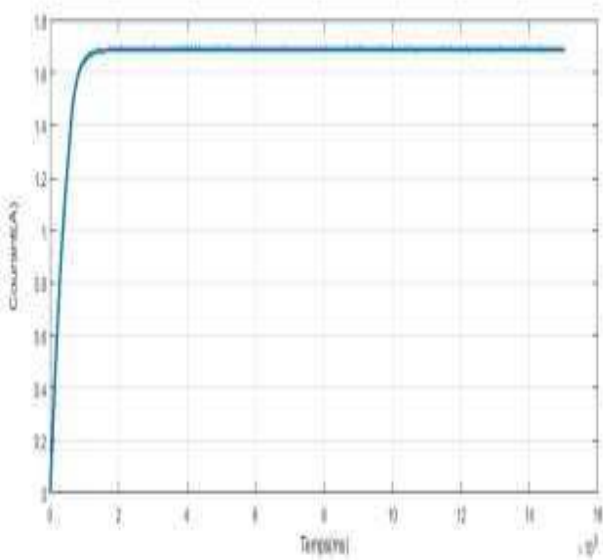


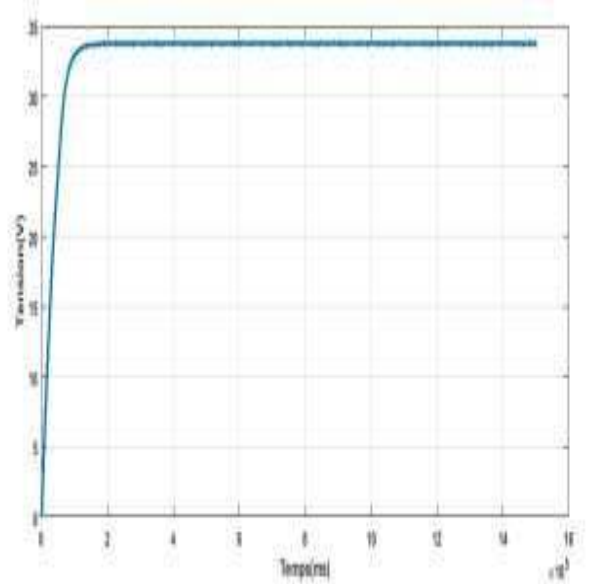
Figure II.22 Caractéristique P-V

D'après la figure (fig.II.20), au départ la tension de PV prend un saut pour qu'elle se stabilise à la valeur désirée. D'après la figure (fig.II.21), on remarque qu'au départ le courant prend la valeur de court-circuit ensuite il prend la valeur nominale. Dans la figure (fig. II.22) on remarque que le générateur PV fonctionne en puissance maximale [23] [22].

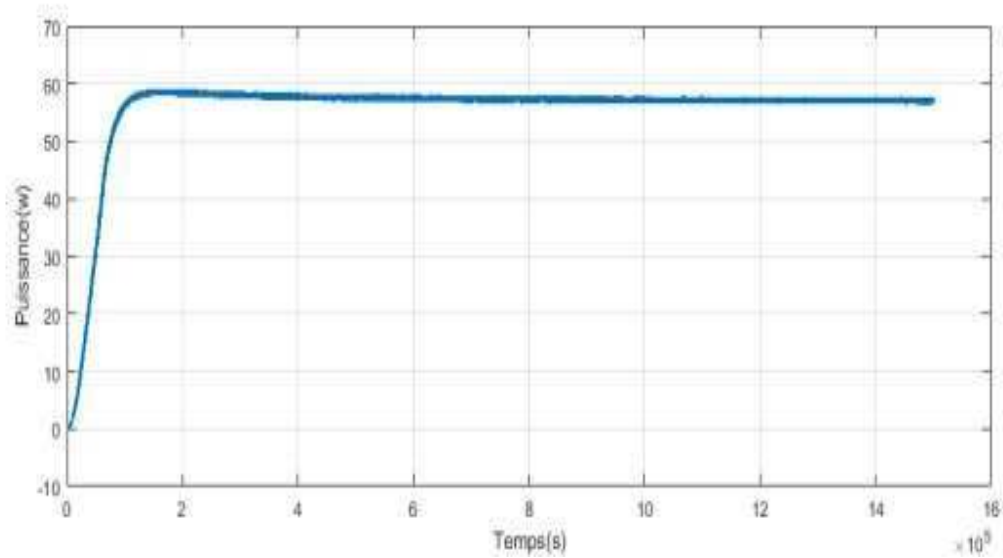
**b) Sortie d'hacheur**



**Figure II.23** variation temporele du courant.



**Figure II.24** variation temporele de la tension.



**Figure II.25** variation temporele de la puissance.

D'après les figures (fig.II.23, 24 et 25) on remarque que les valeurs de tension, de sortie d'hacheur est supérieure à celles de PV car est assurée par la commande MPPT.

## II-10/Conclusion

- Dans ce chapitre, nous avons entamé d'un convertisseur à découpage continu-continu (DC/DC). Ce concept est nommé ainsi à cause des liens que le convertisseur crée entre ses quatre grandeurs électriques sur les ports d'entrée et de sortie qui sont ses courants et ses tensions d'entrée et de sortie. Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à la sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV.

la partie la plus importante et la plus délicate de cette étude. Il s'agit de présenter le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes classifications des commandes MPPT. Nous avons détaillé les différentes méthodes MPPT rencontrées le plus souvent dans la littérature, L'existence de plusieurs types de commande MPPT montre que ce domaine de recherche est en perpétuelle évolution et qu'il est difficile de trouver une ou plusieurs solutions universelles. Ce chapitre nous servira de support de comparaison avec l'approche de MPPT que nous allons développer dans ce qui suit.

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

---

# ***CHAPITRE III***

Simulation, résultat et  
discussions

### III-1/Introduction

La simulation est un outil puissant pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. En effet ce dernier peut être testé sous des conditions facilement contrôlables et ses performances peuvent être aisément surveillées. La procédure de simulation lie les deux principales parties de la conception d'un système, à savoir, l'étude théorique et la réalisation d'un prototype. Vu que des changements dans la conception peuvent facilement être faits à l'étape de la simulation, il est possible d'expérimenter avec un large ensemble de variations des conditions de fonctionnement afin d'aboutir à une solution optimale.

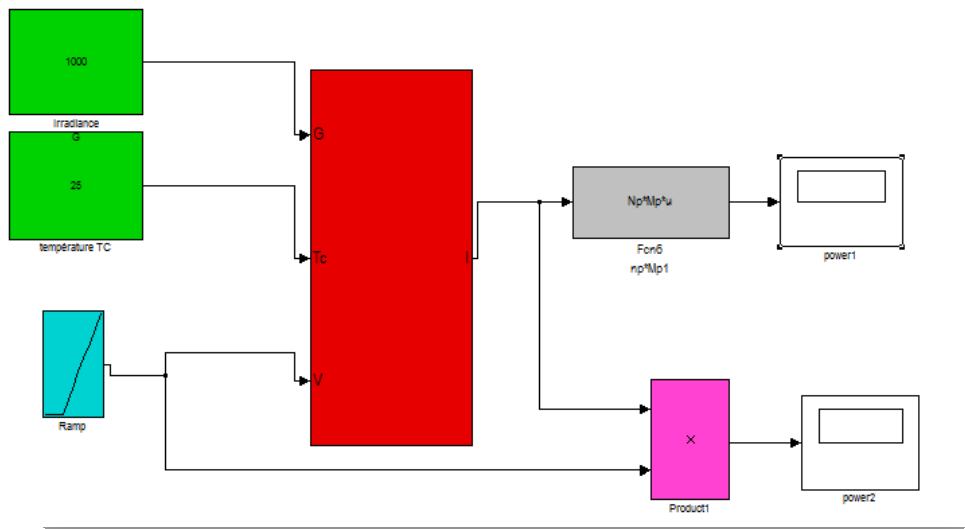
Matlab/Simulink est un logiciel de simulation, qui fournit une interface graphique permettant de construire des modèles sous forme de diagrammes blocs. Il offre l'avantage de construire des modèles hiérarchisés qui offrent la possibilité de voir le système à différents niveaux. Simulink offre également la possibilité de construire des modèles modulaires, qui ont l'avantage d'être facilement reliés entre eux afin de simuler un certain système.

**III-2/Simulation du panneau photovoltaïque**

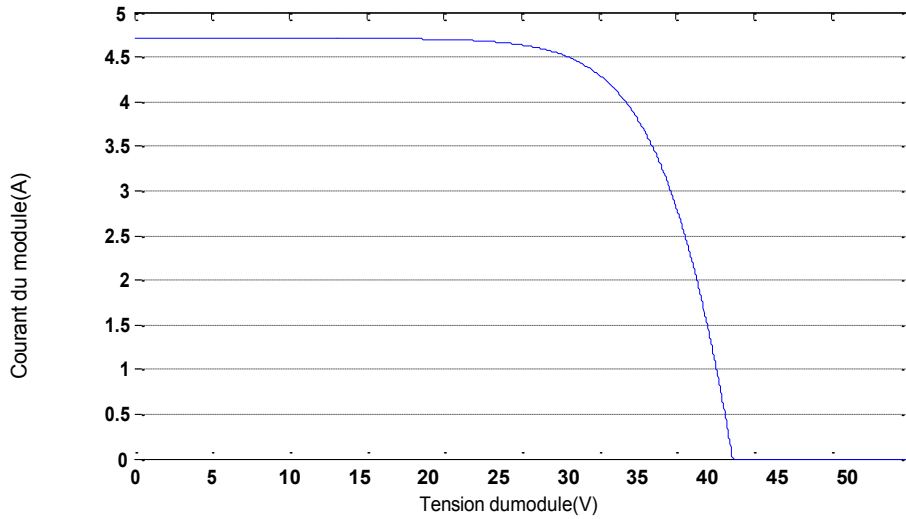
Pour l'analyse du fonctionnement du panneau photovoltaïque choisi, basé sur le modèle précédemment nous avons procédé à une série de simulations[24], ainsi les résultats obtenus sont présentés sur les figures suivantes :

Figure(II.3) : Présente la caractéristique Courant-Tension du panneau PV pour l'éclairement  $G = 1000W /m^2$  et de température  $T_c = 25^\circ C$

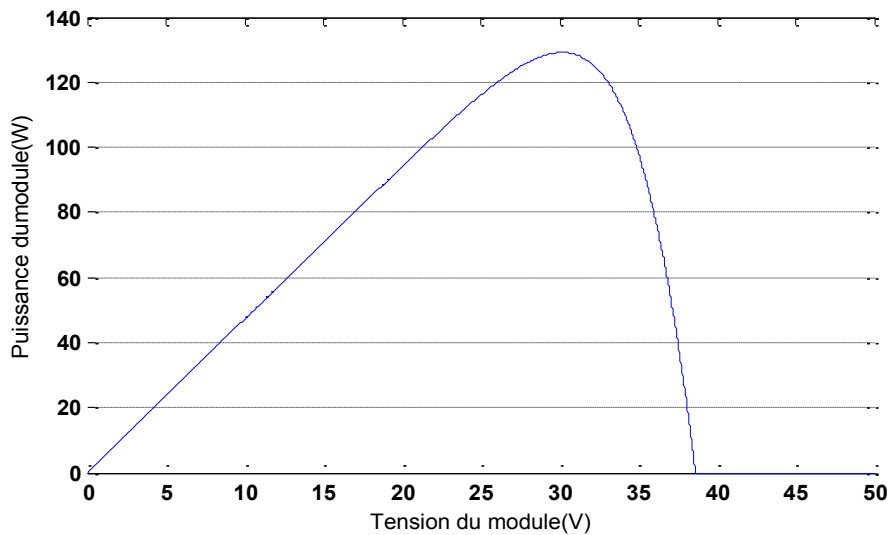
Figure(II.4) : Présente la caractéristique Puissance-Tension du panneau PV pour l'éclairement  $G = 1000W /m^2$  et de température  $T_c = 25^\circ C$



**Figure (III.1) : Schéma de simulation du panneau PV**



Figure(III.2) : Caractéristique Courant-Tension du panneauPV.



Figure(III.3) : Caractéristique Puissance-Tension du panneauPV

La figure(III.3) présente l'évolution du courant générée du module en fonction de la tension à température et éclairément fixe. On note que le courant reste constant jusqu'à V=25V puis il diminue rapidement jusqu'à son annulation.

La figure(III.4) présente l'évolution de la puissance générée du module en fonction de la tension à température et éclairement fixe. On remarque que la puissance augmente linéairement jusqu'à la valeur maximal (129.1W) puis diminue rapidement.

Les résultats de simulation du panneau photovoltaïque représentent par les figures (III.5) à (II.6). Ces figures représentent les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension pour différents éclairements et différents températures.

• *Température fixe  $T_c = 25^\circ c$  et pour différentes éclairements  $G$*

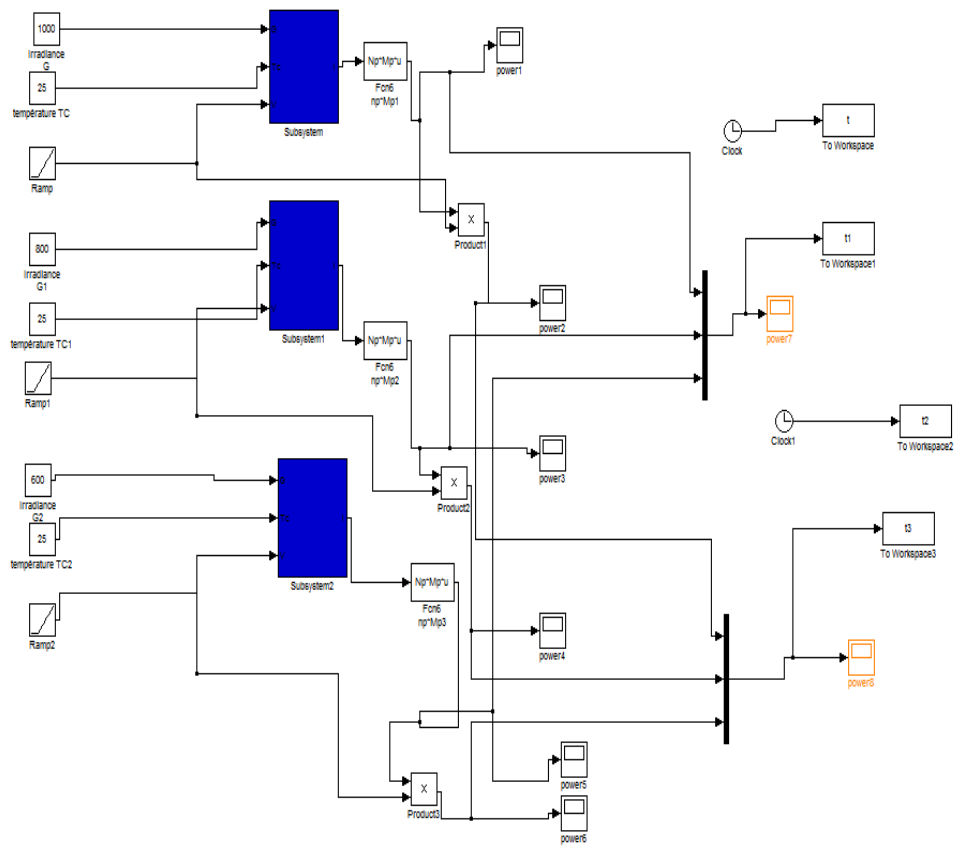


Figure (III.4) : Bloc Simulink de panneau photovoltaïque exposé à différents éclairements



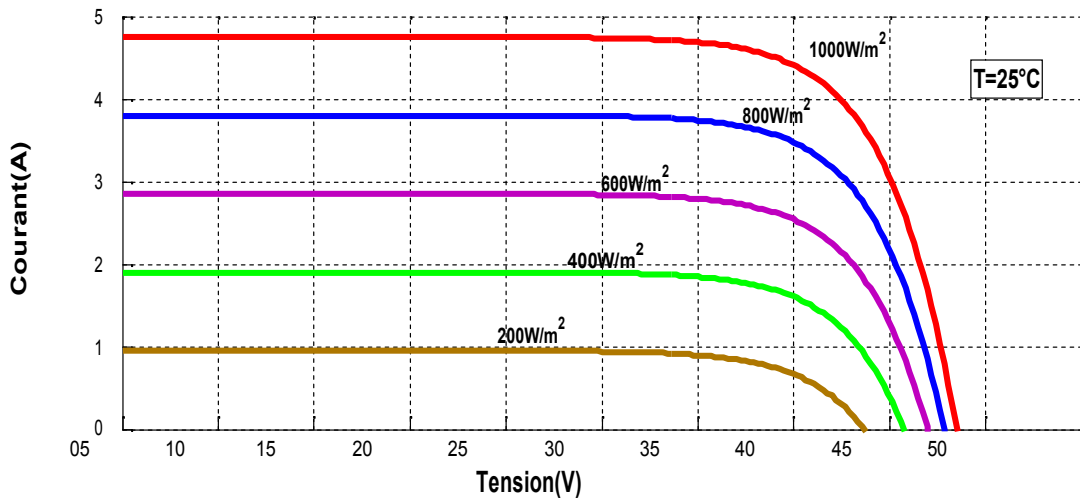


Figure (III.5) : Résultats de simulation des caractéristiques  $I=f(V)$  pour différentes éclairement et une température  $T_c = 25^\circ\text{C}$

La figure(III.5) présente l'évolution du courant généré du module en fonction de la tension (même plage de variation) de sortie à température fixe et éclairement variable, on constate que l'augmentation de l'éclairement entraîne une augmentation du courant.

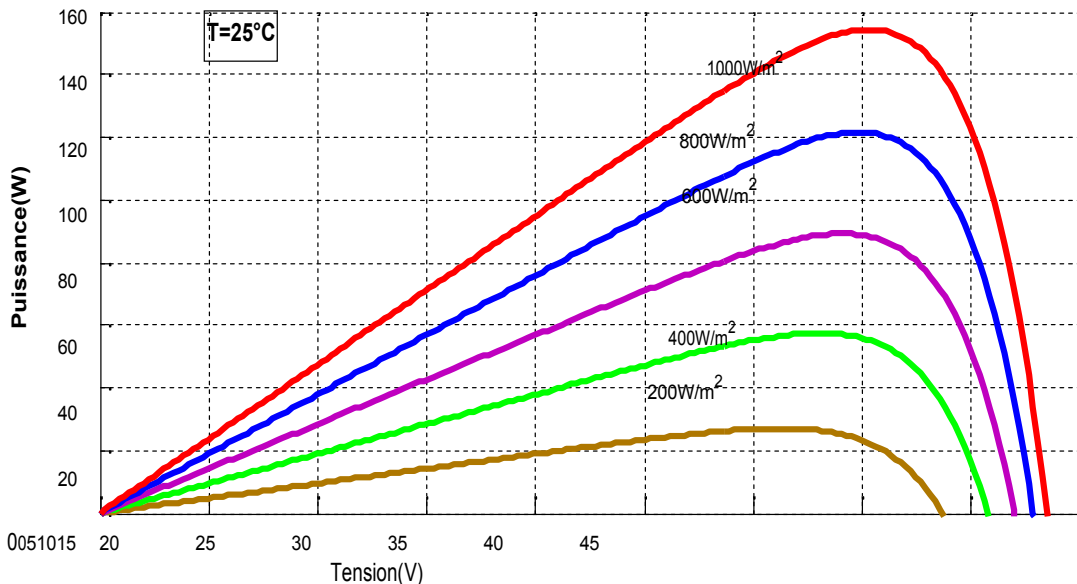
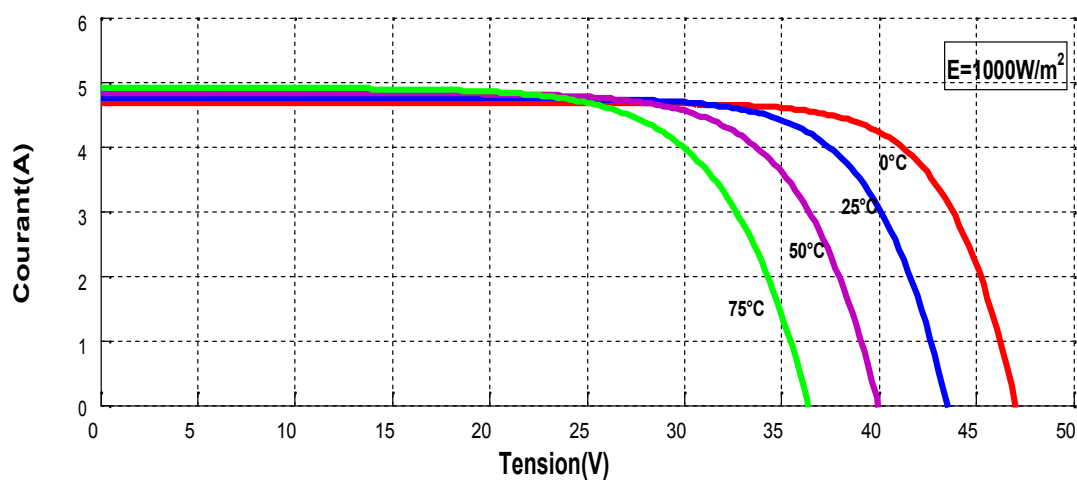


Figure (III.6) : Résultats de simulation des caractéristiques  $P=f(V)$  pour différentes éclairement et une température  $T_c = 25^\circ\text{C}$

La figure(III.6) présente l'évolution de la puissance du module en fonction de la tension à température fixe et éclairage variable, on constate que l'augmentation de l'éclairage entraîne une augmentation de la puissance.

- *Éclairage fixe  $G = 1000\text{W/m}^2$  et pour des différentes températures*

Le même travail comme précédente, nous avons fixé éclairage pour différents températures[25] [26].



**Figure (III.7) : Résultats de simulation des caractéristiques  $I=f(V)$  pour différentes températures et un éclairage  $G=1000\text{W/m}^2$**

La figure(III.7) présente l'évolution du courant généré du module en fonction de la tension à éclairage fixe et température variable, on constate que l'augmentation de la température entraîne un courant relativement constant, on remarque aussi la tension maximal atteinte aux bornes du module diminue.

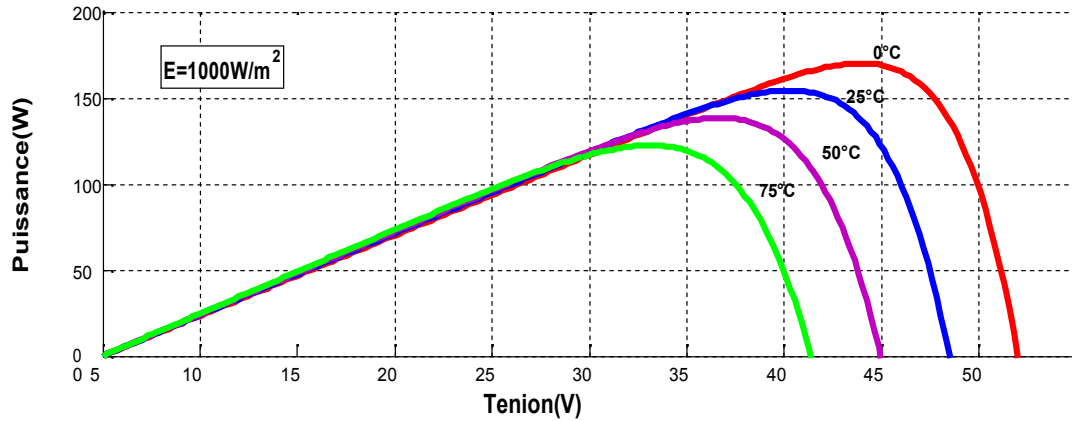
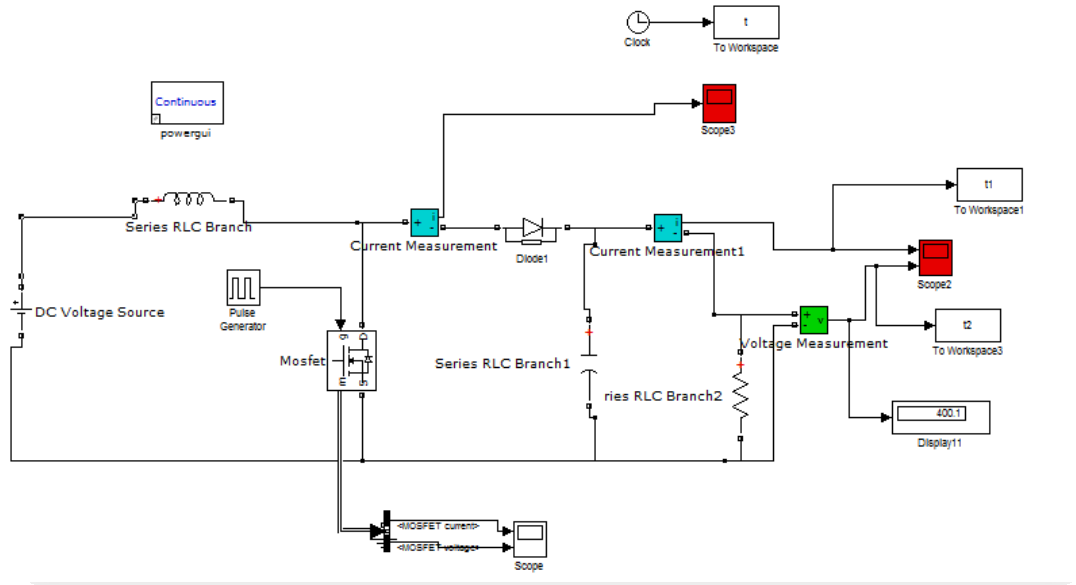


Figure (III.8) : Résultats de simulation des caractéristiques  $P=f(V)$  pour différentes températures et un et un éclairement  $G=1000\text{W/m}^2$

La figure(III.8) présente l'évolution de la puissance générée par le module en fonction de la tension à l'éclairement fixe et température variable, on constate que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la puissance, on remarque aussi la tension maximal atteinte aux bornes du module diminue.

### III-3/Simulation de convertisseur boost

Pour simuler le fonctionnement de l'hacheur élévateur, nous avons utilisé Matlab/simpower system pour nous rapprocher du fonctionnement réel, ce qui est présenté par la figure (III.9) [27] [28].



Figure(III.9) : Schéma de simulation du hacheur boost

Les résultats de simulation de l'hacheur élévateur (boost) sont présentés sur les figures (III.10) et (III.11). Ces figures représentent la tension et le courant de sortie de l'hacheur. Ces résultats montrent que la tension de sortie d'hacheur élévateur (boost) est supérieure à celle d'entrée. Donc l'hacheur élévateur (boost) effectue correctement son rôle. Le courant et la tension de sortie subie un régime transitoire oscillant puis se stabilise en régime permanent.

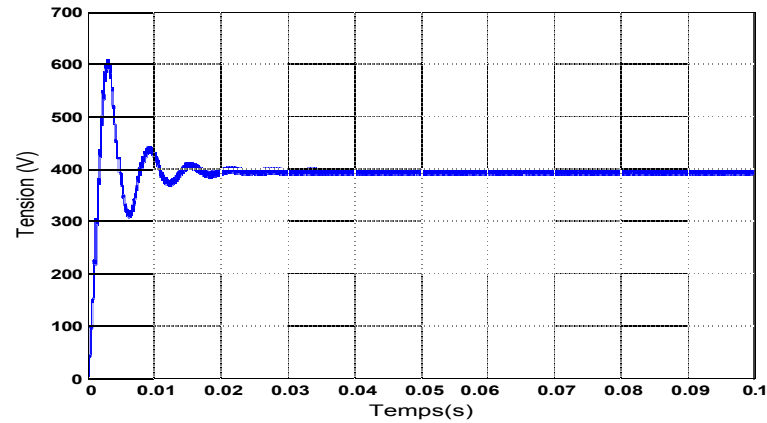


Figure (III.10) : Tension de sortie du hacheur boost

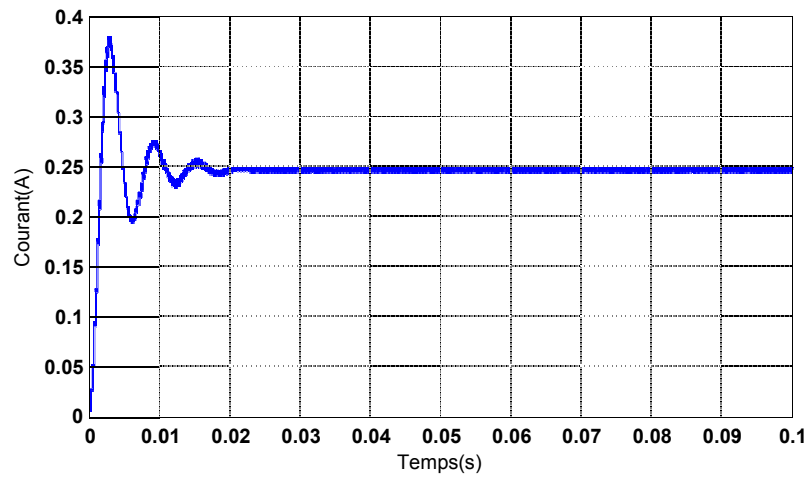
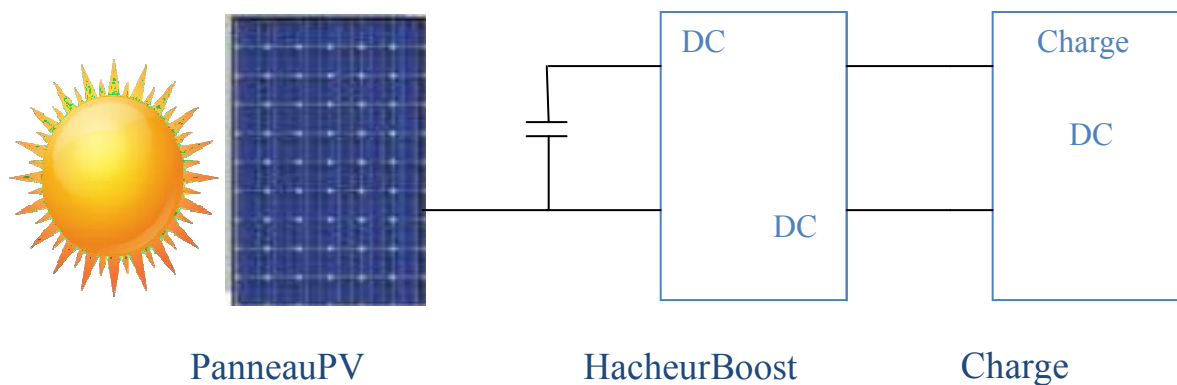


Figure (III.11) : Courant de sortie du hacheur boost

#### *III-4/Simulation du système (panneau+hacheur)*

Nous allons simuler le fonctionnement du système photovoltaïque constitué d'un panneau PV relié à un hacheur alimentant une charge résistive. Qui est présenté sur la figure suivante :



**Figure(III.12) : Schéma de structure du système PV**

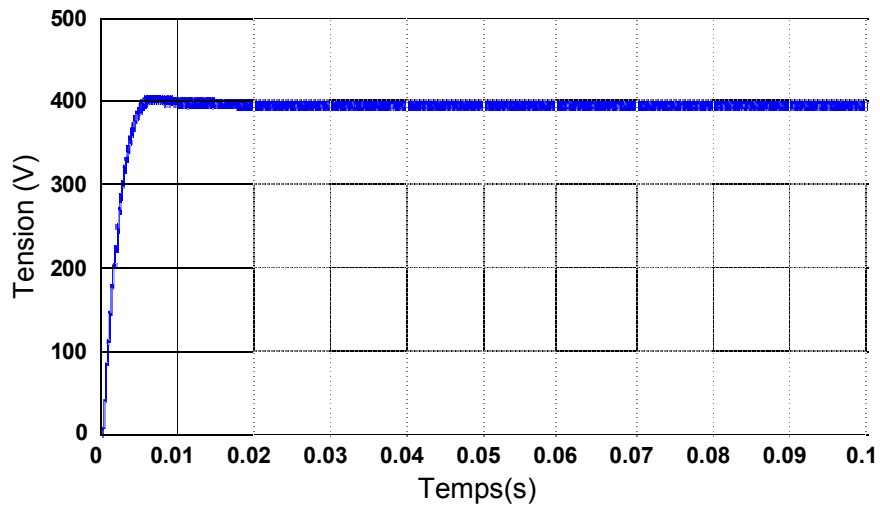
Nous avons simulé le fonctionnement du système avec éclairage et température fixe puis nous simulé le cas avec une variation de température. Les résultats de simulation présentent l'évolution du courant, tension et puissance au niveau de la charge.

#### Cas température fixe :

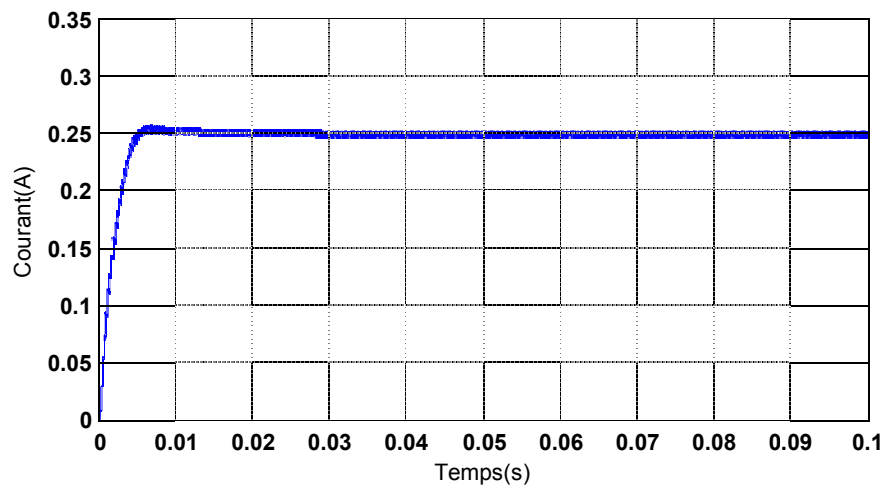
La figure(III.13) montre un établissement de la tension faiblement oscillant qui devient constant au régime permanent.

La figure(III.14) montre l'établissement du courant faiblement oscillant qui devient constant au régime permanent.

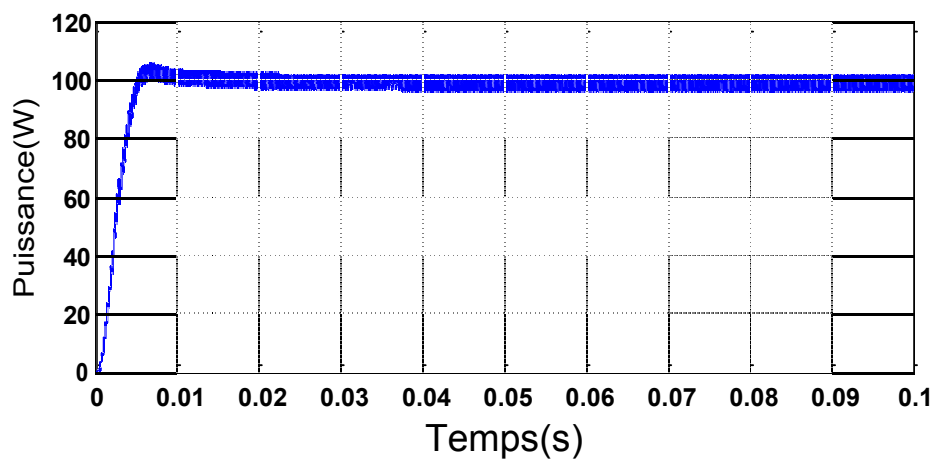
La figure(III.15) montre l'évolution de la puissance consommée par la charge. On note qu'elle est légèrement inférieure à celle générée par le panneau PV, aussi elle présente de faible oscillation et elle est constante au régime permanent.



Figure(III.13) : Tension de sortie du système (panneau+hacheur)



Figure(III.14) : Courant de sortie du système (panneau+hacheur)

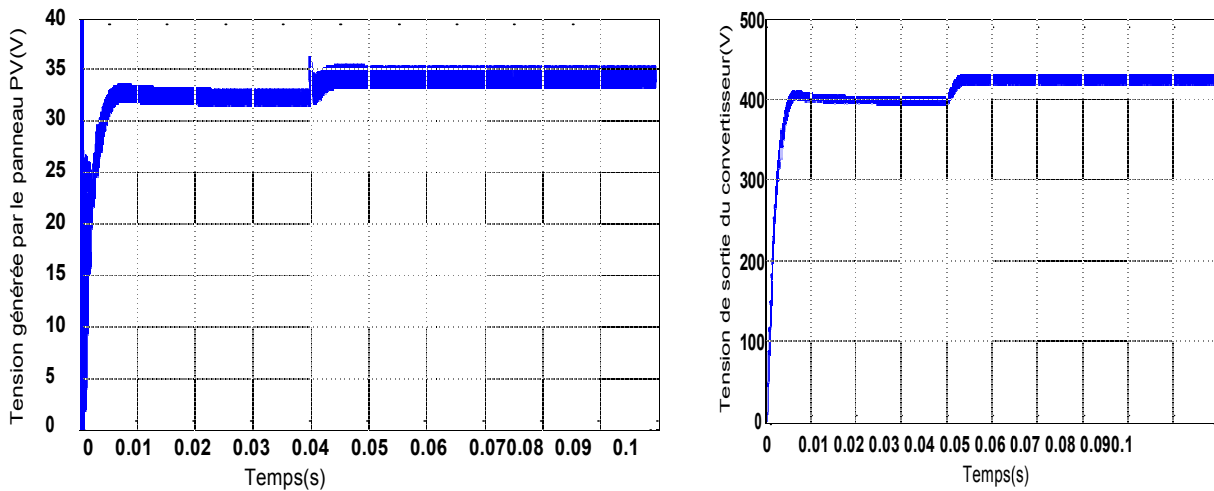


Figure(III.15) : Puissance de sortie

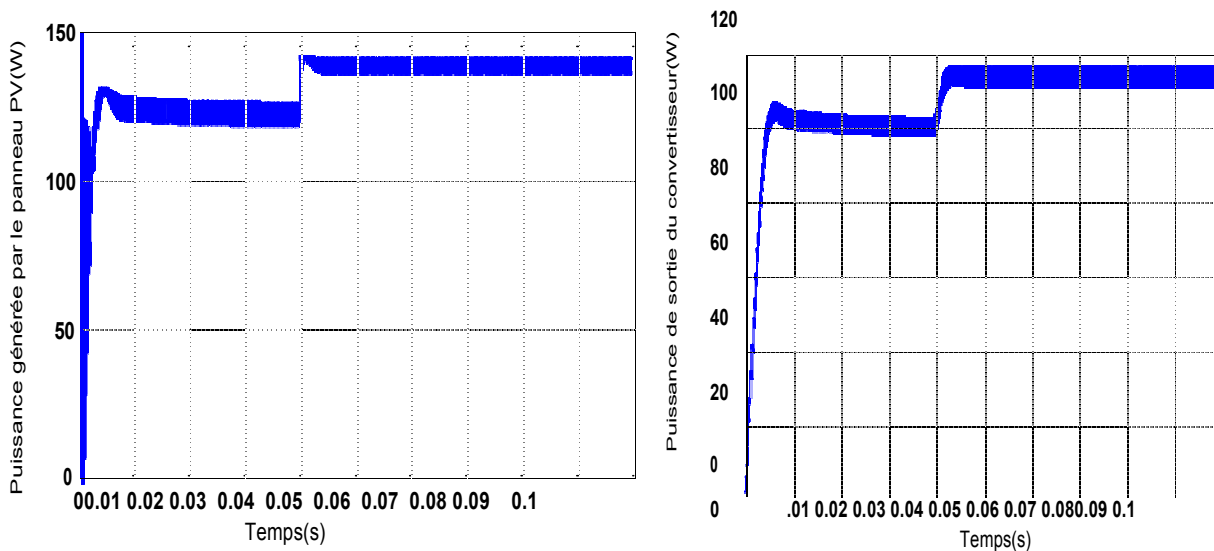
(panneau+hacheur) Cas de variation de la température

La figure (III .16) présente l'évolution de la tension générée par le panneau PV et celle de la charge. On note que la tension augmente avec la diminution de la température (25°C jusqu'à 40°C).

La figure (III.17) présente l'évolution de la puissance par le panneau PV et celle de la charge. On note que la puissance augmente avec la diminution de la température (25°C jusqu'à 40°C).



**Figure(III.16) : Tension du panneau PV et la tension de sortie du convertisseur avec une variation de température de 25°C jusqu'à 40°C**



**Figure(III.17) : Puissance du panneau PV et la Puissance de sortie du convertisseur avec une variation de température de 25°C jusqu'à 40°C**



### III-5/Programme de simulation de l'algorithme perturbation et observation P&O

La figure III.18 présente le schéma Matlab/Simulink assurant la commande MPPT du type P&O.

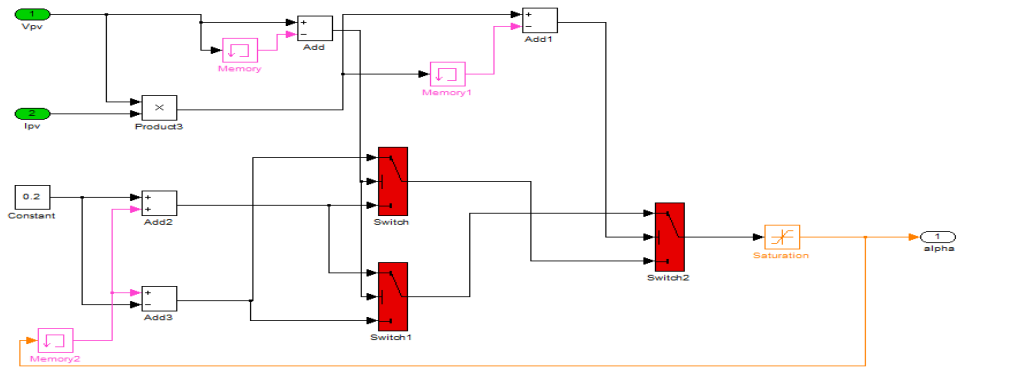


Figure (III.18) : Schéma block de la commande MPPT (P&O)

### III-6/Simulation du système global

Pour une évaluation des performances du système photovoltaïque menu de la commande MPPT du type P&O, nous allons simuler le fonctionnement de l'ensemble (panneau-hacheur- charge et MPPT) avec une variation de la température du milieu, pour un éclairage constant.

La charge utilisée sur le côté (DC) est une résistance idéal ( $R=1600\Omega$ )

La figure (III.19) illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation »:

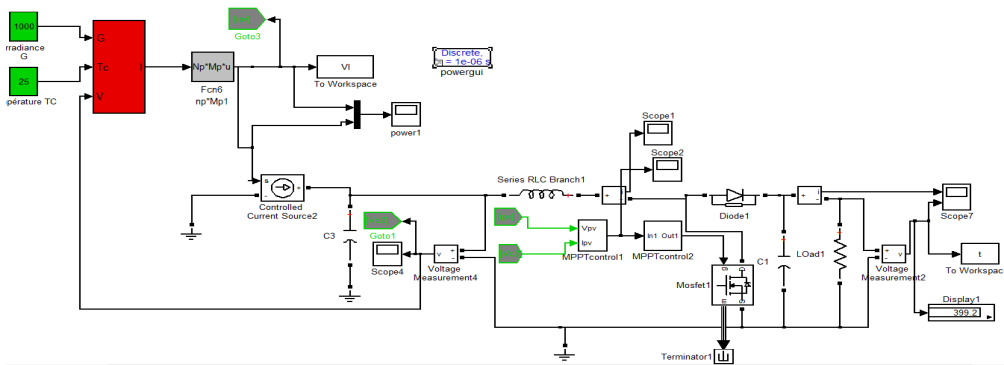
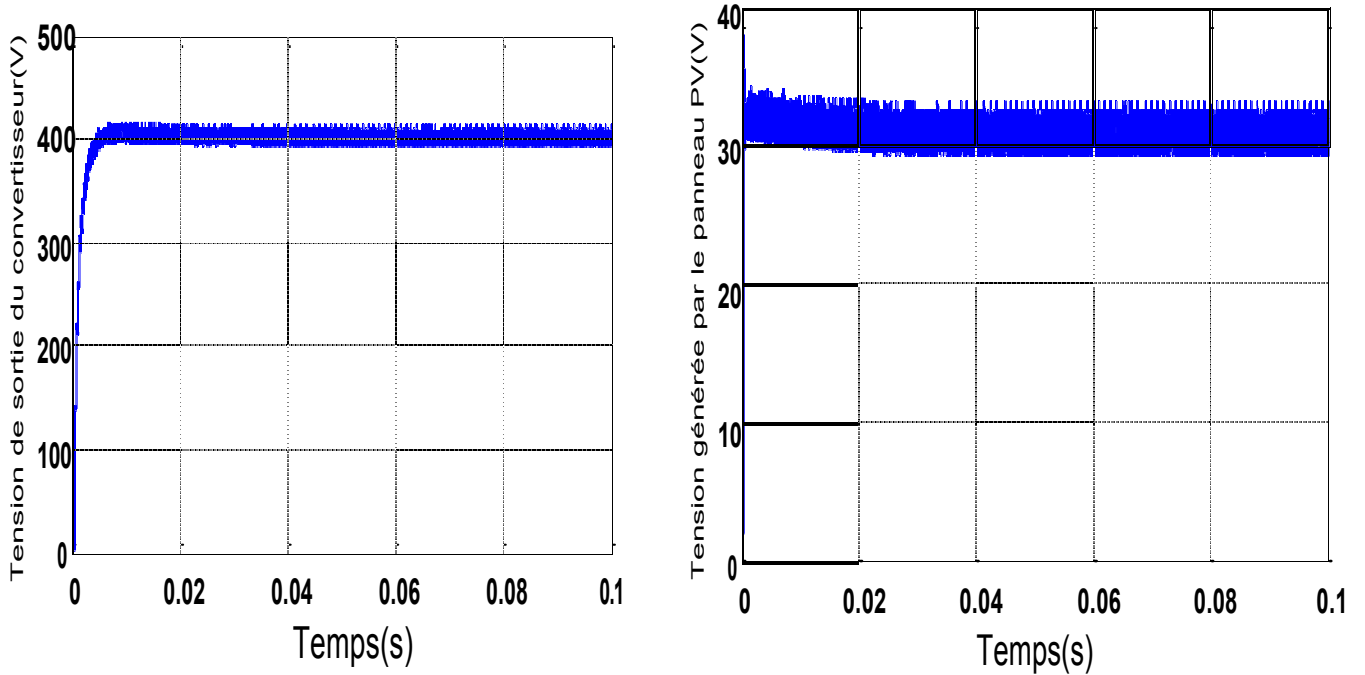


Figure (III.19) : Modèle SIMPOWER du panneau PV +hacheur avec une commande MPPT (P&O)

Les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque menu de la commande MPPT « perturbation et observation » sont représenté par les figures suivantes

Ces résultats montrent que l’hacheur élévateur et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles à travers l’évolution des grandeurs tensions et puissance.

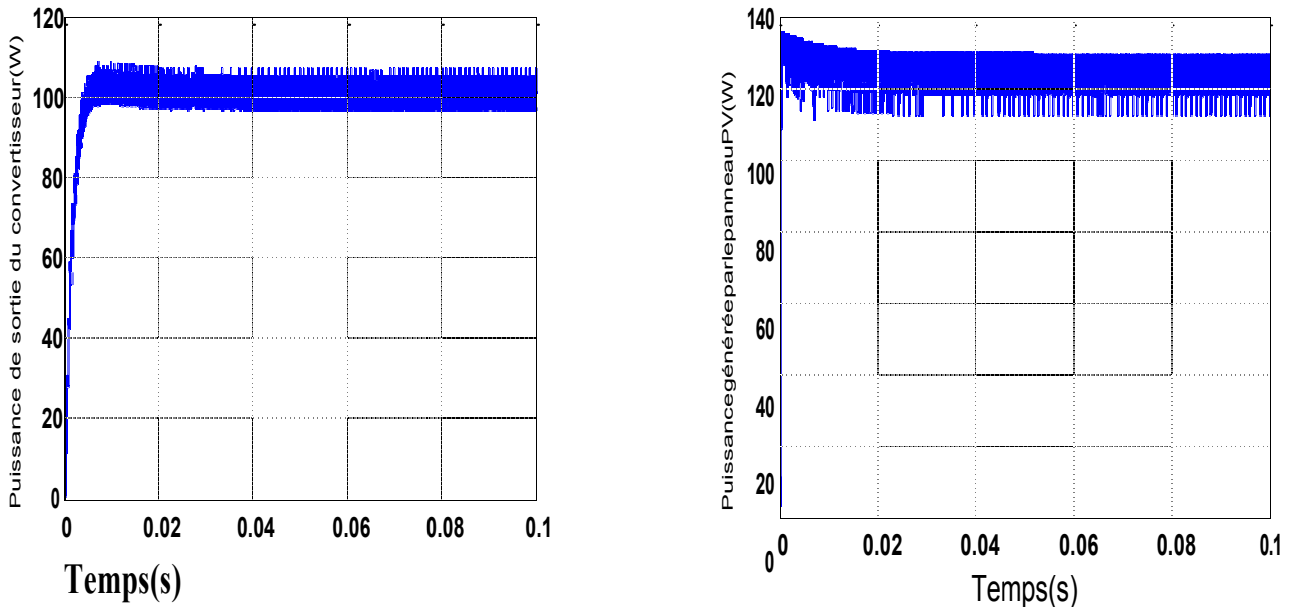
L’hacheur élévateur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le panneau photovoltaïque. Et la commande MPPT adapte le panneau PV à la charge donc le transfert de la puissance maximale fournie par le panneau PV.



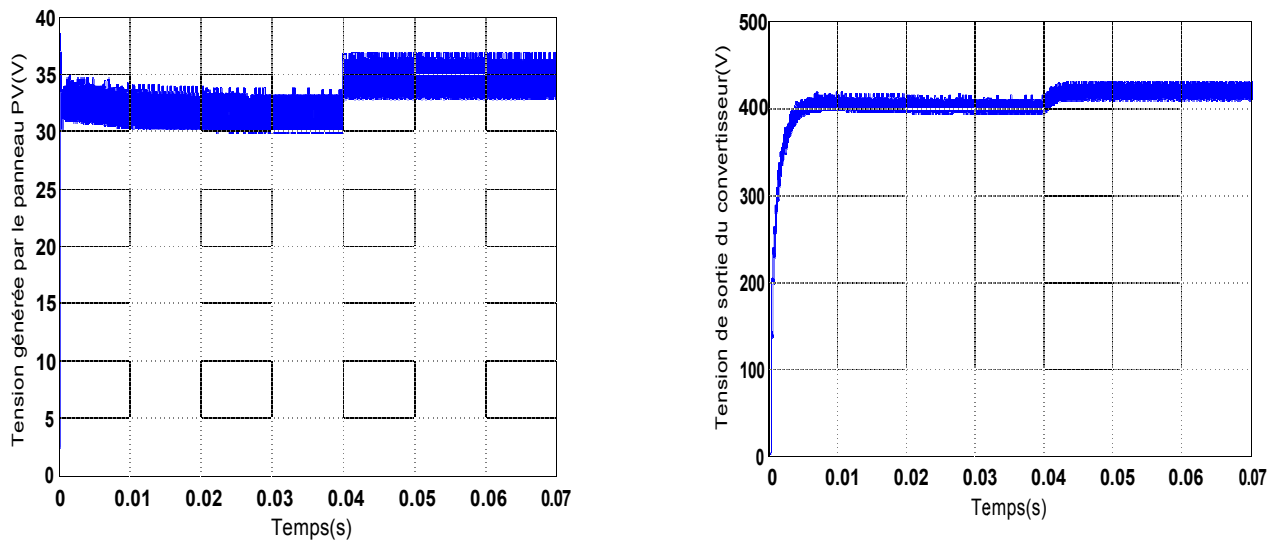
**Figure(III.20) : tension de sortie du convertisseur et la tension du panneau PV**

Figure(III.20) présente l'évolution de la tension sortie du convertisseur et la tension générée par le panneau PV pour un éclairage et température fixe. On note la présence d'oscillations au niveau de la tension source et la tension de la

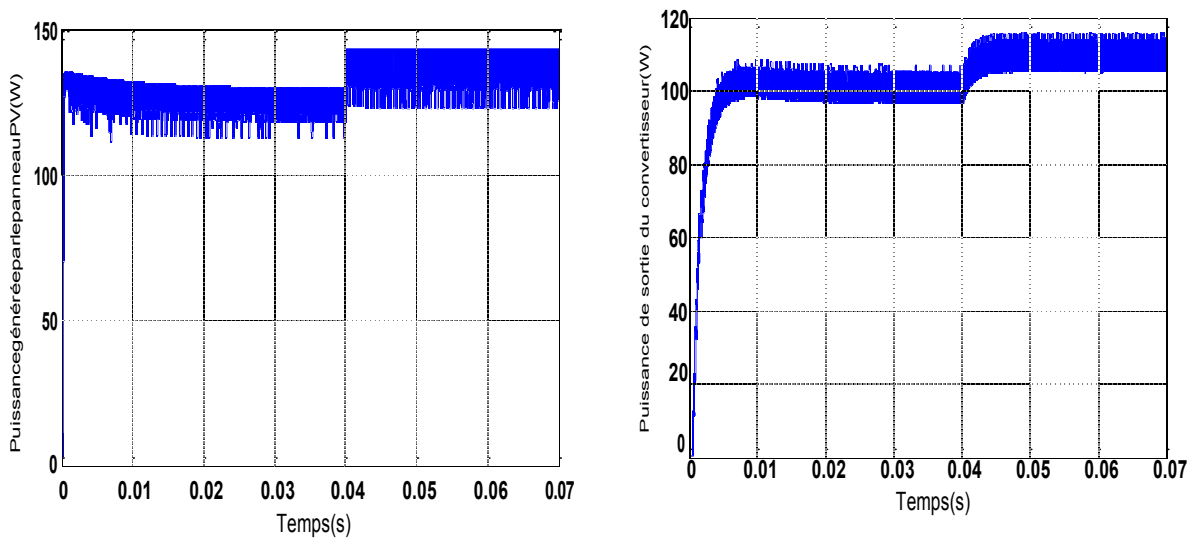
La figure(III.21) représente la puissance de sortie du convertisseur et la puissance générée par le panneau PV. On note une légère diminution de l'amplitude de la puissance entre la source et la charge et présence d'oscillation due à la source.



**Figure (III.21): Puissance de sortie du convertisseur et la puissance du panneau PV**



**Figure(III.22) : Tension du panneau PV et la tension de sortie du convertisseur avec une variation de température de 25°C jusqu'à 40°C**



**Figure(III.23) : Puissance du panneau PV et la puissance de sortie du convertisseur avec une variation de température de 25°C jusqu'à 40°C**

Nous procédons à un essai du système PV, panneau avec hacheur menu de la commande MPPT, pour une variation de la température à l'instant 0.04s. Après un régime transitoire, la commande MPPT fait osciller le point de fonctionnement autour du point du PPM. La commande MPPT adapte la puissance générée par le panneau PV à la charge, ce qui assure un transfert d'énergie à puissance maximale.

On remarque bien l'influence de la température sur les caractéristiques plus la température diminue plus la tension délivré augmente cela implique que même la puissance délivrée augmente avec la diminution de température.

III-7/Simulation du MPPT flou

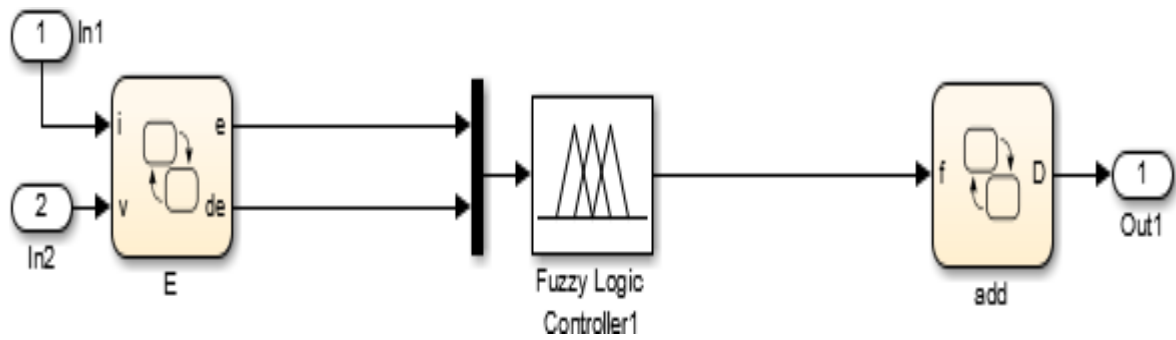


Figure III.24 Schéma de bloc de la commande MPPT flou

La commande MPPT est un contrôleur flou dont la structure interne est détaillée ci-dessous :

□ Variables du MPPT flou

Le contrôleur possède deux entrées l'erreur  $E$  et sa variation  $\Delta E$  et une sortie  $\Delta D$  qui représente la variation du rapport cyclique du convertisseur DC/DC.

Les deux entrées de contrôle sont définies par les deux équations suivantes:

$$e(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)}$$

$$e(k) = e(k) - e(k-1)$$

avec :  $P$  et  $V$  sont respectivement la puissance et la tension du générateur photovoltaïque.

Nous utilisons un contrôleur flou de type PI, la sortie du contrôleur  $\Delta D(k)$  est considérée comme un incrémental du signal de commande  $D(k)$ :

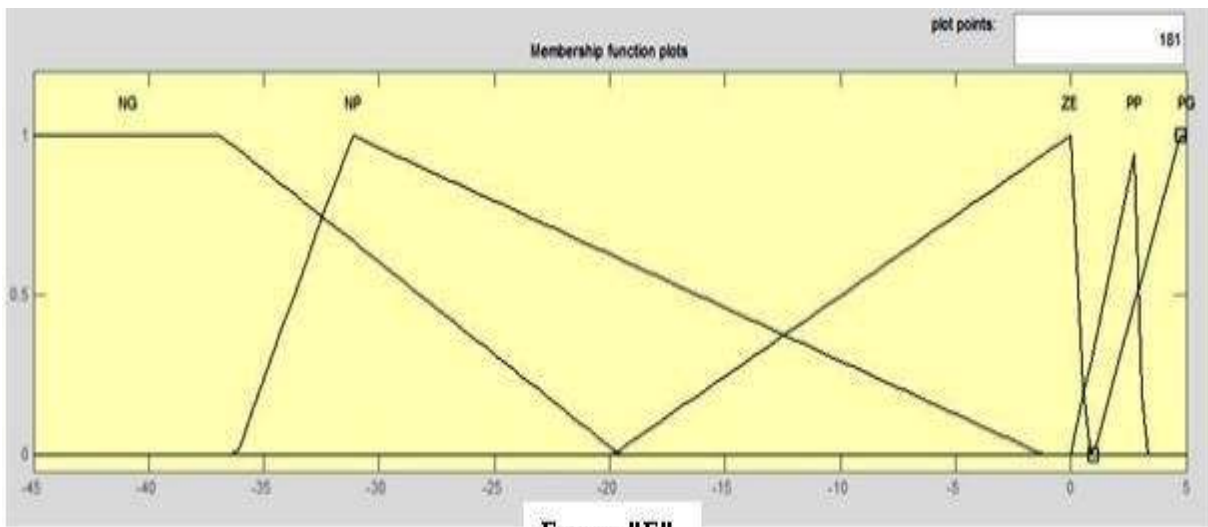
$$D(k) = D(k-1) + G_s \times \Delta D(k)$$

avec :  $G_s$  un gain de sortie, prédéfini à l'avance.

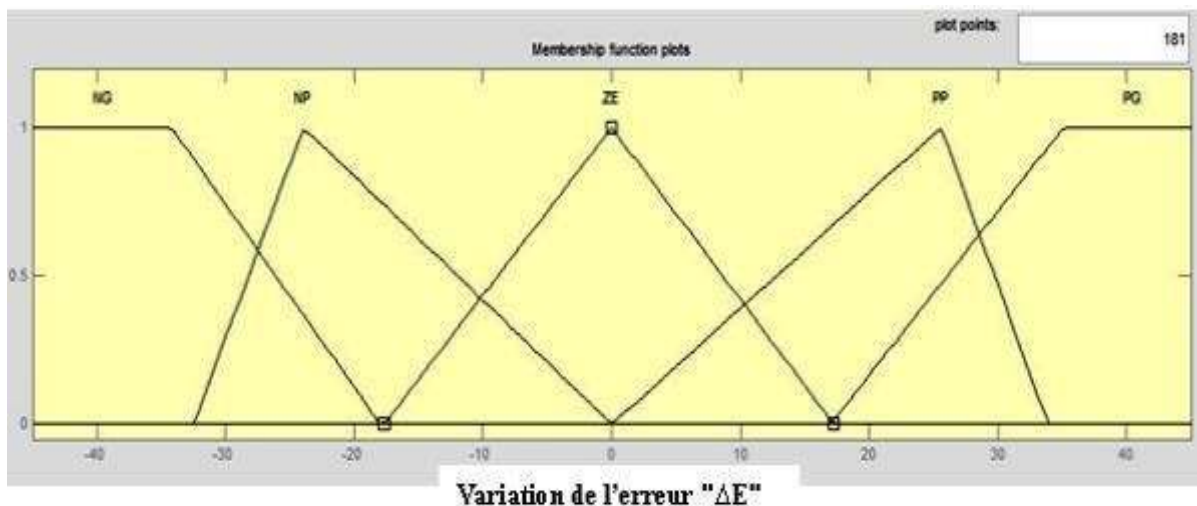
➤ Fonctions d'appartenance

Chaque variable du contrôleur est définie par cinq (5) fonctions d'appartenance de type triangulaire et trapézoïdal aux extrémités des univers de discours (intervalles de variations).

Les figures III.25 donnent respectivement les fonctions d'appartenance associées aux variables d'entrée (E et  $\Delta E$ ) alors que la figure III.26 donne les fonctions d'appartenance de la variable de sortie  $\Delta D$ .



(a)



(b)

Figure III.25: Fonctions d'appartenance de E-(a) et  $\Delta E$ -(b)

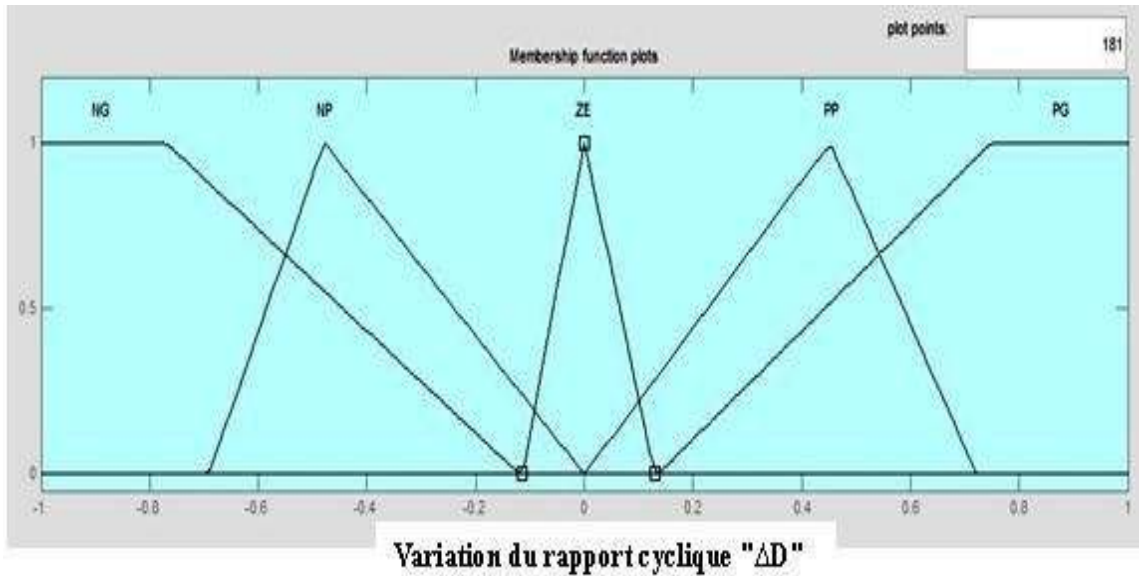


Figure III.26: Fonctions d'appartenance de  $\Delta D$

➤ Règles floues

Le tableau III.1 donne l'ensemble des règles du contrôleur flou, nécessaires pour le calcul de la sortie  $\Delta D$ .

|     |    | $\Delta E$ |    |           |    |    |
|-----|----|------------|----|-----------|----|----|
|     |    | NG         | NP | ZE        | PP | PG |
| $E$ | NG | ZE         | ZE | PG        | PG | PG |
|     | NP | ZE         | ZE | PP        | PP | PP |
|     | ZE | PP         | ZE | ZE        | ZE | NP |
|     | PP | NP         | NP | NP        | ZE | ZE |
|     | PG | NG         | NG | <b>NG</b> | ZE | ZE |

Tableau III.1: Base de règles du contrôleur flou

La règle correspondante à la cellule noire du tableau est interprétée comme suit:

*Si E est Positif Grand ET  $\Delta E$  est Zéro Alors  $\Delta D$  est Négatif Grand*



Cequi veut direque:

"Si le point de fonctionnement est loin du point de puissance maximale (MPP) vers le côtégauche,etle changementde la pente de lacourbe P(V)estenvirondeZéro;Alorsendiminuerle rapport cycliquelargementpour atteindrele"MPP".

Le tableau ci-dessous donne l'ensemble des règles qui permettent de déterminer le signaldesortie $\Delta D$ durégulateurMPPT flouetypeIIen fonctiondessignaux d'entrées( $\Delta P$ et  $\Delta V$ ).

|                              |                              |           |           |               |           |           |
|------------------------------|------------------------------|-----------|-----------|---------------|-----------|-----------|
|                              | <b><math>\Delta D</math></b> | <b>NB</b> | <b>NS</b> | <b>ZO</b>     | <b>PS</b> | <b>PB</b> |
| <b><math>\Delta P</math></b> | <b>NB</b>                    | ZO        | ZO        | <del>NB</del> | ZO        | PS        |
|                              | <b>NS</b>                    | NB        | ZO        | ZO            | NB        | PS        |
|                              | <b>ZO</b>                    | NS        | NS        | PS            | NB        | ZO        |
|                              | <b>PS</b>                    | NB        | ZO        | PS            | NS        | PS        |
|                              | <b>PB</b>                    | PS        | NS        | PB            | NS        | ZO        |

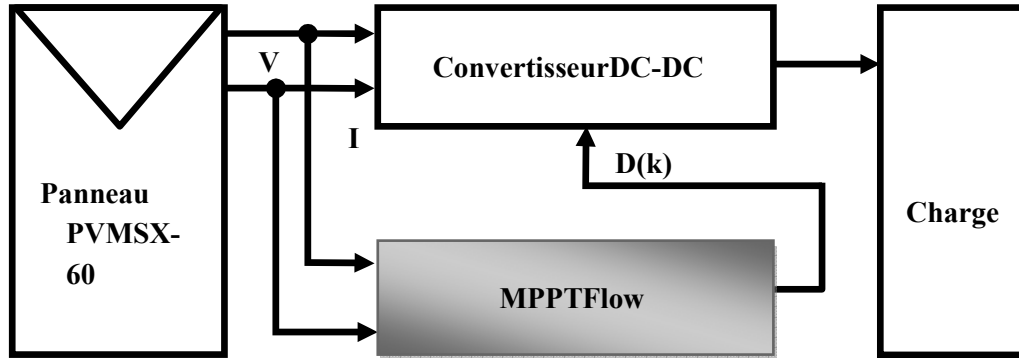
**TableauIII.2.**BasederèglesduMPPTfloue(typeII)

C'est la méthode d'inférence de Mamdani qui a été utilisée pour le traitement des règlesfloues. Elle consiste à modéliser l'opérateur MIN pour le ET flou et l'opérateur MAX pour leOUflou.

Nousavonségalelementutilisélaméthodeducentredegravitécommeméthodededéfuzzification[30].

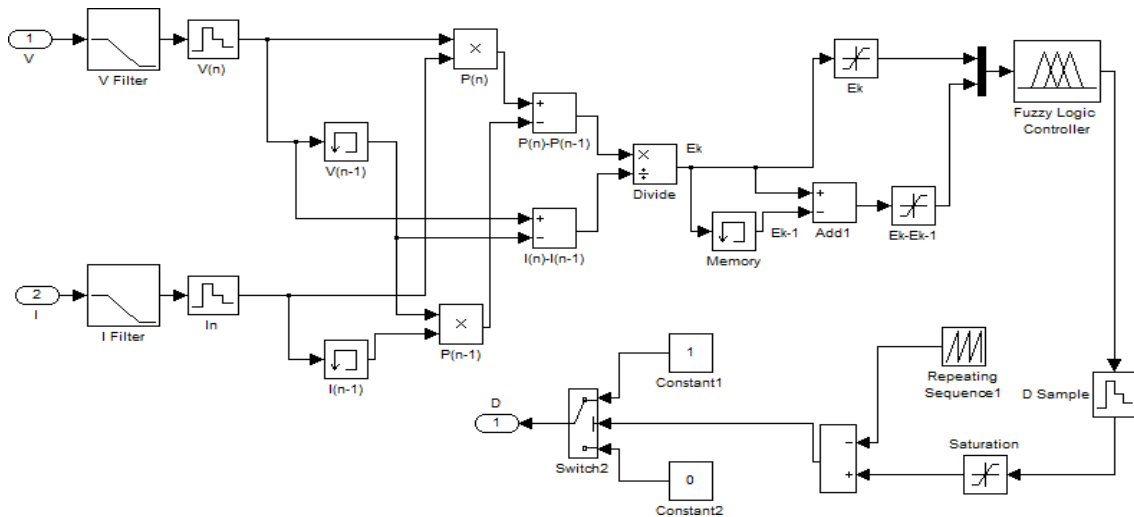
**Conception du contrôleur MPPT flou :**

Dans ce travail nous utilisons la conception des contrôleurs flous (CF)

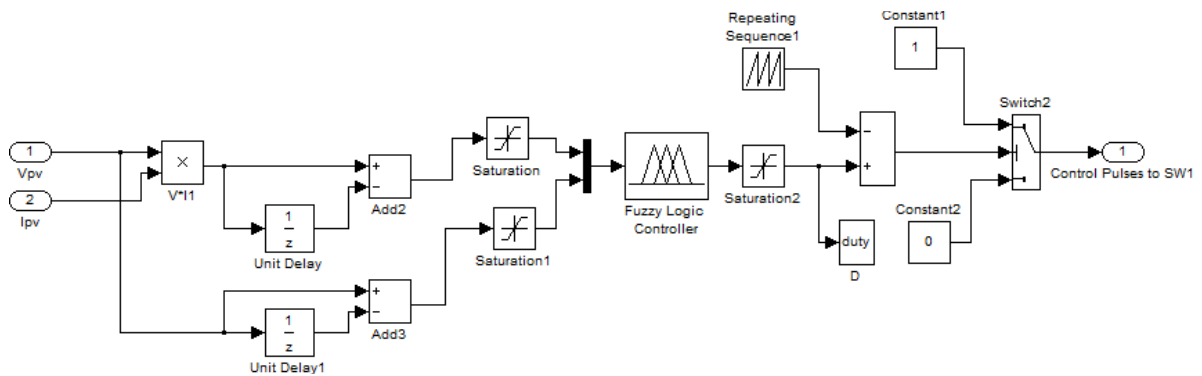


appliqué à la poursuite du point de puissance maximale (commande MPPT floue).

**Figure.III-27.** Approché d'optimisation d'une commande MPPT floue



**Figure.III-28.** Schéma synoptique de contrôleur MPPT flou type I



**Figure.III-29.** Schéma synoptique de contrôleur MPPT flou type II

La figure III-9 illustre la stratégie de cette approche que l'on peut présenter la schémasynoptique d'un contrôleur MPPT floutypes I et II dans la figure III-10.

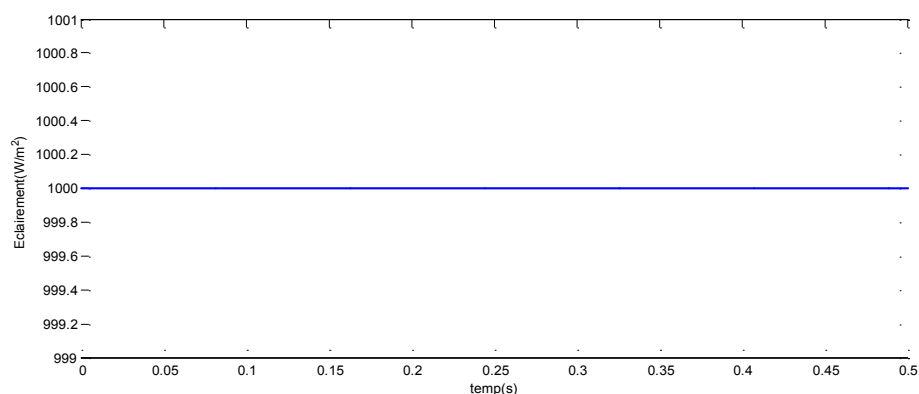
### **III-8/Résultats de Simulation:**

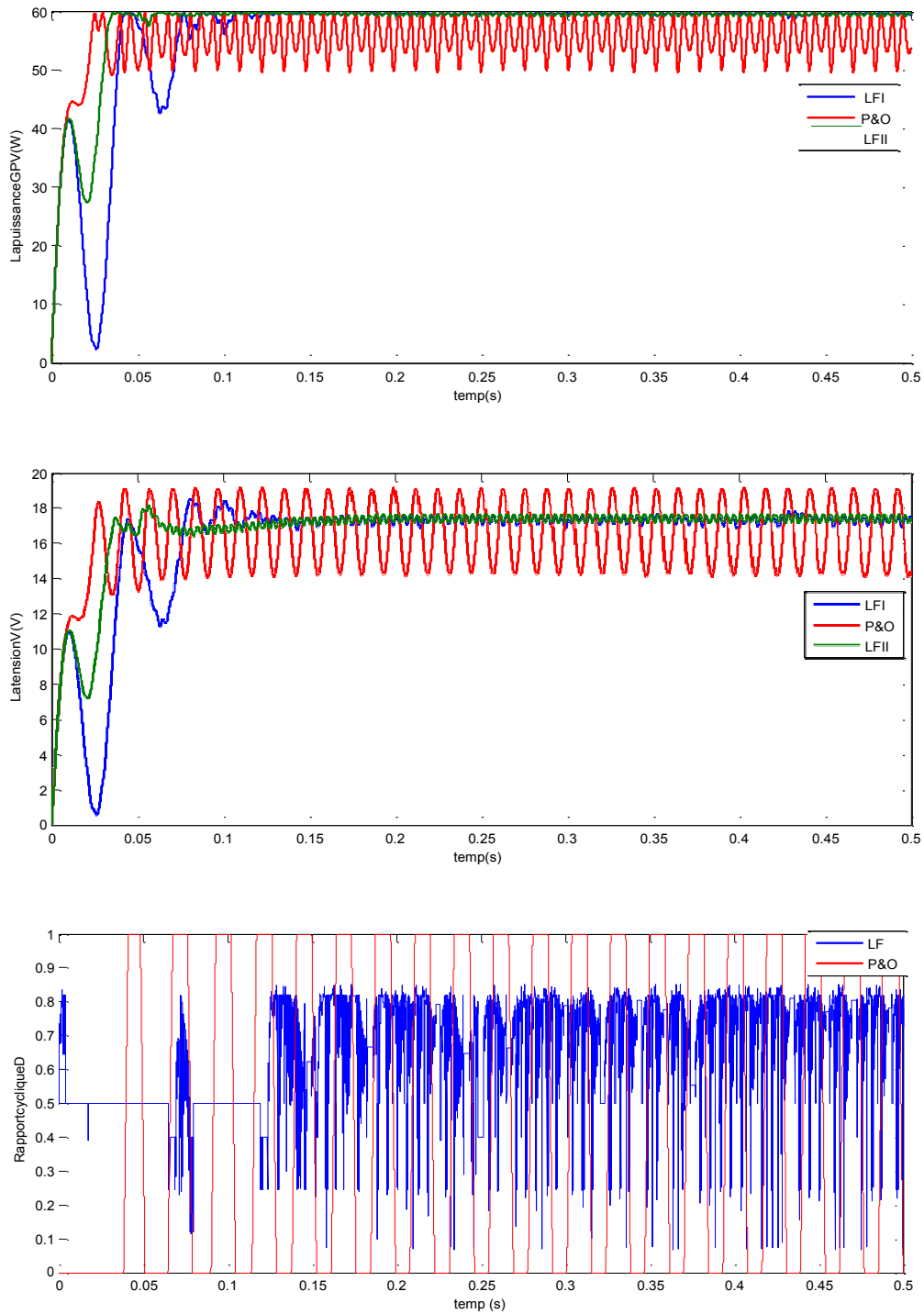
Dans cette partie, on commence par évaluer les systèmes solaires sans régulateur par simulation avec l'outil de simulation MATLAB/Simulink. Ensuite, les deux méthodes de poursuite MPPT sont étudiées; la méthode (P&O), la méthode utilisant le contrôleur flou. Les deux systèmes sont simulés sous les conditions environnementales stables et de nombreux changements des conditions météorologiques.

### **III-9/Fonctionnement sous des Conditions Constantes :**

Dans ce test la température et l'ensoleillement sont maintenus constants. On prend les valeurs des conditions standards : la température  $T = 25^{\circ}\text{C}$  et l'ensoleillement  $= 1000\text{W/m}^2$ . Le but de ces simulations est de visualiser le décalage du point de fonctionnement par rapport au point MPP. Il sera aussi à évaluer les pertes dues aux oscillations autour de ce point.

La Figure III-30 illustre les réponses des deux contrôleurs pour les conditions standards ( $T=25^{\circ}\text{C}$  et  $E=1000\text{W/m}^2$ ).





**Figure .III-30.** Réponses des deux contrôleurs pour les conditions standards : la température  $T=25^{\circ}\text{C}$  et l'ensoleillement  $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ .

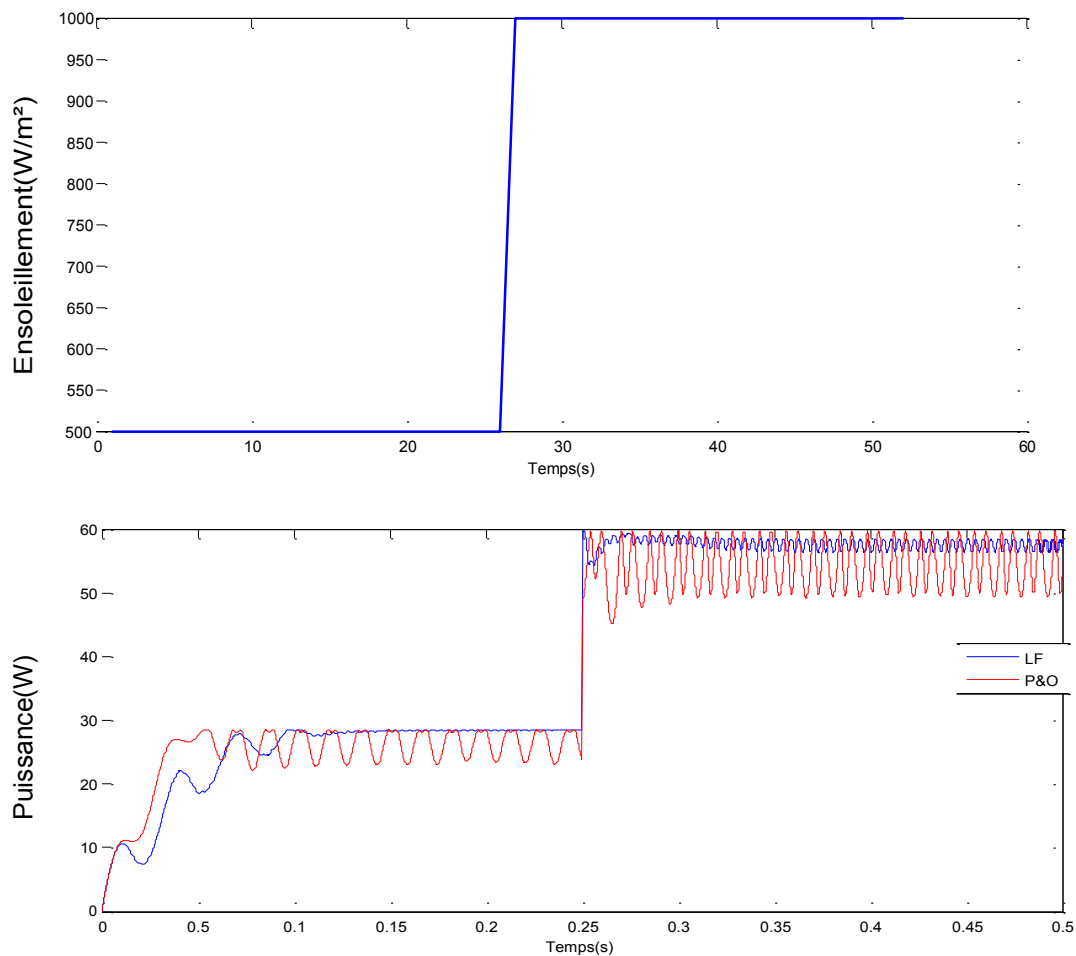
D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que le contrôleur flu conduit à des meilleures performances, avec l'absence des oscillations dans le régime permanent, et un temps de réponse plus rapide.

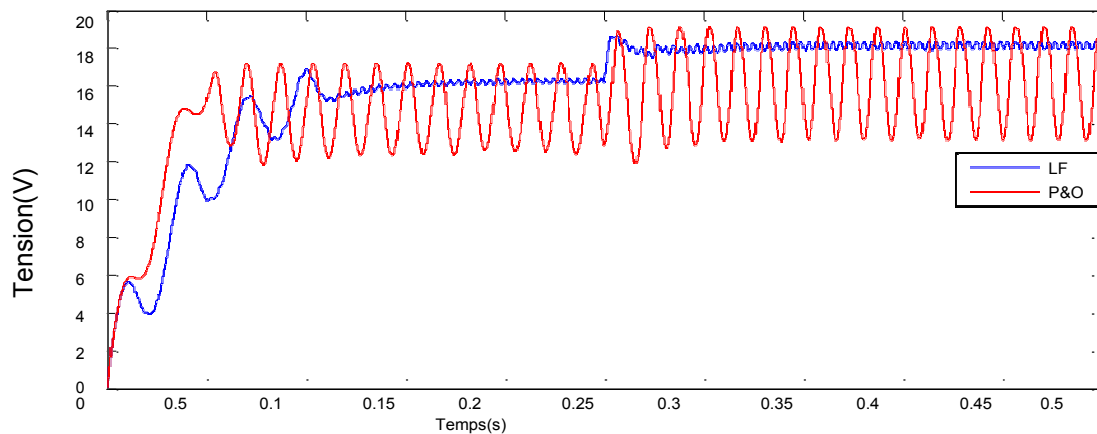
### III-10/Comportement du système face à un changement de les conditions météorologiques :

Afin d'évaluer le temps de réponse des deux mécanismes de poursuite, ces derniers

sont soumis à des variations des conditions météorologiques. Pour voir le comportement du système face aux changements climatiques on va lui faire subir les tests suivants : d'abord on maintient une température constante (25 °C) et on varie l'éclairement solaire avec un signal échelon ( $E=500$  à  $1000 \text{ W/m}^2$ ) et un signal rampe.

Figure III-30 et III-31 montrent que le phénomène d'oscillation apparaît au niveau de la commande MPPT P&O, par contre la commande à logique floue réagit avec finesse en éliminant toute oscillation possible.





**Figure .III-31.** Réponses des trois contrôleurs pour une augmentation d'ensoleillement (échelon  $E=500$  à  $1000\text{w/m}^2$ ) à température constante  $T=25^\circ\text{C}$

La figure (III.31) montre comment la puissance de (P&O) augmente presque instantanément, avec un léger retard. On voit que le MPPT flou, dans ce cas, est plus rapide avec une faible oscillation autour du MPP.

Différents résultats de sortie du générateur photovoltaïque et de la charge, pour différentes valeurs d'éclairement et de température, ont été obtenus en simulant les contrôleurs MPPT flou et P&O. Ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur (P&O). Le contrôleur P&O présente un temps de réponse rapide. La poursuite du point maximum avec le contrôleur MPPT flou a un taux d'ondulation de la tension et de la puissance minimale face aux différentes variations, les pertes de puissance sont moindres dans le régime transitoire, et qu'il est robuste aux différentes variations de conditions atmosphériques.

### III-11/Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la commande MPPT, son principe, quelque méthode de mise en œuvre en particulier nous avons développé la méthode dite perturbe et observe 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. Puis nous avons fait une application de la commande MPPT choisie sur le système PV associant panneau PV – hacheur – charge pour une variation de la température. Les résultats de simulation montre un fonctionnement satisfaisant malgré les faibles oscillations sur la tension et la puissance générée et au niveau de la charge. Nous avons également effectué une étude par simulation MPPT par logique floue. Pour cela, nous avons utilisé une série de tests pour mettre les en prévue dans les cascade conditions climatiques constantes et variables. Nous avons pu constater, à travers les résultats obtenus, l'efficacité de la méthode MPPT floue.

# ***CONCLUSION GENERALE***



## CONCLUSION GENERALE

---

Le travail qu'on a présenté porte sur l'étude par simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque (PV) menu d'une commande MPPT assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le panneau photovoltaïque. Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes PV, notions sur l'énergie et rayonnements solaire et ses caractéristiques ainsi l'effet PV, cellule PV et principe defonctionnement.

Dans le deuxième chapitre on a simulé le comportement d'un générateur photovoltaïque associé à un convertisseur DC-DC contrôlé par MPPT, afin d'extraire le maximum dépaissance disponible aux bornes du générateur et de la transférer à la charge. L'idée est d'utiliser un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge commandé directement par un algorithme traqueur du point de puissance maximale. Nous nous sommes intéressés particulièrement à l'application de l'algorithme basé sur la perturbation et l'observation direct et indirect (à base d'un régulateur PI). Les résultats de simulation ont montré de bonnes performances en termes de poursuite de la puissance maximale fournie par le panneau photovoltaïque.

Le troisième chapitre était consacré à l'étude de la modélisation du système photovoltaïque

Enfin, dans le troisième chapitre, nous avons étudié la commande MPPT, son principe, quelque méthode de mise en œuvre en particulier nous avons développé la méthode dite perturbe et observe, 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. Puis nous avons fait une application de la commande MPPT choisie sur le système PV associant panneau PV – hacheur – charge pour une

## CONCLUSION GENERALE

---

variation de la température. Les résultats de simulation montre un fonctionnement satisfaisant malgré les faibles oscillations sur la tension et la puissance générée et au niveau de la charge.

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

- Les performances du panneau PV se dégradent avec l'augmentation de la température et la diminution de l'intensité d'éclairement. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement 1000W/m<sup>2</sup>, température 25°C

- 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 panneau PV. La commande MPPT adapte le panneau PV à la charge, donc un transfert de la puissance maximale.

➤ **Comme perspectives pour ce travail, on propose :**

- ✓ L'étude expérimentale de l'association présentée dans ce travail du mémoire ;
- ✓ Utilisation des techniques de contrôle MPPT à base d'intelligence artificielle ;
- ✓ Application des commandes robustes comme la commande par mode de glissement.
- ✓ Faire une étude comparative entre l'implantation analogique et numérique de cette MPPT et la faisabilité de cette implantation lors d'une réalisation pratique.
- ✓ -Etablir une étude de découplage lors de la connexion du GPV avec une charge contrôlée (moteur cc-injection dans les réseaux) et l'impact d'une

## CONCLUSION GENERALE

---

commande à deux degrés de liberté sur l'optimisation de la chaîne photovoltaïque.

- ✓ - Etablir une étude comparative entre les différents convertisseurs statiques lors d'une application avec cette MPPT.
- ✓ - Application de l'algorithme en cas du phénomène d'ombrage (courbe avec plusieurs maximums).

# *Bibliographie*

# Bibliographie

---

- [1] [https://www.ripublication.com/aece\\_spl/aecev4n2spl\\_15.pdf](https://www.ripublication.com/aece_spl/aecev4n2spl_15.pdf)
- [2] [https://bu.univ-ouargla.dz/master/pdf/HANANOU\\_ROUABAH.pdf?idme=1009](https://bu.univ-ouargla.dz/master/pdf/HANANOU_ROUABAH.pdf?idme=1009)
- [4] M. Hatti, "-contrôleur flou pour la poursuite du point de puissance maximum mppt d'un système photovoltaïque-".jcge'08 lyon, 2008.
- [5] N. Khaehintung, K. Promoting, B. Tuvirat, P. Sirius, "risk-microcontroller built in fuzzy logic controller of maximum power point tracking for solar-powered light flasher applications", industrial electronics society, 2004.
- [6] W. Chung-Yuen, K. Duk-Heon, K. Sei-Chan, And All, "a new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller", IEEE power electronics specialist's conference, pesc'94, pp. 396-403, jun. 1994.
- [7] M. Veerachary, T. Senjyu and K. Uezato, "feed forward maximum power point tracking of pv systems using fuzzy controller", IEEE trans. On aerospace and electronic systems, vol 38, no. 3, July 2002.
- [8] Ali Nasr Allah Ali, Mohamed H. Saied, M. Z. Mustafa And T. M. Abdel- Moneim, "a survey of maximum ppt techniques of pv systems". IEEE energy tech, 2012.
- [9] Trish anEsrामand Patrick "comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques" IEEE transactions on energy conversion, 200
- [10] A. Dollar, R. Faranda, S. Leva "energy comparison of seven mppt techniques for pv systems", scientific research j. Electromagnetic analysis & applications, department of energy of polytechnic dieMilano, via la mesa 34, 20156, Milano, Italy, 2009;
- [11]. M. Hatti, "-contrôleur flou pour la poursuite du point de puissance maximum mppt d'un système photovoltaïque-".jcge'08 lyon, 2008.
- [12] N. Khaehintung, K. Promoting, B. Tuvirat, P. Sirius, "risk-microcontroller built in fuzzy logic controller of maximum power point tracking for solar-powered light flasher applications", industrial electronics society, 2004.
- [13] W. Chung-Yuen, K. Duk-Heon, K. Sei-Chan, And All, "a new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller", IEEE power electronics specialists conference, pesc'94, pp. 396-403, jun. 1994.
- [14] M. Veer chary, T. Senjyu and K. Uezato, "feedforward maximum power point tracking of pv systems using fuzzy controller", IEEE trans. On aerospace and electronic systems, vol 38, no. 3, July 202.
- [15] Ali Nasr Allah Ali, Mohamed H. Saied, M. Z. Mustafa And T. M. Abdel- Moneim, "a survey of maximum ppt techniques of pv systems". IEEE energy tech, 2012.
- [16] Trish anEsrामAnd Patrick "comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques" IEEE transactions on energy conversion, 2007.

# Bibliographie

---

- [17] Le Ministère de L'énergie et des mines conception et réalisation satinfo société du groupe sone gaz « programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétiques » mars 2011
- [18] A. Ouhd Mohamed Yaya, A. Ouhd Mahmoud Et I. Youm « étude et modélisation d'un générateur photovoltaïque » revue des énergies renouvelables vol. 11 n°3 sénégal, 2008
- [19] S. Liu And R.A. Douglas, "dynamic metaphysics model for solar array", IEEE transactions on energy conversion, vol. 17, n°2, pp. 285 – 294, June 2002.
- [20] Rais Younes « modélisation du rendement du convertisseur DC/AC dans un système photovoltaïque », mémoire de magister en génie électriques, école nationale polytechnique département d'électroniques laboratoire des dispositifs de communication et de conversion photovoltaïque, 2012
- [21] J. Ferreux, f. Forest, « alimentations a découpage convertisseurs a résonance: principes composants modélisation ». Paris, France: dynode, 1999.
- [22] A.Benayad, « modélisation des panneaux photovoltaïques par les méthodes de soft comptent. » mémoire de magister, département de génie électriques, université de Bejaïa 2011.
- [23] Alain Bilbao « le arrêta réalisation de commandes mppt numériques » diplôme ingénieur technique industriel, septembre 2006
- [24] N.Femia, G. Lisa, G. Petrone, AndM.Vitelli "distributed maximum power point tracking of photovoltaic arrays: novel approach and system analysis". IEEE transaction on industrial electronics, vol. 55, no. 7. 2008.
- [25] C.Andr'Es, G.Spagnuolo, G. Petron, M.VitelliAndJ.Davidbastidas "a multivariable mppt algorithm for granular control of photovoltaic systems" IEEE 2010
- [26] F.Slama, « modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électriques », mémoire de magister d'électrotechniques, Sétif 2012.
- [27] M.Obeidi, « commande des hacheurs mppt par logique floue », mémoire de magister, école nationale polytechnique 2006.
- [28] Aamarouayache Mohamed, « contribution à l'optimisation d'une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque », doctorat en sciences en électrotechniques option ,2014
- [29].S.ABADA ,, Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharged'une batterie avec un convertisseur repic" Mémoire Maître esSciences , Universitélaval,2011.
- [30] K.Sundareswaran,V.VigneshkumarandS.Plain."Applicationofa combined particleswarmoptimizationandperturbandobservemethodforMPPTinPVsystemsunderpartial shadingconditions", Renewable Energy75 (2015) 308-317.