

---

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Filière Électrotechnique  
Spécialité machines électriques

présenté par

BELKHERROUBI SALIM

&

RAMDANI OTHMAN

---

### **Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque**

---

Proposé par : Nom et prénom Enseignant 1 & Nom et prénom Enseignant 2

Année Universitaire 2018-2019



---

**Résumé :** Utiliser ces trois champs pour écrire un résumé de votre mémoire dans l'ordre suivant : arabe, français et anglais. Ces trois langues sont indispensables pour le mémoire. Le résumé ne doit pas dépasser les huit lignes ni moins de quatre lignes. Eviter de faire des sauts de lignes dans le résumé pour ne pas dépasser le nombre de lignes exigé.

Ce document doit être fourni pour chaque binôme en cours de préparation du mémoire du projet de fin d'études. Le non respect de ce format entrainera le rejet du mémoire. Nous vous prions de respecter le format.

**Mots clés :** Premier mot ; Deuxième mot ; Troisième mot clé.

---

**Abstract :**

**Keywords :**

---

## Listes des acronymes et abréviations

# Table des matières

## Chapitre 1 Généralité sur les panneaux photovoltaïques

|   |                                    |
|---|------------------------------------|
| Introduction .....  | 3                                  |
| <b>1.1. L'énergie solaire photovoltaïque.....</b>                                 | <b>3</b>                           |
| <b>1.2. L'électricité photovoltaïque.....</b>                                     | <b>4</b>                           |
| 1.2.1. L'effet photovoltaïque .....   | 4                                  |
| 1.2.2. Rappel sur les Propriétés des Semi-conducteurs .....                       | 5                                  |
| 1.2.3. Définition jonction PN.....  | 6                                  |
| <b>1.3. La cellule photovoltaïque.....</b>  | <b>7</b>                           |
| 1.3.1. Modèle équivalent de la cellule photovoltaïque.....                        | 8                                  |
| a. Circuit équivalent simple et modèle d'une cellule photovoltaïque idéale .....  | 8                                  |
| b. Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire réelle.....    | 9                                  |
| c. Calcule de $I_{ph}$ .....  | 10                                 |
| d. Calcule de $I_0$ .....   | 10                                 |
| e. Calcule de $I_0s$ .....  | 10                                 |
| f. Calcule de $I$ .....   | 11                                 |
| 1.3.2. Les Caractéristiques électrique d'une cellule photovoltaïque.....          | 11                                 |
| <b>1.4. Influence des Paramètres sur la caractéristique de la cellule PV.....</b> | <b>12</b>                          |
| 1.4.1. Paramètres interne.....  | 12                                 |
| a) Influence de la résistance série $R_s$ .....                                   | 12                                 |
| b) Influence de la résistance parallèle $R_{sh}$ .....                            | 13                                 |
| 1.4.2 Paramètres externes   | <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |
| a Influence de la température.....  | 13                                 |
| b Influence de l'éclairement.....   | 14                                 |
| <b>1.5. Les Différents Types de Cellules Photovoltaïques.....</b>                 | <b>15</b>                          |

|  |           |
|--|-----------|
| 1.5.1. Cellules monocristallines :               | 16        |
| 1.5.2. Cellules poly-cristallines.....           | 16        |
| 1.5.3. Les cellules amorphes.....                | 17        |
| 1.5.4. Les cellules nanocristallines.....        | 18        |
| <b>1.6. Groupement en série.....</b>             | <b>18</b> |
| <b>1.7. Regroupement en parallèle.....</b>       | <b>19</b> |
| <b>1.8. Protection des cellules.....</b>         | <b>20</b> |
| <b>1.9. Le module PV.....</b>                    | <b>20</b> |
| <b>1.10. Champ photovoltaïque.....</b>           | <b>21</b> |
| <b>1.11. Le Facteur de forme FF :</b> .....      | <b>22</b> |
| <b>1.12. Le rendement <math>\eta</math>.....</b> | <b>22</b> |
| <b>Conclusion.....</b>                           | <b>22</b> |

## Chapitre 2 Les convertisseurs statiques

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introduction.....</b>  | <b>23</b> |
| <b>2.1. Les convertisseurs statiques .....</b>                                      | <b>23</b> |
| 2.1.1. Connexion direct entre la GPV et la charge.....                              | 23        |
| 2.1.2. Connexion indirect avec un étage d'adaptation entre la GPV et la charge..... | 25        |
| <b>2.2. Principe du convertisseur.....</b>  | <b>26</b> |
| <b>2.3. Le convertisseur élévateur (boost) .....</b>                                | <b>27</b> |
| 2.3.1. Structure de convertisseur .....   | 27        |
| 2.3.2. Principe de fonctionnement.....  | 27        |
| 2.3.3. Etude théorique en conduction continu.....                                   | 28        |
| a.Phase 1 : $(0 < t < \alpha T)$ .....  | 28        |
| b.Phase 2 $(\alpha T < t < T)$ .....  | 29        |
| <b>2.4. Convertisseur abaisseur « BUCK » .....</b>                                  | <b>31</b> |

|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| 2.4.1. Description de la structure : | 31        |
| 2.4.2. Principe de fonctionnement    | 31        |
| <b>Conclusion</b>                    | <b>34</b> |

## **Chapitre 3 Les techniques MPPT**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Introduction</b>                                    | <b>35</b> |
| <b>3.1. Les techniques MPPT</b>                        | <b>36</b> |
| 3.1.1. Méthodes de perturbation et d'observation (P&O) | 36        |
| 3.1.2. Méthodes de conductance incrémentielle          | 38        |
| 3.1.3. Méthode de la logique floue                     | 40        |
| a. La fuzzification                                    | 40        |
| b. L'inférence   | 41        |
| c. La defuzzification                                  | 42        |
| <b>4.1. Commande MPPT floue</b>                        | <b>43</b> |
| <b>Conclusion</b>                                      | <b>47</b> |

## **Chapitre 4 Simulations et résultats**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Introduction</b>  | <b>48</b> |
| <b>4.1. Système photovoltaïque</b>                             | <b>48</b> |
| <b>4.2. Simulation des caractéristiques du GPV</b>             | <b>48</b> |
| 4.2.1. Modèle d'un panneau photovoltaïque sous Simulink        | 49        |
| <b>4.3. La simulation de la commande MPPT P&amp;O</b>          | <b>52</b> |
| 4.3.1. Présentation de l'Algorithme Perturber et observer, P&O | 52        |
| 4.3.2. Simulation de la méthode MPPT P&O                       | 52        |
| 4.3.3. Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge)      | 53        |
| 4.3.3. Résultats de simulation de la commande MPPT P&O         | 54        |

|  |           |
|--|-----------|
| a Le cas où la température et l'éclairement sont fixes.....                                | 54        |
| b Cas de la température constante (25C°) et l'éclairement variable.....                    | 57        |
| c Cas de la température variable et l'éclairement fixe 1000 w/m2.....                      | 60        |
| <b>4.4. Principe de poursuite du point de puissance maximale par la logique floue.....</b> | <b>62</b> |
| 4.4.1. Simulation de la méthode MPPT logique floue.....                                    | 65        |
| 4.4.2. Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge).....                             | 66        |
| <b>4.5. Résultat de simulation de la commande MPPT logique floue.....</b>                  | <b>66</b> |
| 4.5.1. Cas où la température et l'éclairement sont fixes.....                              | 67        |
| 4.5.2. Cas d'une température constante (25C°) et l'éclairement variable.....               | 70        |
| 4.5.3. Cas de la température variable et l'éclairement fixe 1000 w/m2.....                 | 73        |
| <b>4.6. Comparaison entre les méthodes <i>P&amp;O</i> et <i>logique floue</i>.....</b>     | <b>75</b> |
| 4.6.1. Fonctionnement sous des conditions climatiques standards.....                       | 76        |
| 4.6.2. Performance sous des changements brusques du niveau de rayonnement.....             | 78        |
| 4.6.3. Performance sous des changements brusques du niveau de température.....             | 79        |
| <b>4.8. Caractéristiques du panneau PV.....</b>  | <b>82</b> |
| <b>CONCLUSION.....</b>   | <b>82</b> |

## Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure 1. 1.</b> L'énergie solaire. ....   | 4  |
| <b>Figure 1. 2.</b> L'effet photovoltaïque. ....  | 5  |
| <b>Figure 1. 3.</b> Principe de la structure en bandes. ....  | 5  |
| <b>Figure 1. 4</b> Jonction PN en polarisation directe. ....  | 6  |
| <b>Figure 1. 5.</b> Jonction PN en polarisation inverse. ....   | 7  |
| <b>Figure 1. 6.</b> Schéma d'une cellule élémentaire. ....  | 7  |
| <b>Figure 1. 7 .</b> Schéma équivalent simplifié d'une cellule photovoltaïque idéale. ....  | 8  |
| <b>Figure 1. 8.</b> Circuit équivalent à une diode d'une cellule photovoltaïque réelle. ....  | 9  |
| <b>Figure 1. 9.</b> Les Caractéristiques électrique (I-V) et (P-V). ....  | 12 |
| <b>Figure 1. 10.</b> Influence de la résistance série. ....   | 12 |
| <b>Figure 1. 11.</b> Influence de la résistance parallèle $R_{sh}$ . ....   | 13 |
| <b>Figure 1. 12.</b> La caractéristique de $I=f(V)$ et $P= f(V)$ en fonction de température. ....   | 14 |
| <b>Figure 1. 13.</b> La caractéristique de $I=f(V)$ et $P= f(V)$ en fonction de l'éclairement. ....   | 15 |
| <b>Figure 1. 14.</b> Type de cellule monocristalline. ....  | 16 |
| <b>Figure 1. 15.</b> Type de cellules poly-cristallines. ....   | 17 |
| <b>Figure 1. 16.</b> Type de cellules amorphes. ....  | 17 |
| <b>Figure 1. 17.</b> Type de cellules nanocristallines. ....  | 18 |
| <b>Figure 1. 18.</b> Association des modules en série. ....   | 18 |
| <b>Figure 1. 19.</b> Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules Identiques. ....  | 19 |
| <b>Figure 1. 20.</b> Association des modules en parallèle ....  | 19 |
| <b>Figure 1. 21.</b> Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de ns cellules Identiques. ..  | 19 |
| <b>Figure 1. 22.</b> les diodes de protection Diode by passe ( $D_p$ ) et la diode anti retour ( $D_r$ ). ....  | 20 |
| <b>Figure 1. 23.</b> Module photovoltaïque. ....  | 21 |
| <b>Figure 1. 24.</b> Champ photovoltaïque. ....   | 21 |
| <br>  |    |
| <b>Figure 2. 1 .</b> Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour. ....  | 24 |
| <b>Figure 2. 2.</b> Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de La charge. 25  |    |
| <b>Figure 2. 3.</b> Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de $P_{max}$ du GPV. .... | 25 |
| <b>Figure 2. 4 .</b> Structure d'un convertisseur élévateur (boost) ....  | 27 |
| <b>Figure 2. 5.</b> Schéma équivalent du convertisseur lorsque K est fermé et la diode bloqué. ....   | 28 |

|  |    |
|--|----|
| <i>Figure 2. 6.</i> Schéma équivalent du convertisseur lorsque K est fermé et la diode bloquée.....                          | 29 |
| <i>Figure 2. 7.</i> Forme du courant.....  | 30 |
| <i>Figure 2. 8.</i> Structure d'un convertisseur abaisseur (Buck).....   | 31 |
| <i>Figure 2. 9.</i> Variation de $V_s$ , $I_s$ et $I_d$ en fonction de temps.....  | 32 |
| <i>Figure 2. 10.</i> Variation de $V_s$ , $I_s$ et $I_d$ en fonction de temps en conduction discontinu.....                  | 33 |
|  |    |
| <i>Figure 3. 1.</i> Principe de fonctionnement d'une commande MPPT .....   | 35 |
| <i>Figure 3. 2.</i> Organigramme de l'algorithme <i>P&amp;O</i> .....  | 37 |
| <i>Figure 3. 3.</i> Organigramme de l'algorithme <i>CI</i> .....   | 39 |
| <i>Figure 3. 4.</i> Contrôle par logique floue.....  | 40 |
| <i>Figure 3. 5.</i> Structure de commande de logique floue.....  | 43 |
| <i>Figure 3. 6.</i> Fonctions d'appartenance pour ; l'entre E ; l'entre CE ; la sortie delta D.....                          | 45 |
| <i>Figure 3. 7.</i> Les 25 règles floues de contrôle présenté sous forme de graphique en 3D.....                             | 46 |
|  |    |
| <i>Figure 4. 1.</i> Le schéma synoptique d'un système PV.....  | 48 |
| <i>Figure 4. 2.</i> Schéma bloc du GPV pour déterminer les caractéristiques ( <i>I-V</i> ) et ( <i>P-I</i> ).....            | 49 |
| <i>Figure 4. 3.</i> Schéma bloc du générateur photovoltaïque.....  | 49 |
| <i>Figure 4. 4.</i> Circuit équivalent à une diode d'une cellule photovoltaïque réelle.....                                  | 50 |
| <i>Figure 4. 5.</i> Les caractéristiques ( <i>I-V</i> ) de GPV.....  | 51 |
| <i>Figure 4. 6.</i> les caractéristiques ( <i>P-V</i> ) de GPV.....  | 51 |
| <i>Figure 4. 7.</i> Organigramme de l'algorithme <i>P&amp;O</i> .....  | 52 |
| <i>Figure 4. 8.</i> Schéma block de la commande MPPT <i>P&amp;O</i> .....  | 53 |
| <i>Figure 4. 9.</i> Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la Commande MPPT<br>( <i>P&amp;O</i> ).....      | 53 |
| <i>Figure 4. 10.</i> Résultats de simulation de la tension générée par le GPV pour $E=1000W/m^2$ et<br>$T=25C^\circ$ .....   | 54 |
| <i>Figure 4. 11.</i> Résultats de simulation du courant généré par le GPV pour $E=1000W/m^2$ et $T=25C^\circ$ .....          | 55 |
| <i>Figure 4. 12.</i> Résultats de simulation de la puissance générée par le GPV pour $E=1000W/m^2$ et<br>$T=25C^\circ$ ..... | 55 |
| <i>Figure 4. 13.</i> Résultats de simulation de la tension de sortie du système pour $E=1000W/m^2$ et<br>$T=25C^\circ$ ..... | 56 |

|   |    |
|---|----|
| <i>Figure 4. 14.</i> Résultats de simulation de le courant de sortie du système pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$ .....                             | 56 |
| <i>Figure 4. 15.</i> Rapport cyclique $\alpha$ de MPPT. ....  | 57 |
| <i>Figure 4. 16.</i> Changement de l'éclairement de $1000W/m^2$ à $500W/m^2$ avec une température fixe de $25^{\circ}C$ .....                           | 57 |
| <i>Figure 4. 17.</i> Tension du GPV, tension de la charge face à un changement de l'éclairement de $1000W/m^2$ à $600W/m^2$ pour la MPPT P&O .....      | 58 |
| <i>Figure 4. 18.</i> Puissance du GPV et Puissance de la charge face à un changement de l'éclairement de $1000W/m^2$ à $600W/m^2$ pour la MPPT P&O..... | 59 |
| <i>Figure 4. 19.</i> Changement de la température de $25^{\circ}C$ à $10^{\circ}C$ avec un ensoleillement fixe de $1000 w/m^2$ . ....                   | 60 |
| <i>Figure 4. 20.</i> Tension du GPV face à un changement de température de $25^{\circ}$ à $10^{\circ}$ pour la MPPT P&O.....                            | 60 |
| <i>Figure 4. 21.</i> tension de la charge face à un changement de température de $25^{\circ}$ à $10^{\circ}$ pour la MPPT P&O. ....                     | 61 |
| <i>Figure 4. 22.</i> Puissance du GPV à un changement de température de $25^{\circ}C$ à $10^{\circ}C$ pour la MPPT P&O.....                             | 61 |
| <i>Figure 4. 23.</i> Puissance de la charge à un changement de température de $25^{\circ}C$ à $10^{\circ}C$ pour la MPPT P&O.....                       | 62 |
| <i>Figure 4. 24.</i> Structure de la commande MPPT floue.....   | 63 |
| <i>Figure 4. 25.</i> Fonction d'appartenance de chacune des variables linguistiques.....  | 64 |
| <i>Figure 4. 26.</i> Le graphe 3D des règles de contrôle floue. ....  | 65 |
| <i>Figure 4. 27.</i> Schéma block de la commande MPPT P&O .....   | 65 |
| <i>Figure 4. 28.</i> Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la Commande MPPT floue.....  | 66 |
| <i>Figure 4. 29.</i> Résultats de simulation de la tension générée par le GPV pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}$ .....                                | 67 |
| <i>Figure 4. 30.</i> Résultats de simulation du courant généré par le GPV pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}$ .....                                    | 67 |
| <i>Figure 4. 31.</i> Résultats de simulation du la puissance généré par le GPV pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}$ .....                               | 68 |
| <i>Figure 4. 32.</i> Résultats de simulation de tension de sortie du système pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$ .....                                | 68 |

|  |    |
|--|----|
| <i>Figure 4. 33.</i> Résultats de simulation de courant de sortie du système pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^\circ C$  | 69 |
| <i>Figure 4. 34.</i> Résultats de simulation de la puissance de sortie du système pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^\circ C$ .....                                       | 69 |
| <i>Figure 4. 35.</i> Rapport cyclique $\alpha$ de MPPT floue. ....   | 70 |
| <i>Figure 4. 36.</i> Changement de l'éclairement de $1000W/m^2$ à $500W/m^2$ avec une température fixe de $25^\circ C$ .....                                       | 70 |
| <i>Figure 4. 37.</i> Tension du GPV, tension de la charge face à un changement de l'éclairement de $1000W/m^2$ à $600W/m^2$ pour la MPPT logique floue. ....       | 71 |
| <i>Figure 4. 38.</i> Puissance du GPV et Puissance de la charge face à un changement de l'éclairement de $1000W/m^2$ à $600W/m^2$ pour la MPPT logique floue. .... | 72 |
| <i>Figure 4. 39.</i> Changement de la température de $25^\circ C$ à $10^\circ C$ avec un ensoleillement fixe de $1000 w/m^2$ .....                                 | 73 |
| <i>Figure 4. 40.</i> Tension du GPV charge face à un changement de température de $25^\circ C$ à $10^\circ C$ pour la MPPT logique floue.....                      | 73 |
| <i>Figure 4. 41.</i> Tension de la charge face à un changement de température de $25^\circ C$ à $10^\circ C$ pour la MPPT logique floue.....                       | 74 |
| <i>Figure 4. 42.</i> Puissance du GPV à un changement de température de $25^\circ C$ à $10^\circ C$ pour la MPPT logique floue. ....                               | 74 |
| <i>Figure 4. 43.</i> Puissance de la charge à un changement de température de $25^\circ C$ à $10^\circ C$ pour la MPPT logique floue. ....                         | 75 |
| <i>Figure 4. 44.</i> Système permettant la simulation Globale du comportement du GPV.....  | 75 |
| <i>Figure 4. 45.</i> Puissance optimale du système PV. ....  | 76 |
| <i>Figure 4. 46.</i> Zoom sur la puissance en sortie du GPV. ....  | 77 |
| <i>Figure 4. 47.</i> Les perturbations de la puissance de sortie du GPV pour MPPT P&O et logique floue.  | 77 |
| <i>Figure 4. 48.</i> L'évolution de l'éclairement. ....  | 78 |
| <i>Figure 4. 49.</i> Puissance en sortie du GPV avec des changements brusques au niveau derayonnement .....  | 78 |
| <i>Figure 4. 50.</i> Zoom sur la puissance en sortie du GPV entre 0.22s et 0.3s. ....  | 79 |
| <i>Figure 4. 51.</i> L'évolution de la température. ....   | 79 |
| <i>Figure 4. 52.</i> Puissance en sortie du GPV avec des changements brusques au niveau de température. ....   | 80 |
| <i>Figure 4. 53.</i> Zoom sur la puissance en sortie du GPV entre 0.1s et 0.35s. ....  | 80 |

## Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| <i>Tableau 2. 1.</i> Les convertisseurs statiques et leur rapport cyclique. ....                                  | 26 |
| <i>Tableau 3. 1.</i> Règles floues .....  | 46 |
| <i>Tableau 4. 1.</i> Classement des variables d'entre. ....   | 63 |
| <i>Tableau 4. 2.</i> Table d'inférence. ....  | 64 |
| <i>Tableau 4. 3.</i> Comparaison des techniques MPPT. ....  | 81 |
| <i>Tableau 4. 4.</i> Les caractéristiques nominales du panneau photovoltaïque. <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |    |

*Je dédie ce modeste travail à*

*Mes chères parents, pour leurs soutient moral et financier et  
d'être la lumière de ma vie, qui m'ont toujours encouragé pour  
terminer mes études dans des bonnes conditions, en leurs espérant une  
longue vie et que ﷻ les gardes.*

- ❖ *A mon cher frère.*
- ❖ *A mes sœurs.*
- ❖ *A ma grand-mère et que dieu la garde.*
- ❖ *A mes tantes et mes oncles.*
- ❖ *A mes chers amis de mon quartier.*
- ❖ *A mes chers amis de l'université.*
- ❖ *A mon promoteur Mr. bounekhla mohamed et mon binôme  
RAMDANI OTHMAN*

**BELKHERROUBI SALIM**

*Je dédie ce modeste travail à*

*mes chères parents, pour leurs soutient moral et financier et  
d'être la lumière de ma vie, qui m'ont toujours encouragé pour  
terminer mes études dans des bonnes conditions, en leurs espérant une  
longue vie et que **الله** les gardes.*

- ❖ *A mes chers frères.*
- ❖ *A mes grands-parents et que dieu les gardes.*
- ❖ *A mes tantes et mes oncles.*
- ❖ *A mon cher ami de l'université Mr. B. CHARF.*
- ❖ *A mon promoteur Mr. A. FERDJOUNI, et mon binôme  
BENRACHED AMINE.*
- ❖ *A toute la promotion 2011-2012 électrotechnique sans  
exception.*

*\*HADDOUCHE ABDELKADER\**

*Au terme de ce travail, nous tenons à remercier en premier lieu **الله** Miséricordieux de nous avoir donné la santé et le courage afin d'accomplir ce modeste travail et de nous avoir permis d'atteindre la fin de notre formation.*

*Nos remerciements et notre reconnaissance vont à notre promoteur **Mr. BOUNEKHLA MOHAMED**, qui a accepté de nous encadrer et qui nous a guidés pendant l'élaboration de ce mémoire, pour sa disponibilité et ses conseils précieux.*

*Nous adressons nos sincères salutations et nos vifs remerciements à tous ceux qui nous encouragés et donnés les mains d'aides, de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail afin qu'il soit présentable.*

*Nos vifs remerciements vont à Monsieur le Président de jury, pour l'honneur qu'il nous fait et aux membres du jury pour avoir accepté de corriger et d'évaluer ce travail.*

*Enfin nous exprimons notre reconnaissance à tous les Enseignants du département d'Electronique qui ont contribués à notre formation*

*Universitaire de BLIDA.*



# Introduction générale

---

Sans énergie, le monde n'aurait jamais pu atteindre le niveau de développement actuel. L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus facile à exploiter. Mais avant de la consommer il faut la produire dans des centrales de production de grande puissance, la transporter, puis la distribuer vers chaque consommateur.

La production d'énergie 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'énergie 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 des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon anarchique pour les générations futures.

On distingue deux types d'énergie : les énergies non renouvelables et les énergies renouvelables. Les premières sont dérivées à partir du pétrole, du gaz, du charbon, et d'uranium...Les secondes de l'hydraulique, la biomasse, l'éolien, le solaire, la géothermique, etc.

Le soleil est la source d'énergie la plus disponible dans la nature, qu'il fallait la capter et la transformer en électricité par effet photovoltaïque, cette conversion est basé sur des matériaux semi-conducteurs comme le silicium et l'amorphe. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique.

La caractéristique courante tension  $I - V$  du GPV dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble, de plus son point de fonctionnement du GPV dépend directement de la charge qu'il alimente. Afin d'extraire en chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV, nous introduisons un étage

d'adaptation entre le générateur et la charge pour coupler les deux éléments le plus parfaitement possible.

Le problème du couplage parfait entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continue n'est pas encore réellement résolu. La littérature propose une grande quantité de solutions sur l'algorithme de contrôle qui effectue une recherche de point de puissance maximale lorsque le GPV est couplé à une charge à travers un convertisseur statique.

Le rendement des systèmes photovoltaïques peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT).

Concernant ce travail, nous nous sommes intéressés essentiellement au développement d'une procédure d'optimisation qui permet la poursuite de point de la puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT) d'un générateur photovoltaïque (GPV).

Ceci nécessite l'implémentation d'une technique de poursuite de point maximale de puissance, telle que la méthode de l'approche Floue, Outre que l'introduction et la conclusion générales, ce projet sera divisé en trois chapitres selon le plan suivant :

Le premier chapitre, sera consacré pour les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système de captage photovoltaïque, Aussi que le principe de fonctionnement de générateur photovoltaïque ainsi que l'établissement caractéristique courant tension I-V et puissance tension P-V.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les caractéristiques électriques des convertisseurs statiques (convertisseur *DC-DC*) suivie d'une présentation du principe de fonctionnement des deux type de convertisseur DC-DC ; le boost (l'élévateur) et le buck (l'abaisseur).

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les différentes techniques de poursuite de point de puissance maximal MPPT. Les principes de fonctionnement des trois techniques : logique floue, inductance incrémental et perturbe and observe (P&O) vont être développés.

Dans le quatrième chapitre on va donner le résultat de simulation des deux méthodes : logique floue et perturbe and observe (P&O), ainsi qu'une interprétation d'une étude comparative entre les deux méthodes.

On termine notre travail avec une conclusion générale.

# Chapitre 1 Généralités sur les panneaux photovoltaïques

---

## Introduction

Nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses caractéristiques[1].

### 1.1. L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux (Solaire ou autre) en électricité. Elle utilise pour cette conversion des modules photovoltaïques

Composés de cellules solaires ou de photopiles.

Elle est radicalement différente de l'énergie solaire thermique qui produit de la chaleur à partir du rayonnement solaire infrarouge afin de chauffer de l'eau ou de l'air. On utilise dans ce cas des capteurs thermiques qui relèvent d'une toute autre technologie. Dans le langage courant, ce sont des « chauffe-eau solaires » ou des « capteurs à air chaud ».

Il y a aussi ce qu'on appelle l'énergie solaire thermodynamique, qui fonctionne sur un principe de concentration des rayons solaires au moyen de miroirs galbés, en un foyer placé sur le tour qui emmagasine les calories pour les restituer ensuite sous forme mécanique à l'aide d'une turbine[2].



*Figure 1. 1.*L'énergie solaire.

## 1.2. L'électricité photovoltaïque

### 1.2.1. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés semi-conducteurs qui produit de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière.

Le plus connu d'entre eux est le **silicium** cristallin qui est utilisé aujourd'hui par 90% des panneaux produits dans le monde.

Pour produire un courant électrique utile il faut arriver à extraire les électrons libérés. Un procédé pour faire cela est d'introduire dans les matériaux semi-conducteurs de l'élément chimique qui contribue à produire un excès d'électrons et de trous. Ces éléments, qui altèrent notablement les propriétés intrinsèques du semi-conducteur, s'appellent les dopants [3].

Un dopant approprié pour le silicium est le bore, cet atome possède moins d'électron sur sa périphérie que le silicium, il lui manque un électron pour la réalisation des liaisons. La structure créée s'appelle un semi-conducteur de type P (positif).

Un autre dopant possible pour le silicium est le phosphore. Ce dernier possède plus d'électron sur sa périphérie que le silicium l'un de ces électrons ne participe pas à la liaison il est donc libre de se déplacer. Le semi-conducteur est dit de type N (négatif).

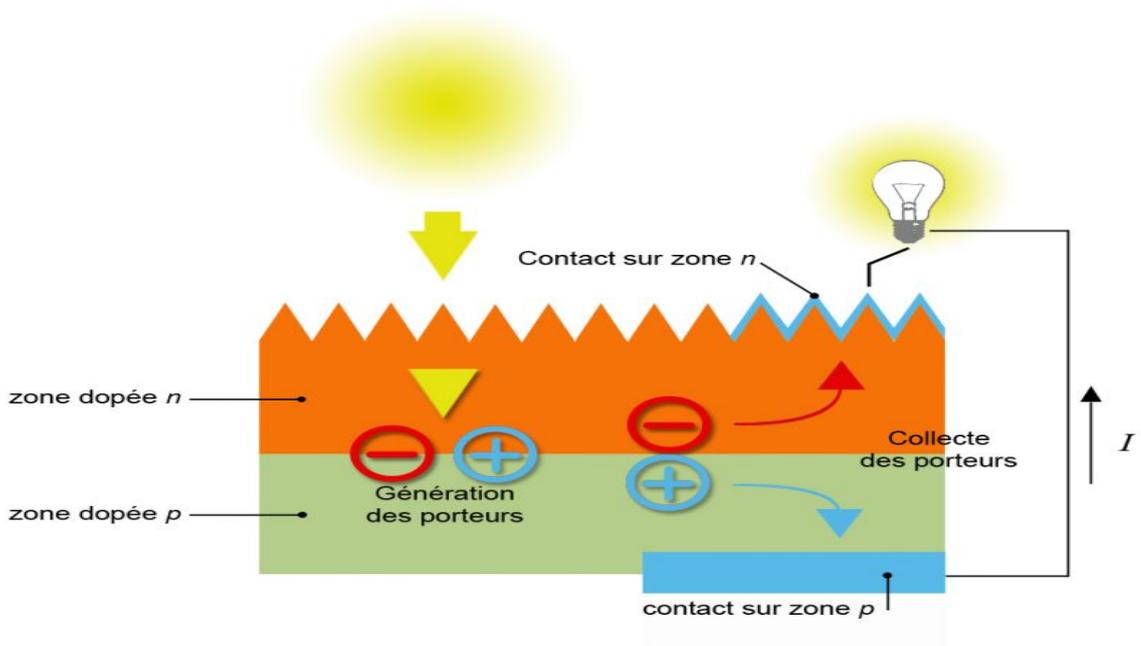


Figure 1. 2. L'effet photovoltaïque.

### 1.2.2. Rappel sur les Propriétés des Semi-conducteurs

Un **semi-conducteur** est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants [4].

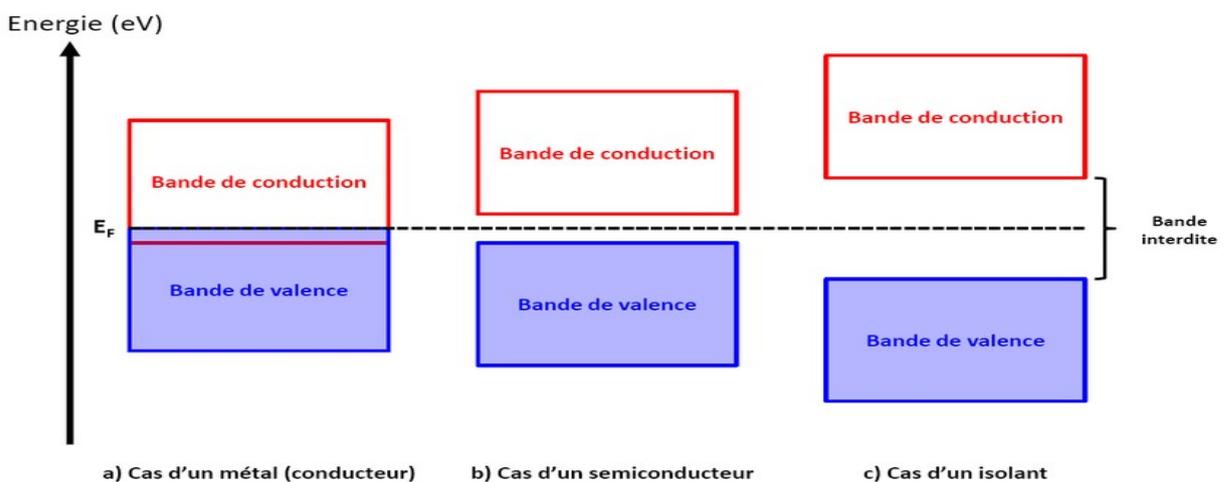


Figure 1. 3. Principe de la structure en bandes.

### 1.2.3. Définition jonction PN

Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dopé N et d'un semi-conducteur dopé P.

Si l'on applique une tension positive du côté de la région P, les porteurs majoritaires positifs (les trous) sont repoussés vers la jonction. Dans le même temps, les porteurs majoritaires négatifs du côté N (les électrons) sont attirés vers la jonction. Arrivés à la jonction, soit les porteurs se recombinent (un électron tombe dans un trou) en émettant un photon éventuellement visible (LED), soit ces porteurs continuent leur course au travers de l'autre semi-conducteur jusqu'à atteindre l'électrode opposée : le courant circule, son intensité varie en exponentielle de la tension. Si la différence de potentiel est inversée, les porteurs majoritaires des deux côtés s'éloignent de la jonction, bloquant ainsi le passage du courant à son niveau. Ce comportement asymétrique est utilisé notamment pour redresser le courant alternatif.

La jonction P-N est à la base du composant électronique nommé « diode », qui ne permet le passage du courant électrique que dans un seul sens. De manière similaire, une troisième région peut être dopée pour former des doubles jonctions N-P-N ou P-N-P qui forment les transistors bipolaires. Dans ce cas-là, les deux semi-conducteurs de même type sont appelés « émetteur » et « collecteur ». Le semi-conducteur situé entre l'émetteur et le collecteur est appelé « base » ; il a une épaisseur de l'ordre du micromètre. Lorsqu'on polarise la jonction émetteur-base en direct, celle-ci est passante alors que la jonction base-collecteur est bloquée. Cependant la base est assez fine pour permettre aux nombreux porteurs majoritaires injectés depuis l'émetteur (fortement dopé) de la traverser avant d'avoir le temps de se recombiner. Ils se retrouvent ainsi dans le collecteur, produisant un courant contrôlé par ce courant de base[5].

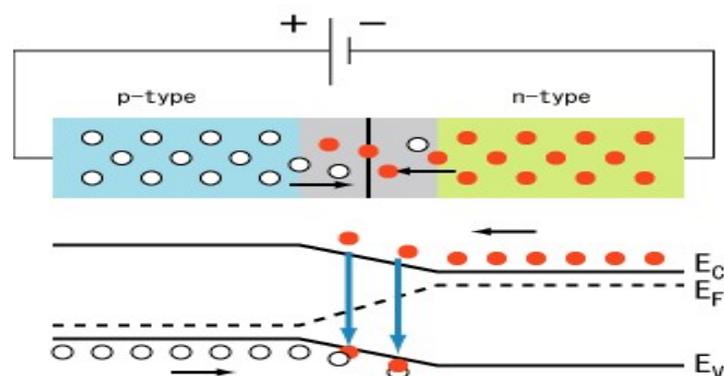
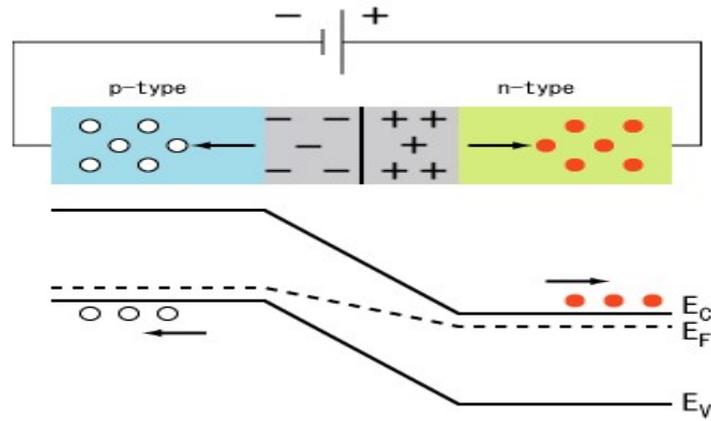


Figure 1. 4Jonction PN en polarisation directe.



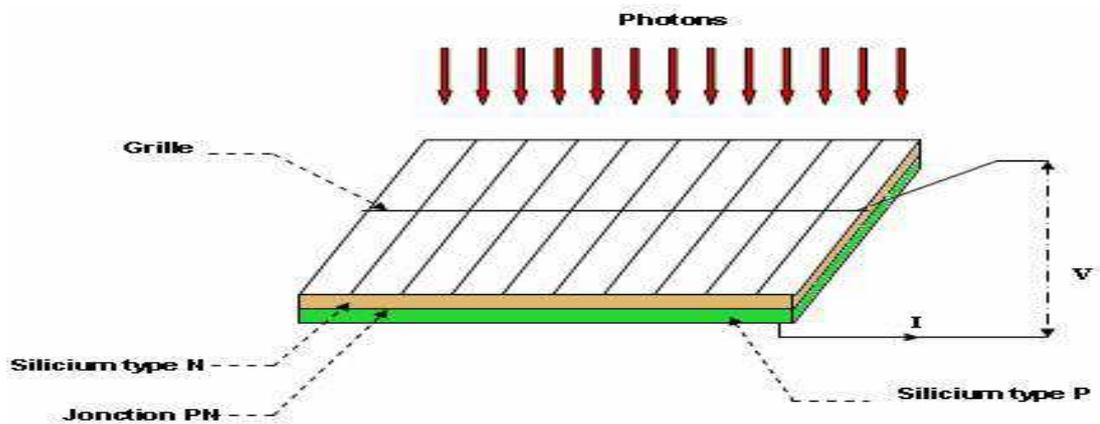
**Figure 1. 5.** Jonction PN en polarisation inverse.

### 1.3. La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs, cette dernière permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque: Les photons qui percutent une cellule PV crée un déplacement d'électrons (courant).

En effet, une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur. Ces deux couches sont dopées différemment [6] :

- Pour la couche N, apport d'électrons périphériques
- Pour la couche P, déficit d'électrons.



**Figure 1. 6.** Schéma d'une cellule élémentaire.

### 1.3.1. Modèle équivalent de la cellule photovoltaïque

#### a. Circuit équivalent simple et modèle d'une cellule photovoltaïque idéale

Idéalement, on peut négliger  $R_{set}I$  devant  $V$ , puis travailler avec un modèle simplifié :

Comme la résistance shunt est beaucoup plus élevée que la résistance série, on peut encore négliger le courant dévié dans  $R_{sh}$ . On obtient : Le schéma équivalent de la figure (1.4) correspondant est celui de la cellule idéale [7] :

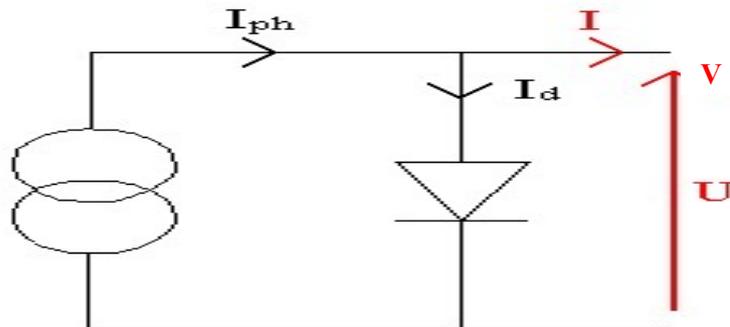


Figure 1. 7 .Schéma équivalent simplifié d'une cellule photovoltaïque idéale.

D'après la loi de Kirchhoff applique sur ce circuit en obtient les équations simple suivant :

- $I = I_{ph} - I_d(1.1)$
- $I = I_{ph} - I_0[e^{\frac{q \times V}{k \times T}} - 1](1.2)$

$I$  : Le courant de sortie de la cellule (A)

$V$  : Tension de sortie de la cellule (V)

$I_{ph}$  : Photo courant, ou courant généré par l'éclairement (A)

$I_0$  : Le courant de saturation de la diode

$I_d$  : Courant de la diode (A) modélisée par l'équation suivant :

- $I_d = I_0 \left[ e^{\frac{q \times V}{k \times T}} - 1 \right] \quad (1.3)$

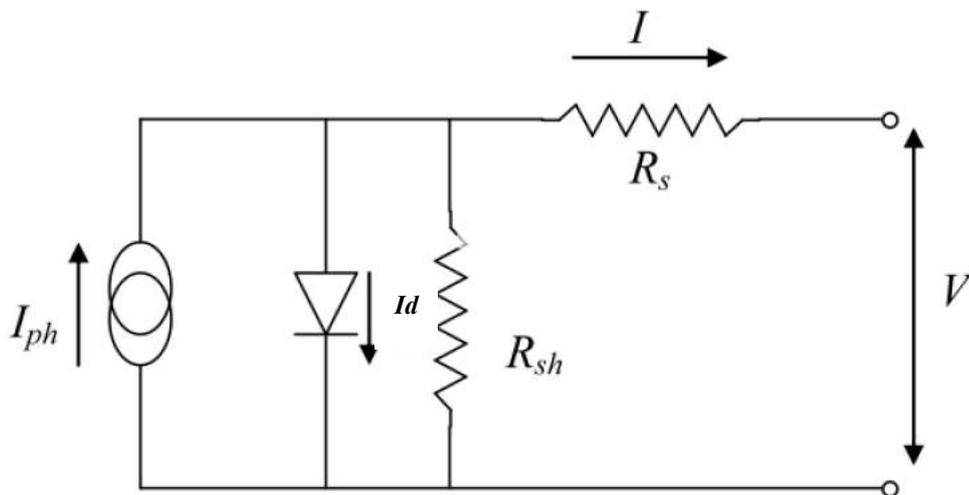
$T$ : La température

$q$  : Charge élémentaire ( $1.602 * 10^{-19} \text{ C}$ )

$K$ : Constante de Boltzmann ( $1.380 * \frac{10^{-23} \text{ J}}{k}$ )

**b. Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire réelle**

Les mesures réelles sur de vraies cellules dans des conditions de fonctionnement diverses montrent cependant le besoin de modèles plus sophistiqués. En particulier la résistance interne du dispositif doit être prise en compte. Ceci mène au modèle représenté par la figure suivante [8] :



**Figure 1. 8.** Circuit équivalent à une diode d'une cellule photovoltaïque réelle.

Une cellule photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant dont la tension de fonctionnement dépend du courant absorbé par la charge qui lui est appliquée. Ces pertes de puissance électrique parviennent au niveau d'une cellule photovoltaïque et diminuent ainsi considérablement le rendement.

La figure (1.5) est une représentation du le circuit équivalent pour une cellule photovoltaïque, d'où on peut écrire l'équation suivant [8]:

- $I = I_{ph} - I_d - I_{sh}(1.4)$

Avec :

- $I_{sh} = \frac{V + R_S \times I}{R_S}(1.5)$

**c. Calcule de  $I_{ph}$**

La dépendance de la température et l'écart d'énergie du semi-conducteur est donnée par

La courante photo  $I_{ph}$  dépend du rayonnement solaire et température de la cellule comme suit:

- $I_{ph} = [I_{cc} + K_i(T - T_n)] \times \frac{G}{1000}(1.6)$

Avec :

$I_{cc}$  = courant de court-circuit de la cellule à la température de référence et radiation (donné)

$K_i$  = coefficient de température du courant de court-circuit

$G$  = rayonnement solaire en W/m<sup>2</sup>.

**d. Calcule de  $I_0$**

- $I_0 = I_{os} \times \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \times \left[ \text{Exp} \left( \frac{q \times E_g}{a \times K} \times \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right](1.7)$

Avec :

$T_n$  = Température de référence de la cellule

$I_{os}$  = Courant de saturation inverse des cellules à  $T_n$

$E_g$  = Bande interdite du semi-conducteur utilisé dans la cellule.

**e. Calcule de  $I_{os}$**

- $I_{os} = I_{cc} / \left[ \text{Exp} \left( \frac{q \times V_{co}}{a \times K \times T} \right) - 1 \right](1.8)$

Avec :

$V_{co}$  : La tension ouverte de la cellule (donner par le fabricant)

*f. Calcule de I*

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left[ \frac{V + R_s \times I}{a \times V_T} \right] - 1 \right] - \frac{V + R_s \times I}{R_{sh}} \quad (1.9)$$

Où :

$I$  = courant de sortie de la cellule.

$I_{ph}$  = photo-courant.

$I_0$  = courant de saturation de la diode.

$V$  = tension de sortie du générateur photovoltaïque.

$q$  = charge d'un électron  $q = 1.602176 \times C$ .

$k$  = constante de Boltzmann  $k = 1,380\ 650\ 3 \times 10^{-23}$  J/K.

$a$  = facteur d'idéalité de jonction p-n

$T$  = température de la cellule (K).

$I_{sh}$  = Le courant qui passe à travers  $R_{sh}$ .

$V_T$  : La tension thermique.

$$V_T = \frac{k \cdot T}{q} \quad (1.10)$$

### 1.3.2. Les Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par deux courbes courant-tension (**I-V**) et puissance-tension (**P-V**) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe [9]:

- **Sa tension à vide  $V_{co}$**  : Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- **Son courant court-circuit  $I_{cc}$**  : Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.

- Son point de puissance maximal *MPP* (en anglais : *maximal power point*) : obtenu pour une tension et un courant optimaux :  $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$  (parfois appelés aussi  $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ).

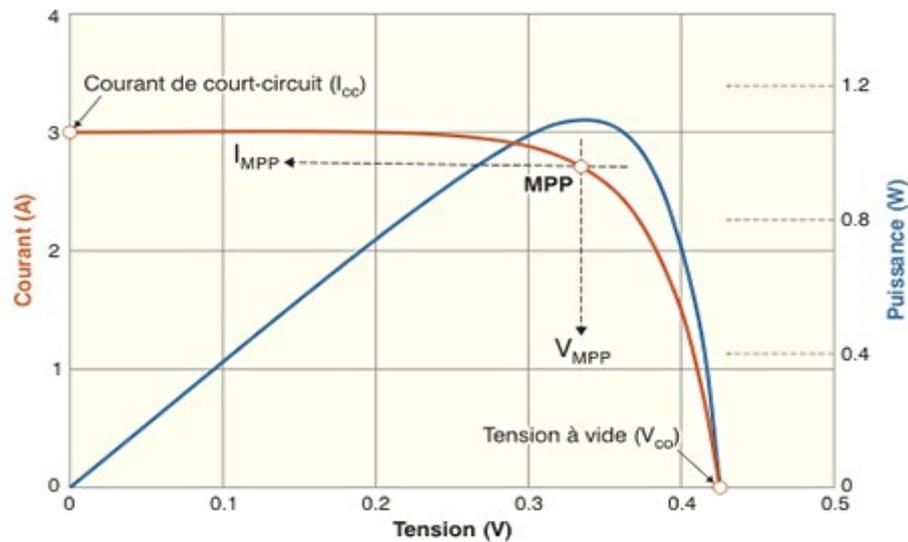


Figure 1. 9. Les Caractéristiques électrique (I-V) et (P-V).

## 1.4. Influence des Paramètres sur la caractéristique de la cellule PV

### 1.4.1. Paramètres interne

#### a) Influence de la résistance série $R_s$

Les pertes dans le semi-conducteur à travers la grille de collecte et le mauvais contact ohmique de la cellule sont modélisées par la résistance  $R_s$  [10].

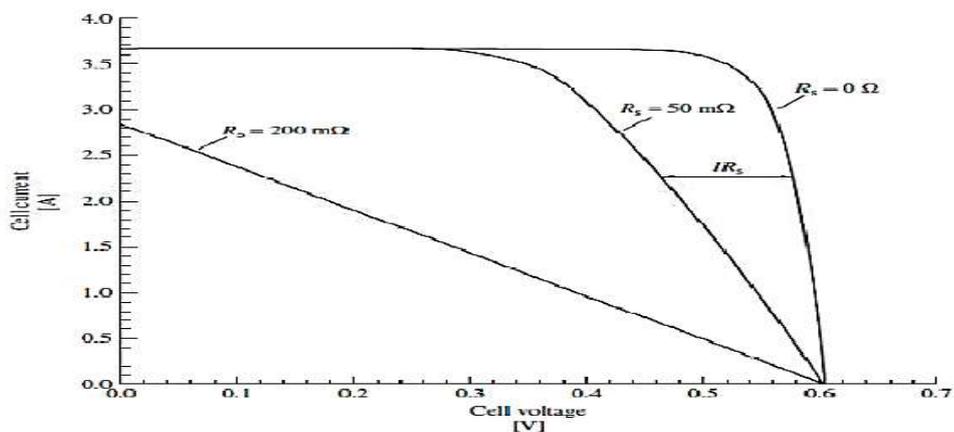
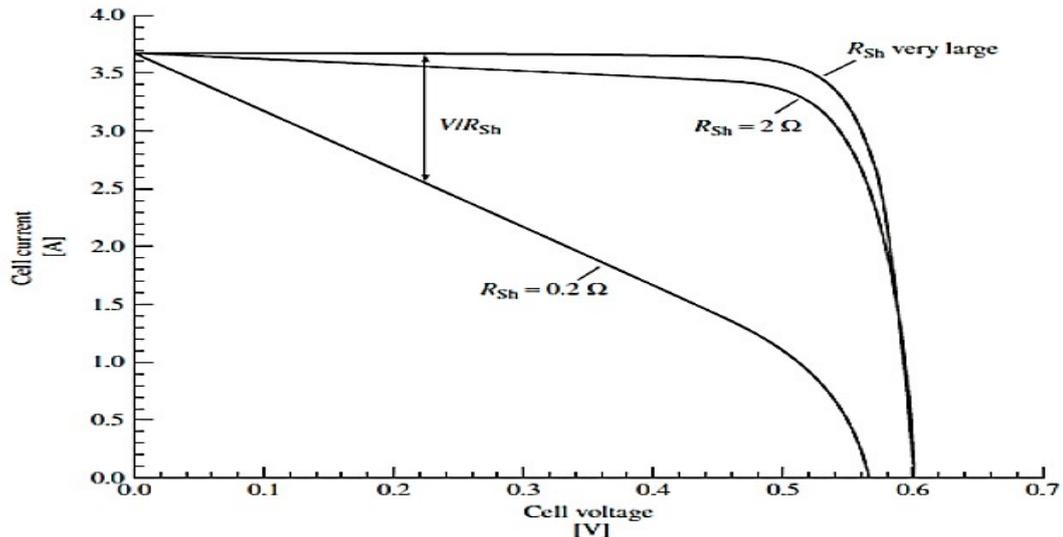


Figure 1. 10. Influence de la résistance série.

### ***b) Influence de la résistance parallèle $R_{sh}$***

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau épaisseurs des régions **N** et **P** et de la zone de charge et d'espace [10].



**Figure 1. 11.** Influence de la résistance parallèle  $R_{sh}$ .

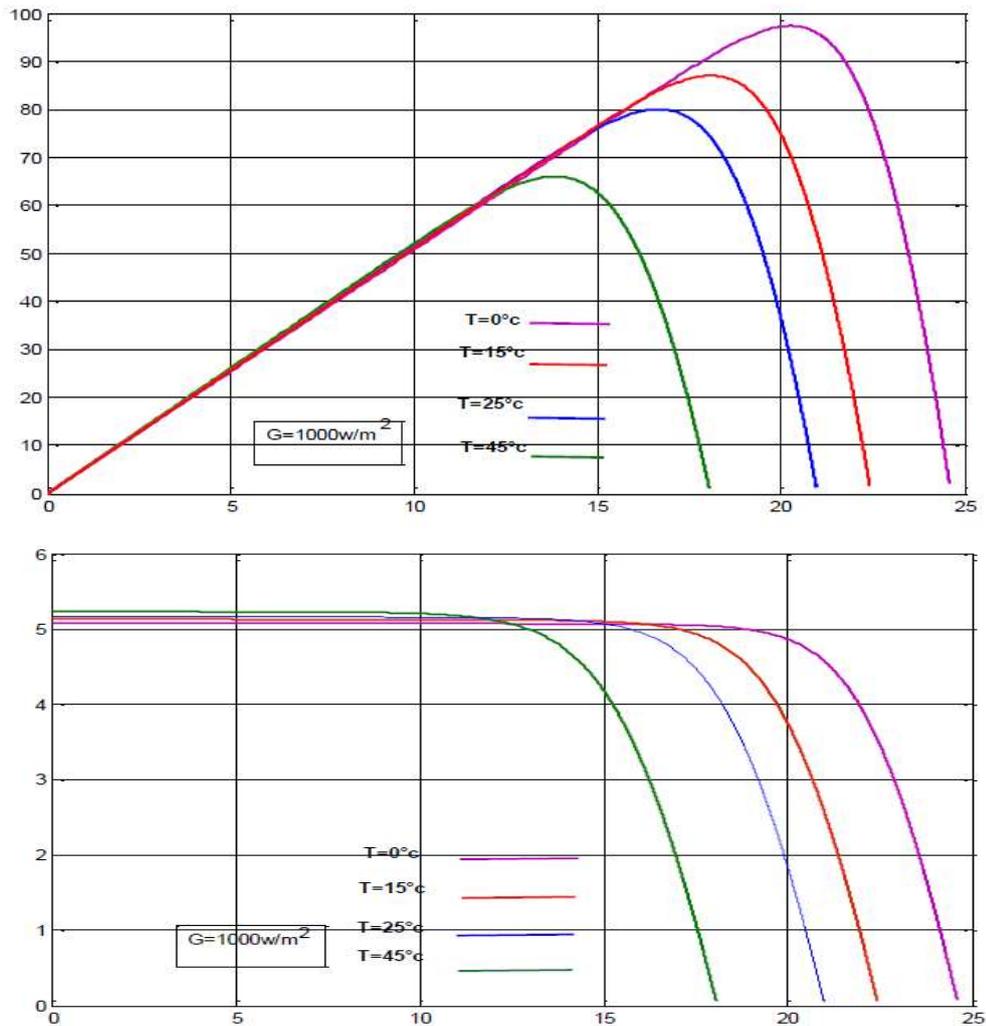
### **1.4.2. Paramètres externes**

#### ***a Influence de la température***

L'expérience montre que la tension de circuit-ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule [11].

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques **(I-V)** et **(P-V)** d'un module photovoltaïque (Figure 1.18) pour un niveau d'ensoleillement **G** donné et pour différentes températures :

- nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la température influence négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit-ouvert diminue.
- par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente



**Figure 1. 12.**La caractéristique de  $I=f(V)$  et  $P= f(V)$  en fonction de température.

### ***b Influence de l'éclairement***

Le même travail comme précédent, nous avons fixé la température pour différents Éclairements figure (1.19). On remarque que pour l'éclairement  $G=1000 \text{ w/m}^2$  le courant  $I_{cc}=5.2\text{A}$  et pour  $G=750\text{w/m}^2$  le courant  $I_{cc}=3.9\text{A}$  on peut voir que le courant subit une variation importante, quand l'éclairement augmente le courant de court-circuit est augmenté, mais par contre la tension varie légèrement .Ce qui se traduit par une augmentation de la puissance[11].

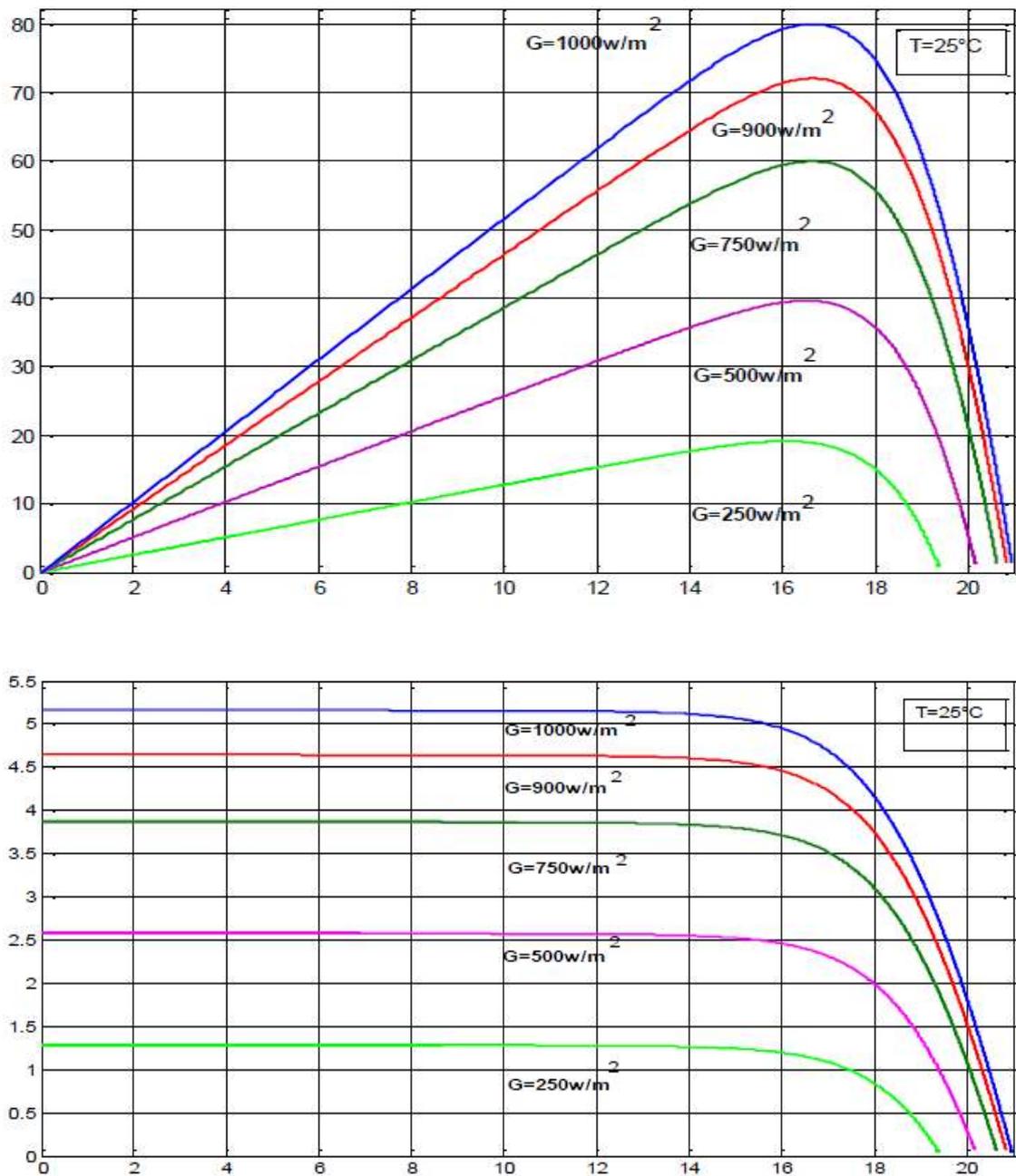


Figure 1. 13. La caractéristique de  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$  en fonction de l'éclairement.

## 1.5. Les Différents Types de Cellules Photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (*Ge*), de sélénium (*Se*), de sulfure de cadmium (*CdS*), de tellure de cadmium (*CdTe*) ou d'arséniure de gallium (*GaAs*).

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. On le trouve dans la nature sous forme de pierre de silice. La silice est un composé chimique (dioxyde de silicium) et un minéral de formule **SiO<sub>2</sub>**. Il est le principal constituant des roches sédimentaires détritiques (sables, grés)[12].

### 1.5.1. Cellules monocristallines :

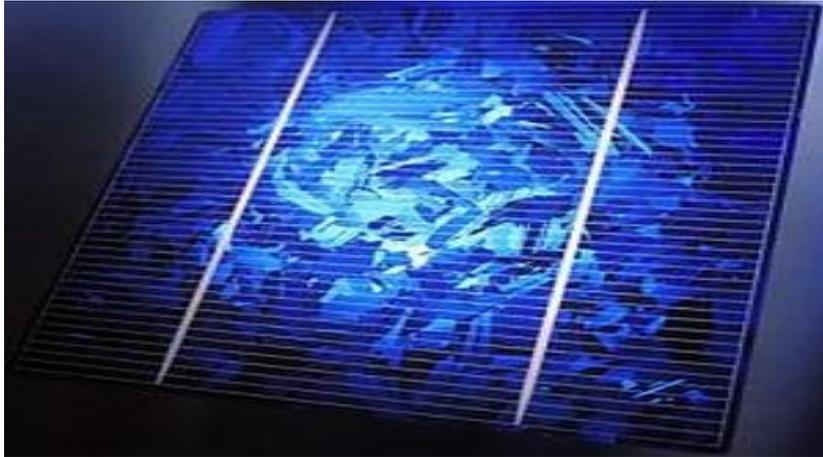
- La première génération de photopiles ;
- Un taux d'efficacité excellent (12-16%).
- Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur



*Figure 1. 14.*Type de cellule monocristalline.

### 1.5.2. Cellules poly-cristallines

- Coût de production moins élevé (le plus utilisé en Algérie).
- Procédé nécessitant moins d'énergie.
- Efficacité 11-13%.
- les cellules poly-cristallines sont les types de cellules les plus répandues sur le marché du photovoltaïque (environ 60% de la production).



*Figure 1. 15.*Type de cellules poly-cristallines.

### 1.5.3. Les cellules amorphes

- Coût de production bien plus bas ;
- Rendement plus bas : 8-10% (13% en labo)
- Durée de vie plus faible



*Figure 1. 16.*Type de cellules amorphes.

C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les produits de consommation comme les calculatrices, les montres etc.... Toutefois, ils réagissent mieux à des températures élevées ou à une lumière diffuse.

#### 1.5.4. Les cellules nanocristallines

- Une des dernières générations de photopiles.
- Procédé et coût de production encore plus bas.
- Rendement global de 10,4 %, confirmé par des mesures au laboratoire.
- Fonctionnent selon un principe qui différencie les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques[12].

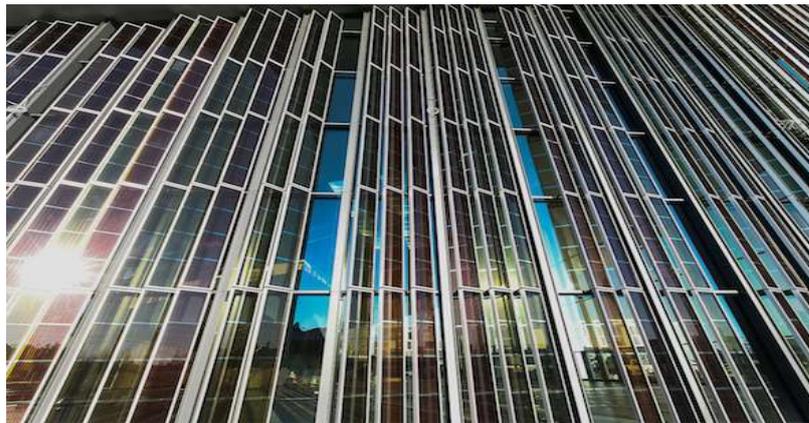


Figure 1. 17.Type de cellules nanocristallines.

#### 1.6. Groupement en série

Dans un groupement en série figure (1.20), les cellules sont traversées par le même Courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des Tensions à courant donné. La figure (1.21) montre la caractéristique résultante ( $I_s, V_s$ ) Obtenue par l'associant en série de  $N$  cellules identiques ( $I_{cc}, V_{co}$ ) [13].

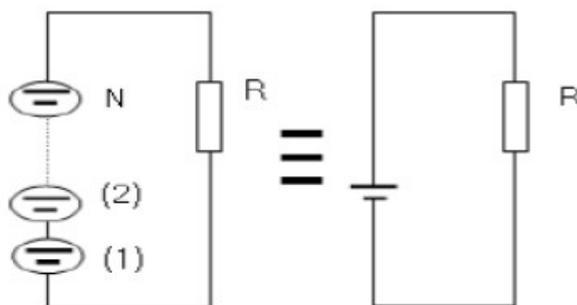


Figure 1. 18.Association des modules en série.

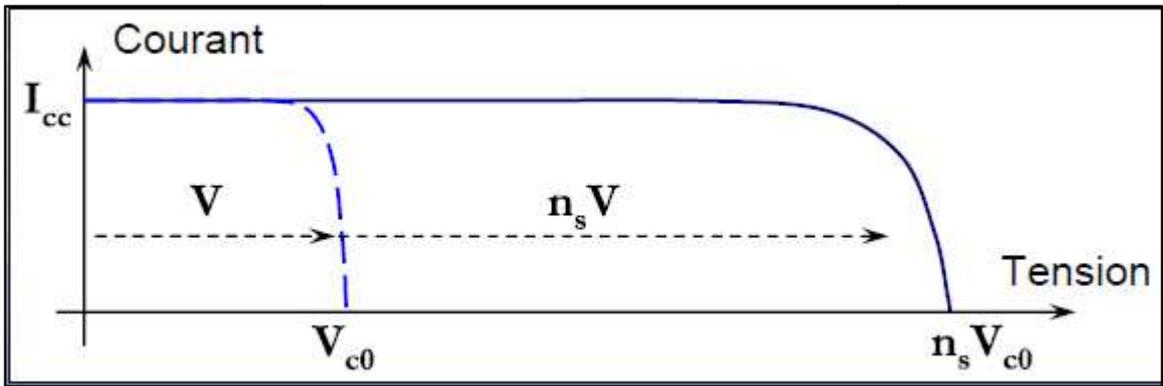


Figure 1. 19.Caractéristique résultante d'un groupement en série de  $N_s$  cellules Identiques.

### 1.7. Regroupement en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle figure (1.20), les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée. La figure (1.2) montre la Caractéristique résultante obtenue en associant en parallèle  $N_p$  cellules Identiques ( $I_{cc}, V_{c0}$ ) [14].

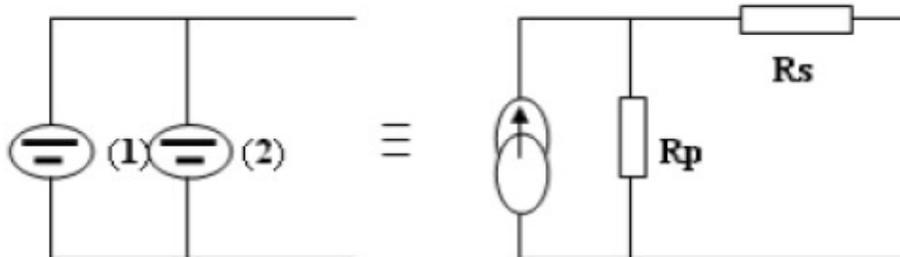


Figure 1. 20.Association des modules en parallèle [15].

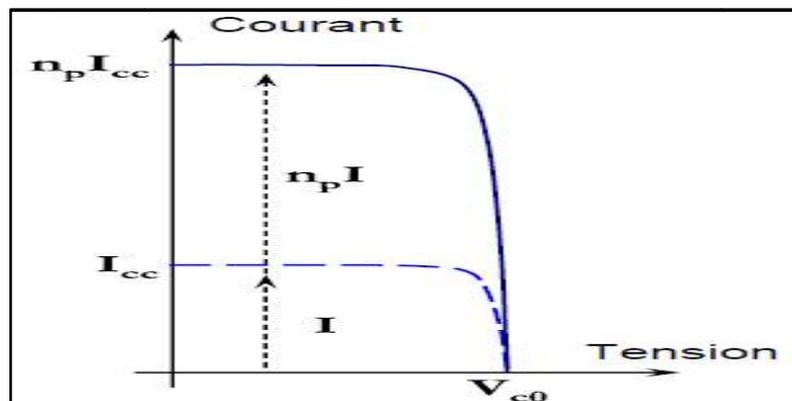
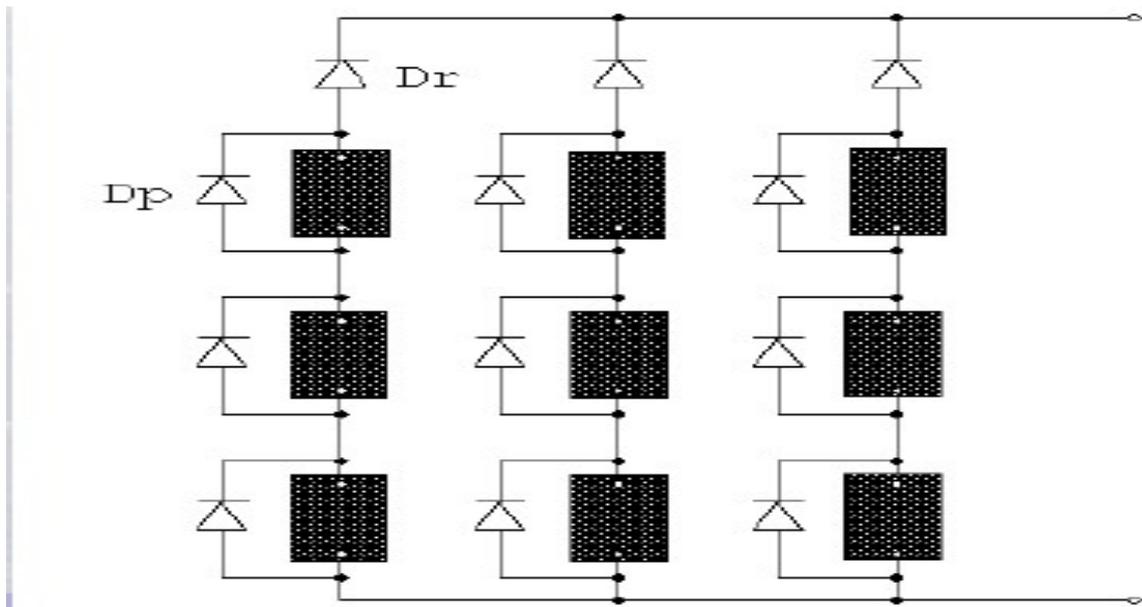


Figure 1. 21.Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de  $n_s$  cellules Identiques.

## 1.8. Protection des cellules

- **en série** : ajoute d'une diode « by-pass » **Dp** en parallèle le des groupements de cellules (30 à 40 max)
- **en parallèle** : ajout d'une diode de « non-retour » **Dr** en série avec les branches en parallèle [15].



**Figure 1. 22.** les diodes de protection Diode by passe(**Dp**) et la diode anti retour (**Dr**).

## 1.9. Le module PV

Le composant le plus crucial de toute installation PV est le module photovoltaïque, qui se compose de cellules solaires série **Ns** et parallèle **Np** interconnectées. Ces modules sont raccordés entre eux pour former des champs de manière à pouvoir satisfaire différents niveaux de besoins en énergie. La figure (1.13) représente un module photovoltaïque.



**Figure 1. 23.**Module photovoltaïque.

Ce module photovoltaïque est caractérisé par l'équation suivante :

$$I = NpI_{ph} - NpI_0 \left[ \exp \left[ \frac{V+Rs \times I}{a \times VT \times NS} \right] - 1 \right] - \frac{V+Rs \times I}{Rsh} \quad (1.11)$$

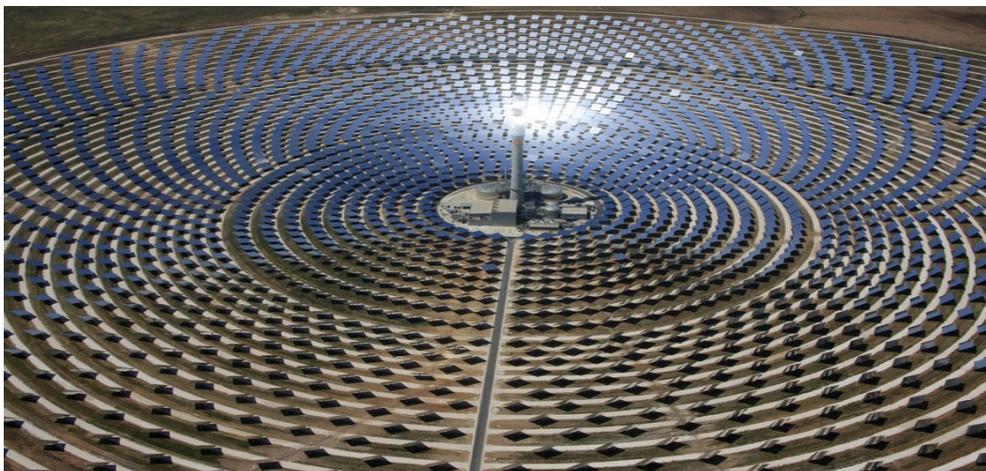
Où :

$NS$ = nombre de cellules en série.

$Np$ = nombre de cellules en parallèle.

## 1.10. Champ photovoltaïque

Le champ photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique. La figure (1.17) représente un champ photovoltaïque.[16]



**Figure 1. 24.**Champ photovoltaïque.

### 1.11. Le Facteur de forme FF :

A l'aide de la caractéristique courant-tension d'une cellule dans l'obscurité et sous éclairage, il est possible d'évaluer les performances et le comportement électrique de la cellule photovoltaïque, donc le facteur de forme (**FF**) « *en anglais : Fill Factor* » est défini comme le rapport entre la puissance maximale et le produit ( $I_{cc}, V_{co}$ ). D'où il est donné par la relation [17]:

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{V_{mpp} \times I_{mpp}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (1.11)$$

Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique  $I-V$  de la cellule solaire. Mais, généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85.

### 1.12. Le rendement $n$

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule  $P_m(I_{opt}, V_{opt})$  et la puissance solaire incidente. Il est donné par [17] :

$$n = \frac{p_m}{p_{inc}} = v_{opt} \times \frac{I_{opt}}{p_{inc}} \quad (1.12)$$

## Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système de captage photovoltaïque. Aussi que les principes de fonctionnement de GPV, Dans le chapitre prochain, on présentera une étude sur les convertisseurs DC-DC (hacheurs).

|  |    |
|--|----|
| Introduction .....   | 23 |
| 2.1. Les convertisseurs statiques .....  | 23 |
| 2.1.1. Connexion direct entre la GPV et la charge .....                              | 23 |
| 2.1.2. Connexion indirect avec un étage d'adaptation entre la GPV et la charge ..... | 25 |
| 2.2. Principe du convertisseur .....   | 26 |
| 2.3. Le convertisseur élévateur ( <b>boost</b> ).....                                | 27 |
| 2.3.1. Structure de convertisseur .....  | 27 |
| 2.3.2. Principe de fonctionnement .....  | 27 |
| 2.3.3. Etude théorique en conduction continu.....                                    | 28 |
| a. Phase 1 : $(0 < t < \alpha T)$ .....  | 28 |
| b. Phase 2 $(\alpha T < t < T)$ .....  | 29 |
| 2.4. Convertisseur abaisseur « BUCK » .....  | 31 |
| 2.4.1. Description de la structure :.....  | 31 |
| 2.4.2. Principe de fonctionnement .....  | 31 |
| Conclusion.....  | 34 |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Figure 2. 1 .Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour. ....</b>  | <b>24</b> |
| <b>Figure 2. 2. Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de La charge. ....</b>   | <b>25</b> |
| <b>Figure 2. 3. Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de <math>P_{max}</math> du GPV. ....</b> | <b>25</b> |
| <b>Figure 2. 4 .Structure d'un convertisseur élévateur (boost) ....</b>  | <b>27</b> |
| <b>Figure 2. 5.Schéma équivalent du convertisseur lorsque K est fermé et la diode bloqué. ....</b>   | <b>28</b> |
| <b>Figure 2. 6.Schéma équivalent du convertisseur lorsque K est fermé et la diode bloqué. ....</b>   | <b>29</b> |
| <b>Figure 2. 7.Forme du courant.....</b>   | <b>30</b> |
| <b>Figure 2. 8 .Structure d'un convertisseur abaisseur (Buck).....</b>   | <b>31</b> |
| <b>Figure 2. 9.Variation de <math>V_s</math>, <math>I_s</math> et <math>I_d</math> en fonction de temps. ....</b>  | <b>32</b> |
| <b>Figure 2. 10. Variation de <math>V_s</math>, <math>I_s</math> et <math>I_d</math> en fonction de temps en conduction discontinu. ....</b>                     | <b>33</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Figure 2. 1 .Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour. ....</b>  | <b>24</b> |
| <b>Figure 2. 2. Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de La charge. ....</b>   | <b>25</b> |
| <b>Figure 2. 3. Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de <math>P_{max}</math> du GPV. ....</b> | <b>25</b> |
| <b>Figure 2. 4 .Structure d'un convertisseur élévateur (boost) ....</b>  | <b>27</b> |
| <b>Figure 2. 5.Schéma équivalent du convertisseur lorsque K est fermé et la diode bloqué. ....</b>   | <b>28</b> |
| <b>Figure 2. 6.Schéma équivalent du convertisseur lorsque K est fermé et la diode bloqué. ....</b>   | <b>29</b> |
| <b>Figure 2. 7.Forme du courant.....</b>   | <b>30</b> |
| <b>Figure 2. 8 .Structure d'un convertisseur abaisseur (Buck).....</b>   | <b>31</b> |
| <b>Figure 2. 9.Variation de <math>V_s</math>, <math>I_s</math> et <math>I_d</math> en fonction de temps. ....</b>  | <b>32</b> |
| <b>Figure 2. 10. Variation de <math>V_s</math>, <math>I_s</math> et <math>I_d</math> en fonction de temps en conduction discontinu. ....</b>                     | <b>33</b> |



# Chapitre 2 Les convertisseurs statiques

---

## Introduction

On ne peut pas extraire à chaque instant la puissance maximal d'un GPV en reliant ce dernier directement à la charge , pour cela il nous faut un étage d'adaptation entre le GPV et la charge , c'est le hacheur.

L'adaptation a lieu en variant le rapport cyclique ( $\alpha$ ) de la commande de l'interrupteur du convertisseur.

Actuellement, le développement des semi-conducteurs et la demande croissante des convertisseurs en électronique de puissance dans les différents domaines de l'énergie électrique, imposent de nouvelles spécifications comme le fonctionnement à hautes fréquences de commutation, densités de puissance élevées, hautes températures et hauts rendements.

Pour cela dans ce chapitre on va reprendre sur la question suivante : pourquoi on ne connecte pas directement le GPV avec la charge au lieu d'utiliser un étage d'adaptation ?

Ensuit on va présenter le principe de fonctionnement des deux type de convertisseur DC-DC ; le boost (l'élévateur) et le buck (l'abaisseur).

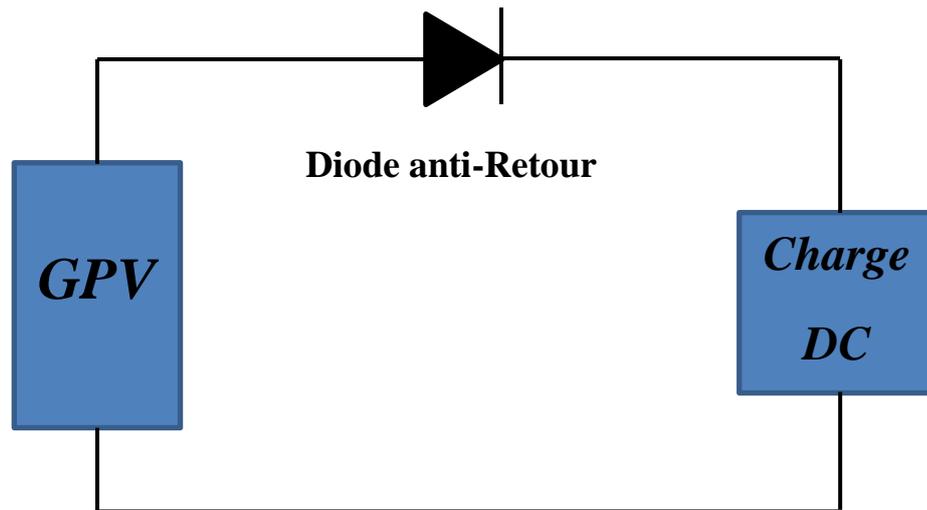
## 2.1. Les convertisseurs statiques

### 2.1.1. Connexion direct entre la GPV et la charge

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

Si cette charge était une batterie, lorsque le module n'est pas éclairé, celui-ci pourrait fonctionner en tant que récepteur, la batterie pourrait donc se décharger sur le générateur

PV et en plus l'endommager irréversiblement. Ainsi, pour éviter cette situation, la connexion doit être assurée à l'aide d'une diode anti-retour placée entre le GPV et la charge. Cette configuration est illustrée à la figure (2.1). L'inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de limitation et/ou réglage de la tension de la batterie. Le transfert de  $P_{max}$  disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti [18].



**Figure 2. 1** .Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour.

En effet, le point de fonctionnement du GPV résulte de l'intersection entre la caractéristique I-V du GPV et la caractéristique I-V de la charge.

Nous supposons que la nature de la charge est continue (DC).

Sur la figure (2.2), nous avons représenté les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'un GPV ainsi que les caractéristiques  $I(V)$  des trois types de charges. Tout d'abord, nous pouvons identifier le point de fonctionnement où la puissance fournie par le générateur est maximale ( $P_{max}$ ) pour un courant optimal ( $I_{opt}$ ) et une tension optimale ( $V_{opt}$ ), point nommé PPM. Ensuite, nous pouvons trouver le point d'intersection entre les caractéristiques  $I(V)$  du générateur et celles des trois types de charges [18]:

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

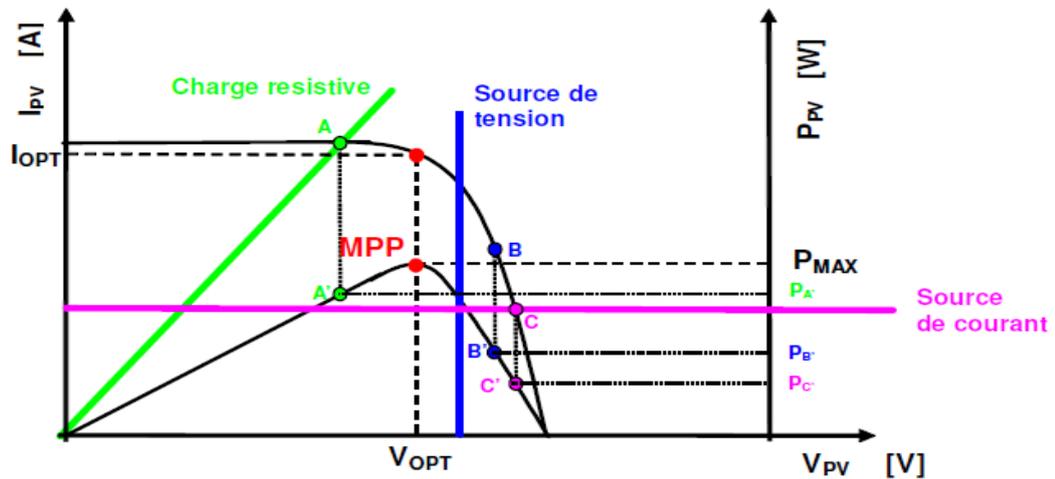


Figure 2. 2. Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de La charge.

Pour ces trois points, la puissance fournie par le générateur est respectivement  $P_{A'}$ ,  $P_{B'}$  et  $P_{C'}$ , que comme l'illustre la figure 2 correspondant à des valeurs de puissance inférieures à la puissance maximale disponible ( $P_{max}$ ). Donc, une perte d'une partie de la puissance dé livrable aux bornes du générateur PV implique à la longue des pertes de production énergétique importantes.

### 2.1.2. Connexion indirect avec un étage d'adaptation entre la GPV et la charge

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure (2.3). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle [19].

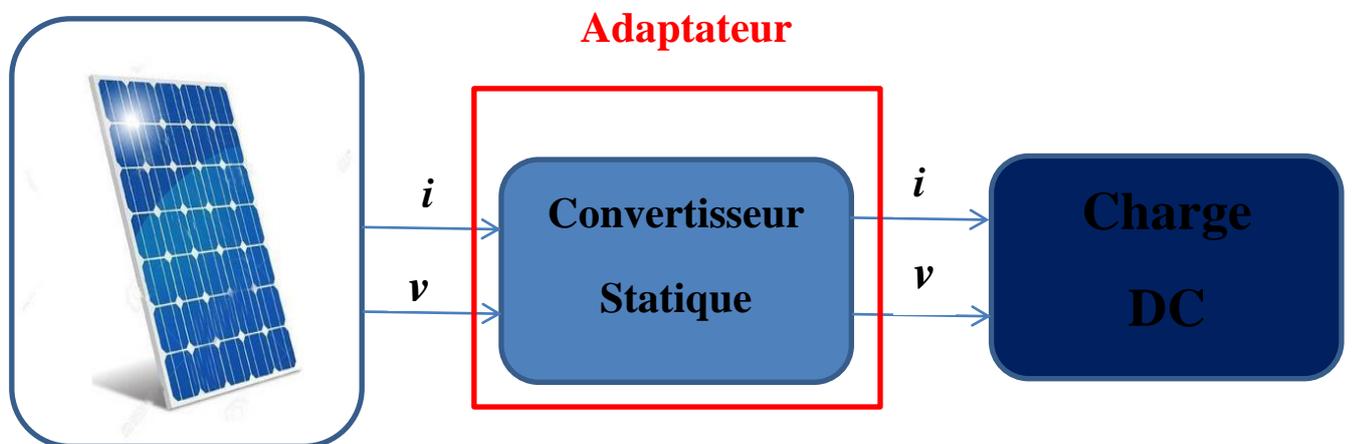


Figure 2. 3. Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de  $P_{max}$  du GPV.

## 2.2. Principe du convertisseur

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

Les convertisseurs statiques sont les dispositifs à composants électroniques capables de modifier la tension et/ou la fréquence de l'onde électrique [21].

Le tableau suivant résume les principaux convertisseurs statiques et leur rapport de transformation [18] :

| Convertisseur | Rapport de transformation $n(D)$ |
|---------------|----------------------------------|
| buck          | $D$                              |
| boost         | $\frac{1}{1-D}$                  |
| Buck-boost    | $\frac{-D}{1-D}$                 |
| Cuk           | $\frac{-D}{1-D}$                 |
| SEPIC         | $\frac{D}{1-D}$                  |
| Flyback       | $k \frac{D}{1-D}$                |
| Push-pull     | $kD$                             |
| Forward       | $kD$                             |

**Tableau 2.1.** Les convertisseurs statiques et leur rapport cyclique.

$D$  correspond au rapport cyclique d'un convertisseur statique et  $k$  au rapport de transformation d'un transformateur AC, soit  $n_2/n_1$ .

On s'intéresse dans notre sur les convertisseurs statiques de type continu – continu qui sont les hacheurs survolteurs (boost).

## 2.3. Le convertisseur élévateur (boost)

### 2.3.1. Structure de convertisseur

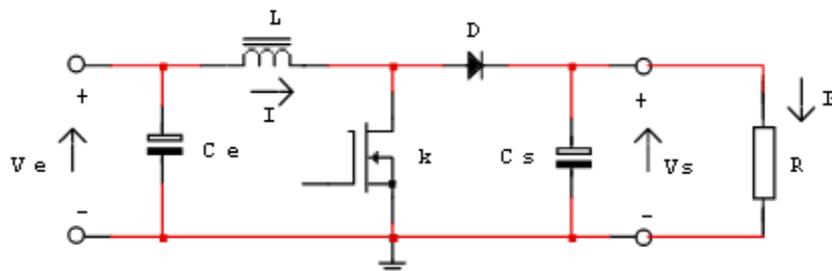


Figure 2. 4 .Structure d'un convertisseur élévateur (boost)

### 2.3.2. Principe de fonctionnement

Ce convertisseur Boost fonctionne comme suit: lorsque l'interrupteur  $k$  est fermé, l'inductance se charge et le courant  $i(t)$ , provenant du module solaire, augmente progressivement et ce durant  $t \in [0, dTs]$ . Quand  $k$  s'ouvre, la rupture du courant provoque une surtension d'où l'utilité de la diode qui protège  $k$  en empêchant le retour du courant. Le condensateur sert à lisser la tension de sortie. L'inductance  $L$  libère une énergie qui s'ajoute à celle de la source pour alimenter la charge via la diode  $D$  durant  $t \in [dTs, Ts]$ .

Pour le convertisseur boost, théoriquement, le transfert de puissance n'est possible que si la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée. Toutefois, en réalité, si on considère le cas où la tension de batterie peut devenir inférieure à la tension du GPV, lorsque par exemple l'état de charge de la batterie est très faible ou proche d'une dégradation définitive, la structure boost peut fonctionner en mode dégradé. En effet, le passage de courant du générateur vers la batterie est possible à travers la diode de roue libre permettant ainsi la récupération d'une partie de l'énergie du GPV. Dans ce mode de fonctionnement dégradé, aucune régulation n'est possible et l'étage d'adaptation ne fonctionne pas à proprement parlé. Le point de fonctionnement de l'ensemble est alors lié directement à la valeur de la tension de la batterie. Ceci peut représenter un avantage important de cette structure par rapport à la structure abaisseuse qui dans le cas d'une tension de batterie supérieure à celle de  $V_{oc}$ , ne permet aucun transfert de puissance [22].

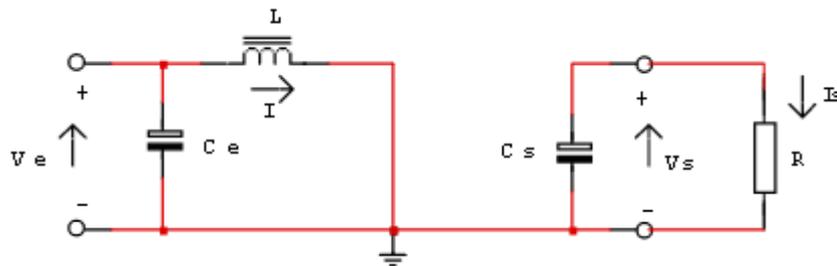
### 2.3.3. Etude théorique en conduction continu

Le circuit est alimentée par une source de tension  $V_e$ , la sortie est chargée par une résistance  $R$  et débite un courant  $I_s$ . L'interrupteur  $K$ , symbolisé ici comme un MOS FET de puissance, est rendu périodiquement conducteur avec un rapport cyclique  $\alpha$  à la fréquence  $F = 1/T$ .

On distingue deux modes de fonctionnement de ce circuit selon que le courant circulant dans l'inductance «  $L$  » est ou non continu (ne s'annule pas au cours de la période). Le mode conduction continue étant le plus intéressant pour ce convertisseur, nous n'étudierons que ce mode [23].

#### a. Phase 1 : $(0 < t < \alpha T)$

L'interrupteur  $K$  est fermé, la diode  $D$  est bloquée. Le schéma équivalent du circuit est le suivant :



**Figure 2. 5.** Schéma équivalent du convertisseur lorsque  $K$  est fermé et la diode bloquée.

On a:

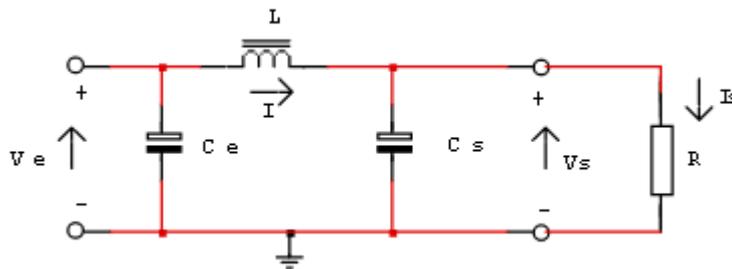
$$V_e = L \frac{di}{dt} \quad d'o\grave{u} \quad i(t) = I_m + \frac{V_e}{L} t \quad (2.1)$$

A l'instant  $t = \alpha T$  le courant dans l'inductance atteint la valeur crête :

$$I_M = I_m + \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (2.2)$$

**b. Phase 2** ( $\alpha T < t < T$ )

A  $t = \alpha T$  on ouvre l'interrupteur K. La diode D devient conductrice et le schéma équivalent du circuit devient :



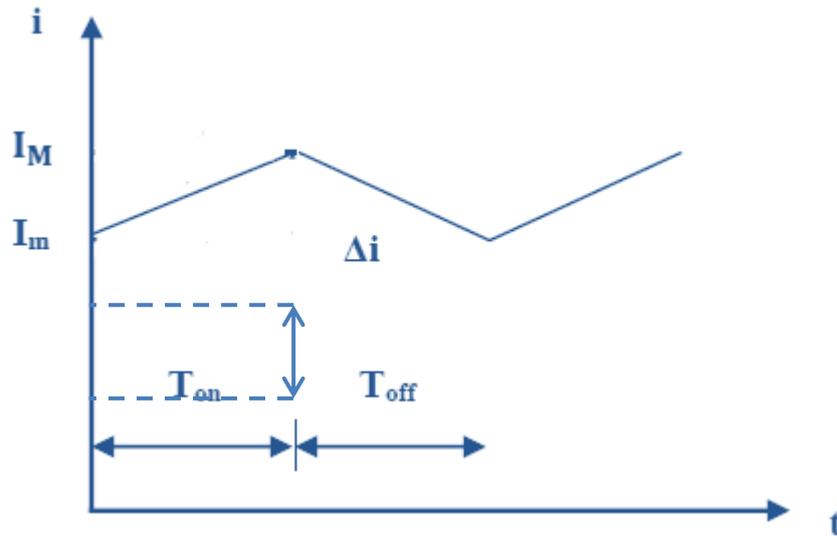
**Figure 2. 6.** Schéma équivalent du convertisseur lorsque K est fermé et la diode bloqué.

$$V_e - V_s = L \frac{di}{dt} \quad \text{ou} \quad V_s - V_e = -L \frac{di}{dt} \quad (2.3)$$

$$i(t) = I_M - \frac{V_s - V_e}{L} (t - \alpha T) \quad (2.4)$$

A l'instant  $t = T$  le courant dans l'inductance atteint sa valeur minimale :

$$I_m = I_M - \frac{V_s - V_e}{L} (\alpha T - T) \quad (2.5)$$



**Figure 2. 7.**Forme du courant.

Soit  $\Delta I$  l'ondulation du courant dans l'inductance :

$$\Delta I = I_M - I_m \quad (2.6)$$

De l'équation (2.6) on tire:

$$\Delta I = I_M - I_m = \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (2.7)$$

Et de l'équation (2.7):

$$\Delta I = I_M - I_m = \frac{V_s - V_e}{L} (1 - \alpha) T \quad (2.8)$$

En combinant ces deux relations, on peut établir l'expression de la tension de sortie :

$$V_s = \frac{V_e}{(1 - \alpha)} \quad (2.9)$$

On constate que la tension de sortie du convertisseur ne dépend que de la tension d'entrée et du rapport cyclique  $\alpha$ . Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, le convertisseur est toujours élévateur de tension.

## 2.4. Convertisseur abaisseur « BUCK »

Le hacheur Buck (abaisseur, dévolteur ou step-down) est un convertisseur DC-DC à liaison directe entre une source d'entrée en tension (générateur) et une source de sortie en courant (récepteur) [24].

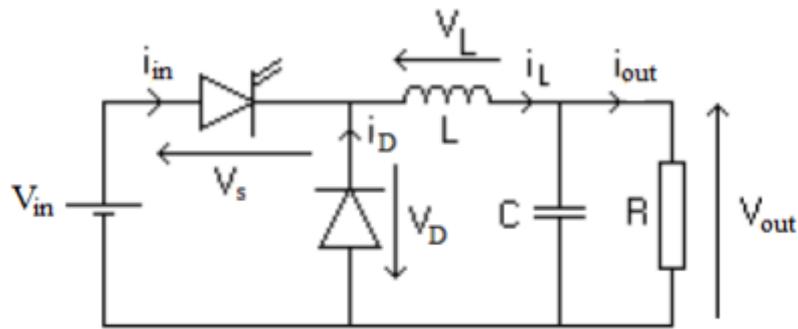


Figure 2. 8 .Structure d'un convertisseur abaisseur (Buck).

### 2.4.1. Description de la structure :

### 2.4.2. Principe de fonctionnement

Selon le principe de découpage (commutation à fréquence élevée), le hacheur permet de transférer de l'énergie d'une source vers une charge en rechargeant et déchargeant des éléments accumulateurs L et C à la même cadence ON et OFF de l'interrupteur. Pendant la fermeture, la diode sera polarisée en inverse et elle se bloque spontanément. La bobine se recharge par un courant d'un niveau minimal précédent vers un autre maximal. Au bout de cette durée de fermeture ton, l'interrupteur s'ouvre à la demande d'une commande extérieure appliquée sous forme d'un rapport cyclique entre la durée ton et la période de commutation T. Au cours de cette ouverture OFF, la charge inductive acquise sera transmise au condensateur de sortie C et à l'élément de charge (Résistance R par exemple) à travers une maille de roue libre via la diode qui est polarisée en directe et devient passante.

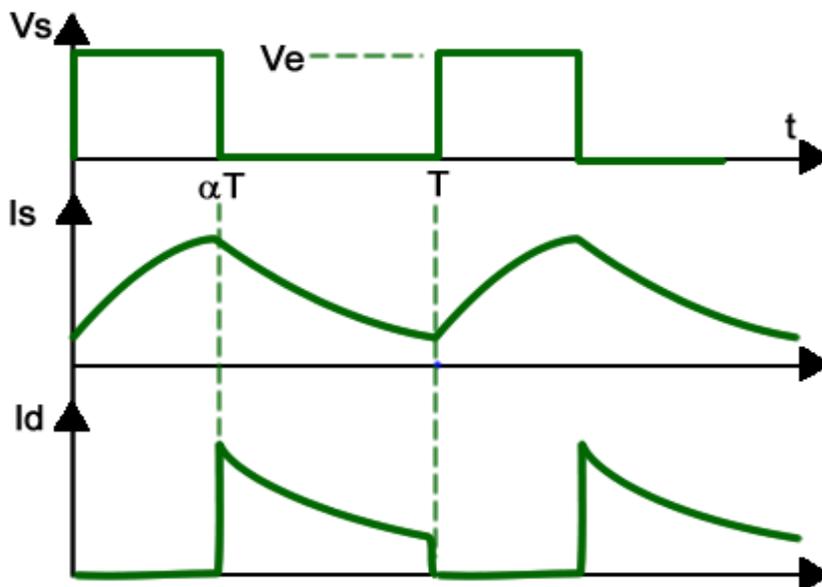
La diode de roue libre permet la continuité du courant lorsque le transistor se bloque, et ainsi d'éviter une surtension aux bornes de l'inductance destructrice pour le transistor.

La présence d'une inductance dans la charge lisse le courant de sortie et lui donne une forme exponentielle avec une constante de temps [24] :

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (2.10)$$

En fonction de la valeur minimale du courant inductif, on distingue deux modes de conduction dans l'élément L à accumulation: Mode de Conduction Continue « CCM » et Mode de Conduction Discontinue « DCM ».

Lorsque le courant de l'inductance ne s'annule jamais, le convertisseur fonctionne en mode de conduction continue. Dans ce cas, la tension de charge dépend seulement de la tension d'entrée et du rapport cyclique  $d = t_{on}/T$ . Dans le cas contraire, le courant de la bobine s'annule avant la fin de la durée OFF de l'interrupteur. C'est l'extinction prématurée de la charge inductive. Cela mène à un transfert incomplet de l'énergie de la source vers la charge. Par conséquent, on trouve une double dépendance de la tension de sortie d'une part et le courant de charge et le rapport cyclique d'autre part.



**Figure 2. 9.** Variation de Vs, Is et Id en fonction de temps.

→ De 0 à  $\alpha T$ , le transistor est passant, le courant augmente exponentiellement :

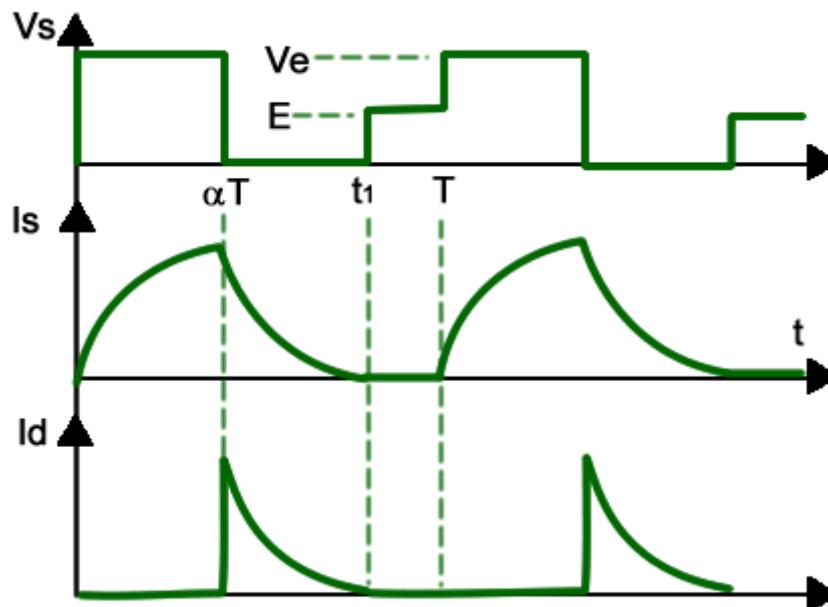
$$I_S = \left( I_{min} + \frac{(E - V_e)}{R} \right) \cdot e^{\frac{-t}{\tau} - \frac{(E - V_e)}{R}} \quad (2.11)$$

Constante de temps  $\tau = \frac{L}{R}$

→ De  $\alpha T$  à  $T$ , la tension est nulle en négligeant la tension de seuil de la diode et le transistor est bloqué, le courant diminue exponentiellement dans la diode

$$I_S = \left( I_{max} + \frac{E}{R} \right) \cdot e^{\frac{-t}{\tau} - \frac{E}{R}} \quad (2.12)$$

Dans le cas l'inductance existe mais ne possède pas une valeur suffisante pour assurer une conduction continue le plus général, en conduction discontinue [25]:



**Figure 2. 10.** Variation de  $V_s$ ,  $I_s$  et  $I_d$  en fonction de temps en conduction discontinu.

→ De 0 à  $\alpha T$ , le transistor est passant,  $V_s$  vaut  $V_e$ , le courant augmente exponentiellement, la diode est bloquée

→ De  $\alpha T$  à  $t_1$ , le transistor est bloqué, le courant diminue exponentiellement, la diode conduit tant que le courant est positif, la tension est nulle en négligeant la tension de seuil de la diode

→ A  $t=t_1$ , le courant s'annule, la diode se bloque,  $V_s$  vaut  $+E$  jusqu'à la commande suivante du transistor.

## Conclusion

Pour qu'un générateur photovoltaïque fonctionne dans les conditions optimales, il doit être doté d'un quadripôle d'adaptation. Ce quadripôle peut être un convertisseur DC/DC survolteur ou dévolteur selon les applications.

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques électriques des deux types de convertisseurs Statiques : le boost et le buck (convertisseur *DC-DC*) ainsi que leur principe de fonctionnement.

Le convertisseur statique joue un rôle très important dans la commande MPPT. Il suffit juste de varier le rapport cyclique  $\alpha$  afin d'avoir la puissance maximal du GPV.

## ***Chapitre III :***

### ***Les différentes technique***

#### ***MPPT***

## Chapitre 2 Les convertisseurs statiques

### Introduction

De nombreuses méthodes de poursuite de point de puissance maximale (MPPT) ont été développées pour permettre au système d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque.

Le principe de ces méthodes est de déplacer le point de fonctionnement en augmentant  $V_{pv}$ , lorsque  $dP_{pv}/dV_{pv}$  est positif ou en diminuant  $V_{pv}$ , lorsque  $dP_{pv}/dV_{pv}$  est négatif [29].

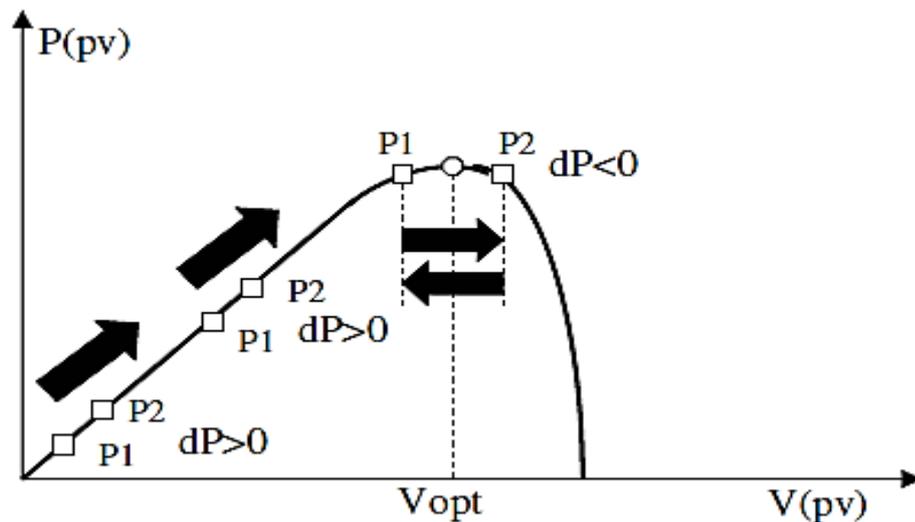


Figure 3. 1.Principe de fonctionnement d'une commande MPPT

Lors du régime transitoire ou permanent, ces commandes doivent estimer et comparer la puissance avec celle de l'instant précédent. Les performances de celles-ci sont liées à la rapidité avec laquelle le point MPP est atteint, à la manière d'osciller autour de ce même point, mais aussi à la robustesse pour éviter une divergence lors de changements brutaux d'ensoleillement ou de charge [29].

On va présenter dans ce chapitre une revue des techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques (PV).

### **3.1. Les techniques MPPT**

Il existe de nombreuses méthodes MPPT disponibles; Les techniques les plus utilisées sont décrites dans les sections suivantes :

- Méthode à tension constante (CV) [30]
- méthode de la tension ouverte (OV) [30]
- Méthodes de température [31]
- Méthodes de conductance incrémentielle (IC) [32]
- Méthodes de perturbation et d'observation (P & O et P & Ob) [33]
- Comparaison du poids en trois points [34]
- Méthode par impulsions à courant court [35]
- Méthode de la logique floue [36]
- Méthode du mode coulissant [37]
- Méthode du réseau de neurones artificiels [38]

#### **3.1.1. Méthodes de perturbation et d'observation (P&O)**

La méthode perturbation et observation 'P&O', est la plus répandue dans le milieu industriel, car son algorithme est facile à implémenter. Ce processus fonctionne par une perturbation du système en augmentant ou en diminuant la tension de fonctionnement du module et observer son effet sur la puissance de sortie de la rangée .La figure 2 montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O', tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle.

D'après la figure 2, la tension et le courant  $V$  et  $I$ , sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante  $P(k)$  de la rangée. Cette valeur  $P(k)$  est comparée à la valeur  $P(k-1)$  de la dernière mesure.

Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle.

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

Si  $C_p$  est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou légèrement changeantes.

Si  $C_p$  est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation [29].

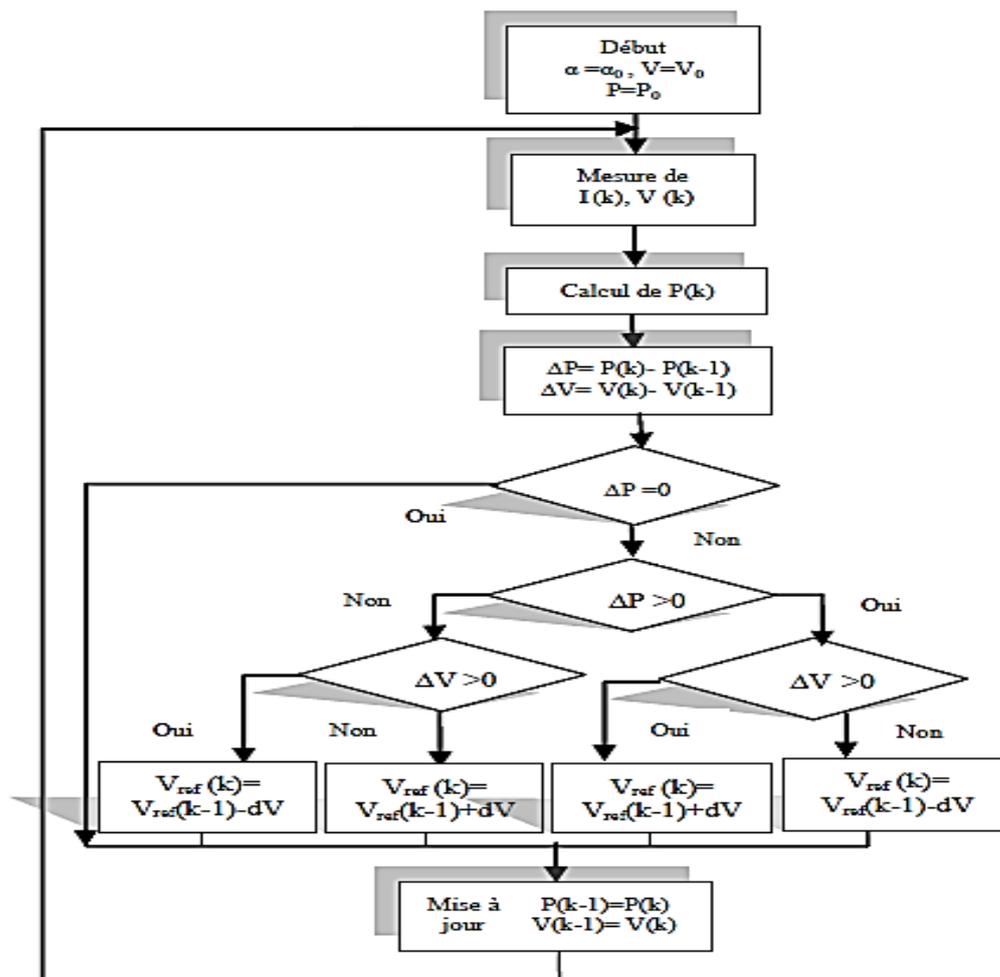


Figure 3. 2. Organigramme de l'algorithme  $P\&O$ .

### 3.1.2. Méthodes de conductance incrémentielle

L'algorithme d'incrémentation de la conductance est basé sur le fait que le point de puissance maximale (MPP) n'est atteint que si  $dP/dV$  est nulle. Les caractéristiques du module photovoltaïque sur la figure 6 prouvent plus loin que la dérivée est supérieure à zéro à gauche du MPP et inférieure à zéro à droite du MPP. Ceci mène à l'ensemble d'équations suivant [39].

$$(dP/dV) = 0 \quad \text{pour} \quad V = V_{mp}$$

$$(dP/dV) > 0 \quad \text{pour} \quad V < V_{mp}$$

$$(dP/dV) < 0 \quad \text{pour} \quad V > V_{mp}$$

Sachant que  $P = I \times V$ , la dérivée du produit par rapport à la tension  $V$  donne la relation suivante:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \times I)}{dV} = I \times \frac{dV}{dI} + V \times \frac{dI}{dV} = I + V \times \frac{dI}{dV} \quad (3.1)$$

Ce qui revient à écrire:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (3.2)$$

Les changements par accroissement nécessaires  $dV$  et  $dI$  sont obtenus en comparant les valeurs mesurées les plus récentes pour  $V$  et  $I$  à ceux mesurés durant le cycle précédent:

$$dV(k) = V(k) - V(k - 1) \quad (3.3)$$

$$dI(k) = I(k) - I(k - 1) \quad (3.4)$$

La fonction centrale pour trouver le MPP utilise les conditions suivantes:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (3.5)$$

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (3.6)$$

Si la relation (3.6) est vraie, le MPP est atteint et aucun changement de la tension  $V(k)$  n'est nécessaire. Si la relation (3.6) est fautive, selon que  $V(k)$  est supérieur ou inférieur à  $V_{mp}$ , la tension  $V(k)$  est ajustée en conséquence.

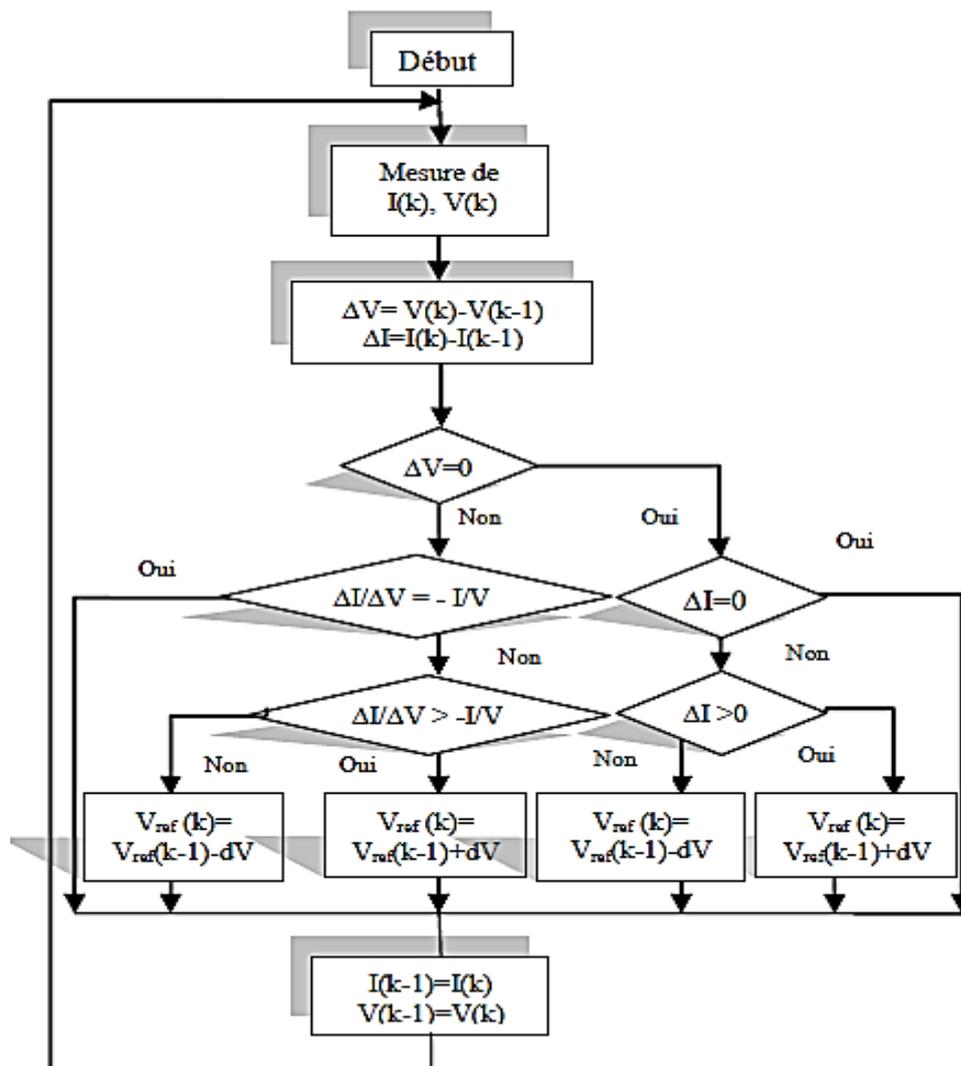


Figure 3. 3. Organigramme de l'algorithme CI

### 3.1.3. Méthode de la logique floue

Récemment, la commande par logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du MPP.

Cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et relativement simple à élaborer ; elle ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle à réguler. La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification [40].

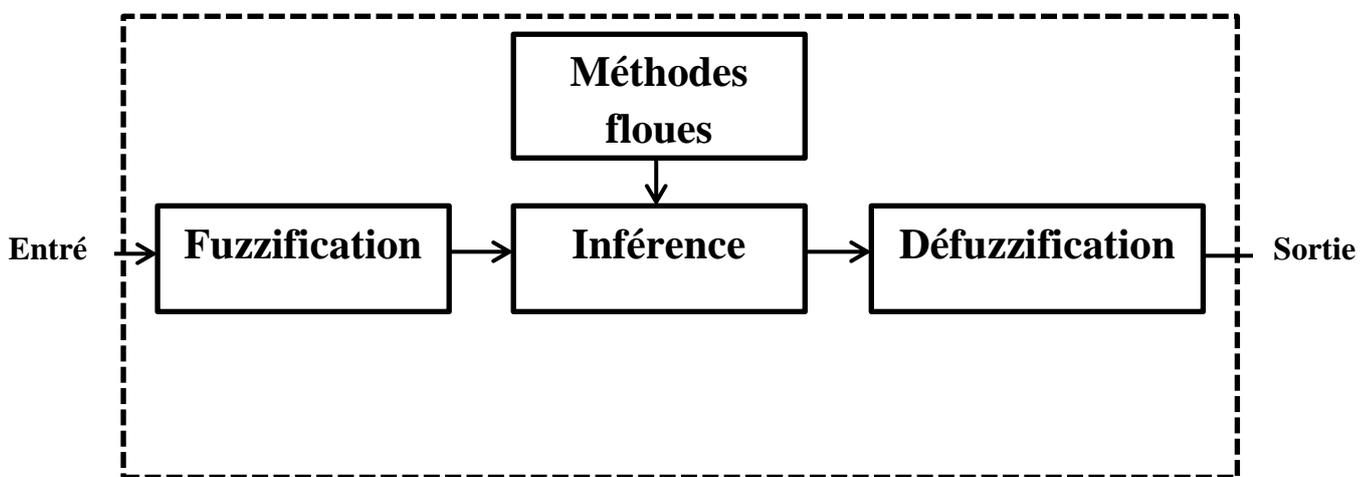


Figure 3. 4. Contrôle par logique floue.

#### a. La fuzzification

La fuzzification permet de rendre flou les variables d'entrée. Le bloc fuzzification contient en général un traitement de données préliminaire, (différence entre deux instants échantillonnés).

Ces grandeurs sont alors traitées par des **variables linguistiques** ou variables flous, ce qui nécessite leur définition par des **fonctions d'appartenance**.

- **variables linguistiques** : c'est la description d'une situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en générale des expressions floues par exemple : chaud, froid.

Les expressions de ce genre forment les valeurs des variables linguistiques de la logique floue.

Afin de permettre un traitement numérique, il est indispensable de les soumettre à une définition à l'aide de fonctions d'appartenances.

- **fonction d'appartenance** : elle est désigné par  $\mu_E(x)$ . l'argument x se rapport à la variable linguistique, tandis que l'indice E indique l'ensemble concerné.

Les termes linguistiques associés aux fonctions d'appartenance sont : PG (positif grand), PP (positif petit), Z (Zéro), NP (négatif petit) et NG (négatif grand).

Nous utilisons des fonctions de triangulaires et trapézoïdales aux extrémités des univers de discours pour les variables d'entrée ( $E$  et  $\Delta E$ ).

Dans ce cas, on a deux variables d'entrées qui sont l'erreur  $E(k)$  et la variation d'erreur  $\Delta E(k)$  à l'instant  $k$  qui sont définies comme suit :

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (3.7)$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k - 1) \quad (3.8)$$

### ***b. L'inférence***

L'inférence est une étape qui consiste à définir un rapport logique entre les entrées et la sortie. Elles lient les grandeurs mesurées, qui sont les variables d'entrées (transformées en variables linguistiques à l'aide de la fuzzification), à la variable de sortie.

Il existe différentes méthodes d'inférence [40] :

- méthode d'inférence max-min.
- méthode d'inférence max-prod.
- méthode d'inférence somme-prod.

#### ❖ **Méthode d'inférence max-min**

Cette méthode est la plus mentionnée dans la littérature sur les régulateurs flous. Elle réalise au niveau de :

- La condition : Et  $\longrightarrow$  Min ; Ou  $\longrightarrow$  Max
- La conclusion : Ou  $\longrightarrow$  Max ; Alors  $\longrightarrow$  Min

#### ❖ **Méthode d'inférence max-prod :**

- Au niveau de la condition : Et  $\longrightarrow$  Min ; Ou  $\longrightarrow$  Max
- Au niveau de la conclusion : Ou  $\longrightarrow$  Max ; Alors  $\longrightarrow$  Prod

#### ❖ **Méthode d'inférence somme-prod**

- Au niveau de la condition : Et  $\longrightarrow$  Prod ; Ou  $\longrightarrow$  Somme
- Au niveau de la conclusion : Ou  $\longrightarrow$  Somme ; Alors  $\longrightarrow$  Prod

#### ***c. La defuzzification :***

Le bloc d'inférence fournit une fonction d'appartenance résultant pour la variable de sortie. Il s'agit donc d'une information floue. Étant donné que l'organe de commande nécessite un signal de commande précis à son entrée, il faut prévoir une transformation de cette

information floue en une information déterminé. Cette transformation est appelé *defuzzification*.de plus, on doit souvent prévoir un traitement du signal et la conversion digitale /analogique.

Pour se faire, plusieurs méthodes sont alors utilisées que nous citerons ci-dessous les plus connues :

- **Defuzzification par centre de gravité**

Cette méthode est la plus utilisé, elle est basée sur la détermination du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante.

- **Defuzzification par valeur maximum**

Cette méthode consiste à choisit l'abscisse de la valeur maximal de la fonction d'appartenance résultante.

- **Méthode de la moyenne pondérée**

Dans le cas où plusieurs sous-ensembles auraient la même hauteur maximale, on réalise leur moyen.

#### 4.1. Commande MPPT floue

La figure ci-dessous donne la structure de la commande MPPT floue utilisée pour la poursuite de la puissance maximale d'un générateur photovoltaïque.

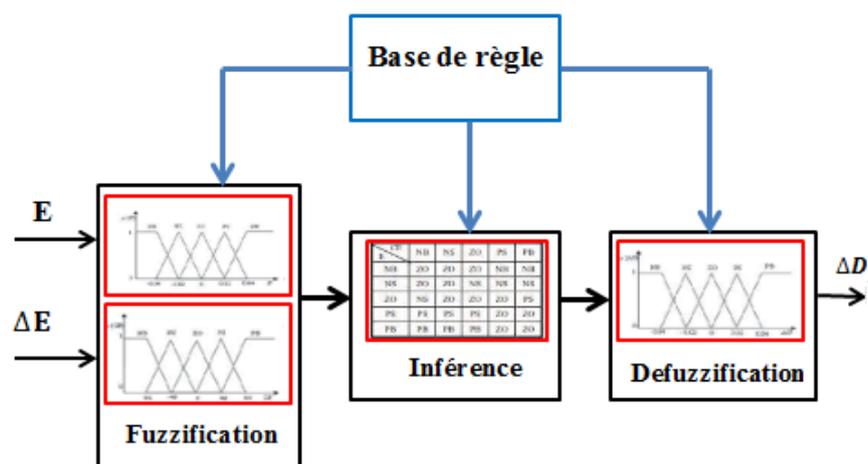


Figure 3. 5. Structure de commande de logique floue.

La tension réelle (V) et le courant (I) du générateur PV peuvent être mesurés en continu et la puissance peut être calculée ( $P = V \times I$ ). Le contrôle est déterminé sur la base de la satisfaction de deux critères relatifs à deux variables d'entrée du contrôleur proposé, à savoir l'erreur E (qui représente la pente de la caractéristique PI) et le changement de cette erreur (CE), à un instant d'échantillonnage k [41]. Les variables E et CE sont exprimées comme suit :

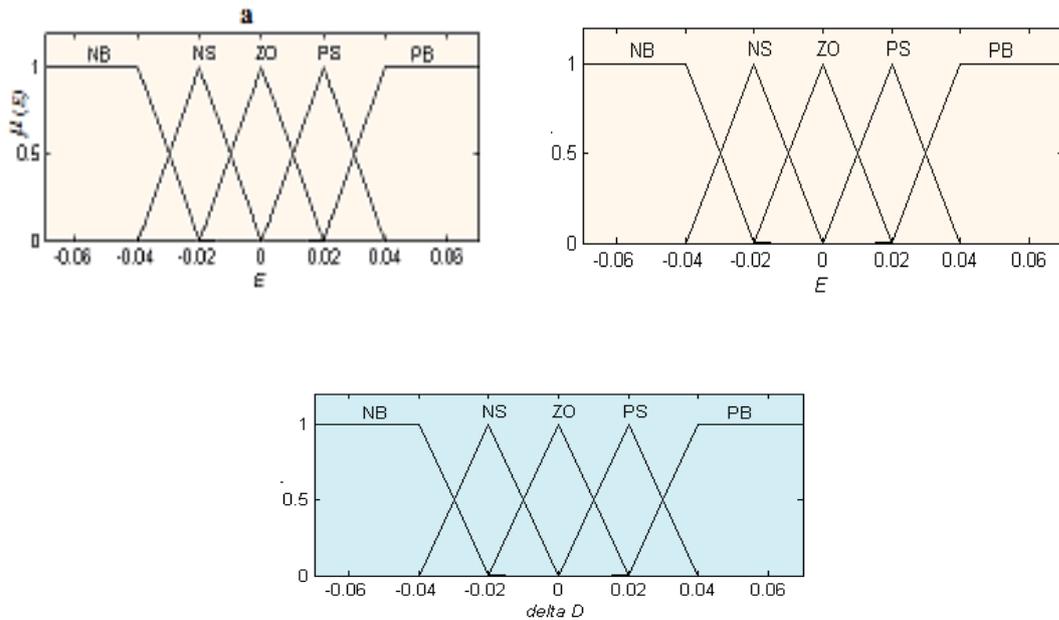
$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (3.9)$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k - 1) \quad (3.10)$$

Où P (k) et V (k) sont la puissance et le courant du générateur photovoltaïque, respectivement.

Par conséquent, l'entrée E (k) indique si le point de fonctionnement à l'instant k est situé à gauche ou à droite du MPP sur la caractéristique P-I, tandis que l'entrée CE (k) exprime la direction de déplacement de ce point.

Le changement de facteur de marche ( $\Delta D$ ) du convertisseur continu-continu est utilisé comme sortie du contrôleur proposé. Par conséquent, le contrôle est effectué en modifiant ce facteur de marche en fonction de la pente E (k) afin de ramener le point de fonctionnement sur le point optimal où la pente est égale à zéro. Comme le montre la fig. 4, les variables d'entrée (E, CE) sont convertis en variables linguistiques telles que PB (positif grand), PS (positif petit) , ZO (zéro), NS (petit négatif), NB (grand négatif) en utilisant un sous-ensemble flou de base. La figure 5 montre les niveaux d'appartenance de cinq sous-ensembles flous de base pour les variables d'entrée et de sortie.



**Figure 3. 6.** Fonctions d'appartenance pour ; l'entre E ; l'entre CE ; la sortie delta D.

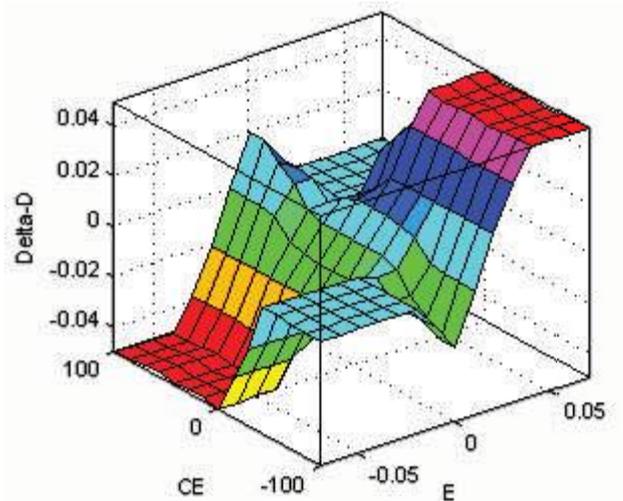
Les 25 règles floues de contrôle incluses dans le tableau (3.1) peuvent être présentées sous forme de graphique en 3 dimensions (3-D), comme illustré à la figure 6. Ces règles sont utilisées pour le contrôle du convertisseur abaisseur CC-CC tel que le MPP du générateur PV est Comme indiqué dans le tableau 2, l'idée principale des règles est d'amener le point de fonctionnement au MPP en augmentant ou en diminuant l'autoradio en fonction de la position du point de fonctionnement du MPP. Si le point de fonctionnement est éloigné du MPP, le facteur de marche sera augmenté ou réduit en grande partie.

Le tableau (1) illustre un exemple de règle de contrôle: SI E est PB et CE est NB ALORS que D est PB. Cela implique que si le point de fonctionnement est éloigné du MPP du côté gauche et que le changement de pente de la caractéristique P-I est important dans la direction opposée, la radio en service est alors considérablement augmentée.

|                                     |           |           |           |           |           |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b><i>CE</i></b><br><b><i>E</i></b> | <b>NB</b> | <b>NS</b> | <b>ZO</b> | <b>PS</b> | <b>PB</b> |
| <b>NB</b>                           | <b>ZO</b> | <b>ZO</b> | <b>NB</b> | <b>NB</b> | <b>NB</b> |
| <b>NS</b>                           | <b>ZO</b> | <b>ZO</b> | <b>NS</b> | <b>NS</b> | <b>NS</b> |
| <b>ZO</b>                           | <b>NS</b> | <b>ZO</b> | <b>ZO</b> | <b>ZO</b> | <b>PS</b> |
| <b>PS</b>                           | <b>PS</b> | <b>PS</b> | <b>PS</b> | <b>ZO</b> | <b>ZO</b> |
| <b>PB</b>                           | <b>PB</b> | <b>PB</b> | <b>PB</b> | <b>ZO</b> | <b>ZO</b> |

Si E est NB et CE est NB  
ALORS  $\Delta D$  est NB

**Tableau 3.1.** Règles floues



**Figure 3. 7.** Les 25 règles floues de contrôle présenté sous forme de graphique en 3D.

## Conclusion

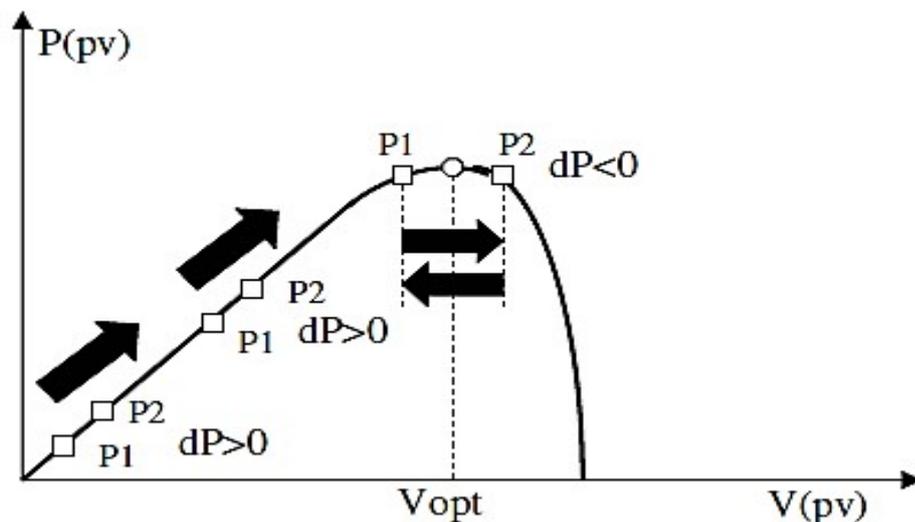
Le générateur photovoltaïque a un point de puissance maximale (MPP) qui varie en fonction de l'évolution de l'irradiation solaire et de la température de la cellule. Pour pouvoir extraire cette MPP on a le choix d'utiliser plusieurs méthode, parmi ces méthode on peut citer ; méthode par logique floue, méthode perturbe and observe (P&O), méthode a inductance incrémentale.

## Chapitre 3 Les techniques MPPT

### Introduction

De nombreuses méthodes de poursuite de point de puissance maximale (MPPT) ont été développées pour permettre au système d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque.

Le principe de ces méthodes est de déplacer le point de fonctionnement en augmentant  $V_{pv}$ , lorsque  $dP_{pv}/dV_{pv}$  est positif ou en diminuant  $V_{pv}$ , lorsque  $dP_{pv}/dV_{pv}$  est négatif[26].



**Figure 3. 1** . Principe de fonctionnement d'une commande MPPT

Lors du régime transitoire ou permanent, ces commandes doivent estimer et comparer la puissance avec celle de l'instant précédent. Les performances de celles-ci sont liées à la rapidité avec laquelle le point MPP est atteint, à la manière d'osciller autour de ce même point, mais aussi à la robustesse pour éviter une divergence lors de changements brutaux d'ensoleillement ou de charge[26].

On va présenter dans ce chapitre une revue des techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques (PV).

### 3.1. Les techniques MPPT

Il existe de nombreuses méthodes MPPT disponibles; Les techniques les plus utilisées sont décrites dans les sections suivantes :

- Méthode à tension constante (CV) [27]
- méthode de la tension ouverte (OV) [27]
- Méthodes de température [28]
- Méthodes de conductance incrémentielle (IC) [29]
- Méthodes de perturbation et d'observation (P & O et P & Ob) [30]
- Comparaison du poids en trois points [31]
- Méthode par impulsions à courant court [32]
- Méthode de la logique floue [33]
- Méthode du mode coulissant [34]
- Méthode du réseau de neurones artificiels [35]

#### 3.1.1. Méthodes de perturbation et d'observation (P&O)

La méthode perturbation et observation 'P&O', est la plus répandue dans le milieu industriel, car son algorithme est facile à implémenter. Ce processus fonctionne par une perturbation du système en augmentant ou en diminuant la tension de fonctionnement du module et observer son effet sur la puissance de sortie de la rangée. La figure 2 montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O', tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle.

D'après la figure 2, la tension et le courant  $V$  et  $I$ , sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante  $P(k)$  de la rangée. Cette valeur  $P(k)$  est comparée à la valeur  $P(k-1)$  de la dernière mesure.

Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle.

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

Si  $C_p$  est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou légèrement changeantes.

Si  $C_p$  est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation [26].

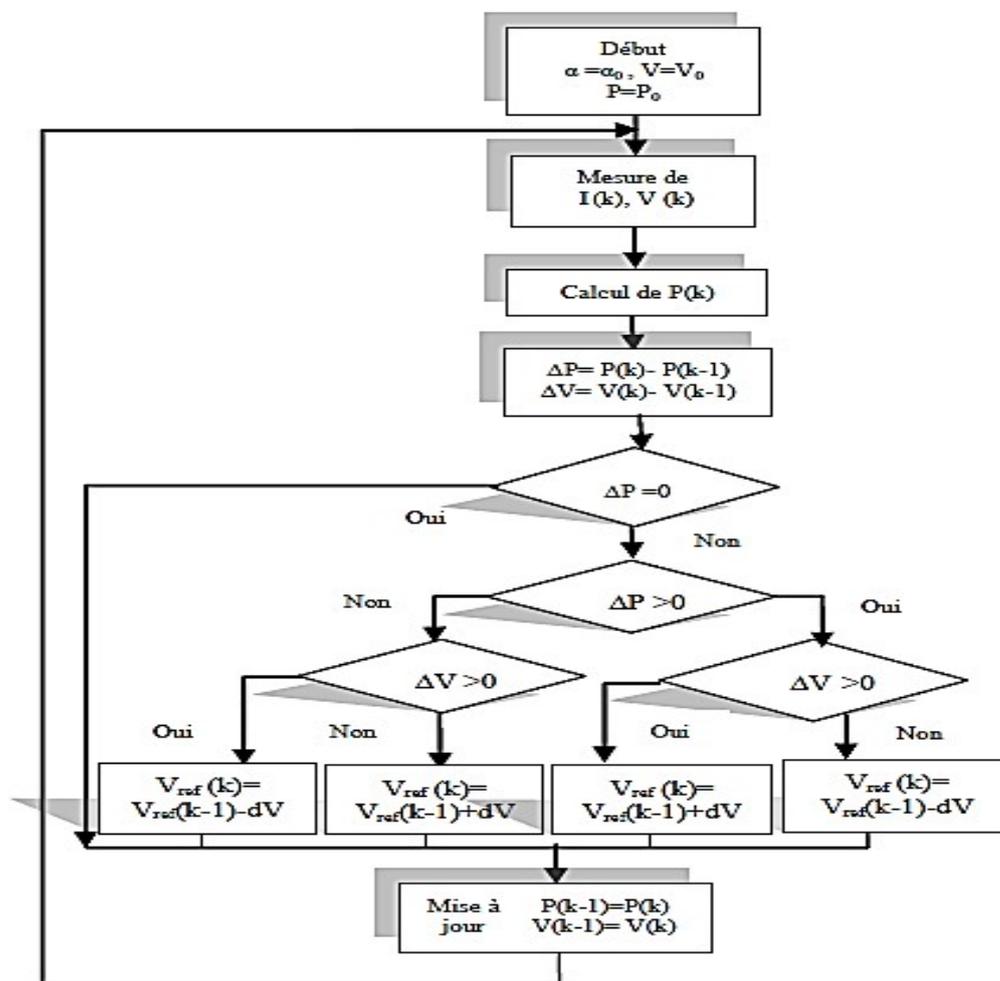


Figure 3. 2 .Organigramme de l'algorithme  $P\&O$ .

### 3.1.2. Méthodes de conductance incrémentielle

L'algorithme d'incrémentation de la conductance est basé sur le fait que le point de puissance maximale (MPP) n'est atteint que si  $dP/dV$  est nulle. Les caractéristiques du module photovoltaïque sur la figure 6 prouvent plus loin que la dérivée est supérieure à zéro à gauche du MPP et inférieure à zéro à droite du MPP. Ceci mène à l'ensemble d'équations suivant [36].

$$(dP/dV) = 0 \quad \text{pour} \quad V = V_{mp}$$

$$(dP/dV) > 0 \quad \text{pour} \quad V < V_{mp}$$

$$(dP/dV) < 0 \quad \text{pour} \quad V > V_{mp}$$

Sachant que  $P = I \times V$ , la dérivée du produit par rapport à la tension  $V$  donne la relation suivante:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \times I)}{dV} = I \times \frac{dV}{dI} + V \times \frac{dI}{dV} = I + V \times \frac{dI}{dV} \quad (3.1)$$

Ce qui revient à écrire:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (3.2)$$

Les changements par accroissement nécessaires  $dV$  et  $dI$  sont obtenus en comparant les valeurs mesurées les plus récentes pour  $V$  et  $I$  à ceux mesurés durant le cycle précédent:

$$dV(k) = V(k) - V(k - 1) \quad (3.3)$$

$$dI(k) = I(k) - I(k - 1) \quad (3.4)$$

La fonction centrale pour trouver le MPP utilise les conditions suivantes:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (3.5)$$

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (3.6)$$

Si la relation (3.6) est vraie, le MPP est atteint et aucun changement de la tension  $V(k)$  n'est nécessaire. Si la relation (3.6) est fausse, selon que  $V(k)$  est supérieur ou inférieur à  $V_{mp}$ , la tension  $V(k)$  est ajustée en conséquence.

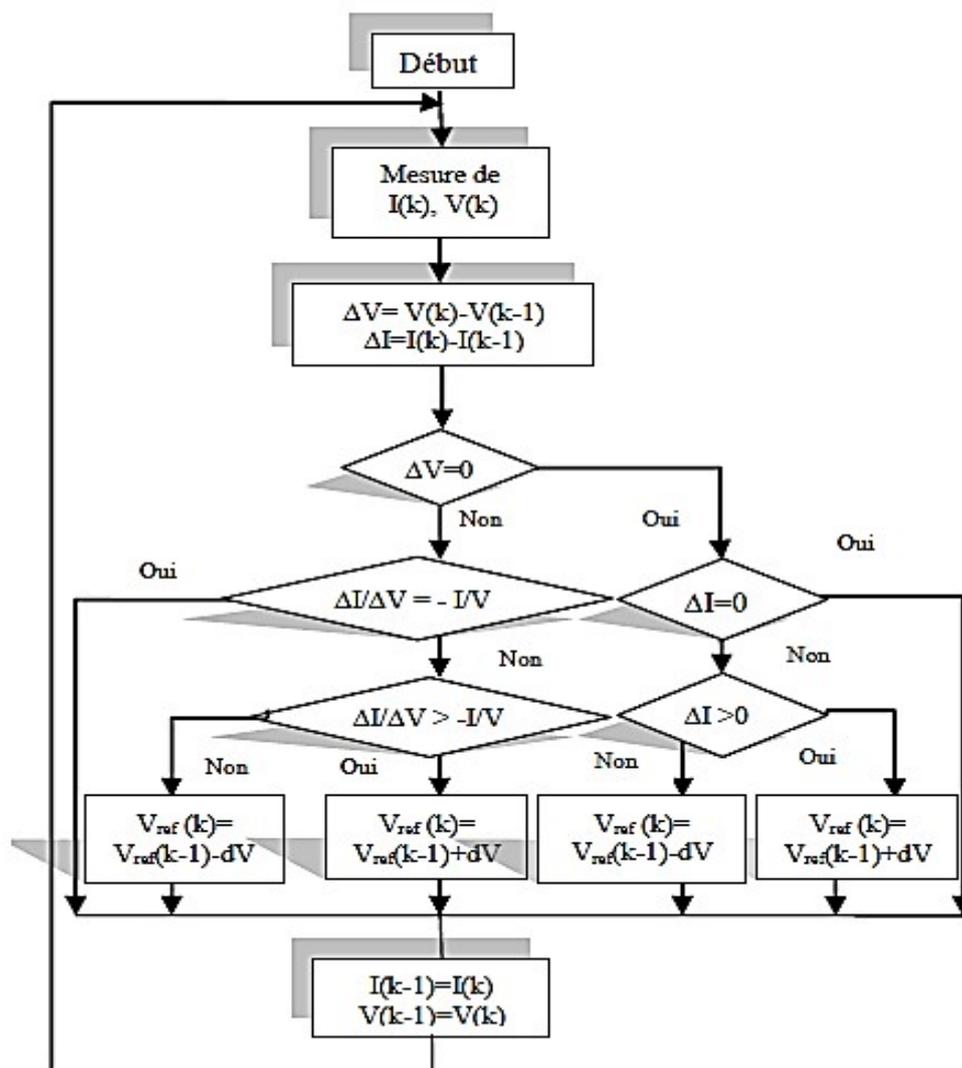


Figure 3. 3. Organigramme de l'algorithme CI

### 3.1.3. Méthode de la logique floue

Récemment, la commande par logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du MPP.

Cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et relativement simple à élaborer ; elle ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle à réguler. La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification [37].

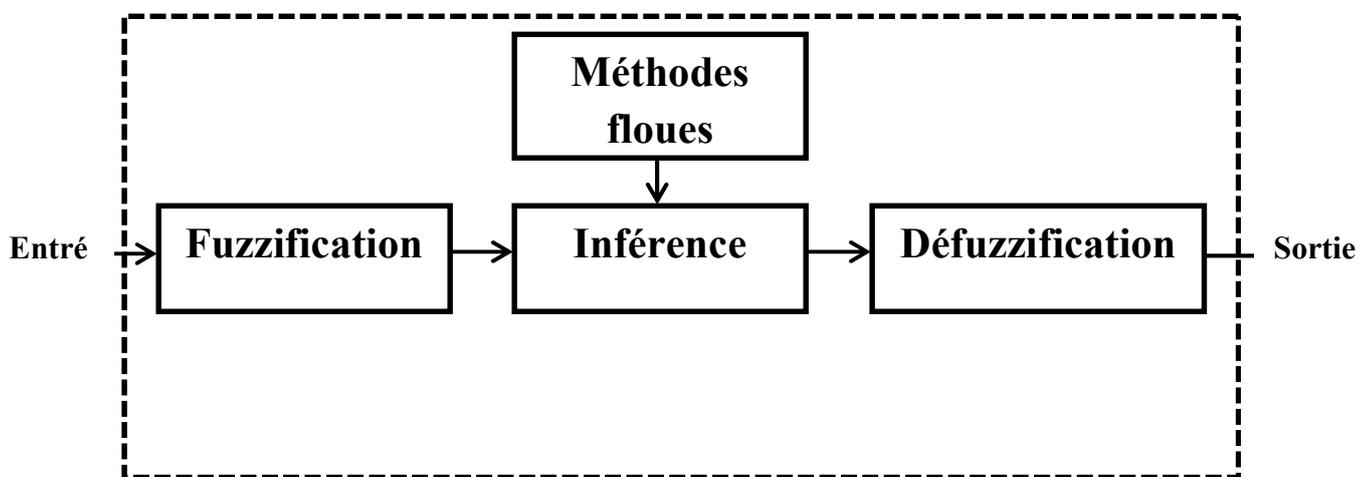


Figure 3. 4. Contrôle par logique floue.

#### a. La fuzzification

La fuzzification permet de rendre flou les variables d'entrée. Le bloc fuzzification contient en général un traitement de données préliminaire, (différence entre deux instants échantillonnés).

Ces grandeurs sont alors traitées par des **variables linguistiques** ou variables flous, ce qui nécessite leur définition par des **fonctions d'appartenance**.

- **variables linguistiques** : c'est la description d'une situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en générale des expressions floues par exemple : chaud, froid.

Les expressions de ce genre forment les valeurs des variables linguistiques de la logique floue.

Afin de permettre un traitement numérique, il est indispensable de les soumettre à une définition à l'aide de fonctions d'appartenances.

- **fonction d'appartenance** : elle est désigné par  $\mu_E(x)$ . l'argument x se rapport à la variable linguistique, tandis que l'indice E indique l'ensemble concerné.

Les termes linguistiques associés aux fonctions d'appartenance sont : PG (positif grand), PP (positif petit), Z (Zéro), NP (négatif petit) et NG (négatif grand).

Nous utilisons des fonctions de triangulaires et trapézoïdales aux extrémités des univers de discours pour les variables d'entrée ( $E$  et  $\Delta E$ ).

Dans ce cas, on a deux variables d'entrées qui sont l'erreur  $E(k)$  et la variation d'erreur  $\Delta E(k)$  à l'instant  $k$  qui sont définies comme suit :

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (3.7)$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k - 1) \quad (3.8)$$

### ***b. L'inférence***

L'inférence est une étape qui consiste à définir un rapport logique entre les entrées et la sortie. Elles lient les grandeurs mesurées, qui sont les variables d'entrées (transformées en variables linguistiques à l'aide de la fuzzification), à la variable de sortie.

Il existe différentes méthodes d'inférence [38] :

- méthode d'inférence max-min.
- méthode d'inférence max-prod.
- méthode d'inférence somme-prod.

#### ❖ Méthode d'inférence max-min

Cette méthode est la plus mentionnée dans la littérature sur les régulateurs flous. Elle réalise au niveau de :

- La condition : Et  $\rightarrow$  Min ; Ou  $\rightarrow$  Max
- La conclusion : Ou  $\rightarrow$  Max ; Alors  $\rightarrow$  Min

#### ❖ Méthode d'inférence max-prod :

- Au niveau de la condition : Et  $\rightarrow$  Min ; Ou  $\rightarrow$  Max
- Au niveau de la conclusion : Ou  $\rightarrow$  Max ; Alors  $\rightarrow$  Prod

#### ❖ Méthode d'inférence somme-prod

- Au niveau de la condition : Et  $\rightarrow$  Prod ; Ou  $\rightarrow$  Somme
- Au niveau de la conclusion : Ou  $\rightarrow$  Somme ; Alors  $\rightarrow$  Prod

#### **c. La defuzzification :**

Le bloc d'inférence fournit une fonction d'appartenance résultant pour la variable de sortie. Il s'agit donc d'une information floue. Étant donné que l'organe de commande nécessite un signal de commande précis à son entrée, il faut prévoir une transformation de cette information floue en une information déterminée. Cette transformation est appelée

defuzzification. de plus, on doit souvent prévoir un traitement du signal et la conversion digitale /analogique.

Pour se faire, plusieurs méthodes sont alors utilisées que nous citerons ci-dessous les plusconnues :

- **Defuzzification par centre de gravité**

Cette méthode est la plus utilisé, elle est basée sur la détermination du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante.

- **Defuzzification par valeur maximum**

Cette méthode consiste à choisit l'abscisse de la valeur maximal de la fonction d'appartenance résultante.

- **Méthode de la moyenne pondérée**

Dans le cas où plusieurs sous-ensembles auraient la même hauteur maximale, on réalise leur moyen.

#### 4.1. Commande MPPT floue

La figure ci-dessous donne la structure de la commande MPPT floue utilisée pour la poursuite de la puissance maximale d'un générateur photovoltaïque.

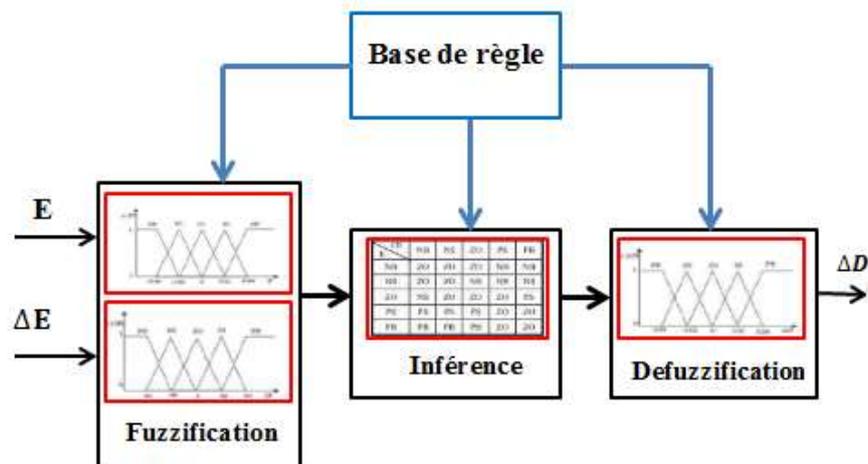


Figure 3. 5. Structure de commande de logique floue.

La tension réelle (V) et le courant (I) du générateur PV peuvent être mesurés en continu et la puissance peut être calculée ( $P = V \times I$ ). Le contrôle est déterminé sur la base de la satisfaction de deux critères relatifs à deux variables d'entrée du contrôleur proposé, à savoir l'erreur E (qui représente la pente de la caractéristique P-I) et le changement de cette erreur (CE), à un instant d'échantillonnage k [39]. Les variables E et CE sont exprimées comme suit :

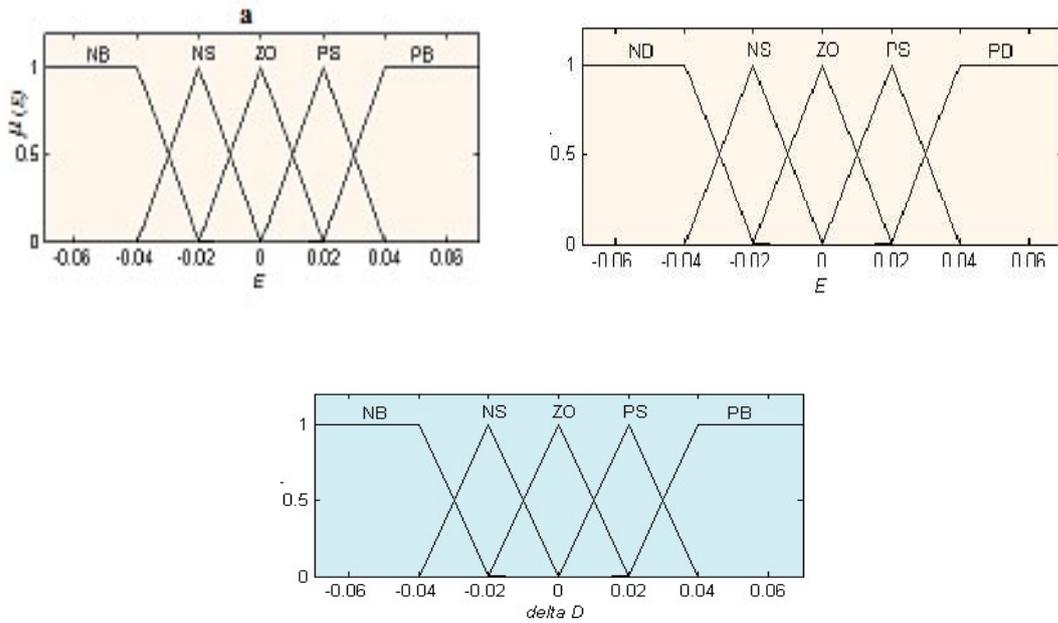
$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (3.9)$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k - 1) \quad (3.10)$$

Où P (k) et V (k) sont la puissance et le courant du générateur photovoltaïque, respectivement.

Par conséquent, l'entrée E (k) indique si le point de fonctionnement à l'instant k est situé à gauche ou à droite du MPP sur la caractéristique P-I, tandis que l'entrée CE (k) exprime la direction de déplacement de ce point.

Le changement de facteur de marche ( $\Delta D$ ) du convertisseur continu-continu est utilisé comme sortie du contrôleur proposé. Par conséquent, le contrôle est effectué en modifiant ce facteur de marche en fonction de la pente E (k) afin de ramener le point de fonctionnement sur le point optimal où la pente est égale à zéro. Comme le montre la fig. 4, les variables d'entrée (E, CE) sont converties en variables linguistiques telles que PB (positif grand), PS (positif petit), ZO (zéro), NS (petit négatif), NB (grand négatif) en utilisant un sous-ensemble flou de base. La figure 5 montre les niveaux d'appartenance de cinq sous-ensembles flous de base pour les variables d'entrée et de sortie.



**Figure 3. 6.** Fonctions d'appartenance pour ; l'entre E ; l'entre CE ; la sortie delta D.

Les 25 règles floues de contrôle incluses dans le tableau (3.1) peuvent être présentées sous forme de graphique en 3 dimensions (3-D), comme illustré à la figure 6. Ces règles sont utilisées pour le contrôle du convertisseur abaisseur CC-CC tel que le MPP du générateur PV est Comme indiqué dans le tableau 2, l'idée principale des règles est d'amener le point de fonctionnement au MPP en augmentant ou en diminuant l'autoradio en fonction de la position du point de fonctionnement du MPP. Si le point de fonctionnement est éloigné du MPP, le facteur de marche sera augmenté ou réduit en grande partie.

Le tableau (1) illustre un exemple de règle de contrôle: SI E est PB et CE est NB ALORS que D est PB. Cela implique que si le point de fonctionnement est éloigné du MPP du côté gauche et que le changement de pente de la caractéristique P-I est important dans la direction opposée, la radio en service est alors considérablement augmentée.

|           |           |           |           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>CE</b> | <b>NB</b> | <b>NS</b> | <b>ZO</b> | <b>PS</b> | <b>PB</b> |
| <b>E</b>  |           |           |           |           |           |
| <b>NB</b> | <b>ZO</b> | <b>ZO</b> | <b>NB</b> | <b>NB</b> | <b>NB</b> |
| <b>NS</b> | <b>ZO</b> | <b>ZO</b> | <b>NS</b> | <b>NS</b> | <b>NS</b> |
| <b>ZO</b> | <b>NS</b> | <b>ZO</b> | <b>ZO</b> | <b>ZO</b> | <b>PS</b> |
| <b>PS</b> | <b>PS</b> | <b>PS</b> | <b>PS</b> | <b>ZO</b> | <b>ZO</b> |
| <b>PB</b> | <b>PB</b> | <b>PB</b> | <b>PB</b> | <b>ZO</b> | <b>ZO</b> |

Si E est NB et CE est NB  
ALORS  $\Delta D$  est NB

Tableau 3. 1. Règles floues

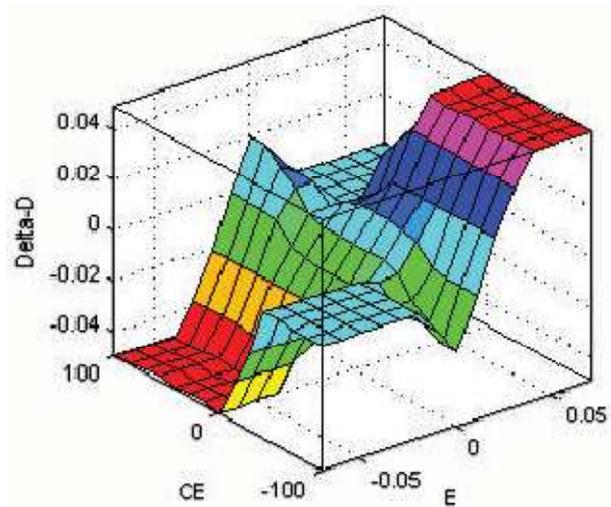


Figure 3. 7. Les 25 règles floues de contrôle présenté sous forme de graphique en 3D.

## Conclusion

Le générateur photovoltaïque a un point de puissance maximale (MPP) qui varie en fonction de l'évolution de l'irradiation solaire et de la température de la cellule. Pour pouvoir extraire cette MPP on a le choix d'utiliser plusieurs méthode, parmi ces méthode on peut citer ; méthode par logique floue, méthode perturbe and observe (P&O), méthode a inductance incrémentale.

## Chapitre 4 Simulations et résultats

---

### Introduction

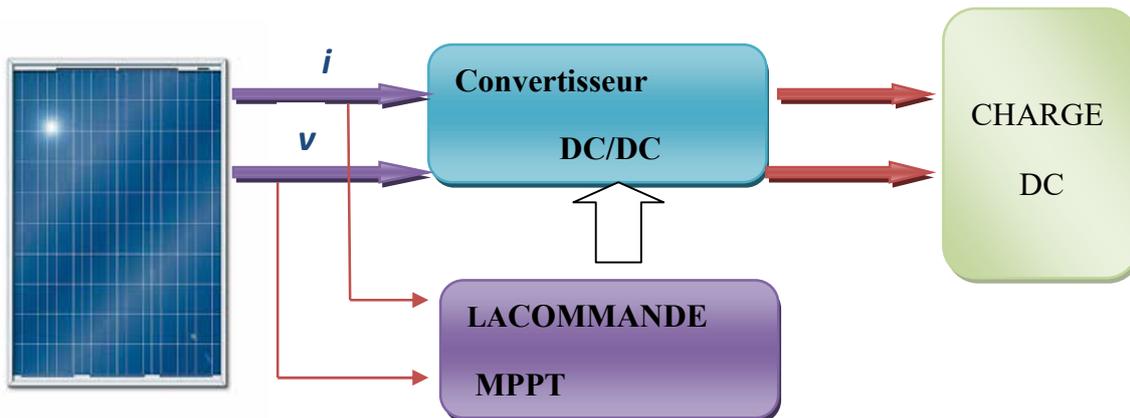
Ce chapitre est consacré à l'étude de deux méthodes (*P&O* et *MPPT* floue) de poursuite du point de puissance maximale.

Nous avons commencé par présenter la caractéristique courant tension (I-V) et puissance tension (P-V) du GPV. Ensuite on va illustrer l'algorithme perturbé and observe (*P&O*) suivi d'une simulation de la commande *P&O* et logique floue pour trois cas différentes : la température et l'éclairement sont fixes ; Cas d'une température constante (25C°) et l'éclairement variable ; Cas de la température variable et l'éclairement fixe 1000 w/m2.

A la fin de cette partie on va faire une comparaison entre les deux commandes étudiées pour les 3 cas cités avant.

### 4.1. Système photovoltaïque

Le schéma synoptique d'un système photovoltaïque est illustré par la figure 4.1 :



**Figure 4.1** .Le schéma synoptique d'un système PV.

## 4.2. Simulation des caractéristiques du GPV

La figure suivante représente le schéma bloc de PV sous matlab-simulink pour déterminer les caractéristiques ( $I-V$ ) et ( $P-V$ ) du ce panneau :

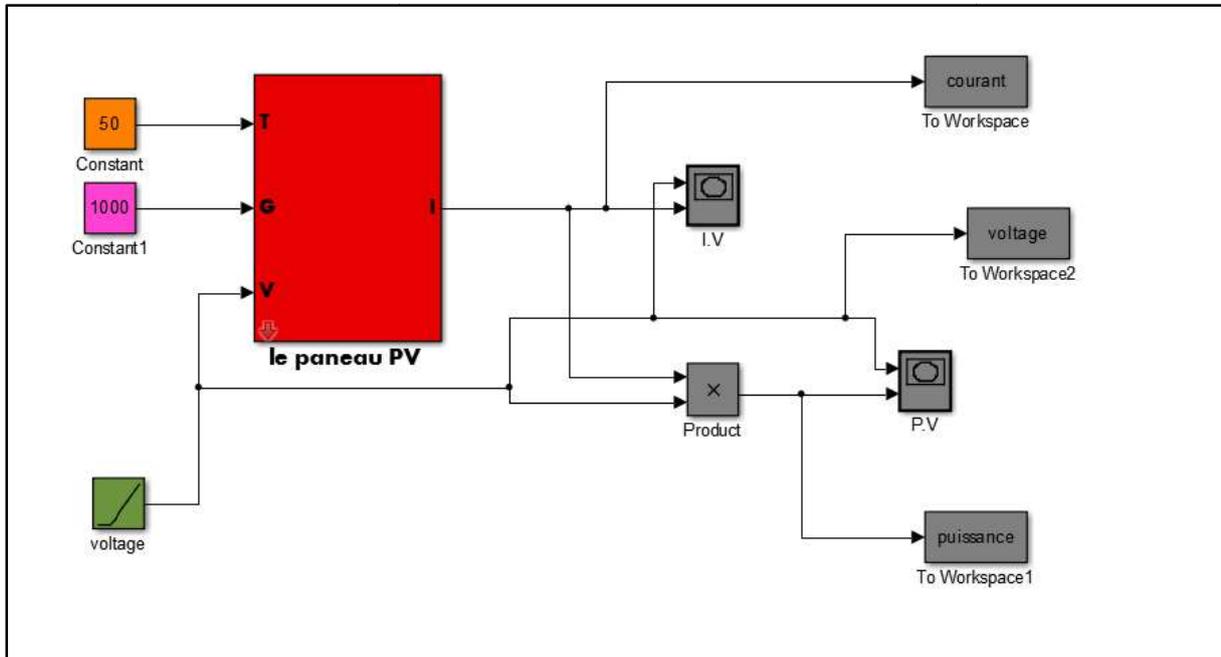


Figure 4. 2.Schéma bloc du GPV pour déterminer les caractéristiques ( $I-V$ ) et ( $P-I$ ).

### 4.2.1. Modèle d'un panneau photovoltaïque sous Simulink

La Figure (4.3)représenté le schéma bloc du générateur photovoltaïque (GPV) comportant tous paramètres. Deux variables d'entrées qui sont : l'éclairement  $G$  ( $W/m^2$ ), la température  $T$  ( $C^\circ$ ) et deux variables de sortie : courant fourni par le GPV  $I$ (A) et tension aux bornes du GPV  $V_s$ (V).

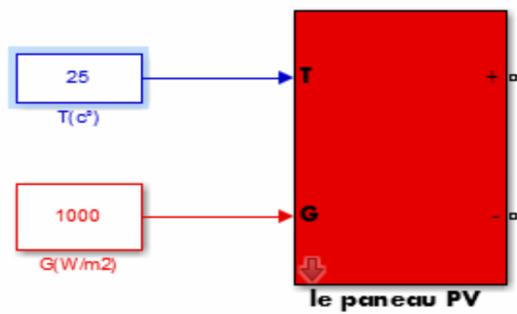


Figure 4. 3.Schéma bloc du générateur photovoltaïque.

La figure 4.4 suivante représente Circuit équivalent un panneau photovoltaïque une seule diode [1] :

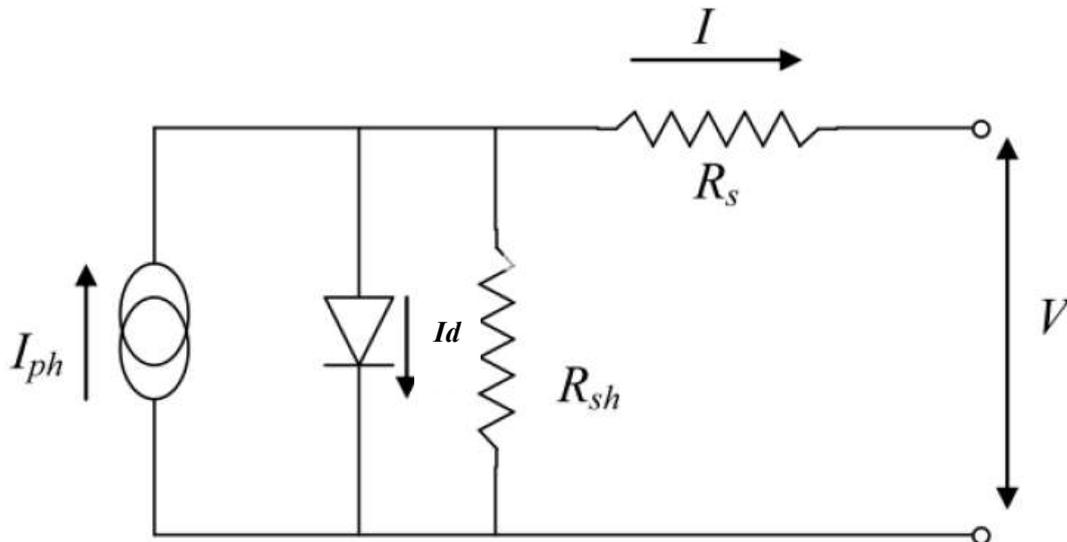


Figure 4. 4.Circuit équivalent à une diode d'une cellule photovoltaïque réelle.

Pour la modélisation au schéma bloqué-t-on donne l'équation suivante [1] :

$$I = NpI_{ph} - NpI_0 \left[ \exp \left[ \frac{V+R_s \times I}{a \times V_T \times N_s} \right] - 1 \right] - \frac{V+R_s \times I}{R_{sh}} \quad (4.1)$$

$I$  = courant de sortie de cellule.

$I_{ph}$  = le photo-courant.

$I_0$  = courant de saturation de diode.

$V$  = tension de sortie du générateur photovoltaïque.

$NP$  = nombre de cellules en parelle.

$NS$  = nombre de cellules en série.

$q$  = charge d'un électron  $q = 1.602176 \times C$ .

$k$  = constante de Boltzmann  $k = 1,380\ 650\ 3 \times 10^{-23}$  J/K.

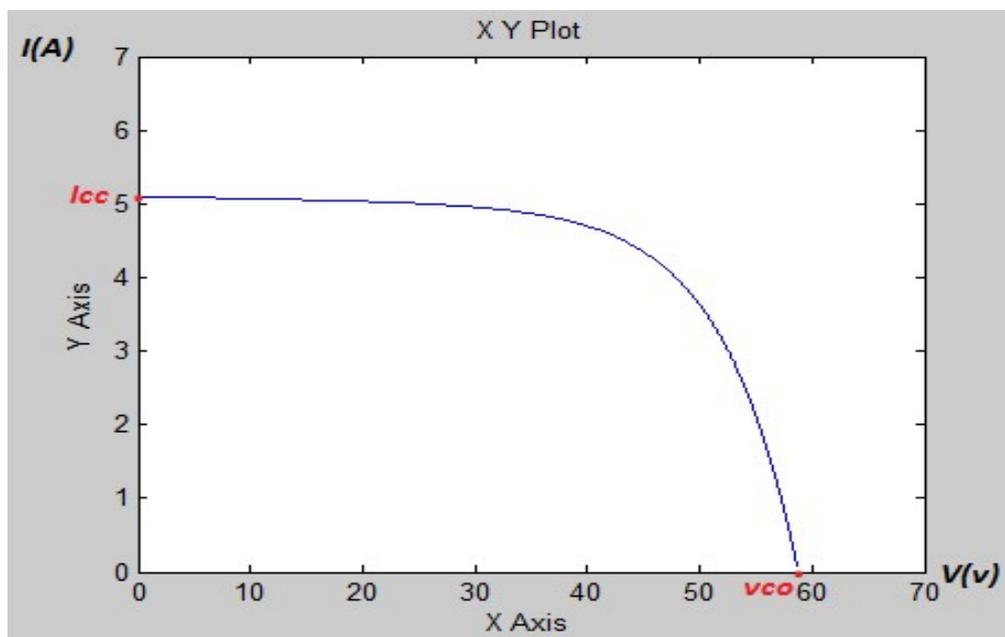
$\alpha$  = facteur d'idéalité de jonction p-n

$T$  = température de la cellule (K).

$VT$  : Le potentiel thermique.

- $VT = \frac{K \times T}{q} (4.2)$

Les figures (4.5, 4.6) représentent respectivement les courbes  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$  de GPV :



**Figure 4. 5.** Les caractéristiques (I-V) de GPV.

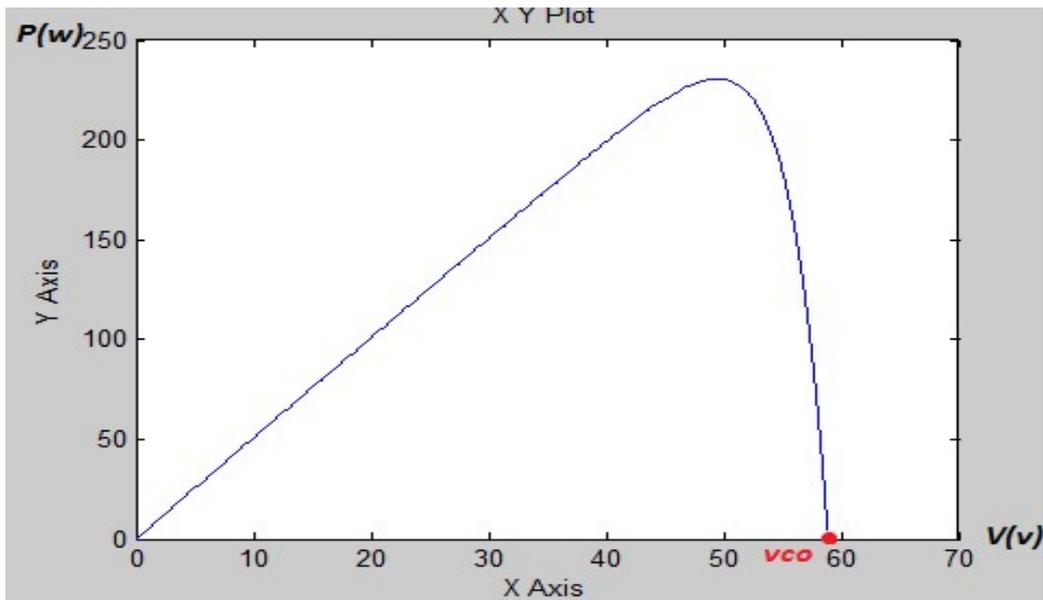


Figure 4. 6.les caractéristiques (P-V) de GPV.

### 4.3. La simulation de la commande MPPT P&O

#### 4.3.1. Présentation de l'Algorithme Perturber et observer, P&O

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique  $\alpha$ . En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant  $k$ , puis on la compare à la précédente de l'instant  $(k-1)$ .

Si la puissance augmente, on s'approche du point de puissance maximale, 'MPP' et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du point de puissance maximale, 'MPP'. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique.[26]

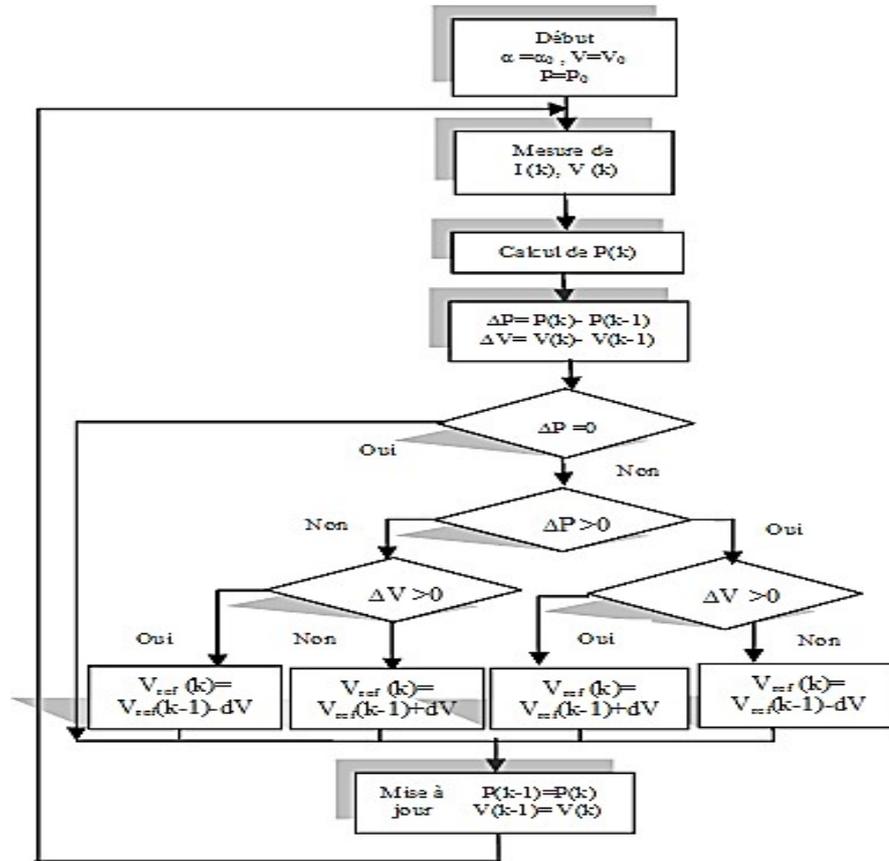


Figure 4. 7.Organigramme de l'algorithme P&O.

### 4.3.2. Simulation de la méthode MPPT P&O

La figure (4.8) illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande de poursuite MPPT P&O :



Figure 4. 8. Schéma block de la commande MPPT P&O.

### 4.3.3. Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge)

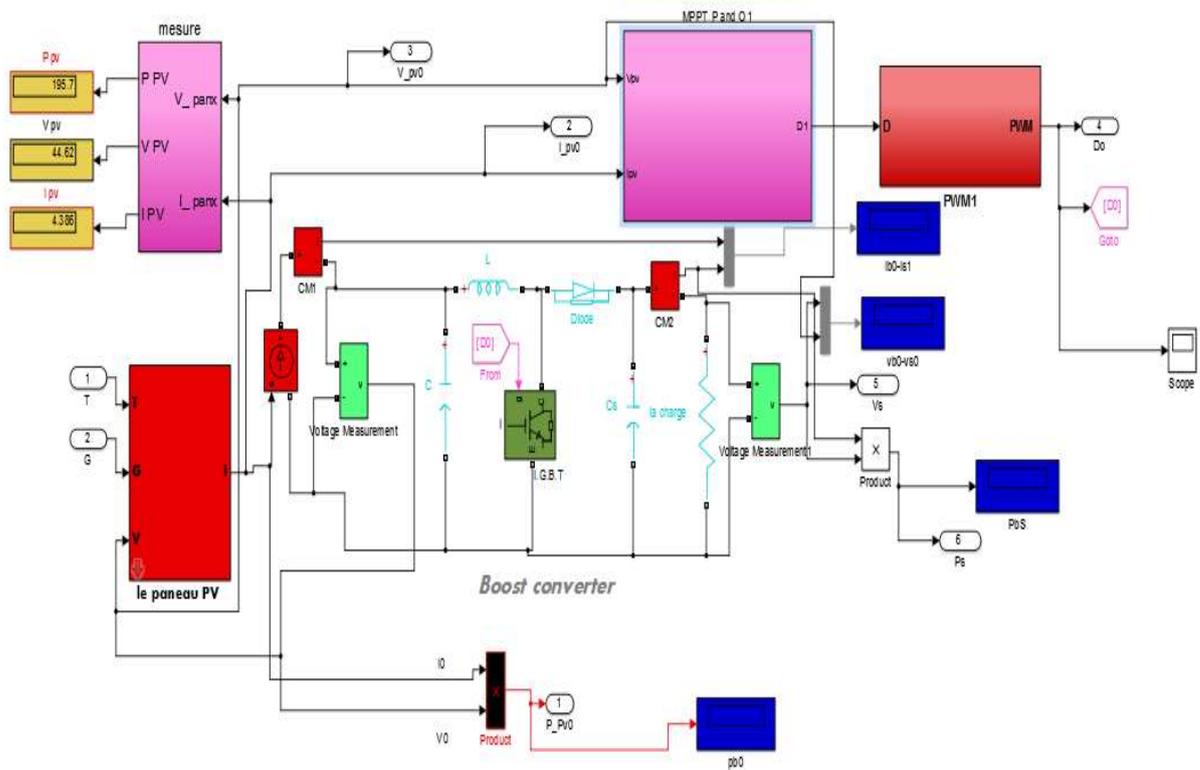


Figure 4. 9. Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec laCommande MPPT (P&O).

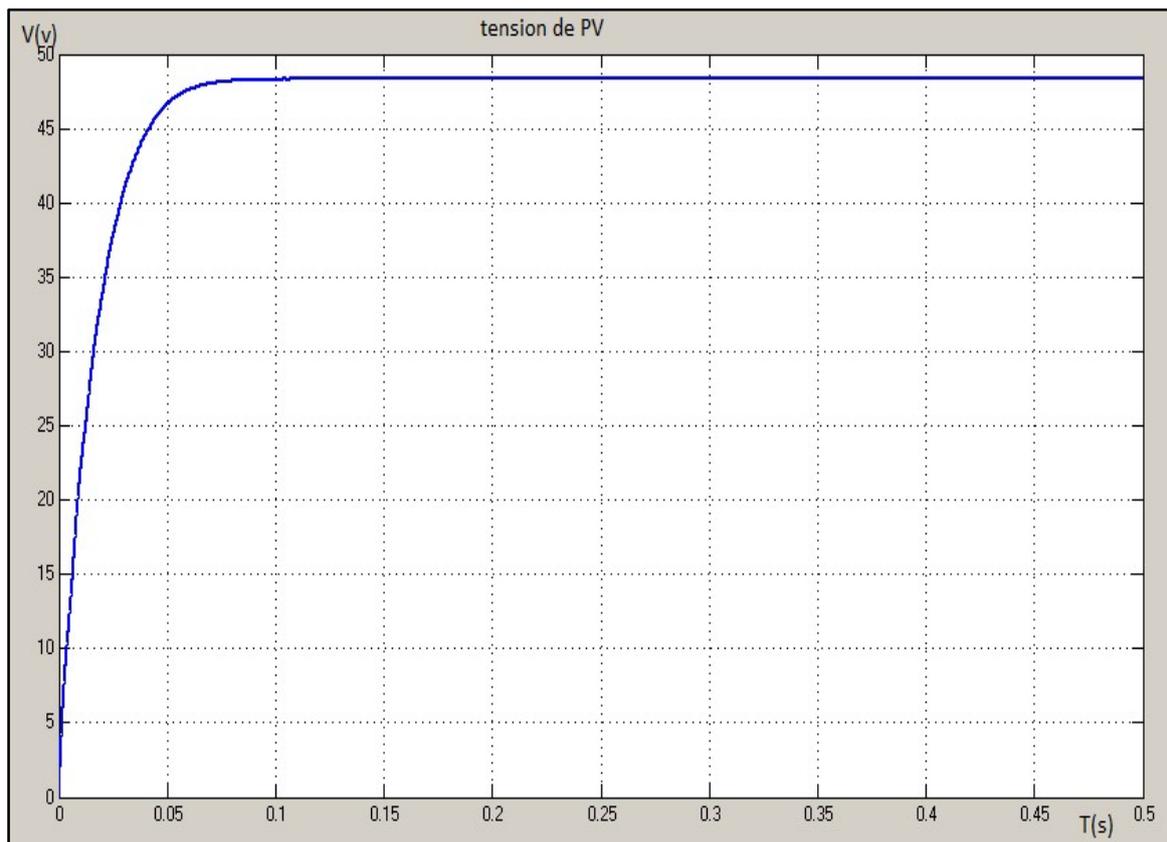
### 4.3.3. Résultats de simulation de la commande MPPT P&O

Dans cette partie nous effectuons une simulation de la commande **MPPT P&O** pour les trois cas suivants :

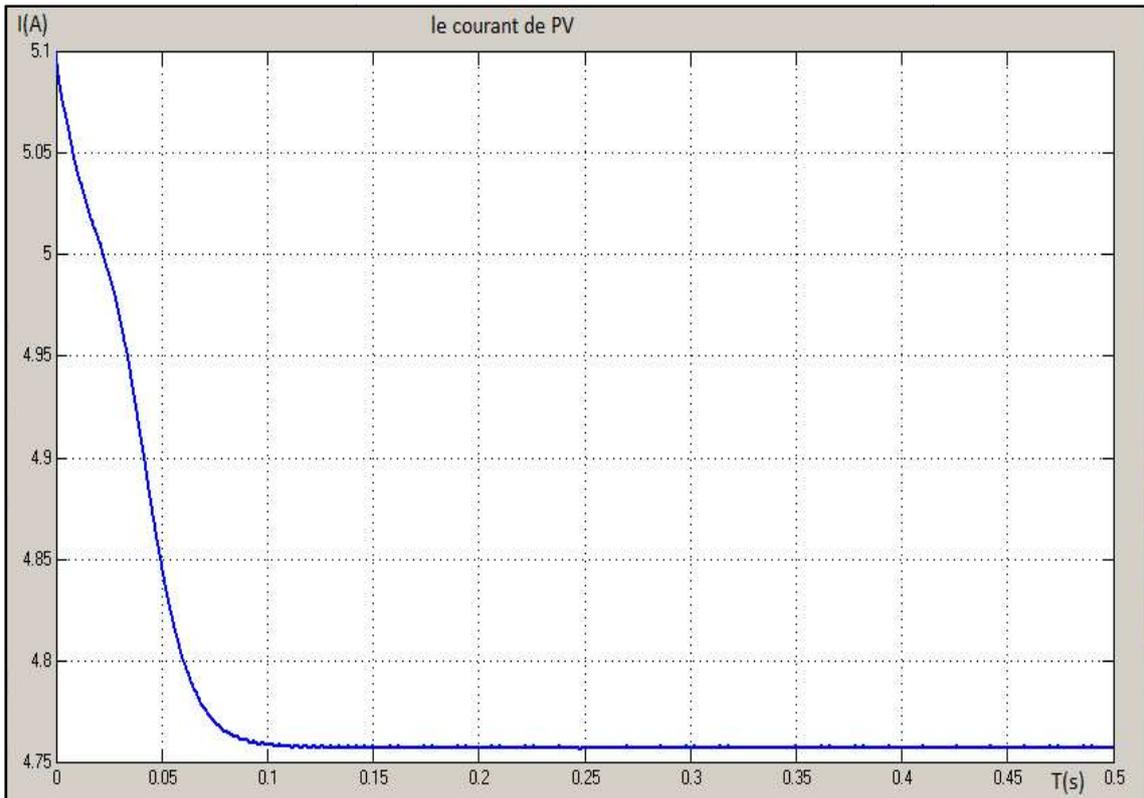
- ✚ Le cas où la température et l'éclairement sont fixes.
- ✚ Cas d'une température constante (25°C) et l'éclairement variable.
- ✚ Cas de la température variable et l'éclairement fixe 1000 w/m<sup>2</sup>.

#### a Le cas où la température et l'éclairement sont fixes

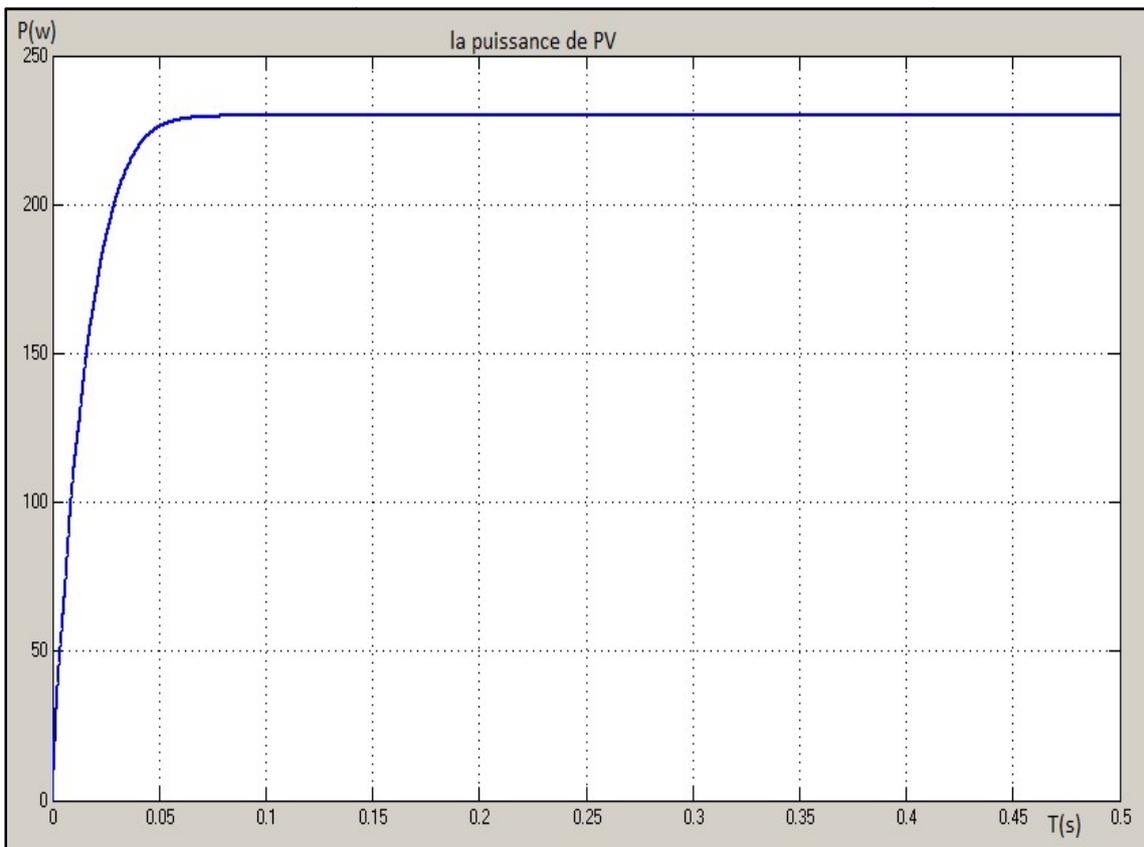
Les figures (4.10) à (4.15) représentent Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande **MPPT « P&O »** dans le cas où la température et l'éclairement sont fixes :



**Figure 4. 10.** Résultats de simulation de la tension générée par le GPV pour  $E=1000W/m^2$  et  $T=25C^\circ$



**Figure 4. 11.** Résultats de simulation du courant généré par le GPV pour  $E=1000\text{W}/\text{m}^2$  et  $T=25\text{C}^\circ$



**Figure 4. 12.** Résultats de simulation de la puissance générée par le GPV pour  $E=1000\text{W}/\text{m}^2$  et  $T=25\text{C}^\circ$

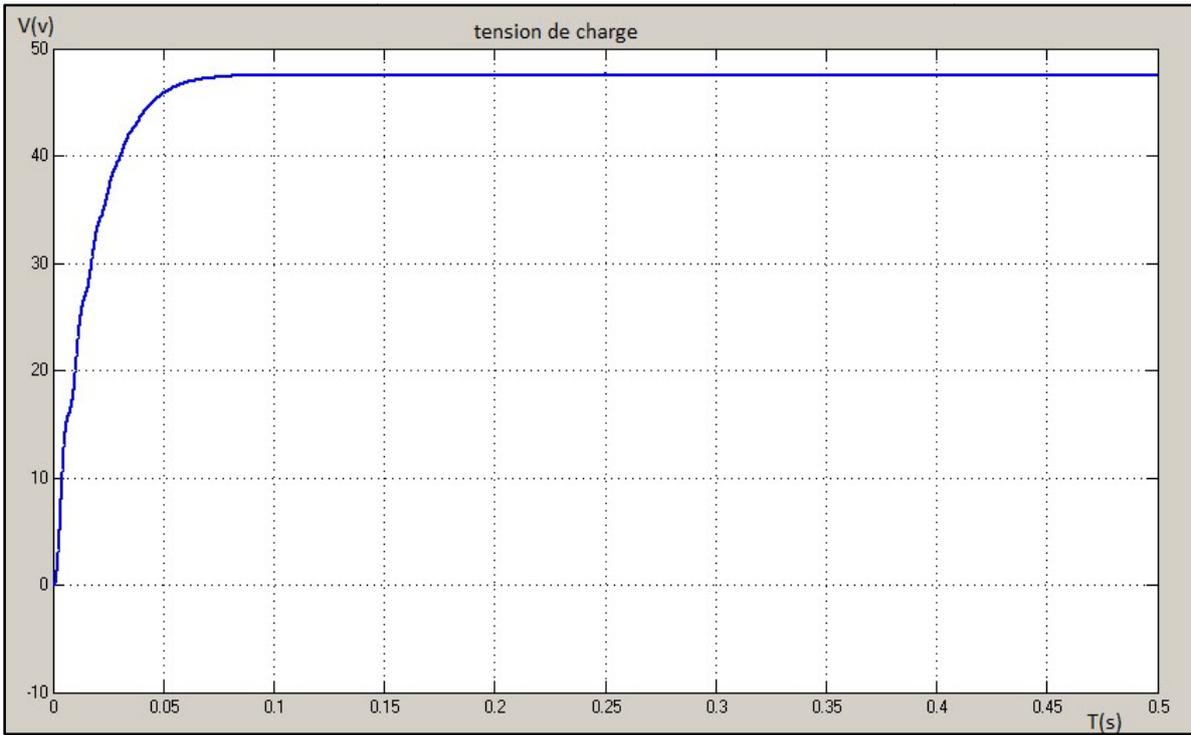


Figure 4. 13. Résultats de simulation de la tension de sortie du système pour  $E=1000W/m^2$  et  $T=25C^\circ$

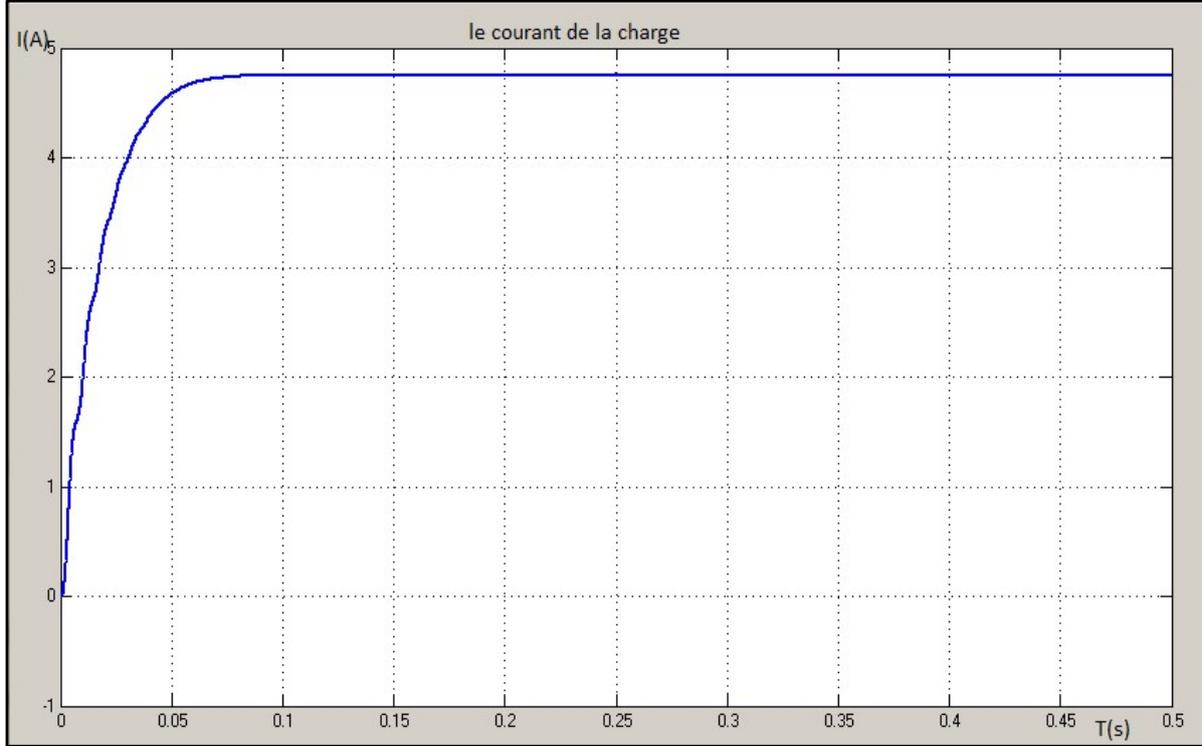
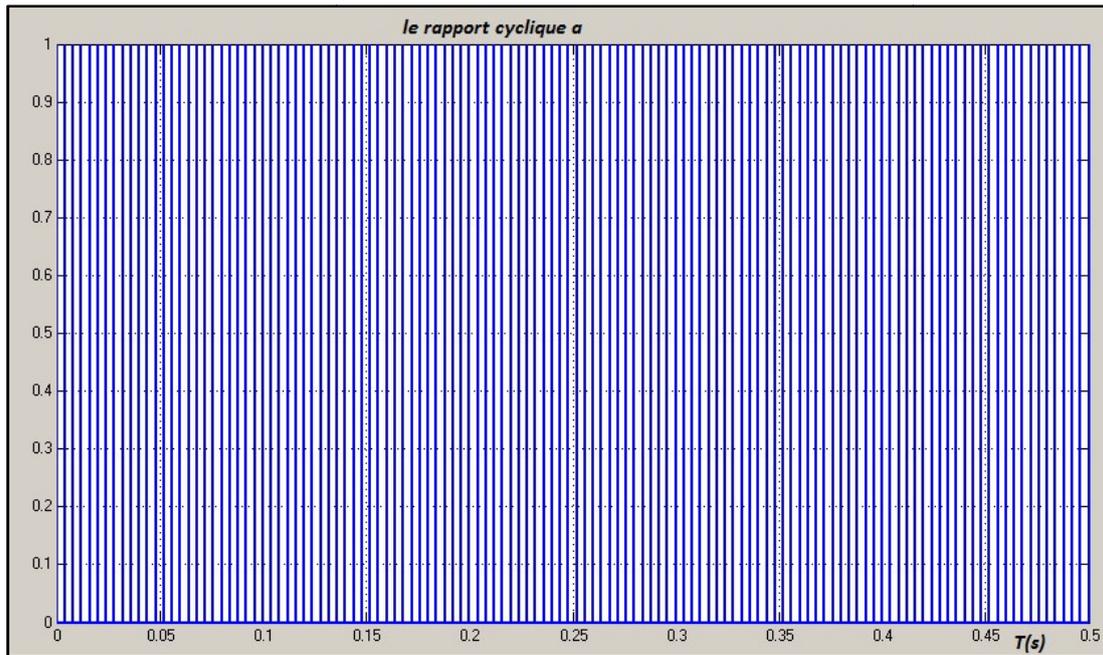


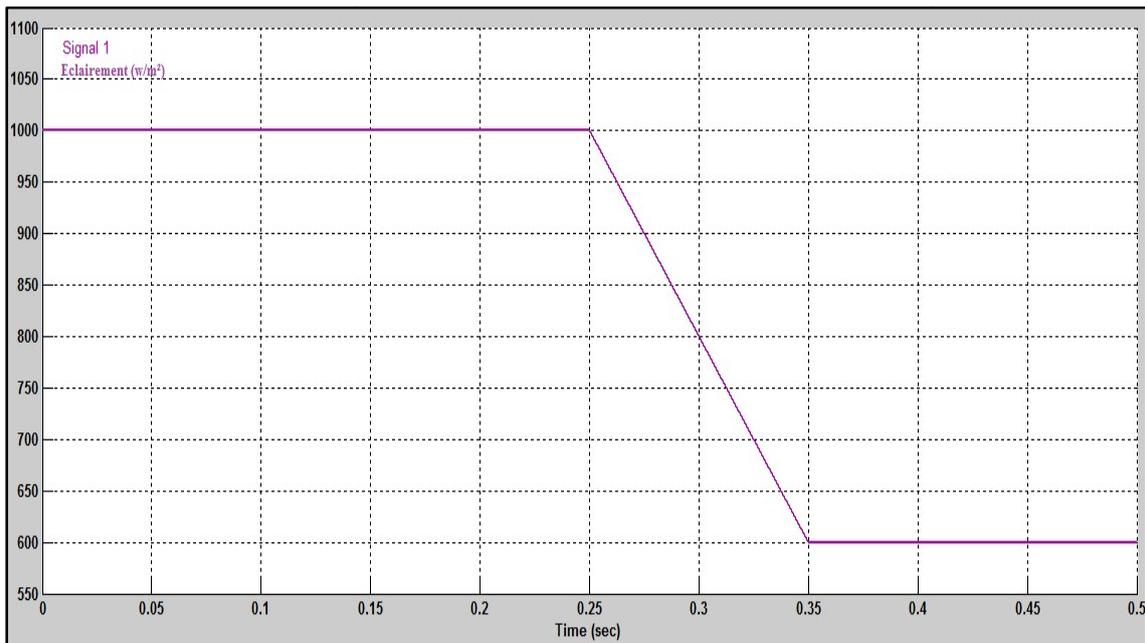
Figure 4. 14. Résultats de simulation de le courant de sortie du système pour  $E=1000W/m^2$  et  $T=25^\circ C$



**Figure 4. 15.**Rapport cyclique  $\alpha$  de MPPT.

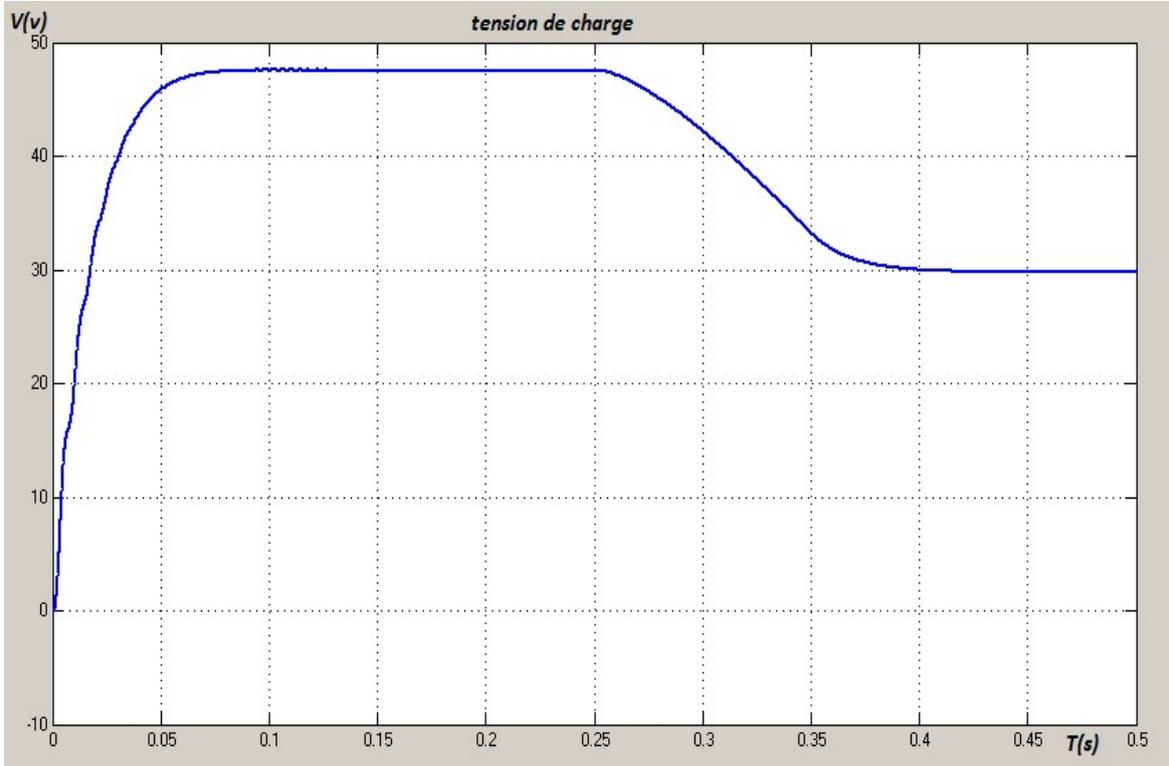
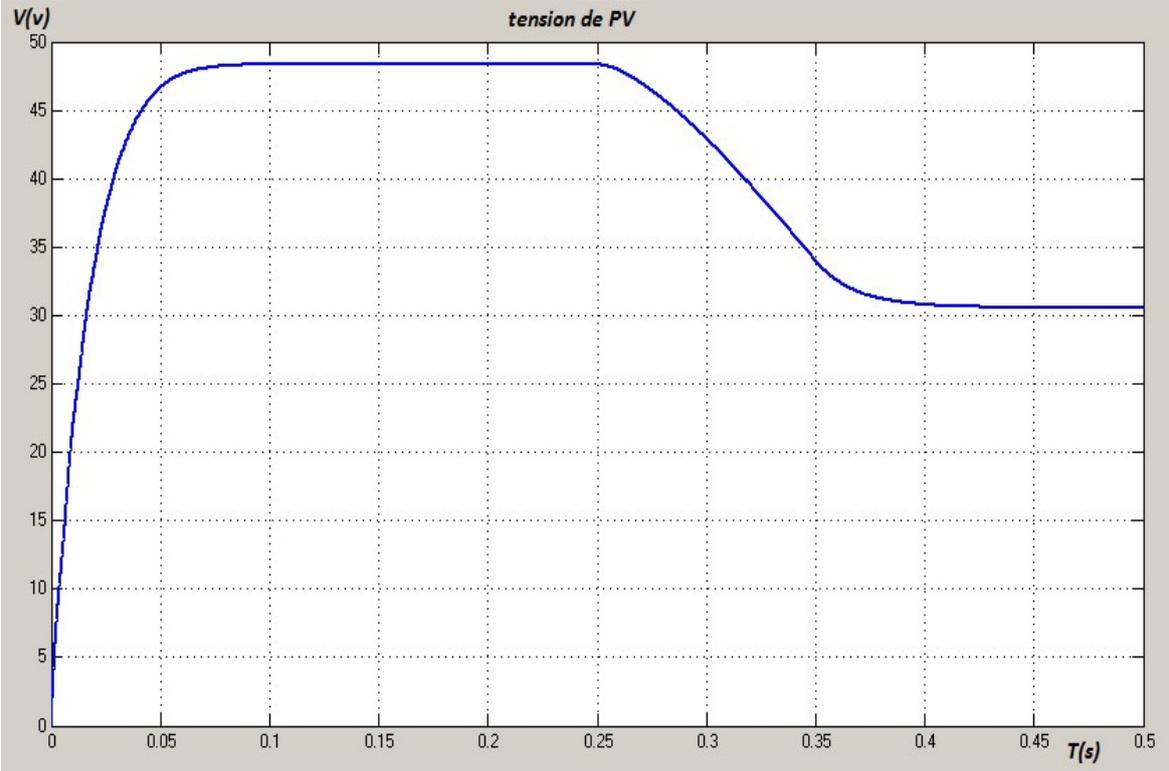
**b Cas de la température constante (25°C) et l'éclairement variable**

Les figures (4.17, 4.18) montrent les résultats de simulation obtenus pour un pas de perturbation de 0.01 et avec diminution lente de 1000W/m<sup>2</sup> à 600W/m<sup>2</sup> dans un intervalle de 0.1s du niveau de rayonnement. Ces changements sont représentés par la figure suivante. La température ambiante reste constante et égale à 25°C.



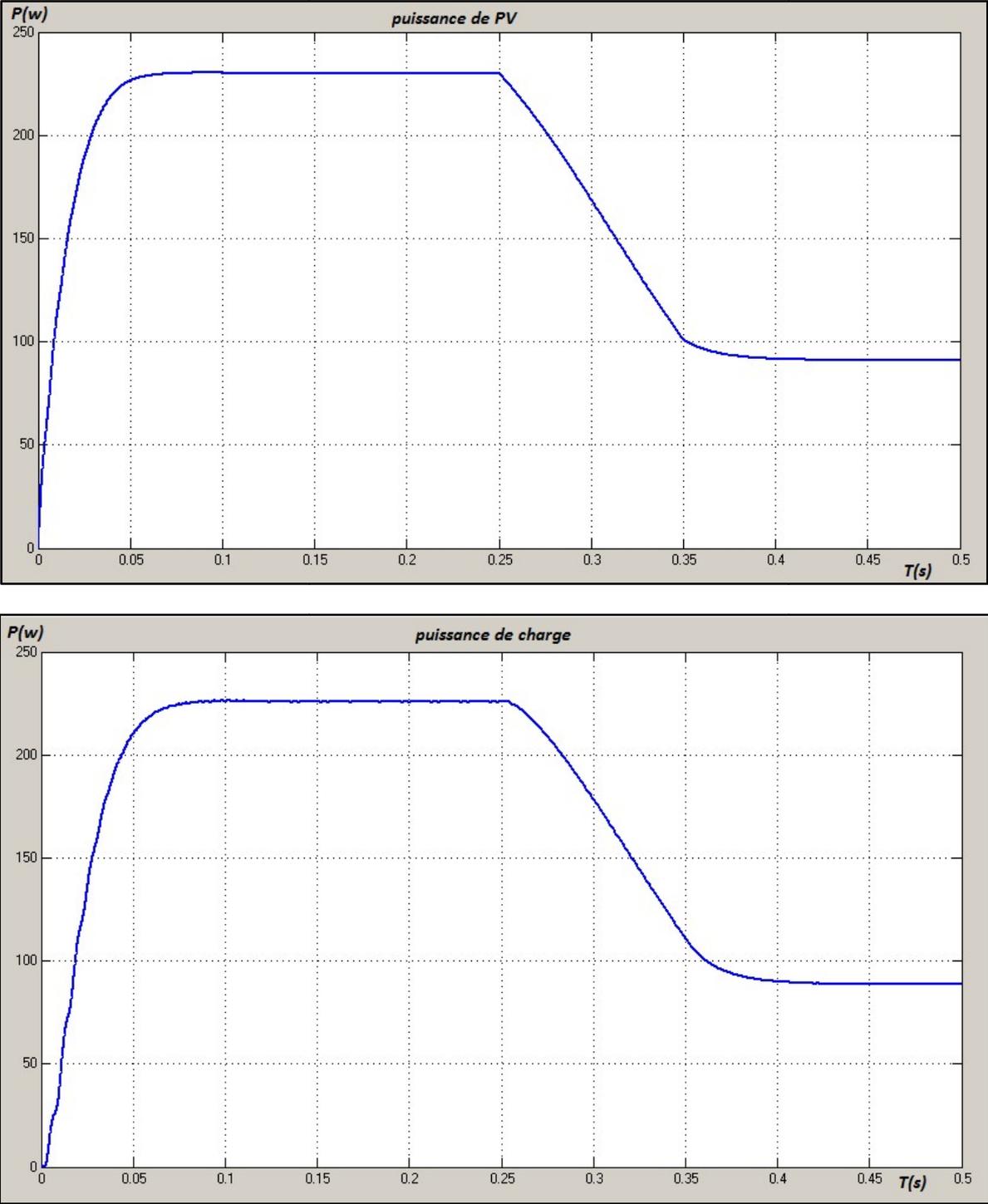
**Figure 4. 16.**Changement de l'éclairement de 1000W/m<sup>2</sup> à 600W/m<sup>2</sup> avec une température fixe de 25°C.

La figure (4.17) représente la tension du générateur photovoltaïque, la tension de la charge à un changement d'ensoleillement de  $1000\text{W/m}^2$  à  $600\text{W/m}^2$ . On remarque que La courbe de tension de la charge et la tension d'entrée du GPV suit le changement d'ensoleillement.



**Figure 4. 17.** Tension du GPV, tension de la charge face à un changement de l'éclairément de  $1000\text{W/m}^2$  à  $600\text{W/m}^2$  pour la MPPT P&O

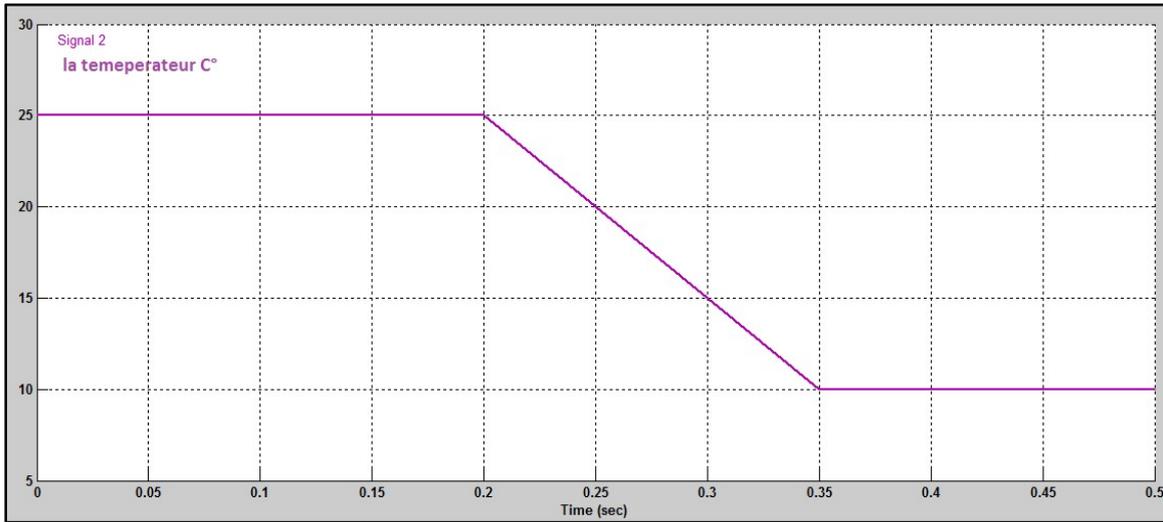
pour la commande *MPPT P&O* on remarque l'effet de la diminution rapide de la puissance du GPV causée par une diminution de l'éclairement. Dans les mêmes conditions  $1000\text{W/m}^2$  à  $600\text{W/m}^2$  et température fixe  $25\text{C}^\circ$  comme le montre la figure (4.18).



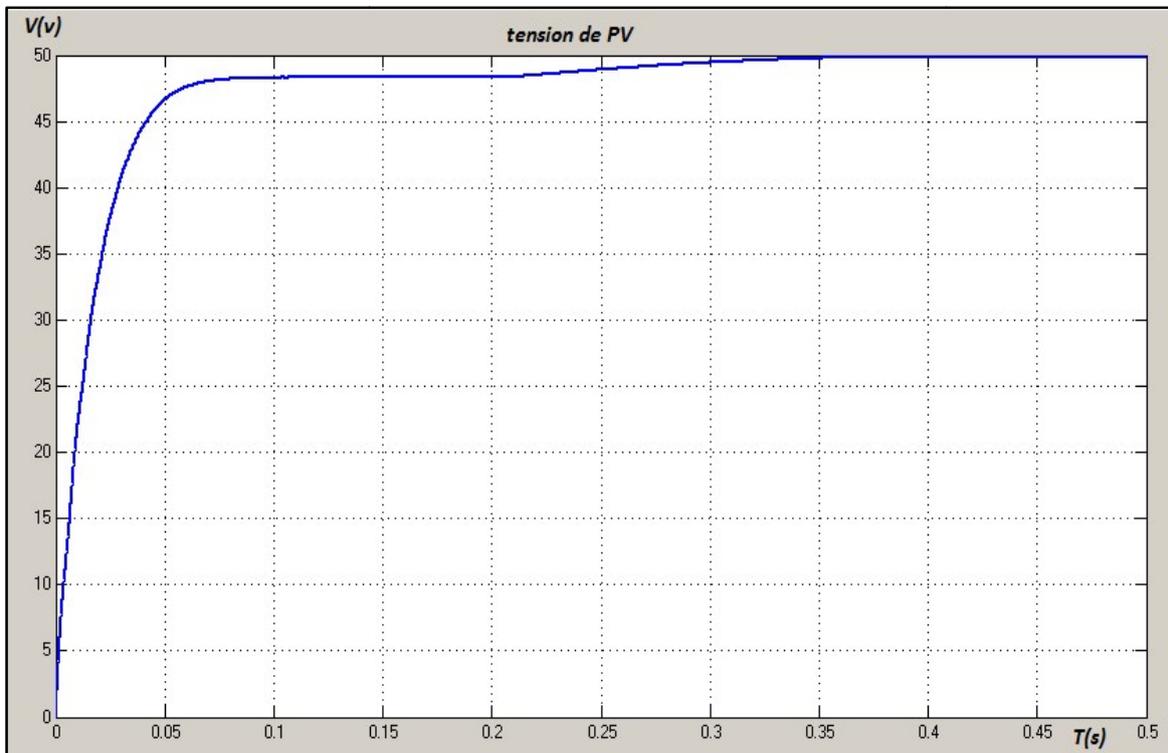
**Figure 4. 18.** Puissance du GPV et Puissance de la charge face à un changement de l'éclairement de  $1000\text{W/m}^2$  à  $600\text{W/m}^2$  pour la MPPT P&O.

**c Cas de la température variable et l'éclairement fixe 1000 w/m2**

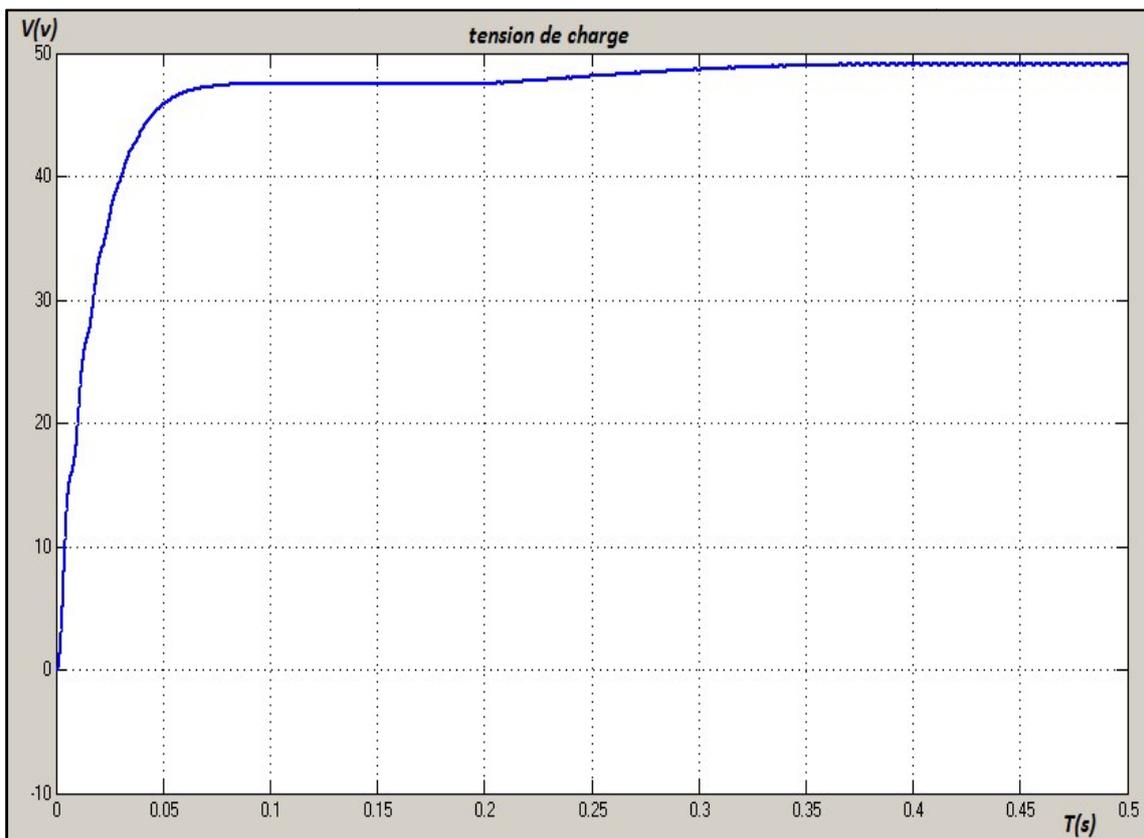
Les figures (4.20, 4.23) montrent les résultats de simulation obtenus pour un pas de perturbation de 0.01 et avec diminution de température 25C° jusqu' 10C° dans un intervalle de 0.15s, L'éclairement reste constante et égale 1000w/m2,Cette diminution produit une augmentation des tensions du GPV et de la charge. Ces changements sont représentés par la figure suivante :



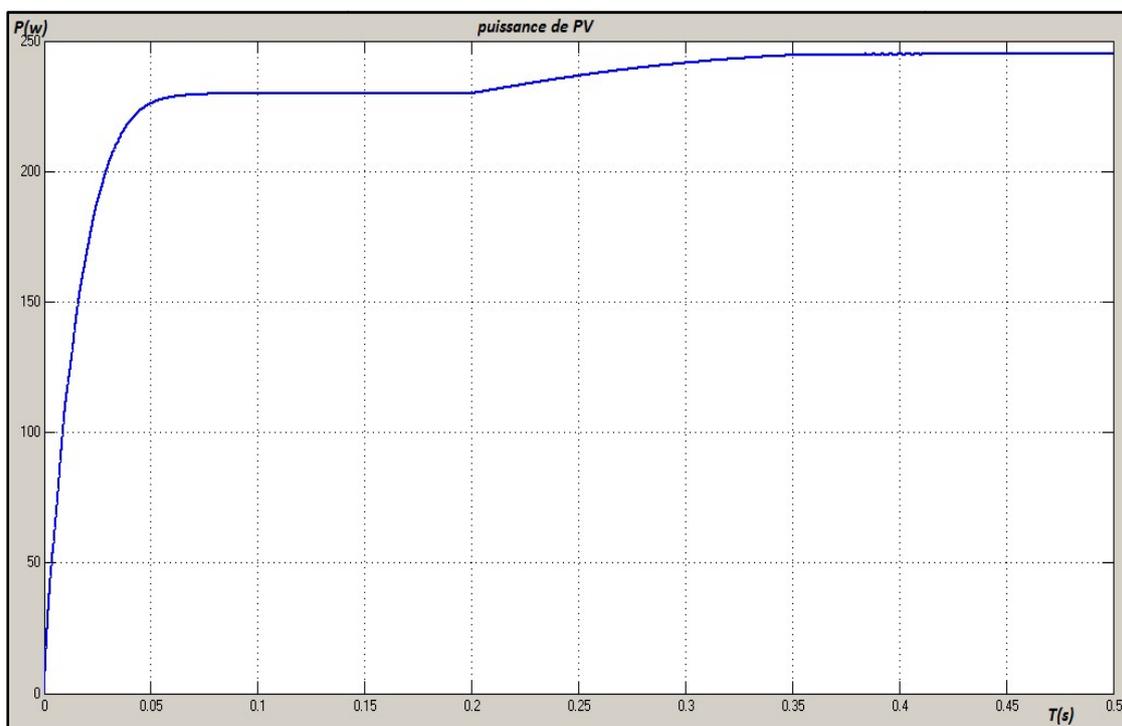
**Figure 4. 19.** Changement de la température de 25°C à 10°C avec un ensoleillement fixe de 1000 w/m<sup>2</sup>.



**Figure 4. 20.** Tension du GPVface à un changement de température de 25C°à 10C° pour la MPPT P&O.



**Figure 4. 21.** tension de la charge face à un changement de température de 25°C à 10°C pour la MPPT P&O.



**Figure 4. 22.** Puissance du GPV à un changement de température de 25°C à 10°C pour la MPPT P&O

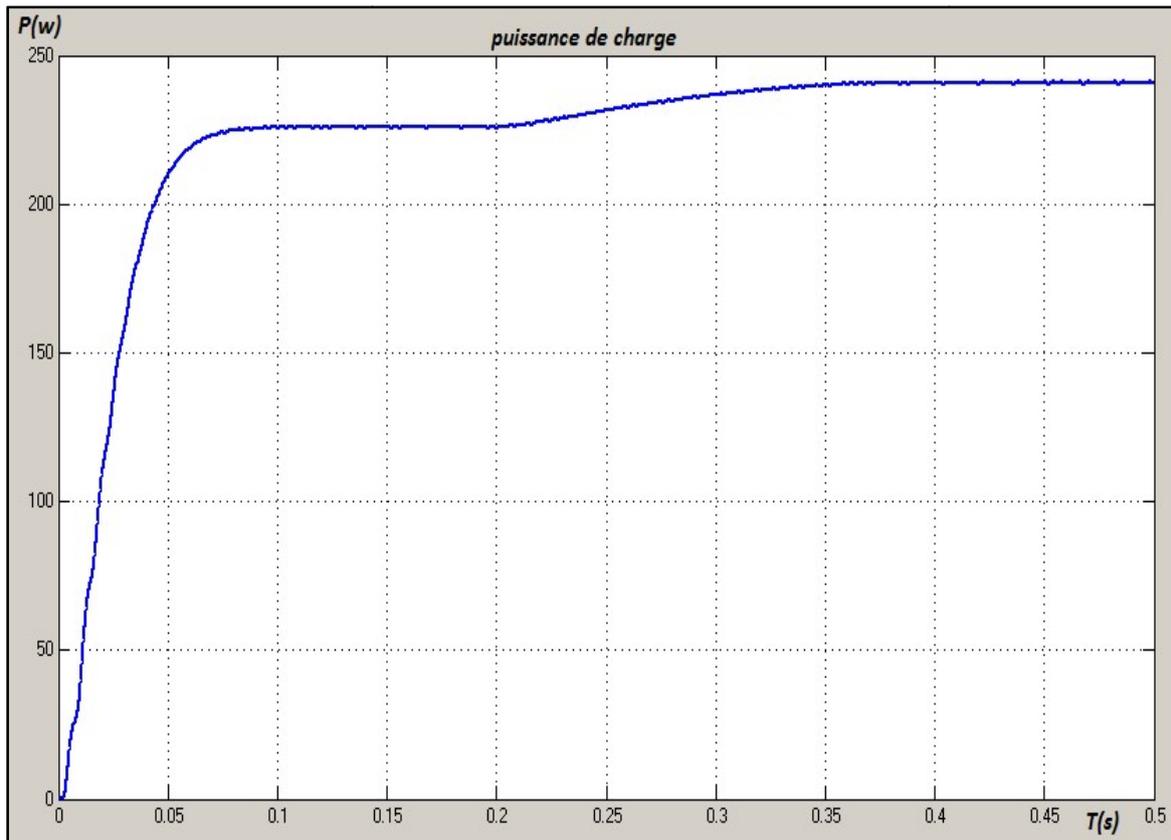
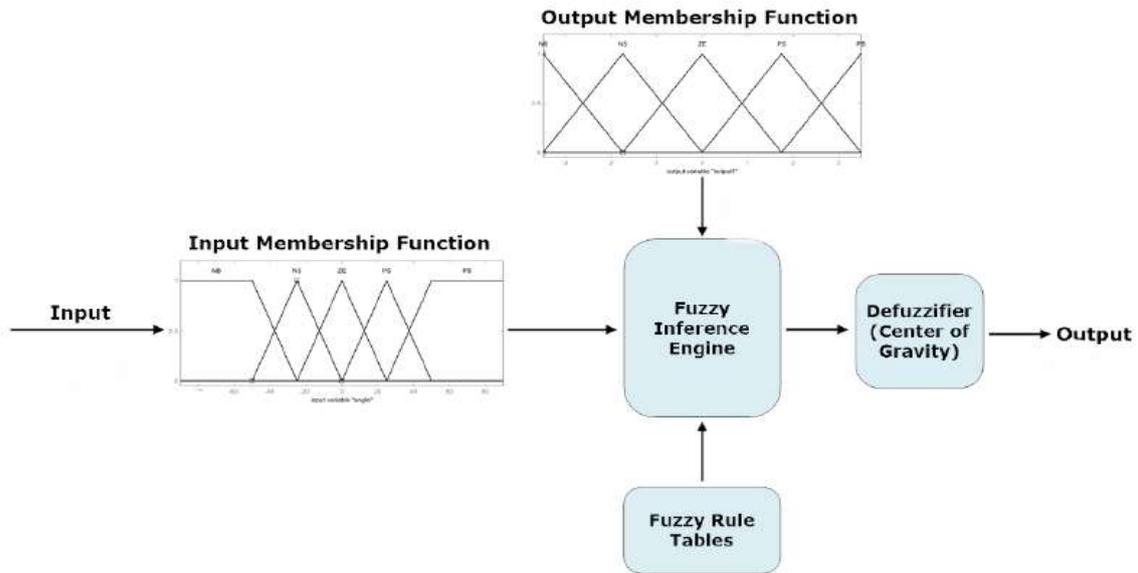


Figure 4. 23. Puissance de la charge à un changement de température de 25°C à 10°C pour la MPPT P&O.

#### 4.4. Principe de poursuite du point de puissance maximale par la logique floue

Le contrôleur flou se compose par les trois blocs suivants : **Fuzzification** des variables d'entrées par l'utilisation des fonctions trapèze et triangulaire et gaussienne, ensuite **l'inférence** où ces variables fuzzifiées sont comparées avec des ensembles prédéfinis pour déterminer la réponse appropriée. Finalement on trouve la **défuzzification** pour convertir les sous-ensembles fuzzifiés en valeurs numériques. La structure de base de la commande floue est donnée par la Figure suivante [37] :



**Figure 4. 24.**Structure de la commande MPPT floue.

Dans le cas étudié, nous allons considérer deux variables d'entrées qui sont l'erreur  $E(k)$  et la variation d'erreur  $\Delta E(k)$  à l'instant  $k$ . ces variables sont fonctions de la puissance et de la tension PV. Elles sont données d'après les équations suivantes [3] :

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (4.2)$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k - 1) \quad (4.3)$$

L'intervalle d'intérêt de chaque variable d'entrée et de la variable de sortie est divisé en cinq classes. Elles sont récapitulées dans le tableau 1.

|               |    |
|---------------|----|
| Négatif Grand | NG |
| Négatif Petit | NP |
| Environ Zéro  | EZ |
| Positif Petit | PP |
| Positif Grand | PG |

**Tableau 4. 1.**Classement des variables d'entre.

Les fonctions d'appartenance, des fonctions floues ou linguistiques, des variables d'entrée et de sortie sont données par la figure (4.25)

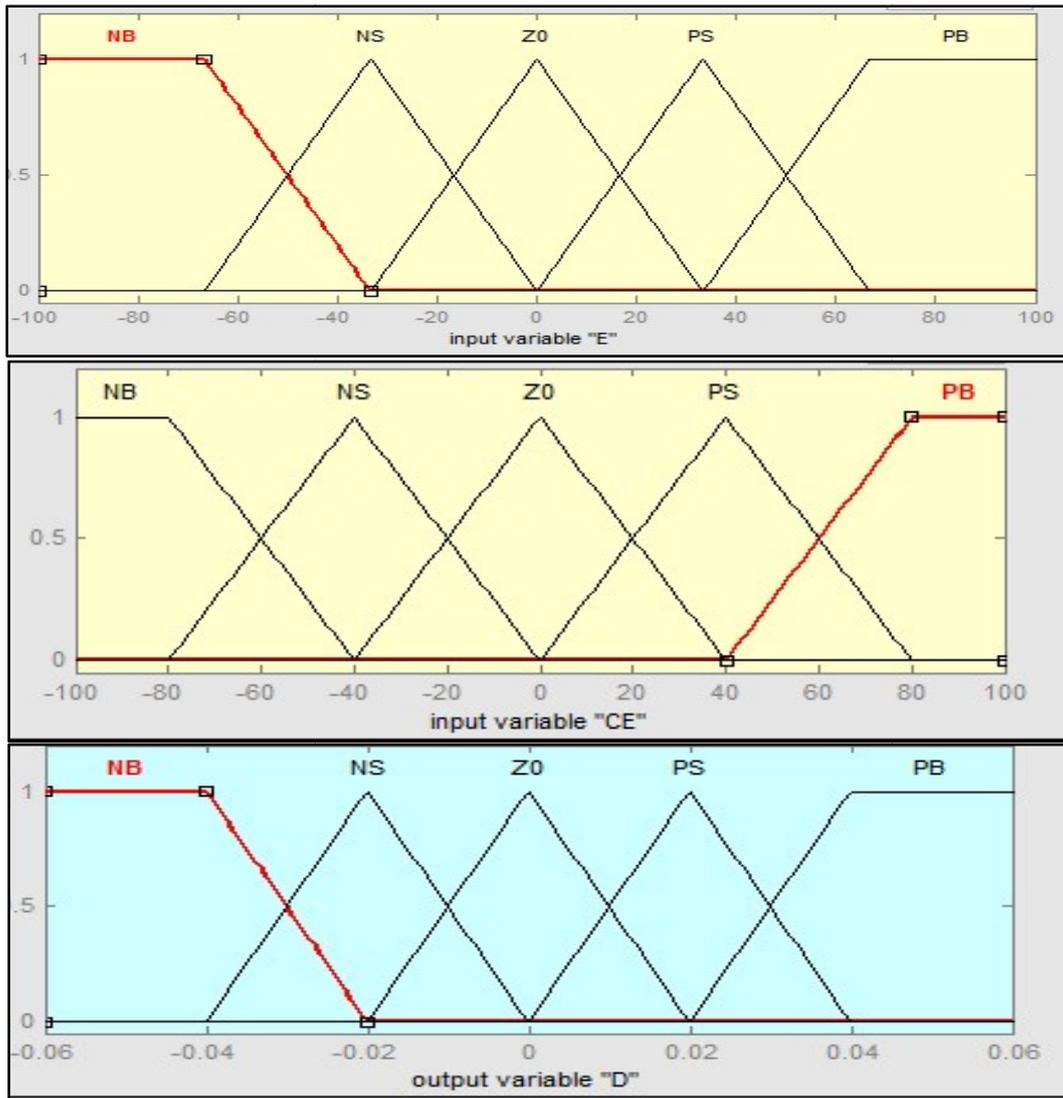


Figure 4. 25. Fonction d'appartenance de chacune des variables linguistiques.

Dans la deuxième étape, nous allons définir le rapport logique entre les entrées et la sortie. Même, nous allons fixer des règles d'appartenance pour la sortie comme il est fait pour les entrées. Grâce à ces règles nous avons dressé le tableau d'inférence suivant :

| $\Delta E$<br>E | NG | NP | EZ | PP | PG |
|-----------------|----|----|----|----|----|
| NG              | EZ | EZ | NG | NG | NG |
| NP              | EZ | EZ | NP | NP | NP |
| EZ              | NP | EZ | EZ | EZ | PP |
| PP              | PP | PP | PP | EZ | EZ |
| PG              | PG | PG | PG | EZ | EZ |

Tableau 4. 2. Table d'inférence.

On peut représenter les 25 relations différence de tableau 2 sous forme de graphe 3D comme le montre dans la figure suivante :

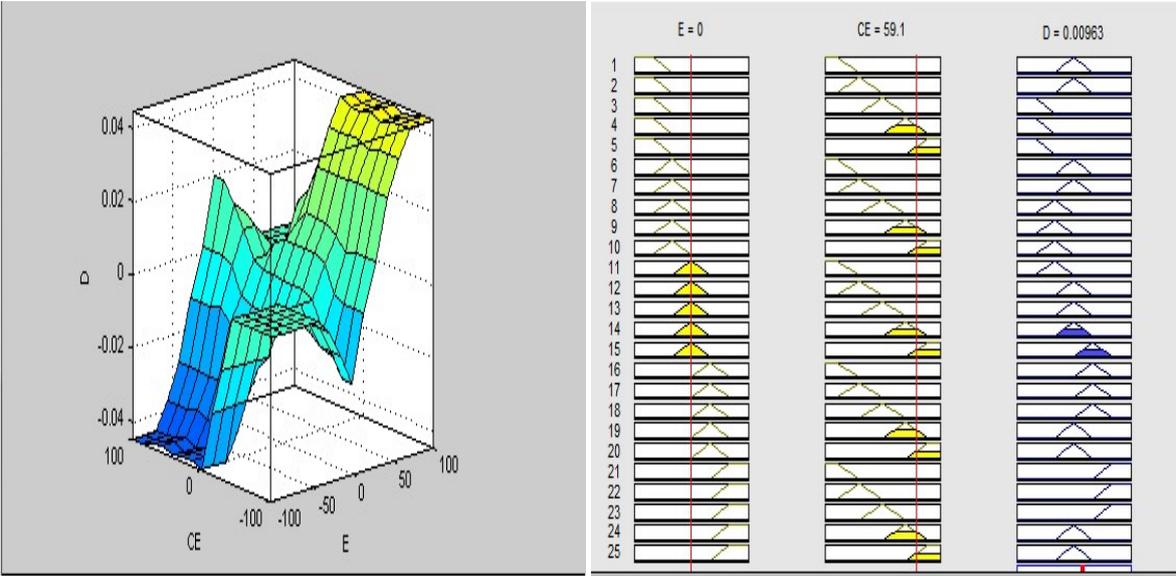


Figure 4. 26.Le graphe 3D des règles de contrôle floue.

4.4.1. Simulation de la méthode MPPT logique floue

La figure (4.27) illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande de poursuite MPPT floue



Figure 4. 27.Schéma block de la commande MPPT logique floue.

#### 4.4.2. Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge)

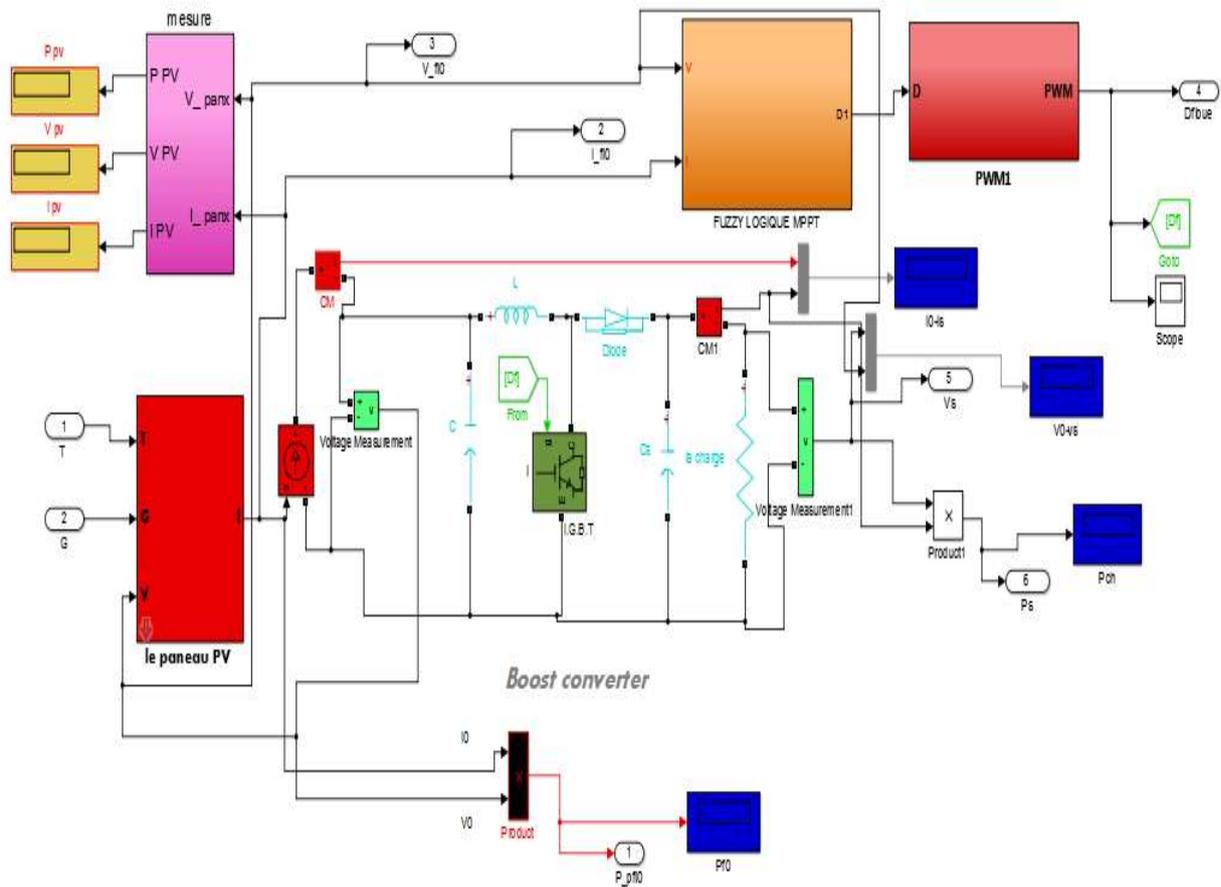


Figure 4. 28. Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la Commande MPPT floue

#### 4.5. Résultat de simulation de la commande MPPT logique floue

Dans cette partie nous effectuons une simulation de la commande MPPT logique floue pour les trois cas suivants :

- ✚ Le cas où la température et l'éclairement sont fixes.
- ✚ Cas d'une température constante (25°C) et l'éclairement variable.
- ✚ Cas de la température variable et l'éclairement fixe 1000 w/m<sup>2</sup>.

### 4.5.1. Cas où la température et l'éclairement sont fixes

Les figures (4.29) à (4.35) représentent Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « logique floue».

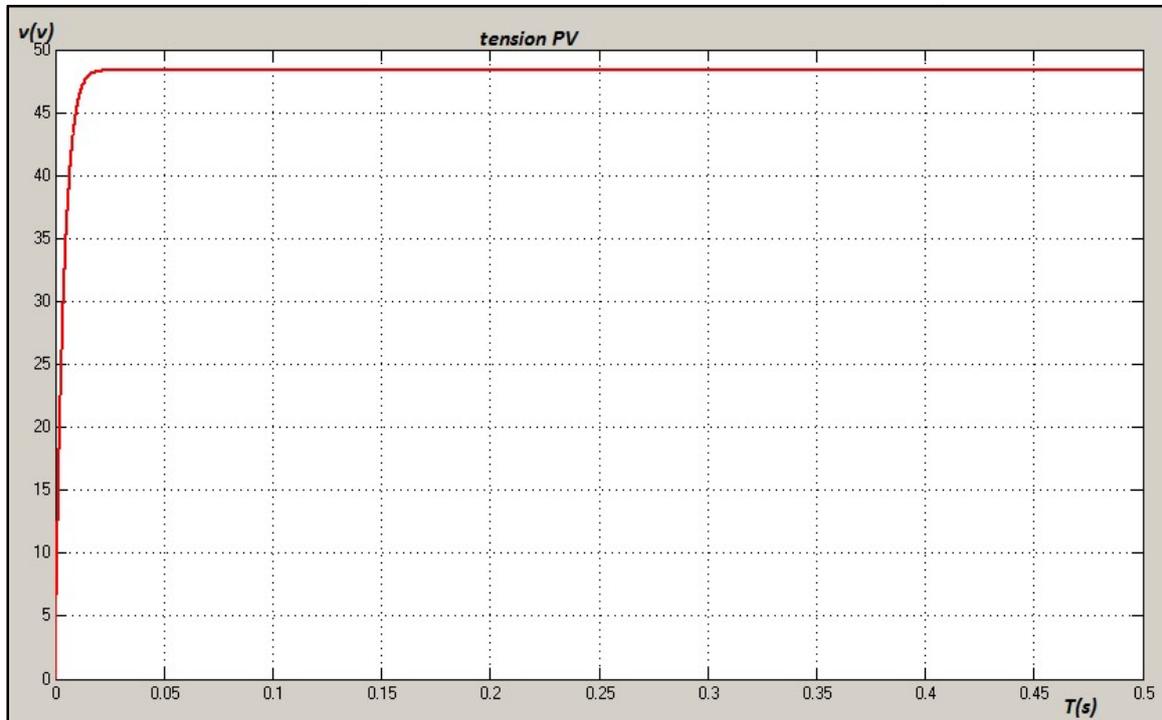


Figure 4. 29. Résultats de simulation de la tension générée par le GPV pour  $E=1000W/m^2$  et  $T=25C^\circ$

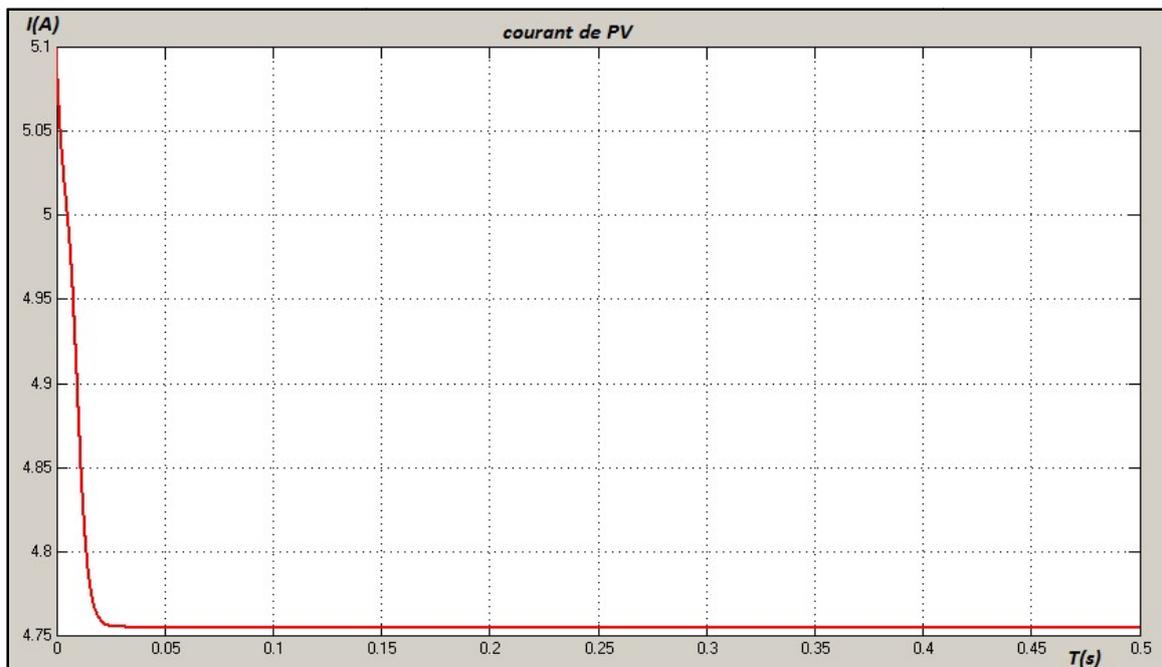
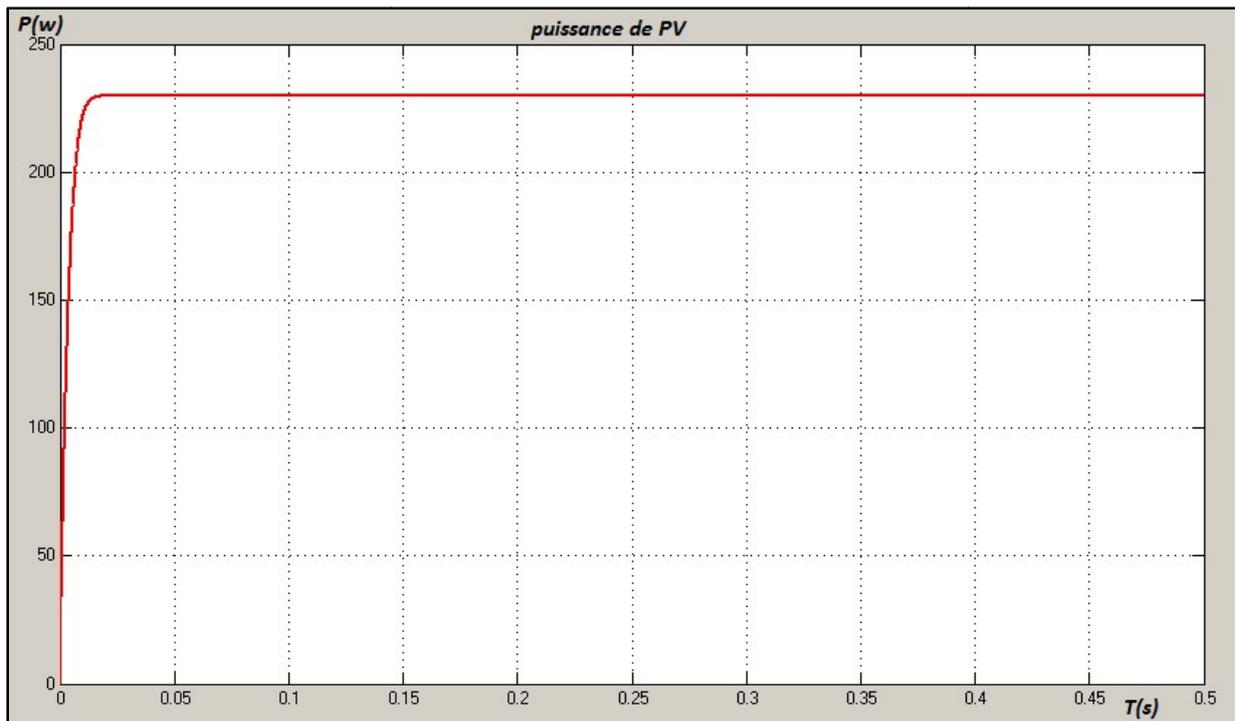
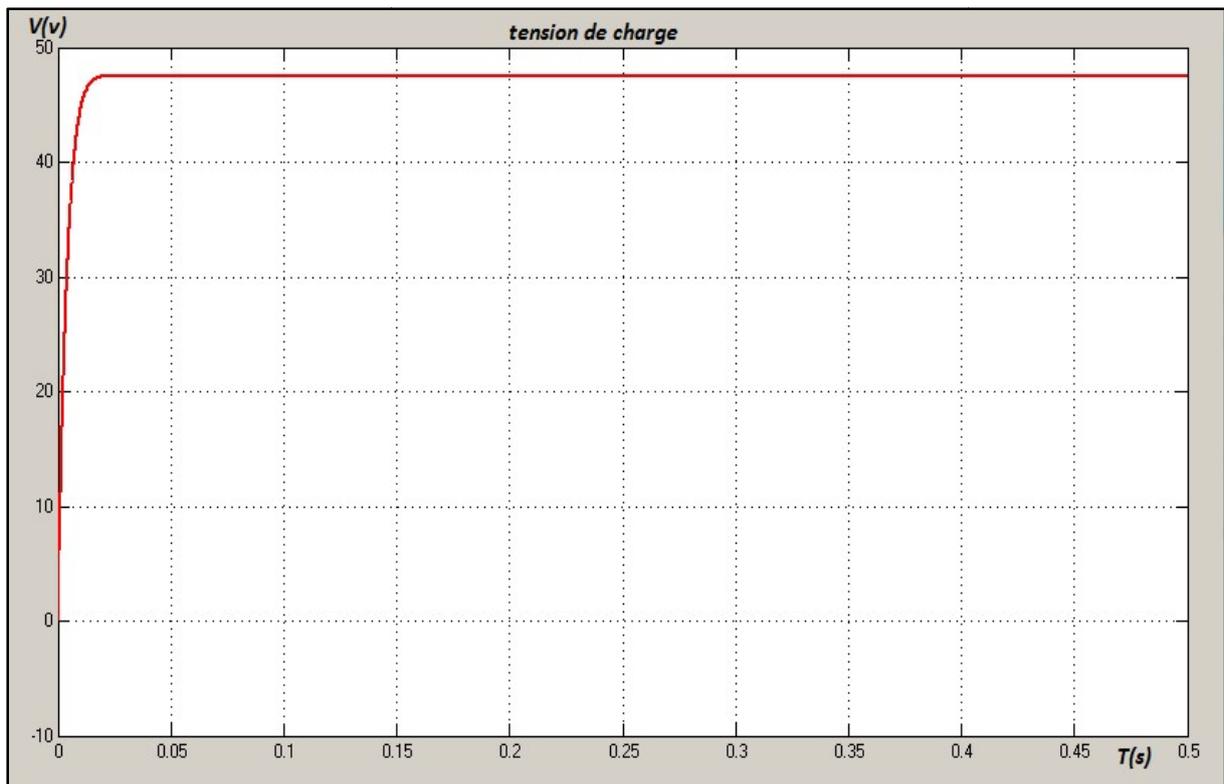


Figure 4. 30. Résultats de simulation du courant généré par le GPV pour  $E=1000W/m^2$  et  $T=25C^\circ$



**Figure 4. 31.** Résultats de simulation du la puissance généré par le GPV pour  $E=1000W/m^2$  et  $T=25C^\circ$



**Figure 4. 32.** Résultats de simulation de tension de sortie du système pour  $E=1000W/m^2$  et  $T=25C^\circ$

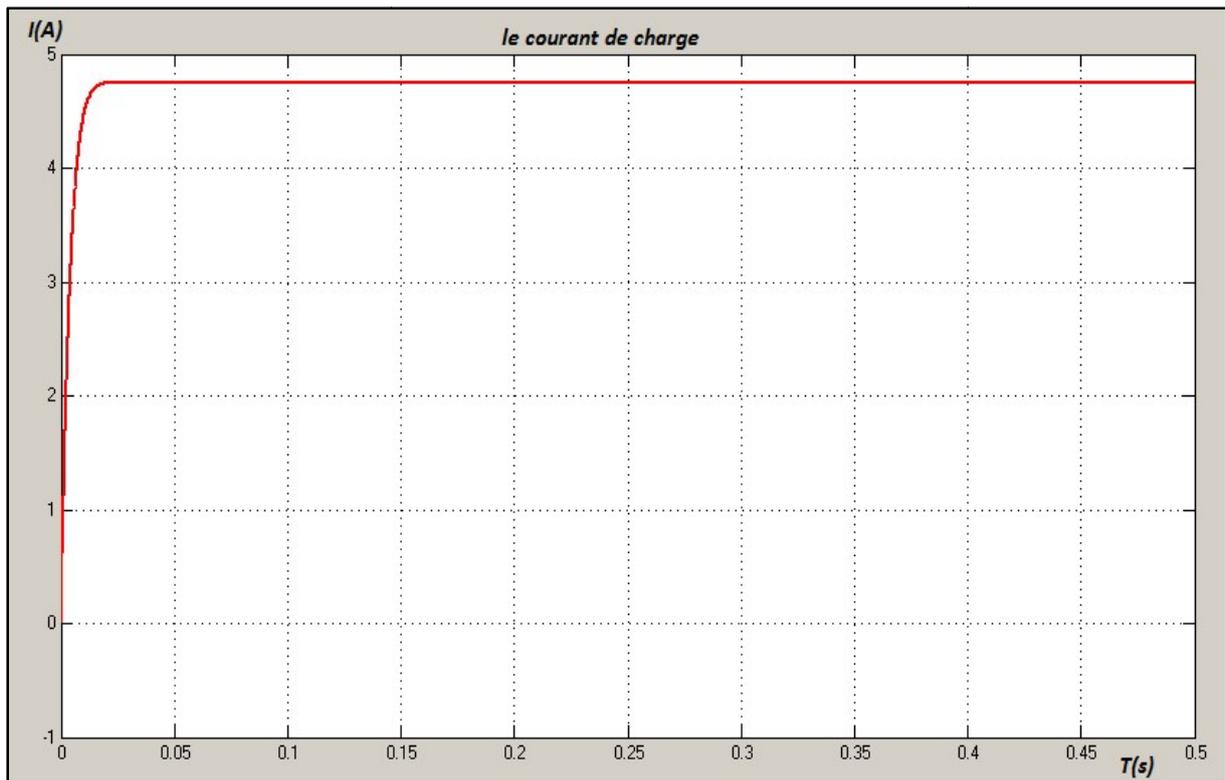


Figure 4. 33. Résultats de simulation de courant de sortie du système pour  $E=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$

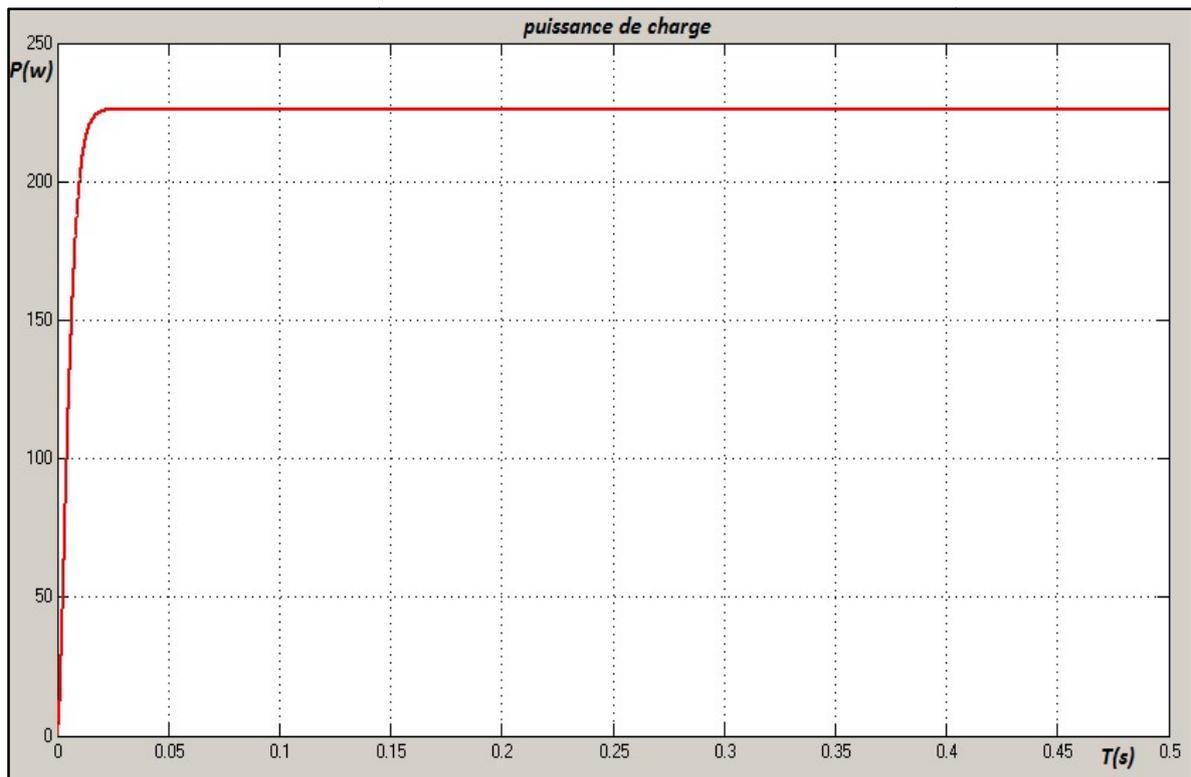
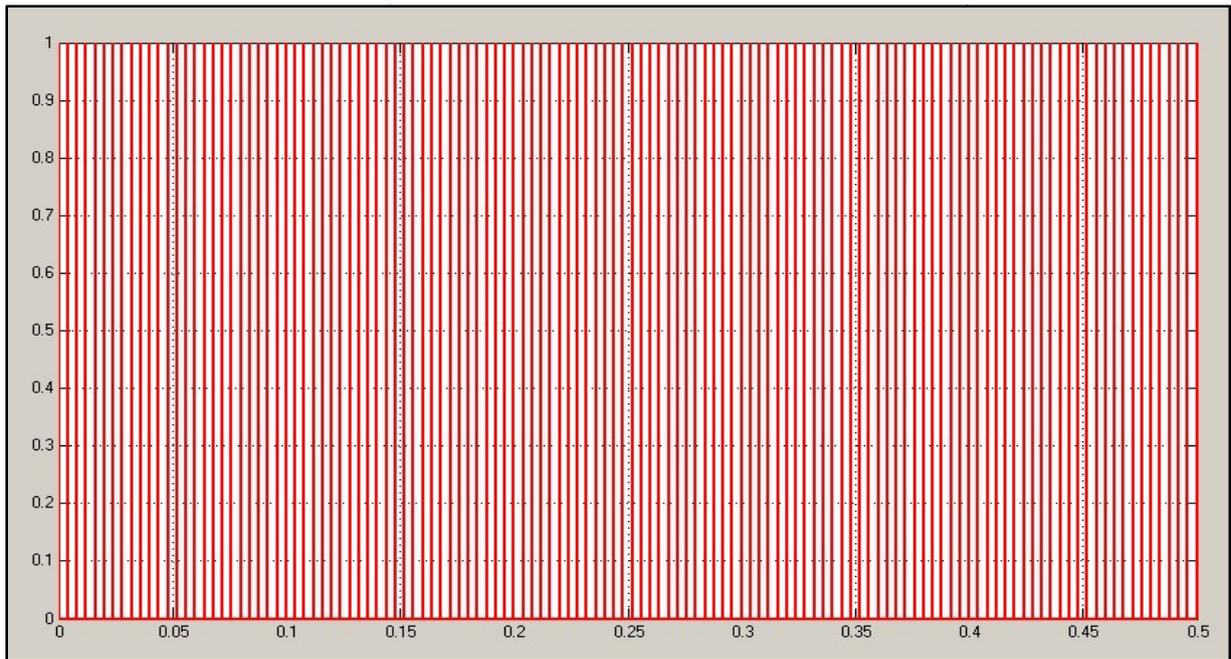


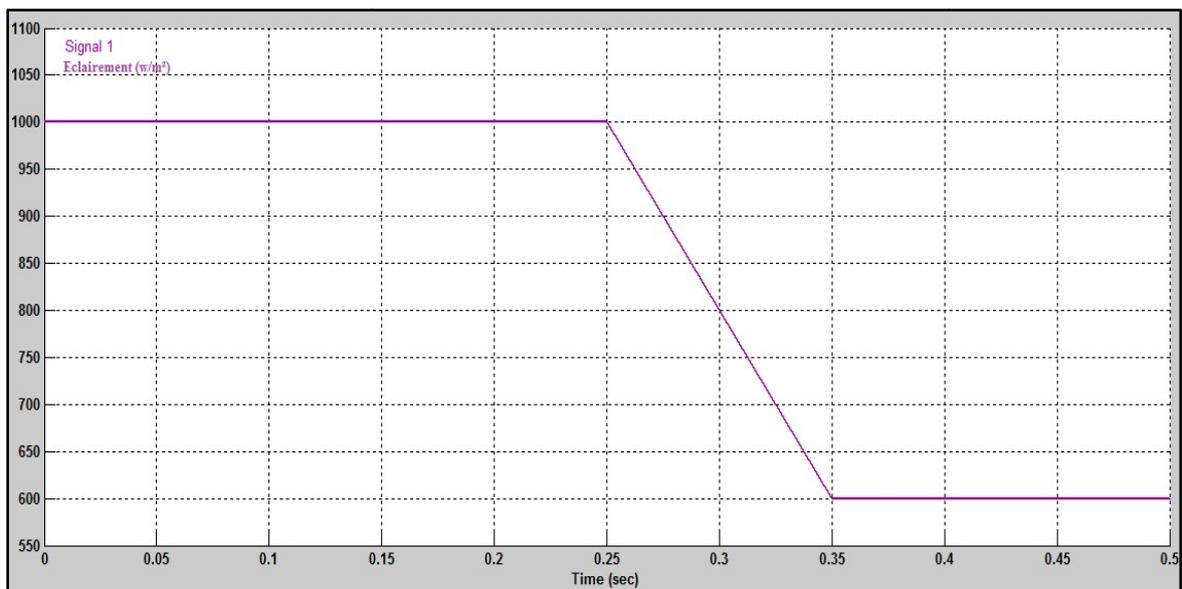
Figure 4. 34. Résultats de simulation de la puissance de sortie du système pour  $E=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$



**Figure 4. 35.**Rapport cyclique $\alpha$ de MPPTfloue.

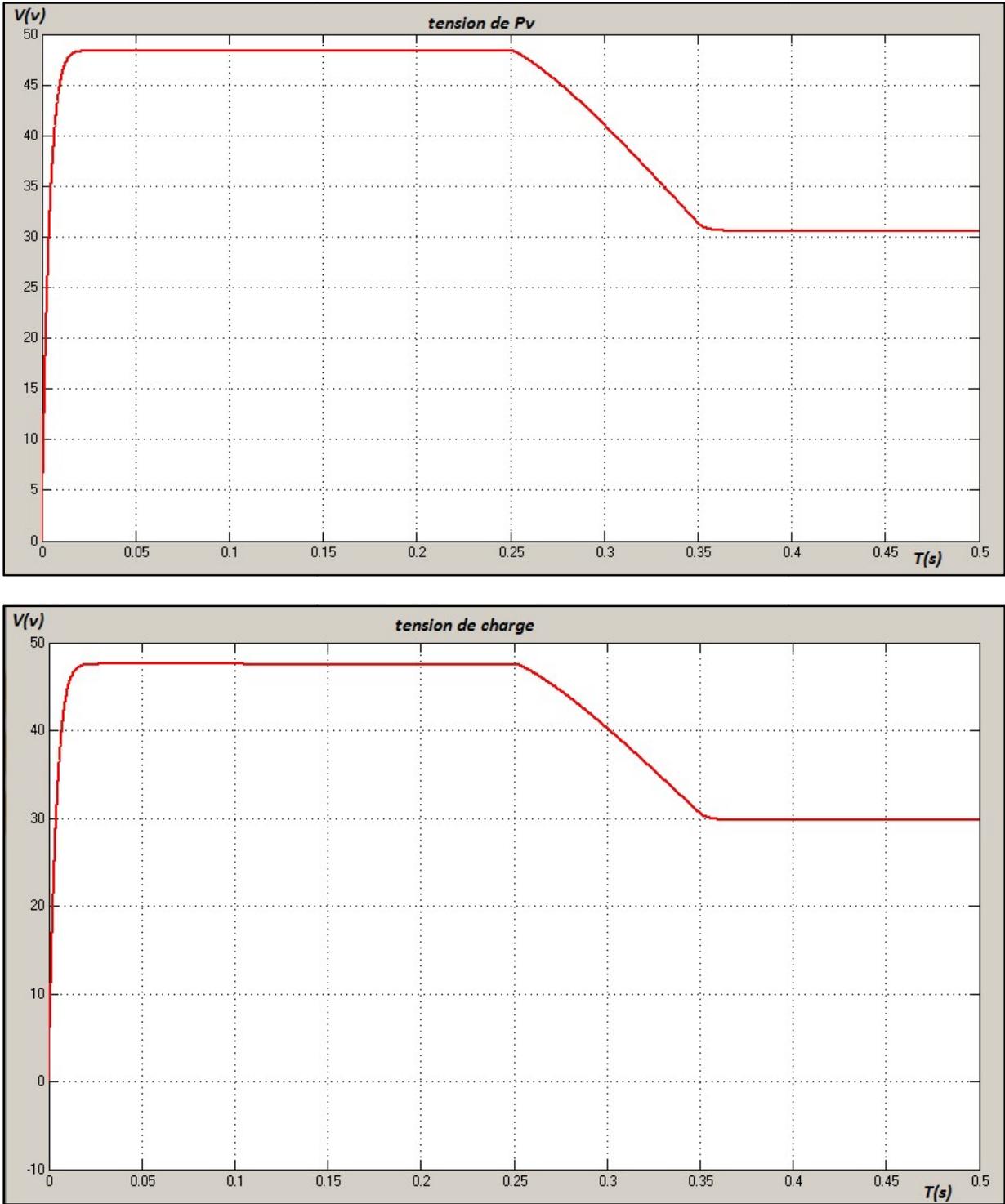
#### 4.5.2. Cas d'une température constante (25°C) et l'éclairement variable.

Les figures (4.37, 4.38) montrent les résultats de simulation obtenus avec diminution lente de 1000W/m<sup>2</sup> à 600W/m<sup>2</sup> dans un intervalle de 0.1s du niveau de rayonnement. Ces changements sont représentés par la figure suivante. La température ambiante reste constante et égale à 25°C.



**Figure 4. 36.**Changement de l'éclairement de 1000W/m<sup>2</sup> à 500W/m<sup>2</sup> avec une température fixe de 25°C.

La figure (4.37) représente la tension du générateur photovoltaïque, la tension de la charge a un changement d'ensoleillement de 1000W/m<sup>2</sup> à 600W/m<sup>2</sup>. On remarque que La courbe de tension de la charge et la tension d'entrée du GPV suit le changement d'ensoleillement.



**Figure 4. 37.**Tension du GPV, tension de la charge face à un changement de l'éclairage de 1000W/m<sup>2</sup> à 600W/m<sup>2</sup> pour la MPPT logique floue.

pour la commande MPPT floue on remarque l'effet de la diminution rapide de la puissance du GPV causée par une diminution de l'éclairement Dans les mêmes conditions  $1000\text{W/m}^2$  à  $600\text{W/m}^2$  et température fixe  $25\text{C}^\circ$  comme le montre la figure (4.38).

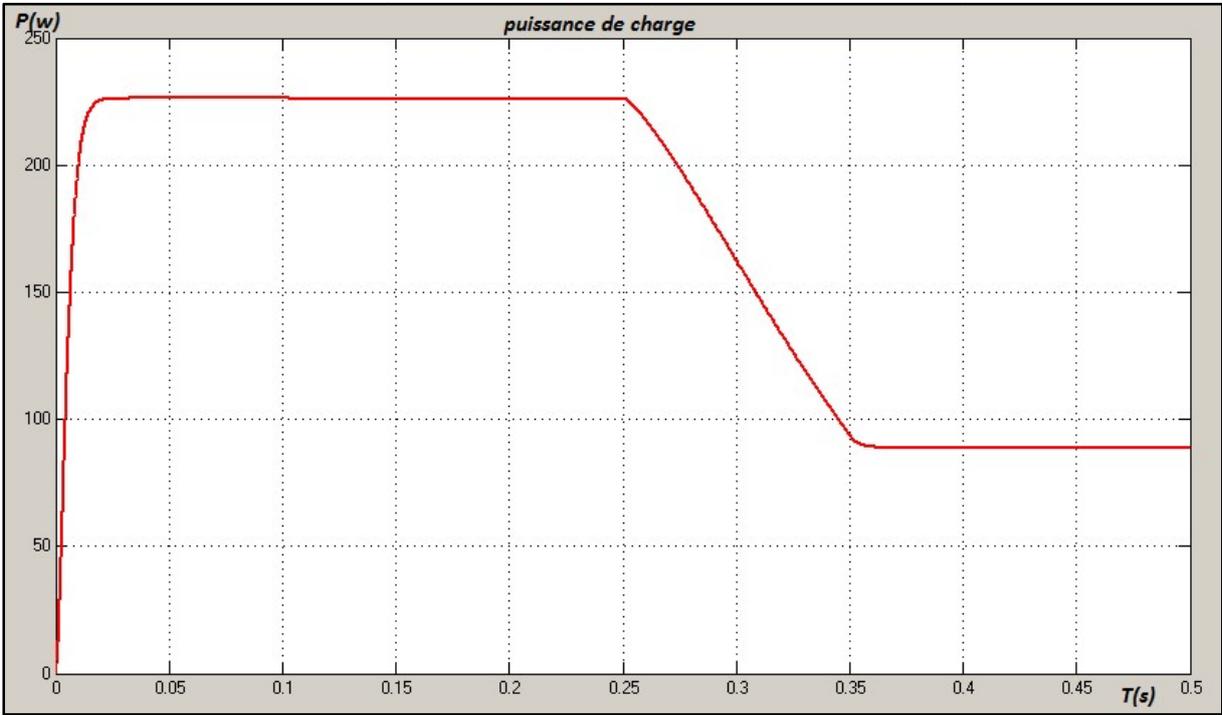


Figure 4. 38. Puissance du GPV et Puissance de la charge face à un changement de l'éclairement de  $1000\text{W/m}^2$  à  $600\text{W/m}^2$  pour la MPPT logique floue.

### 4.5.3. Cas de la température variable et l'éclairement fixe 1000 w/m2

Les figures (4.40, 4.43) montrent les résultats de simulation obtenus pour avec diminution de température 25°C jusqu' 10°C dans un intervalle de 0.15s, L'éclairement reste constante et égale 1000w/m2, Cette diminution presque ne produit aucun changement sur les tensions du GPV et de la charge. Ces changements sont représentés par la figure suivante :

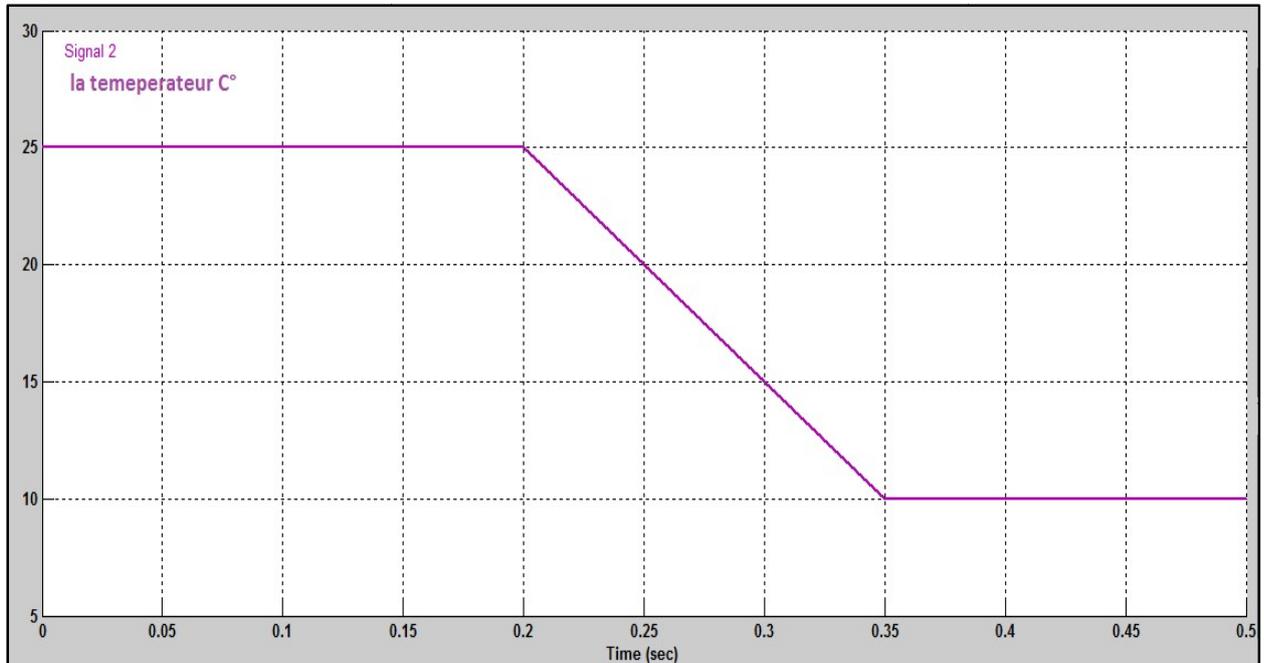


Figure 4. 39.Changement de la température de 25°C à 10°C avec un ensoleillement fixe de 1000 w/m<sup>2</sup>

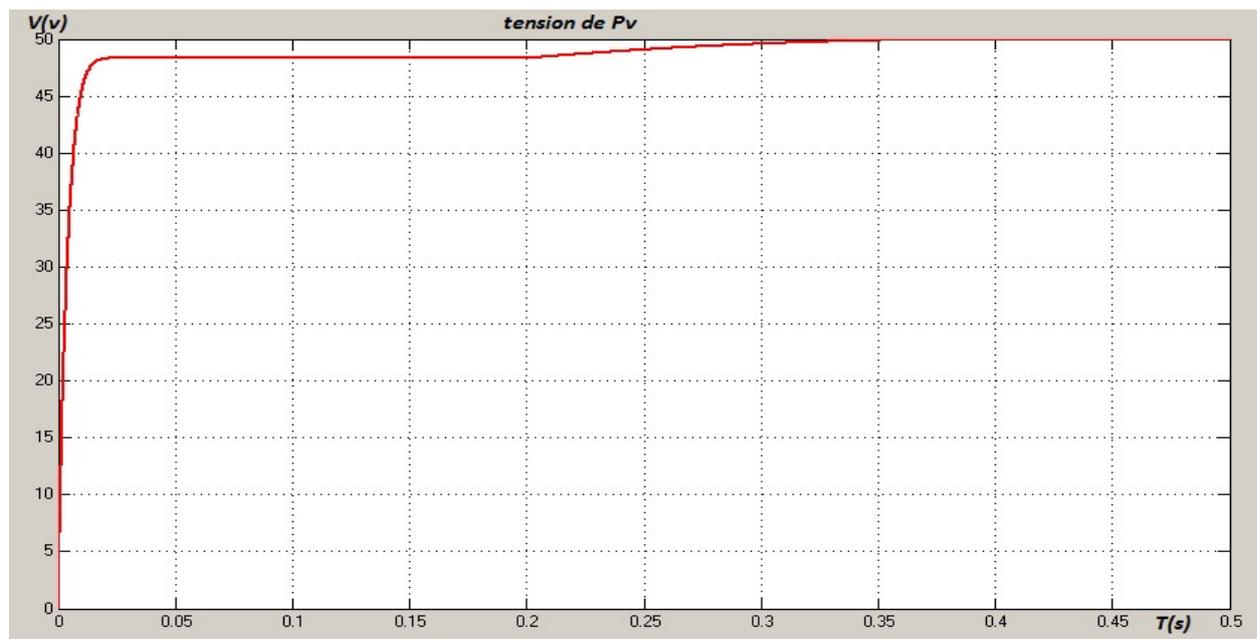
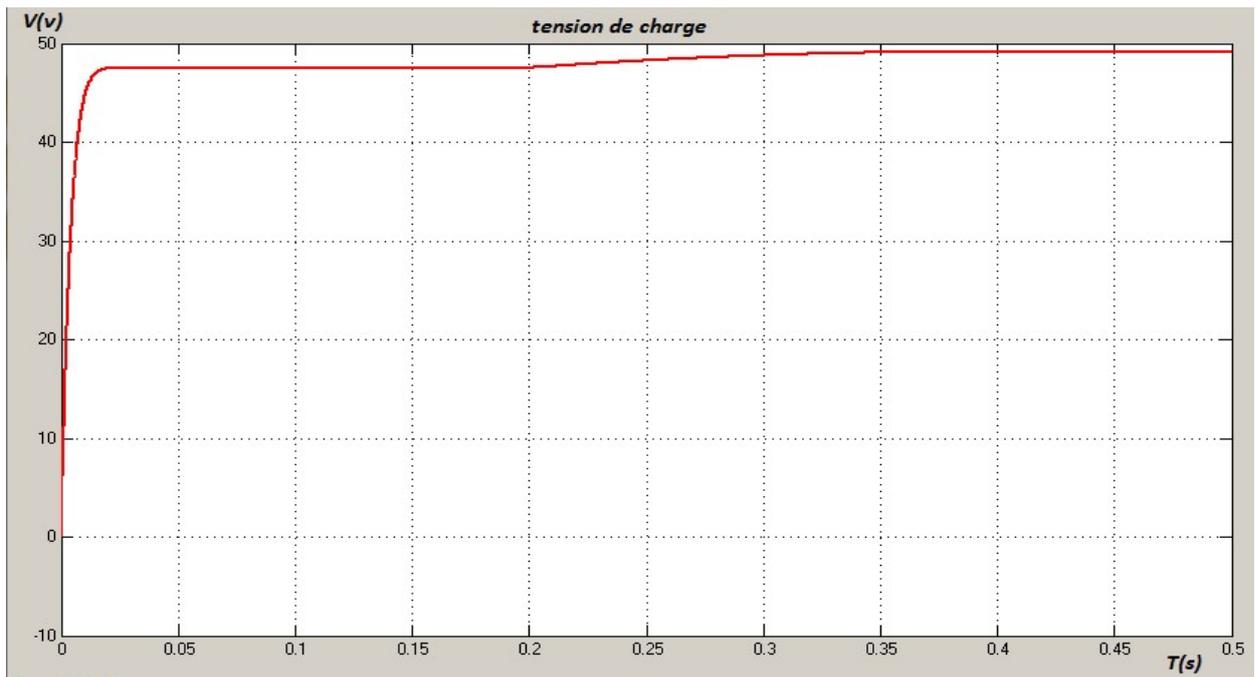
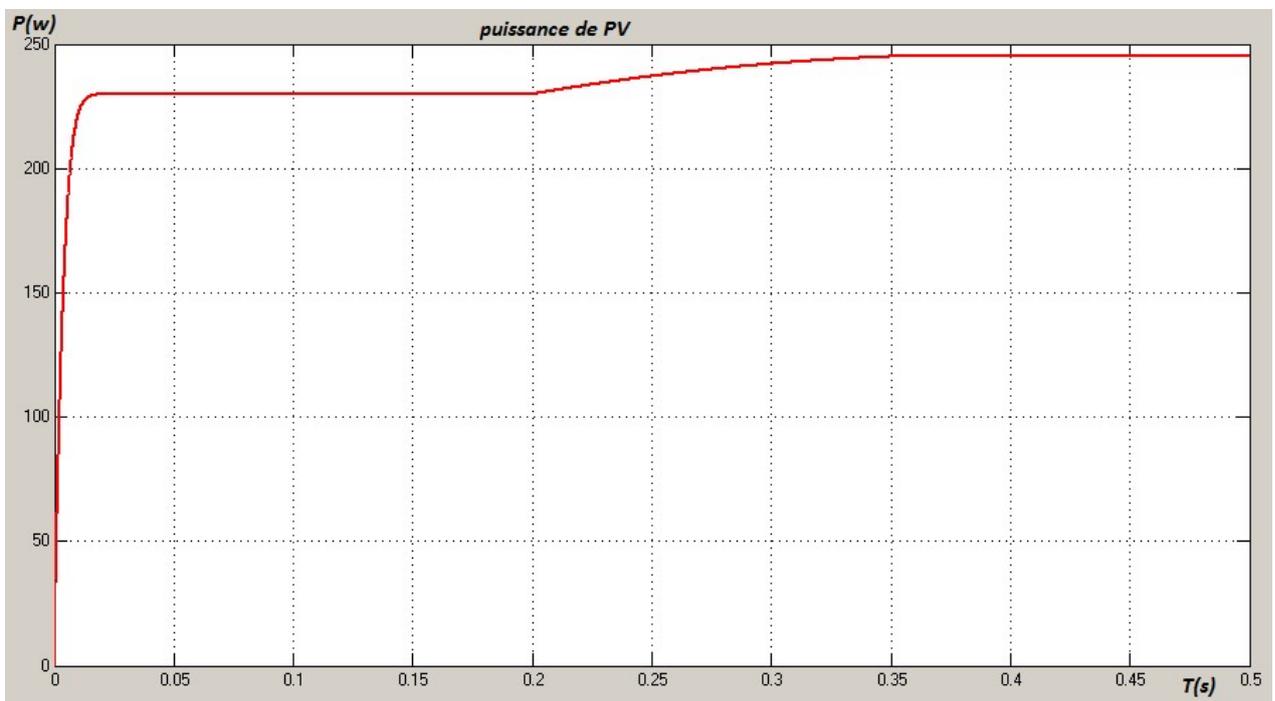


Figure 4. 40.Tension du GPV face à un changement de température de 25°C à 10°C pour la MPPT logique floue



**Figure 4. 41.** Tension de la charge face à un changement de température de 25°C à 10°C pour la MPPT logique floue.



**Figure 4. 42.** Puissance du GPV à un changement de température de 25°C à 10°C pour la MPPT logique floue.

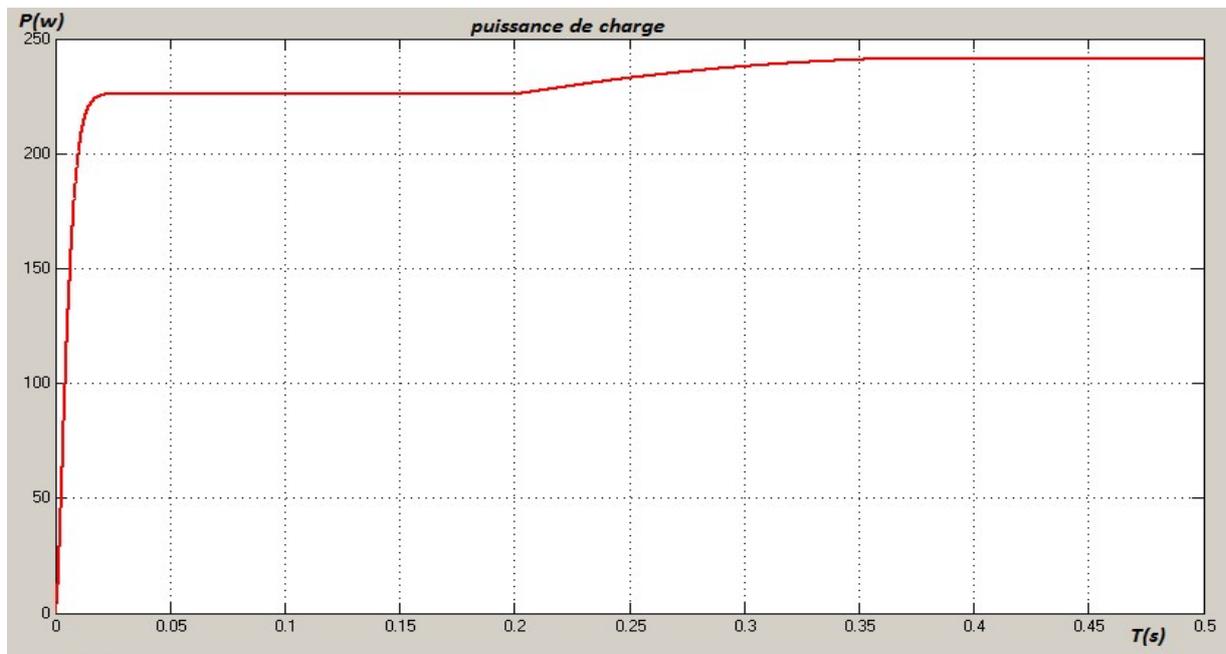
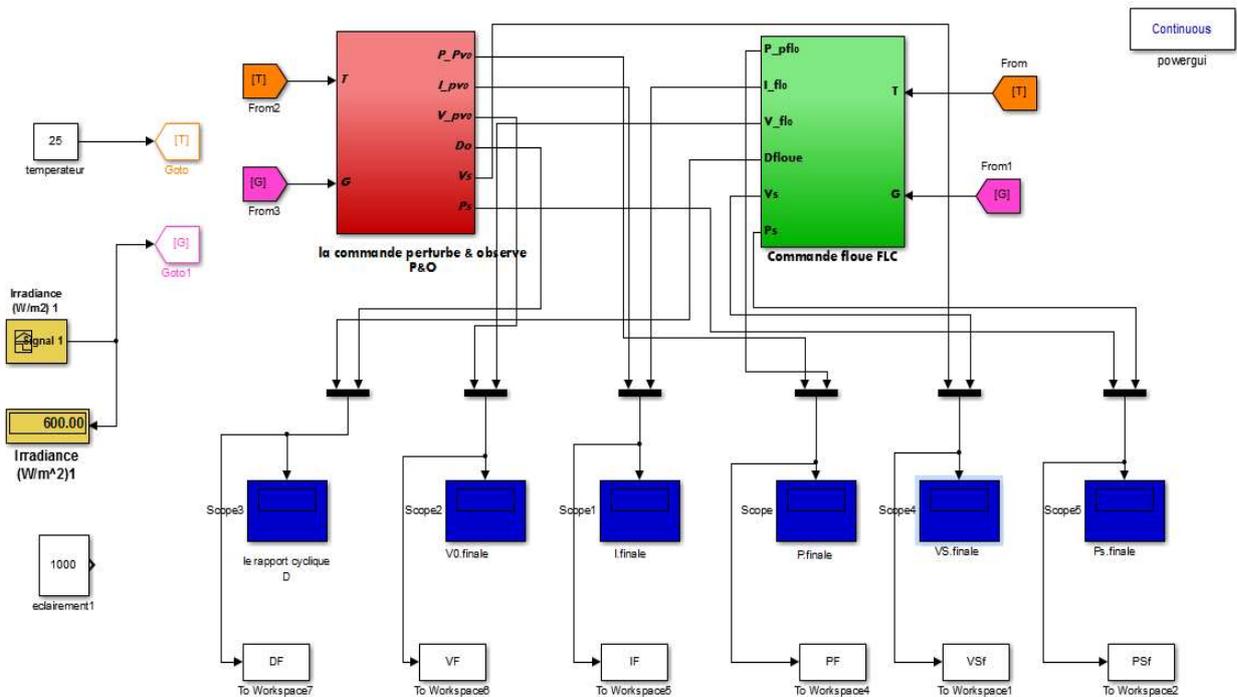


Figure 4. 43. Puissance de la charge à un changement de température de 25°C à 10°C pour la MPPT logique floue.

#### 4.6. Comparaison entre les méthodes P&O et logique floue

La figure (4.44) donne le modèle de simulation du système de conversion d'énergie photovoltaïque tel qu'il a été dans Simulink. On peut facilement identifier le modèle du Panneau photovoltaïque, le convertisseur DC-DC, la charge et les deux méthodes poursuit du MPPT

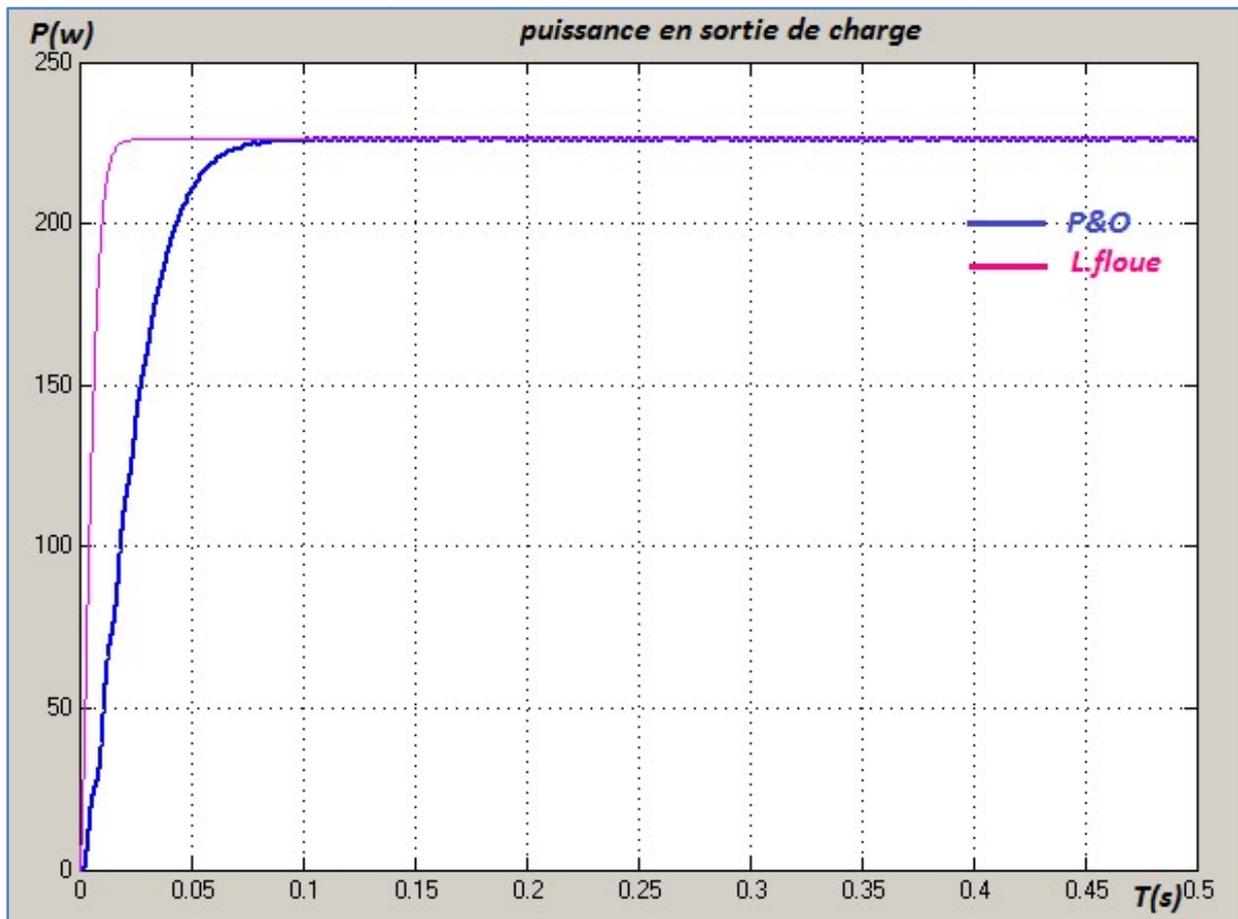


**Figure 4. 44.** Système permettant la simulation Globale du comportement du GPV

Dans tout ce qui suit la période de simulation est fixé à 0.5 ( $T_e = 0.5s$ ), la charge utilisée est une résistance dont la valeur est égale à 10 ohm et les cordonnés du point MPP sous conditions climatiques standards sont ( $P_{mpp}, V_{mpp}, I_{mpp}$ ) = (229.9W, 48.32V, 4.75A).

#### 4.6.1. Fonctionnement sous des conditions climatiques standards

Les conditions atmosphériques choisies pour la simulation, dans cette partie, Correspondent aux conditions nominales de fonctionnement (un rayonnement de 1KW/m<sup>2</sup> et une température de 25°C). La puissance désirée en sortie du GPV est donc 229.9W. Pour cette partie, l'objectif est de faire une étude comparative entre la méthode P&O et La méthode logique floue sous des conditions climatiques standards.



**Figure 4. 45.** La puissance optimale en sortie de la charge.

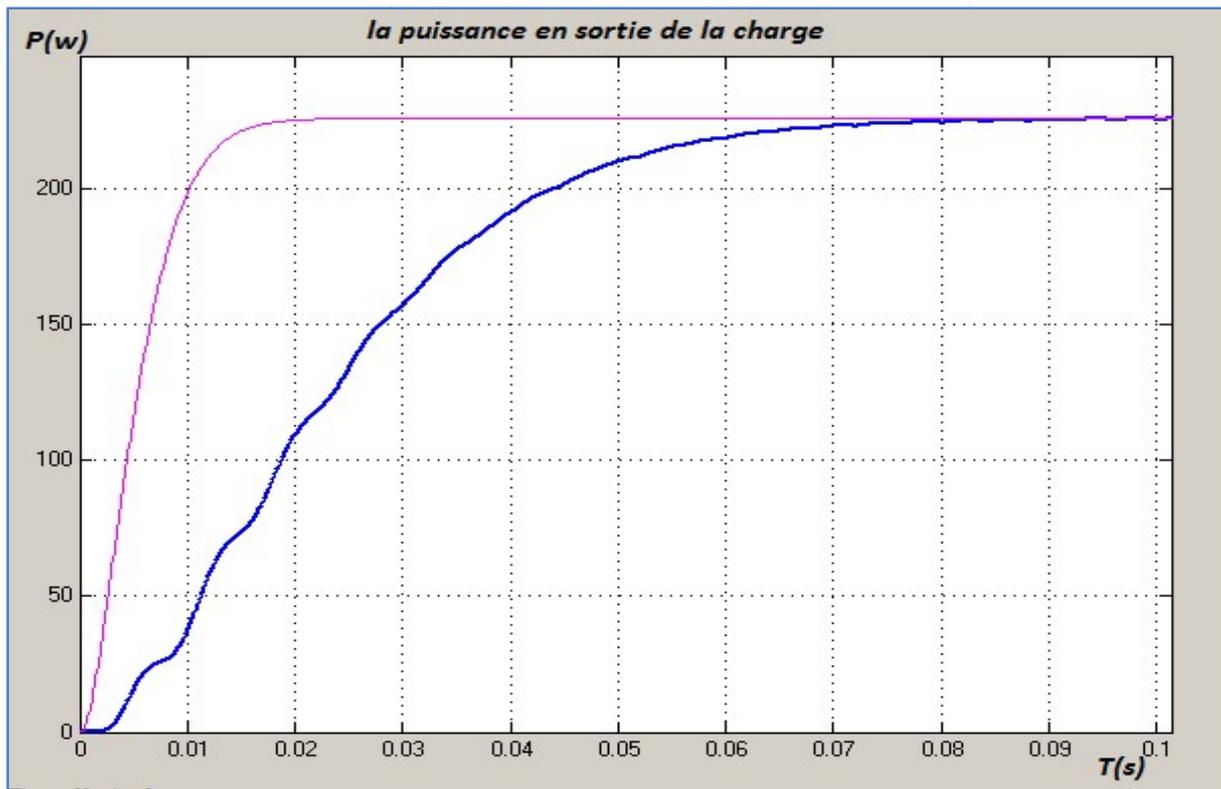


Figure 4. 46.Zoom sur la puissance en sortie de la charge.

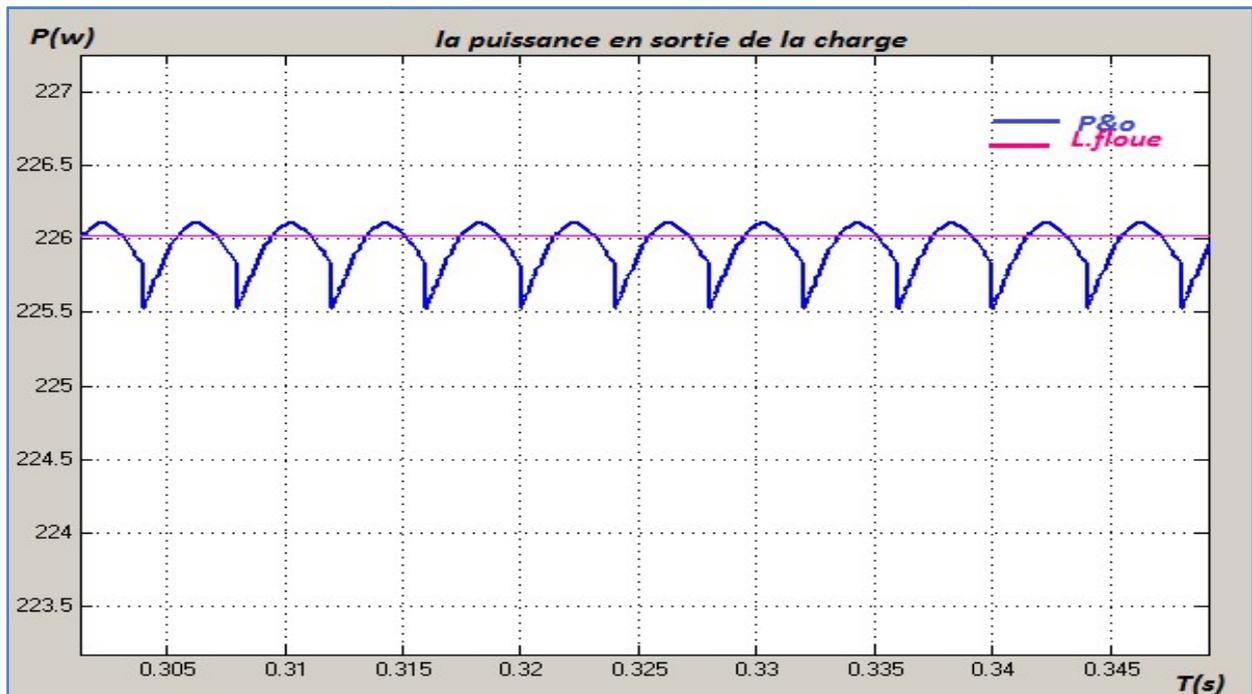


Figure 4. 47.Les perturbations de la puissance en sortie du charge pour MPPT P&O et logique floue.

Les figures de simulation précédentes montrent que le système photovoltaïque converge vers les valeurs optimales.

#### 4.6.2. Performance sous des changements brusques du niveau de rayonnement

On considère la variation de l'éclairement donné par les figures (4.48). Les figures (4.49) et (4.50) illustrent l'évolution de la puissance aux bornes de la charge.

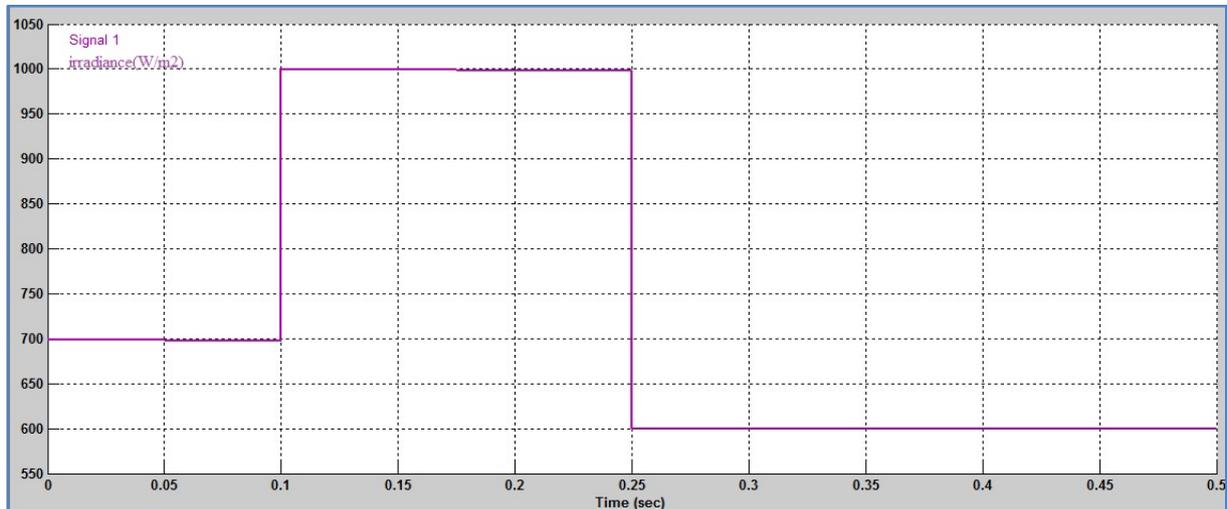


Figure 4. 48.L'évolution de l'éclairement.

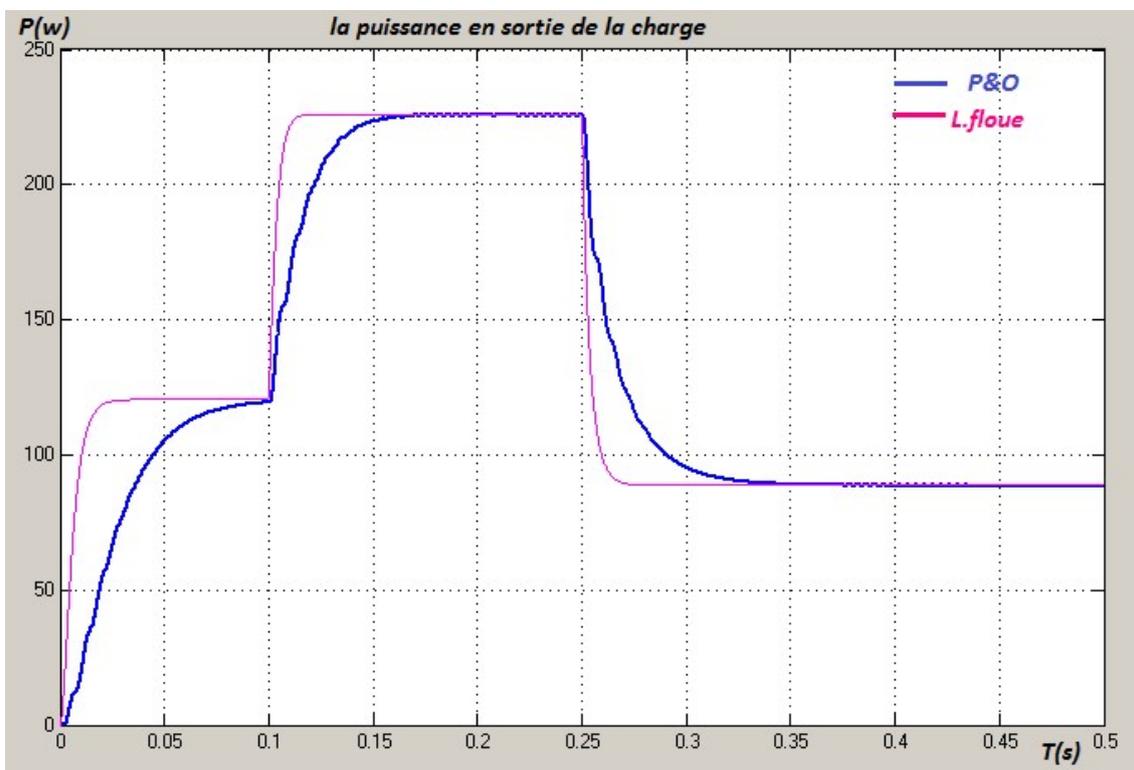


Figure 4. 49.Puissance en sortie de la charge avec des changements brusques au niveau de rayonnement.

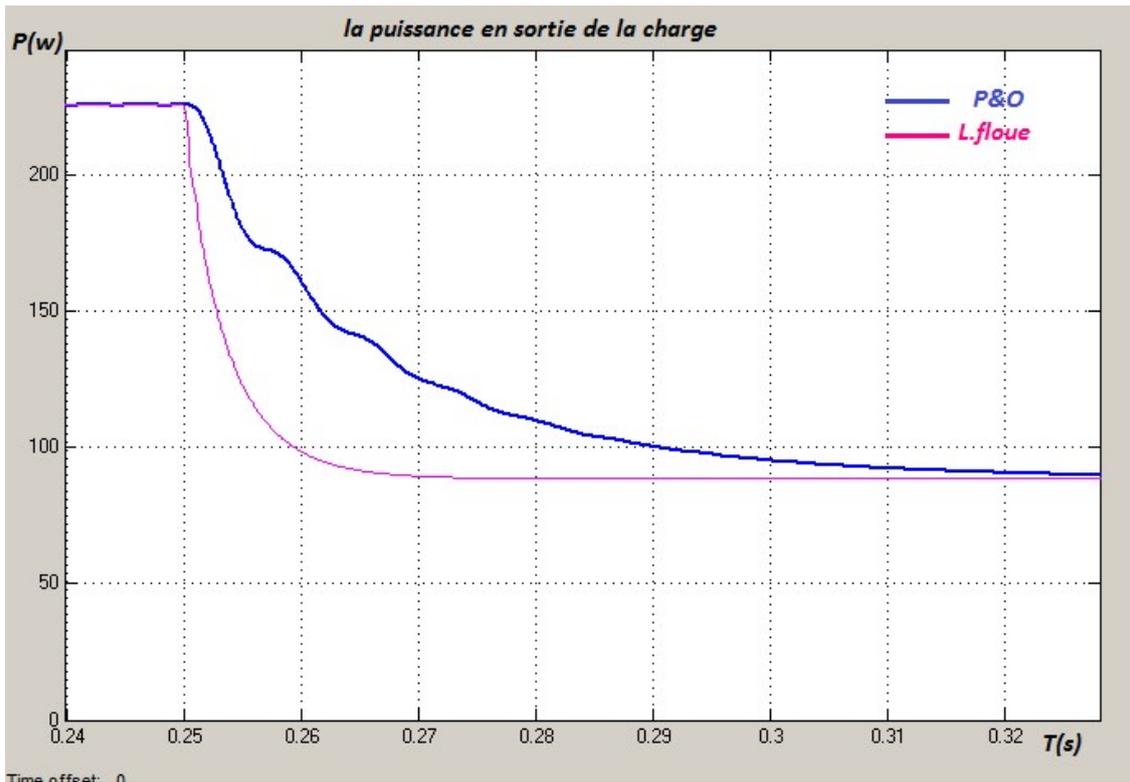


Figure 4. 50.Zoom sur la puissance en sortie de la charge entre 0.24s et 0.32s.

#### 4.6.3. Performance sous des changements brusques du niveau de température

On considère les variations de l'éclairage données par les figures (4.51). Les figures (4.52et 4.53) illustrent l'évolution de la puissance aux bornes de la charge.

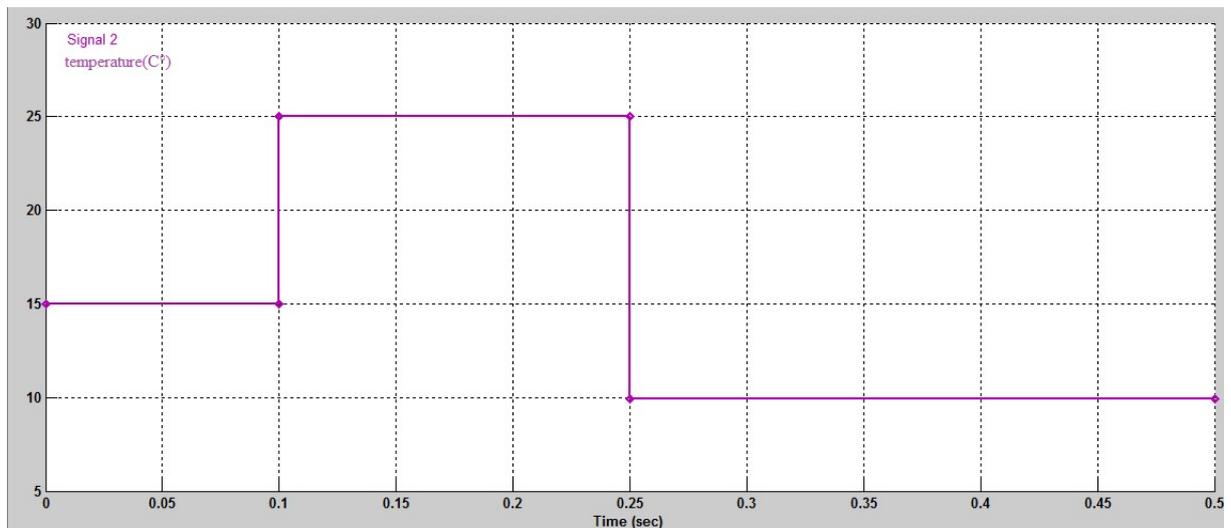


Figure 4. 51.L'évolution de la température.

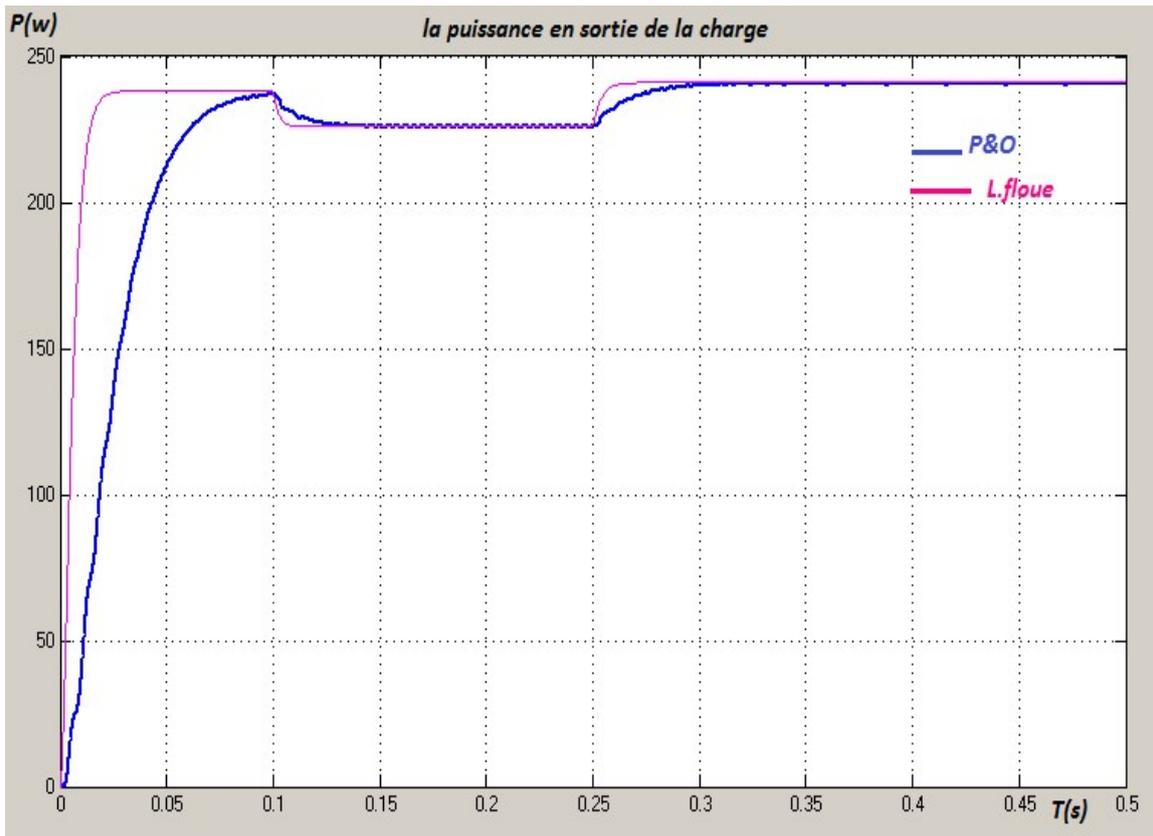


Figure 4. 52. Puissance en sortie de la charge avec des changements brusques au niveau de température.

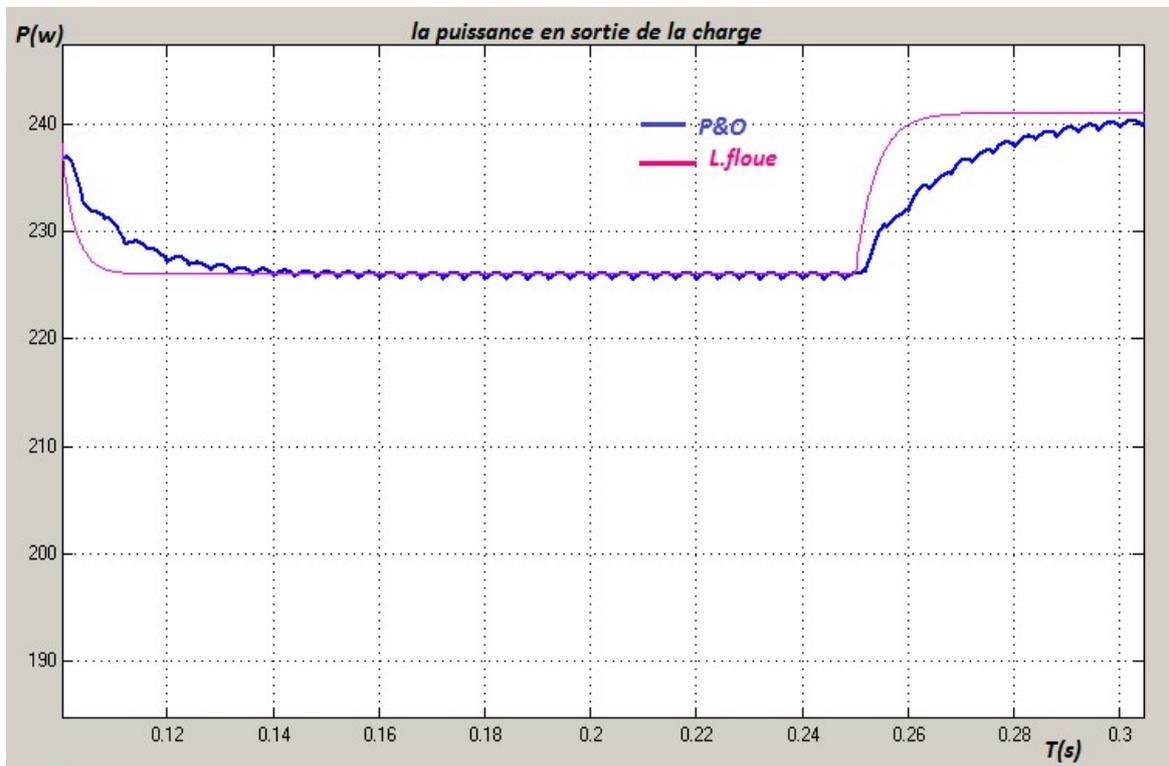


Figure 4. 53. Zoom sur la puissance en sortie de la charge entre 0.12s et 0.3s.

## 4.7. Discussion de résultats

- L'algorithme P&O est un algorithme classique et simple. En général, cet algorithme dépend fortement des conditions initiales et il présente des oscillations autour de la valeur optimale qui provoque des pertes au niveau d'énergie (stabilité faible).
- Comme nous avons pu le constater précédemment, l'algorithme P&O réalise une Mauvaise interprétation lors d'un changement brusque du niveau de rayonnement, il est très lent pour un pas de perturbation important et moins précis que la méthode MPPT floue.
- Les résultats obtenues avec un Contrôleur flou sont meilleurs que ceux obtenus avec l'algorithme de contrôle perturbation et observation, L'algorithme basé sur la logique floue est très efficace. En effet, ce dernier fonctionne au point de puissance optimal sans oscillations (très stable). En outre, il est caractérisé par un bon comportement en état transitoire.
- Le **FLC** proposé peut suivre le point de puissance maximale beaucoup plus rapide que la méthode P&O et atteindre son état stable en 0,01s par rapport P&O qui a pris 0,07s

Le tableau suivant résume les principales spécifications des différents algorithmes MPPT précédemment étudiés. Nous avons évalué et comparé ces algorithmes en termes de complexité, rapidité et précision :

| Algorithmes MPPT                 | la méthode P&O | la méthode FLC |
|----------------------------------|----------------|----------------|
| complexité                       | Basse          | Haute          |
| Rapidité :<br>(Vit. Convergence) | Moyenne        | Très rapide    |
| précision                        | Moyenne        | Très précis    |

**Tableau 4. 3.** Comparaison des techniques MPPT.

## 4.8. Caractéristiques du panneau PV

|    | <i>NP</i> | <i>NS</i> | <i>Voc</i> | <i>Icc</i> | <i>P max</i> | <i>Vmpp</i> | <i>Impp</i> | <i>Ki</i> | <i>Rs</i> | <i>Rp</i> | <i>Rch</i> |
|----|-----------|-----------|------------|------------|--------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 01 | 10059V    | 5.1 A     | 229.9W     | 48.32 V    | 4.75A        | 0.0013A/°C  | 0.05Ω       | 380Ω      | 10Ω       |           |            |

**Tableau 4.4.** Les caractéristiques nominales du panneau photovoltaïque.

## CONCLUSION

Nous avons également effectué une étude comparative par simulation entre les deux méthodes MPPT. Pour cela, nous avons utilisé une série de tests pour mettre les Méthodes en épreuve dans les cas de conditions climatiques constantes et variables.

Les résultats obtenues avec un Contrôleur flou sont meilleurs que ceux obtenus avec des algorithmes de contrôle perturbation et observation. Ainsi le contrôle par logique flou peut être vu comme un pas vers un rapprochement entre le contrôle mathématique précis et la prise de décision humaine. Aussi, ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur (P and O) mais montrent un meilleur fonctionnement du contrôleur flou. Ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances, temps de réponse, stabilité et précision.

***Rs*** : Résistance série.

***Rsh*** : Résistance shunt (parelle).

***I<sub>ph</sub>*** : Photo courant

***Tn*** : Température de référence de la cellule.

***MPP*** : *maximal power point en anglais* (point de puissance maximal).

***Vo<sub>opt</sub>*** : Tension optimale.

***I<sub>opt</sub>*** : Courant optimale.

***VT*** : La tension thermique.

***G*** : Le niveau d'ensoleillement.

***Ns*** : Nombre de cellules en série.

***Np***= nombre de cellules en parallèle.

***I<sub>cc</sub>*** : Courant de court-circuit de la cellule.

***V<sub>co</sub>*** : Tension ouverte de la cellule (donner par le fabriquant).

***D<sub>p</sub>*** : La diode « *by-pass* ».

***D<sub>r</sub>*** : La diode de « *non-retour* ».

***FF*** : Le facteur de forme.

***P<sub>m</sub>*** : La puissance maximale.

***GPV*** : Générateur photovoltaïque.

***I<sub>ph</sub>***= photo-courant.

***T*** = température de la cellule (K).

***k*** = constante de Boltzmann.

***PV*** : Photovoltaïque.

***MPPT*** : Poursuite de point de puissance maximal.

***P&O*** : Perturbe and observe.

***FLC*** : Fuzzy logic controller

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

. Le travail qu'on a présenté porte sur l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

En effet, pour la conception des systèmes photovoltaïques, les données les plus utiles sont le rayonnement solaire et la température reçus par le panneau photovoltaïque solaire, on donne des généralités sur les systèmes PV, l'effet PV, principe de cellule PV, Ainsi nous avons étudié deux convertisseurs DC/DC de type Buck et Boost qui fournissent une tension continue. Ce convertisseur présente l'avantage d'être un abaisseur ou élévateur de tension respectivement, ce qui permet à ce système de s'adapter aux changements météorologiques et pour extraire le maximum de puissance disponible.

Le modèle du MPPT est basé sur un convertisseur DC/DC et un algorithme de recherche de point de puissance maximal, Ainsi, approfondie sur les différents algorithmes des techniques de poursuite de point de puissance : algorithme de perturbation et observation et logique floue Le choix du convertisseur élévateur (BOOST)., Finalement, on a étudié la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque. Pour ce la, on a étudié d'abord la modélisation du générateur PV par la résolution de l'équation caractéristique non linéaire d'une cellule PV. Puis, on a représenté la structure de deux commandes MPPT numériques « perturbation et observation » et « logique floue ». 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.

La commande MPPT soit classique P&O ou Floue permet la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge et elle force le de faire fonctionner toujours au point de puissance maximale, cependant, l'étude comparative des résultats de simulation a permis de constater que la commande MPPT Floue conduit à des meilleurs performances (réduction du temps de réponse et de la précision).

Pour la simulation PV on a démontré l'intérêt d'un dispositif de recherche de la puissance maximale. La méthode P&O (perturbation and observation) a été choisie pour implanter un algorithme de poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale du panneau PV (MPPT). D'après les résultats de la simulation obtenue, on peut dire que :

- Les performances du générateur se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité d'éclairement et les variations de la charge. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST): éclairement  $1000\text{W/m}^2$  et  $T = 25^\circ\text{C}$ .
- ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur (P and O) mais montrent un meilleur fonctionnement du contrôleur flou. Ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances, temps de réponse rapide et stabilité,
- Ces résultats, montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïque.

Comme perspectives nous envisageons d'améliorer l'algorithme et d'essayer de créer un prototype pour une réalisation expérimentale.

## Caractéristiques du panneau PV

| <i>NP</i> | <i>NS</i> | <i>Voc</i> | <i>Icc</i> | <i>P max</i> | <i>Vmpp</i> | <i>Impp</i> | <i>Ki</i>  | <i>Rs</i> | <i>Rp</i> | <i>Rch</i> |
|-----------|-----------|------------|------------|--------------|-------------|-------------|------------|-----------|-----------|------------|
| 01        | 100       | 59V        | 5.1 A      | 229.9W       | 48.32 V     | 4.75 A      | 0.0013A/°C | 0.05Ω     | 380Ω      | 10Ω        |

**Tableau** .Les caractéristiques nominales du panneau photovoltaïque.

# Bibliographie

---

- [1]: M. L. Louazene, « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque Sur le site de Ouargla », Mémoire de Magister, Université El Hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 2008.
- [2]: ANNE LABOURET, MICHEL VILOOZ, « énergie photo voltaïque » 2em édition dunod.
- [3]: H. BELGHITRI et H. « Modélisation, simulation et optimisation d'un systèmeHybride éolien-photovoltaïque » mémoire de magister, 2009.
- [4]: S.M. Ait -cheikh, « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïque Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique », Alger, Algérie, 2007.
- [5]: R. Lakehal « Réalisation d'un système de pilotage d'un simulateur solaire : mesures I-V et extraction des paramètres » mémoire de master université de Tlemcen, Algérie, 2011.
- [6]: Y .PANKOW, « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque », thèse doctorat, LEEPL, 2004
- [7]: R. Touahir et M. A. K. Ben Zahia, « contrôleur neuronal pour la poursuite du point dePuissance maximale d'un système photovoltaïque », Mémoire master, Université KasdiMerbah, Ouargla, Algérie, 2015.
- [8]: *BELKACEM Mourad*, « Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique enConversion photovoltaïque par la recherche du point de puissanceMaximale (MPPT), Mémoire de master, université Abou bekrbelkaid de Tlemcen, Algérie ,2015.
- [9]: <https://www.energiepluslesite.be/index.php?6696>
- [10]: LASLADJ MERIEM, « simulation numériques des cellules solaires troisième génération pour des applications spatiales », mémoire magister, université Ferhat abas setif, Algerie 2015.
- [11]: S.ISSAADI, « Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones » Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006.
- [12]: ABID ZOULEYKHA « Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque » Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, Algérie 2017.

- [13]: OUBADJI MOHAMED NESSAL ABDENACER, « Poursuite du point de puissance Maximale d'un système photovoltaïque », Université Djilali BounaamaKhemis Miliana, Algérie 2017-2018.
- [14]: M .M NIANG, S DIOP, « les pompes solaires : dimensionnement d'une station de pompage en zone Maraîchère », institut supérieur de technologie industrielle 2008.
- [15]: F.C BOUKHTOUCH, « étude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT » Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie 2004.
- [16]: MEHDI MERAD-BOUDIA, « Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique », Mémoire de magister, université Aboubekbelkaid de Tlemcen, 2009-2010.
- [17]: ALAYAT MAHMOUD, BOUCETTA ISSAM, « Maximisation de la production d'un système photovoltaïque à base de MPPT soumis à des éclaircissements différents », Mémoire de master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR Annaba, 2017.
- [18]: Angel Cid Pastor. « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». mémoire de doctorat. INSA de Toulouse, 2006. Français.
- [19]: Singer, S. and Braunstein A., "A general model of maximum power point tracking". Proceedings of MELECON'85 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Madrid, Spain pp 147-151.
- [20]: Dr.F.Bouchafaa, « Cours Électronique de puissance », [http : //www.usthb.com](http://www.usthb.com), 2008/2009.
- [21]: [http://numlor.fr/elearning/etenp/co/1Hacheur\\_serie.html](http://numlor.fr/elearning/etenp/co/1Hacheur_serie.html).
- [22]: <https://docplayer.fr/20392132-Convertisseur-eleveur-boost.html>.
- [23]: "Etude sur la Commande du Hacheur Quatre Quadrants", Mémoire de Master, 2013, Université Larbi Ben M'hidi-Oum El Bouaghi, Département Sciences & Technologie,
- [24]: Soltani Ali. « Etude et réalisation d'un hacheur Buck destiné à l'implémentation des commandes à base de DSP ». mémoire de master. Université Larbi Ben M'hidi d'Oum Elbouaghi. 2016.
- [25]: Soltani Ali. « Etude et réalisation d'un hacheur Buck destiné à l'implémentation des commandes à base de DSP ». mémoire de master. Université Larbi Ben M'hidi d'Oum Elbouaghi. 2016.
- [26]: N. Acouchie, M.S. Aït Cheikh et A. Malek. « Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation ». Ecole Nationale Polytechnique Avenue Hassen Badi, El Harrach. 2013

- [27] : G.J. Yu, Y.S. Jung, J.Y. Choi, G.S. Kim, "A novel two-mode MPPT control algorithm based on comparative study of existing algorithms",
- [28] : G.J. Yu, Y.S. Jung, J.Y. Choi, G.S. Kim, "A novel two-mode MPPT control algorithm based on comparative study of existing algorithms",
- [29]: Minwon Park, In-Keun Yu, "A study on the optimal voltage for MPPT obtained by surface temperature of solar cell",
- [30]: Jae Ho Lee ,HyunSuBae and Bo Hyung Cho, "Advanced Incremental Conductance MPPT Algorithm with a Variable Step Size",
- [31]: Abu Tariq and M.S. JamilAsghar, "Development of Microcontroller-Based Maximum Power Point Tracker for a Photovoltaic Panel",
- [32]: Joe-Air Jiang, Tsong-Liang Huang, Ying-Tung Hsiao and Chia-Hong Chen, "Maximum Power Tracking for Photovoltaic Power Systems",
- [33]: T. Noguchi, R. Nakamotoand S. Togashi, "Short-Current Pulse Based Adaptive Maximum-Power-Point Tracking for Photovoltaic Power Generation System".
- [34]: Neil S. D'Souza, Luiz A. C. Lopes and XueJun Liu, "An intelligent maximum power point tracker using peak current control",
- [35]: Il-Song Kim, Myung-Bok Kim and Myung-JoongYoun, "New Maximum Power Point Tracker Using Sliding-Mode Observer for Estimation of Solar Array Current in the Grid-Connected Photovoltaic System",
- [36]: NoppadolKhaehintung, PhaophakSirisuk, WerusakKurutach, "A Novel ANFIS Controller for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems",
- [37]: K.H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino and M. Osakada, 'Maximum Photovoltaic Power Tracking, an Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions Generation', IEE Proceedings, Generation, Transmission and distributions, Vol. 142, N°1, pp. 59 – 64, 1995.
- [38]:HansruediBuhler. « réglage par logique floue ».premier édition ISBN 2-88074-271-4,1994.
- [39]: B. Bendiba,b, F. Krimb, H. Belmilia, «Advanced Fuzzy MPPT Controller for a stand-alone PV system ». Energy Procedia 50 ( 2014 ) 383 – 392,2014.

# Conclusion générale

---

La commande MPPT soit classique P&O ou Floue permet la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge et elle force le de faire fonctionner toujours au point de puissance maximale, cependant, l'étude comparative des résultats de simulation a permis de constater que la commande MPPT Floue conduit à des meilleurs performances (réduction du temps de réponse et de la précision).

Pour la simulation PV on a démontré l'intérêt d'un dispositif de recherche de la puissance maximale. La méthode P&O (perturbation and observation) a été choisie pour implanter un algorithme de poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale du panneau PV (MPPT). D'après les résultats de la simulation obtenue, on peut dire que :

- Les performances du générateur se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité d'éclairement et les variations de la charge. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST): éclairement  $1000\text{W}/\text{m}^2$  et  $T = 25^\circ\text{C}$ .
- Ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur (P and O) mais montrent un meilleur fonctionnement du contrôleur flou. Ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances, temps de réponse rapide et stabilité,
- Ces résultats, montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïque.

Comme perspectives nous envisageons d'améliorer l'algorithme et d'essayer de créer un prototype pour une réalisation expérimentale.