



**République Algérienne Démocratique et  
Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieure  
et de la Recherche Scientifique**



**Université Echahid Hamma Lakhdard'El-Oued**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE**

**GENIEMECHANIQUE**

**Projet de fin de cycle**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTERACADEMIQUE**

Domaine: Technologie

Filière: génie électrique

Spécialité: Réseau électrique

**Thème**

**Étude et Simulation de la Commande MPPT Basée  
sur Contrôleur Flou pour le Système  
Photovoltaïque**

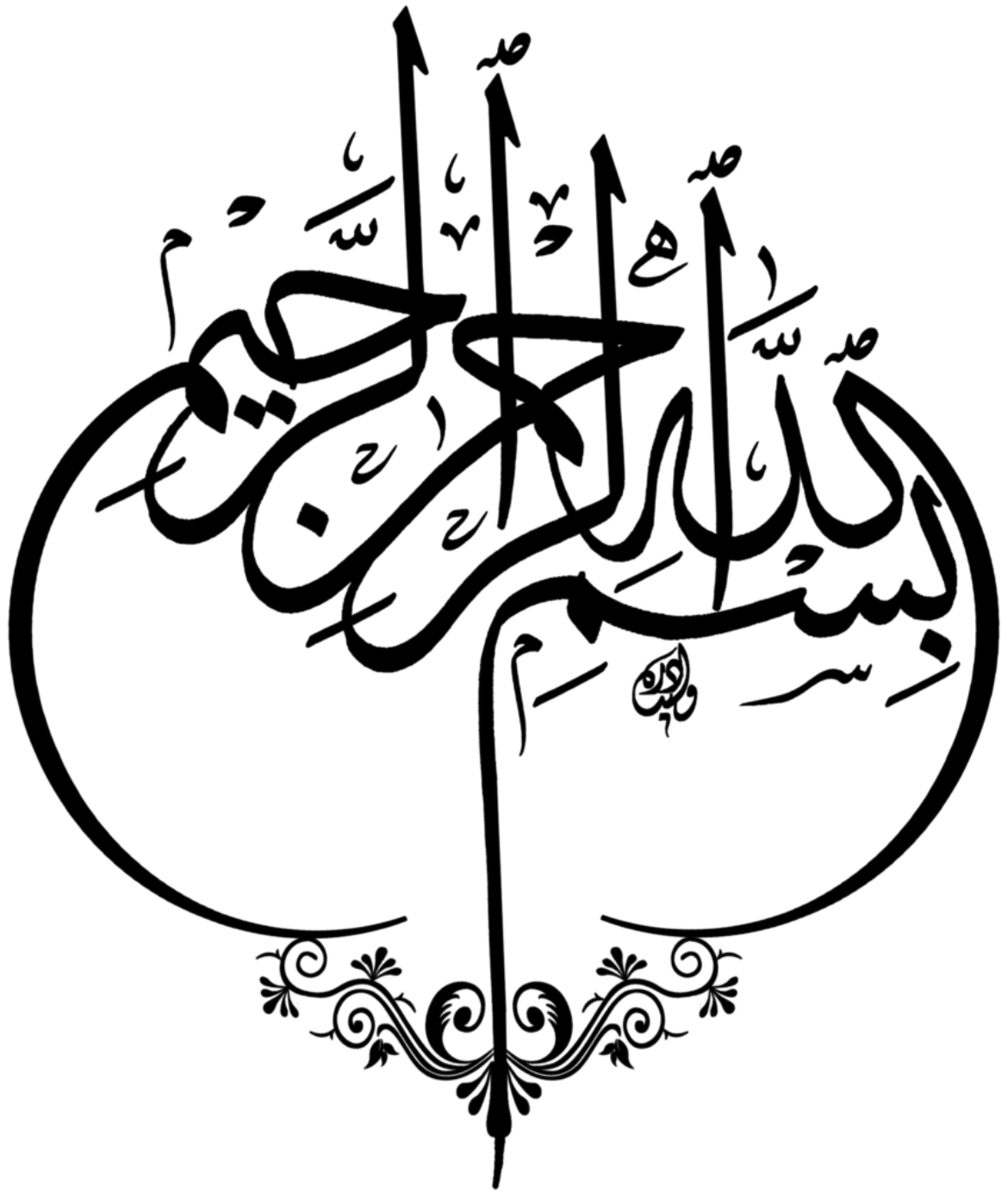
**Présenté par:**

Barak nour eddine  
Gacem abd Elmalek  
Labi Yacine

Président  
Examineur  
Encadreur

- Guessoum seddik
- Drid Abdel Mohsen
- Lagoubi lassaad


**Année Académique 2023-2024**





## *Remerciements*

En premier lieu, nous tenons à remercier notre encadreur **Dr. Labi yacine**, pour son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail. Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions. Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.





## *Remerciements*

Dieu merci. Mon par cours universitaire a pris fin après l'épuisement et les épreuves. Et ici, je termine ma thèse de fin d'études avec toute la vigueur et l'activité. Je dé diemon diplôme et ma joie à mon père, ma mère et tous les membres de ma famille. Je ne dois pas oublie rmesamis, mes professeurs et tous ceux qui m'ont soutenu et encouragé dans ma vie et m'ont donné un coup de pouce. Merci

**AbdElmohsen...**

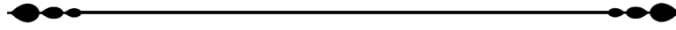


## ***Remerciements***

Dieu merci. Mon parcours universitaire a pris fin après l'épuisement et les épreuves. Et ici, je termine ma thèse de fin d'études avec toute la vigueur et l'activité. Je dédie mon diplôme et ma joie à mon père, ma mère et tous les membres de ma famille. Je ne dois pas oublier mes amis, mes professeurs et tous ceux qui m'ont soutenu et encouragé dans ma vie et m'ont donné un coup de pouce. Merci

**Lassaad**

# Résumé



## **Résumé**

L'électrification solaire photovoltaïque (PV) est une source d'énergie renouvelable

panneau photovoltaïque n'est pas stable en raison de l'intensité solaire différente. Pour maximiser la puissance de sortie du panneau photovoltaïque, le suivi du point de puissance maximale (MPPT) de perturbation et d'observation (P&O) a été mis en œuvre dans le système photovoltaïque. Grâce à un convertisseur DC-DC Buck-Boost, MPPT est capable de faire varier la tension de fonctionnement PV et de rechercher la puissance maximale que le panneau PV peut produire. La mise en œuvre de la logique floue a été proposée dans cet mémoire. Sur la base du changement de puissance d'entrée et du changement de puissance d'entrée par rapport au changement de tension, le flou peut déterminer la taille de la tension perturbée et faciliter un suivi plus rapide de la puissance maximale et minimiser la variation de tension une fois que le point de puissance maximale a été identifié. Les résultats de la simulation montrent que les performances du MPPT flou sont meilleures que celles du MPPT P&O conventionnel.

## **Summary**

The electrification of solar photovoltaic (PV) is an important renewable energy source. Electricity that is converted directly from solar irradiation via a photovoltaic panel is not stable due to different solar intensity. To maximize the output power of the photovoltaic panel, Maximum Power Point (MPPT) Disturbance and Observation (P&O) monitoring was implemented in the photovoltaic system. Thanks to a Buck-Boost DC-DC converter, MPPT is able to vary the PV operating voltage and search for the maximum power that the PV panel can produce. The implementation of fuzzy logic was proposed in this thesis. Based on the input power change and the input power change in relation to the voltage change, blur can determine the size of the disturbed voltage and facilitate faster tracking of maximum power and minimize voltage variation once the maximum power point has been identified. The simulation results show that the performance of fuzzy MPPT is better than that of conventional P&O MPPT.

## ملخص

تعد كهربية الطاقة الشمسية (الكهروضوئية) مصدرًا مهمًا للطاقة المتجددة. الكهرباء التي يتم تحويلها مباشرة من الإشعاع الشمسي عبر لوحة كهروضوئية ليست مستقرة بسبب اختلاف كثافة الطاقة الشمسية. ولزيادة طاقة إخراج اللوحة الكهروضوئية إلى أقصى حد، تم تنفيذ رصد نقطة الطاقة القصوى (MPPT) للاضطراب والرصد (P&O) في النظام الكهروضوئي. بفضل محول Buck-Boost DC-DC، يمكن لم PT تغيير جهد التشغيل PV والبحث عن الطاقة القصوى التي يمكن أن تنتجها لوحة PV. تم اقتراح تنفيذ المنطق الغامض في هذه الأطروحة. بناءً على تغيير طاقة الإدخال وتغيير طاقة الإدخال فيما يتعلق بتغيير الجهد، يمكن أن يحدد الضبابية حجم الجهد المضطرب ويسهل التتبع الأسرع للطاقة القصوى ويقلل من تغيير الجهد بمجرد تحديد نقطة الطاقة القصوى. تظهر نتائج المحاكاة أن أداء MPT الغامض أفضل من أداء P&O التقليدي.

# *Sommaire*



*sommaire*

	page
<b>Remerciements</b>	-
<b>Sommaire</b>	<b>II</b>
<b>Liste figureur</b>	<b>V</b>
<b>Tableau</b>	II
<b>Introduction général</b>	<b>1</b>
<b><i>Chapitre I: Le system photovoltaïque</i></b>	
<b>I-1- Introduction</b>	<b>03</b>
<b>I-2- Historique</b>	<b>03</b>
<b>I-3-L'effet Photovoltaïque</b>	<b>04</b>
<b>I-4-La Cellule Photovoltaïque</b>	<b>04</b>
<b>I-4-a- Semi-conducteurs</b>	<b>05</b>
<b>I-4-b- Dopage des Semi-conducteurs</b>	<b>05</b>
➤ <b>Dopage de type P</b>	<b>06</b>
➤ <b>La Jonction P-N</b>	<b>06</b>
<b>I-4-c-Principe de Fonctionnement</b>	<b>07</b>
<b>I-4-d-Les Différents Types de Cellules</b>	<b>08</b>
<b>I-5- L'énergie Solaire Photovoltaïque</b>	<b>08</b>
<b>I-6-Les Constituants d'un Module PV</b>	<b>09</b>
<b>I-7- Les Modèles de la Cellule PV</b>	<b>09</b>
<b>I-7-A-Modèle à une Diode</b>	<b>10</b>
<b>I-7-B- Modèle Idéal</b>	<b>10</b>
<b>I-7-C-Modèle avec Pertes Ohmiques (<i>Rs</i>-Model)</b>	<b>11</b>
<b>I-7-D .Modèle à Deux Diodes</b>	<b>12</b>
<b>I-7-E- Modèle Empirique</b>	<b>13</b>
<b>I-7-F- Modèle de Bishop</b>	<b>14</b>
<b>I-8-Générateur photovoltaïque (GPV)</b>	<b>14</b>
<b>I-8-A- Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)</b>	<b>14</b>
<b>I-8-B-Protection d'un générateur photovoltaïque</b>	<b>15</b>
<b>I-9- La caractéristique I-V de la cellule PV</b>	<b>16</b>

<b>I-9-A- Courant de court-circuit (<math>I_{cc}</math>)</b>	<b>17</b>
<b>I-9-B- Tension en circuit ouvert (<math>V_{co}</math>)</b>	<b>18</b>
<b>I-9-C- Puissance débitée</b>	<b>18</b>
<b>I-9-D- Le facteur de forme FF</b>	<b>18</b>
<b>I-9-F- Le rendement de conversion d'énergie <math>\eta</math></b>	<b>18</b>
<b>I-10- Influence des paramètres sur la caractéristique I-V</b>	<b>19</b>
<b>I-10-A- Impact du type de connexion sur la caractéristique I-V</b>	<b>19</b>
<b>I-10-B- Influence de l'éclairement et de la température sur les courbes I-V et P-V</b>	<b>20</b>
<b>I-10-C- Les zones de fonctionnement du modèle solaire</b>	<b>23</b>
<b>I-11- Avantages et inconvénients d'une installation PV</b>	<b>24</b>
<b>I-11-A. Avantage</b>	<b>24</b>
<b>I-11-B - Inconvénient</b>	<b>24</b>
<b>Conclusion</b>	<b>24</b>
<b>Chapter II :</b> <i>Pour suite du point de puissance Maximale MPPT</i>	
<b>II-1- Introduction</b>	<b>27</b>
<b>II-2- Circuit d'adaptation et Types de Hacheurs</b>	<b>27</b>
<b>II-2-A- Connexion directe entre la source et la charge</b>	<b>27</b>
<b>II-2-B- Circuit d'adaptation entre un générateur photovoltaïque et la charge</b>	<b>28</b>
<b>II-2-C- Convertisseur DC-DC</b>	<b>28</b>
<b>II-2-C-1- Les types d'hacheurs</b>	<b>29</b>
<b>a) Hacheur parallèle (boost)</b>	<b>29</b>
<b>b). Dimensionnement de la capacité <math>C</math> et l'inductance <math>L</math></b>	<b>30</b>
<b>II-3- Optimisation de la puissance du générateur PV: Étude du MPPT</b>	<b>31</b>
<b>II-3-1- La commande de la puissance maximale du générateur photovoltaïque :</b>	<b>31</b>
<b>II-3-1-1- Recherche du Maximum Power Point Tracker (MPPT)</b>	<b>31</b>
<b>II-3-2- Efficacité du régulateur MPPT</b>	<b>32</b>
<b>II-3-3- Effets des facteurs environnementaux sur le régulateur MPPT</b>	<b>32</b>
<b>II-3-4- Indice de Performance de l'Installation Photovoltaïque (Facteur de Qualité)</b>	<b>32</b>
<b>II-3-4-A. Facteurs Environnementaux</b>	<b>33</b>
<b>II-3-4-B. Autres Facteurs</b>	<b>33</b>

<b>II-4-La méthode de perturbation et d'observation (P&amp;O)</b>	<b>33</b>
<b>II-5- Simulation du Contrôle MPPT Numérique "P&amp;O"</b>	<b>35</b>
<b>II-5-A-Simulation de la méthode MPPT</b>	<b>35</b>
<b>II.5-2- Résultats de Simulation</b>	<b>36</b>
<b>Conclusion</b>	<b>39</b>
<b><i>Chapter III: Commande Mppt Basée sur l' approche Floue</i></b>	
<b>III-1- Introduction</b>	<b>41</b>
<b>III-2- Applications et Commande de la Logique Floue dans les Systèmes MPPT</b>	<b>41</b>
<b>III-2-1-Les principaux domaines de recherche et d'application de la logique Floue</b>	<b>41</b>
<b>III-2-2-La commande MPPT basée sur la logique floue</b>	<b>42</b>
<b>III-2-2-A-Fuzzification des Variables d'Entrée</b>	<b>42</b>
<b>III-2-2-B-Méthode d'inférence</b>	<b>44</b>
<b>III-2-2-C-Défuzzification</b>	<b>45</b>
<b>III-3-RésultatsdesimulationetinterprétationsdelaméthodeMPPT-Floue</b>	<b>46</b>
<b>III-4- Résumé</b>	<b>48</b>
<b>IV) comparative entre MPPT Floue et MPPT classiques (P&amp;O)</b>	<b>49</b>
<b>Conclusion</b>	<b>51</b>
<b>General Conclusion</b>	<b>54</b>
<b>Références et bibliographiques</b>	<b>55</b>

## Liste figure

<i>Figures</i>	Page
<b><i>Chapitre I : Le system photovoltaïque</i></b>	
<b>Figure I.1 : Dopage de type N.</b>	<b>05</b>
<b>Figure I.2 : Dopage de type P.</b>	<b>06</b>
<b>Figure I. 3 : Jonction P-N.</b>	<b>07</b>
<b>Figure I. 4 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.</b>	<b>07</b>
<b>Figure I.5 : Différents types de cellule PV</b>	<b>08</b>
<b>Figure I.6: Les différentes couches constituant un module PV</b>	<b>09</b>
<b>Figure I.7: Circuit Équivalent d'une Cellule PV – Modèle 1-D</b>	<b>10</b>
<b>Figure I.8:Circuit Équivalent d'une Cellule PV – Modèle Idéal –</b>	<b>11</b>
<b>Figure I.9 :Circuit Équivalent d'une Cellule PV – <math>R_s</math>-Model –</b>	<b>12</b>
<b>Figure I.10 : Le Schéma de Circuit Équivalent d'une Cellule PV avec Modèle à Deux Diodes, Résistance Série et Résistance Shunt.</b>	<b>12</b>
<b>Figure I.11 : Circuit Équivalent simple de la Cellule PV</b>	<b>13</b>
<b>Figure I.12: Schéma Équivalent d'une Cellule PV Modèle de Bishop</b>	<b>14</b>
<b>Figure I.13 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour</b>	<b>15</b>
<b>Figure I.14: Module de 36 cellules protégé par deux diodes de by-pass</b>	<b>15</b>
<b>Figure I.15 :diode anti-retour placée à la sortie du string et avant la charge et la connexion</b>	<b>16</b>
<b>Figure I.16: cellule photovoltaïque sous MATLAB</b>	<b>16</b>
<b>Figure I.17: Les courbes I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque dans des conditions standard de test (STC) avec une irradiance de 1000 W/m<sup>2</sup> et une température de 25 °C.</b>	<b>17</b>
<b>Figure I.18: Représentation conventionnelle de la courbe I(V) et P(V)</b>	<b>17</b>
<b>Figure. I-19 : Points et valeurs remarquables de la caractéristique courant–tension</b>	<b>18</b>
<b>Figure I.20: Génération de résidus/symptômes par estimation des paramètres</b>	<b>19</b>
<b>Figure I.21:Schéma de connexion de cellule en série et en parallèle</b>	<b>20</b>
<b>Figure I.22:L'effet de l'irradiation sur les caractéristique I-V et P-V, <math>T=25^{\circ}\text{C}</math></b>	<b>21</b>

Figure .I.23 : Effet de la température sur les caractéristiques I-V et P-V, 1000 W/m <sup>2</sup>	22
Figure . I.24 :les caractéristique de 3 cellules photovoltaïques	22
Figure .I.25: les caractéristiques de 3 cellules photovoltaïque sassociées en série	23
Figure .I.26 :Les zones de caractéristique I(V)d'un générateur photovoltaïque	23
<b>Chapitre II :</b> <b><i>Pour suite du point de puissance Maximale MPPT</i></b>	
Figure .II.1:Principe de la connexion directe entre un GPV et une charge	28
Figure .(II.2):Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation	28
Figure .II.3:Schéma électrique du hacheur « Boost »	29
Figure .II.4:Hacheur élévateur en régime de fonctionnement continu.	30
Figure .II.5:Diagramme du système photovoltaïque étudié	31
Figure .II.6 :Algorithme de la méthode P&O	34
Figure . II.7:Principe de la commande P&O sur la courbe P-V[ 15].	34
Figure II-8 : le diagramme bloc de l'algorithme (P&O).	35
Figure II-9 : le schéma du convertisseur Boost contrôlé par MPPT.	36
Figure .II.10:Irradiation solaire	36
Figure . II.11:Variation de la tension de sortie du PV	37
Figure . II.12:Variationducourantdesortiedu PV	37
Figure .II.13:Puissance de sortie du panneau PV	38
Figure .II.14: cycle de signale	38
<b>Chapitre III :</b> <b><i>Commande Mppt Basée sur l' approche Floue</i></b>	
Figure . III.1:Principe de la commande à logique floue.	42
Figure .III.2:Fonctionsd'appartenancesde :	44
Figure .III.3: Simulation du système flou basé sur le suivi du point de puissance maximale des PV	47
Figure . III.4 :Variation de l'éclairement (W/m <sup>2</sup> )	48
Figure .III.5:Variation de la tension PV de sortie.	48
Figure .III.6: Variation du courant PV de sortie.	49

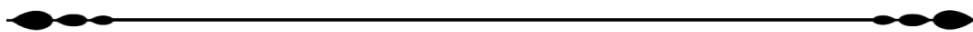
---

<b>Figure .III.7 : Puissance de sortie du panneau PV.</b>	<b>49</b>
<b>Figure .III.8 : Cycle signal</b>	<b>50</b>
<b>Figure .(III.9):MPPT avec les deux techniques</b>	<b>51</b>

**Tableau**

<b>Tableau</b>	<b>page</b>
<b>Tableau II.1:</b> les paramètres du module photovoltaïque à étudier.	<b>35</b>
<b>Tableau III.1:</b> Règles du contrôleur logique floue	<b>45</b>

# *Introduction General*



## **Introduction General**

Aujourd'hui, le monde est conscient que le photovoltaïque solaire est une source importante d'énergie renouvelable pour la production d'électricité, en particulier dans les pays où la densité solaire est relativement élevée. Le photovoltaïque solaire est un phénomène où l'irradiation solaire est convertie directement en électricité via une cellule solaire [1], et le processus ne nécessite aucune consommation ni émission de matériaux. L'électrification solaire peut être appliquée même dans les zones rurales où un système PV autonome peut fournir une électricité adéquate pour une certaine zone indépendamment, sans avoir besoin d'être connecté au réseau électrique.

Le réseau PV a un point de fonctionnement particulier qui peut fournir la puissance maximale à la charge, généralement appelé point de puissance maximale (MPP). Le point de puissance maximale a un lieu non linéaire où il varie en fonction de l'irradiance solaire et de la température de la cellule [2]. Pour augmenter l'efficacité du système PV, le MPP doit être suivi et ensuite réguler le panneau PV pour qu'il fonctionne au point de tension de fonctionnement du MPP, optimisant ainsi la production d'électricité. Le processus d'optimisation maximisera la puissance produite par le panneau PV.

Il existe plusieurs méthodes qui ont été largement mises en œuvre pour suivre le MPP. Les méthodes les plus courantes sont Perturb and Observe (P&O), la conductance incrémentale et la comparaison de poids à trois points. Dans cet article, le MPPT P&O est étudié. La technique P&O applique une perturbation au contrôleur buck-boost DC-DC en augmentant ou en diminuant le cycle de service du modulateur de largeur d'impulsion (PWM), observant ensuite l'effet sur la puissance de sortie PV [3]. Si la puissance à l'état actuel est supérieure à l'état précédent, le cycle de service du contrôleur doit être augmenté ou inversement jusqu'à ce que le point de tension de fonctionnement du MPP soit identifié. Le problème qui se pose dans la méthode MPPT P&O est que la tension de fonctionnement du panneau PV fluctue toujours en raison des besoins de suivi continu pour le prochain cycle de perturbation.

Dans cet article, il est proposé d'implémenter la logique floue dans le MPPT. La logique floue est robuste et relativement simple à concevoir car elle ne nécessite pas d'informations sur le modèle exact [4]. La puissance PV à l'état actuel sera comparée à la puissance PV à l'état précédent et le changement de puissance sera l'une des entrées du système d'inférence floue (FIS).

*Chapitre I:*  
*Le system photovoltaique*

# Le Système Photovoltaïque

## I-1- Introduction :

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique au moyen des cellules basées sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque, qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. En effet, le mot "photovoltaïque" vient du grec "photo" qui signifie lumière et de "voltaïque" qui tire son origine du nom du physicien italien Alessandro Volta (1754-1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité. Ainsi, le photovoltaïque signifie littéralement "lumière électricité".

Dans ce chapitre, nous aborderons les concepts généraux de l'énergie solaire, le modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque ainsi que les détails d'un générateur photovoltaïque.

## I-2- Historique :

Le développement des systèmes photovoltaïques est le résultat d'un travail continu depuis de nombreuses années et des contributions de différents scientifiques à travers l'histoire. Nous mentionnerons les étapes marquantes suivantes :

- **1839** : Le physicien français Antoine Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.
- **1875** : Werner Von Siemens présente devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.
- **1887** : L'effet photoélectrique est compris et présenté par Heinrich Rudolf Hertz, qui publie les résultats dans la revue scientifique *Annalen der Physik*.
- **1905** : Einstein explique le phénomène photoélectrique et obtient le prix Nobel de physique pour ses travaux en 1921.
- **1954** : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince des laboratoires BELL, mettent au point la première cellule photovoltaïque au silicium avec un rendement de 4%, alors que l'industrie spatiale naissante cherche des solutions pour alimenter ses satellites.
- **1958** : Une cellule photovoltaïque avec un rendement de 9% est mise au point. Les premiers satellites Vanguard, alimentés par des cellules photovoltaïques, sont envoyés dans l'espace.
- **1973** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Wilmington dans l'État du Delaware, USA.
- **1983** : La première voiture alimentée par de l'énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

- **1995** : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau sont lancés au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.
- **2000** : L'EEG Renewable Energy Sources Act (EEG), entré en application le 1er avril 2000 et modifié en 2004 et en 2009, est le résultat de la transposition de la directive européenne relative à la promotion des énergies renouvelables dans le secteur de l'électricité.
- **2005** : En décembre 2005, la première centrale solaire photovoltaïque du groupe Prime Energy est mise en réseau à Weil am Rhein (Baden-Württemberg), Hagenheimer Strasse 17, 79576 Weil am Rhein[1].

Cette découverte, appelée plus tard "l'effet photoélectrique", a eu un impact significatif sur le développement des panneaux photovoltaïques.

### **I-3-L'effet Photovoltaïque :**

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire.

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives [2].

Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés, on trouve le silicium, le germanium, le sulfure de gallium et l'arséniure de gallium.

### **I-4-La Cellule Photovoltaïque :**

La cellule photovoltaïque est un composant électronique qui produit de l'électricité quand il est exposé à la lumière (photons), grâce à l'effet photovoltaïque. Une cellule PV donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie des photons en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électrons/trous dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule PV doit posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant. Un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons/trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P- N [3].

#### I-4-a- Semi-conducteurs :

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Cette conductivité des semi-conducteurs, à la différence de celle des conducteurs et des isolants, dépend fortement de leur pureté, des irrégularités de leur structure, de la température et d'autres quantités physiques et chimiques. Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques très diversifiées.

#### I-4-b- Dopage des Semi-conducteurs :

Le dopage d'un matériau consiste à introduire dans sa matrice des atomes d'un autre matériau. Ces atomes vont se substituer à certains atomes initiaux et ainsi introduire davantage d'électrons ou de trous. Les atomes de matériau dopant sont également appelés impuretés, et sont en phase diluée : leur concentration reste négligeable devant celle des atomes du matériau initial.

Dans un semi-conducteur intrinsèque, ou pur, il n'y a aucun atome dopant. Tous les électrons présents dans la bande de conduction proviennent donc de la bande de valence. Il y a donc autant d'électrons que de trous :  $n = p = ni$  ;  $ni$  : étant la concentration intrinsèque. Tout dopage sert à modifier cet équilibre entre les électrons et les trous, pour favoriser la conduction électrique par l'un des deux types de porteurs.

Il existe deux types de dopage :

##### ➤ Dopage de type N

La figure I.1 représente le dopage de type N, qui consiste à ajouter un atome de phosphore au sein de la structure cristalline du silicium. Le phosphore, disposant de cinq électrons sur sa couche électronique externe, va s'associer avec quatre atomes de silicium, laissant ainsi libre un électron. Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative [2].

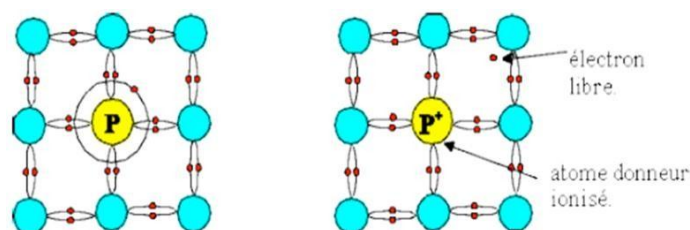


Figure I.1 : Dopage de type N.

### ➤ Dopage de type P :

La figure I.2 représente le dopage de type P, qui consiste à ajouter un atome de bore au sein de la structure cristalline du silicium. Le bore, disposant de trois électrons sur sa couche électronique externe, va s'associer avec quatre atomes de silicium, laissant ainsi libre un trou. Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale positive[2].

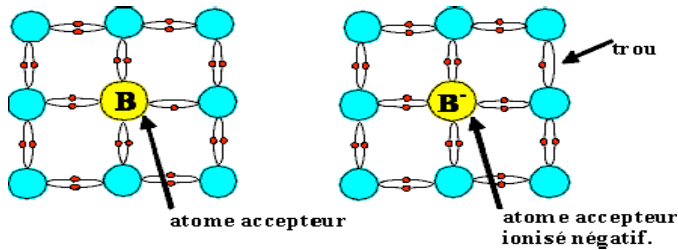


Figure I.2 : Dopage de type P.

### ➤ La Jonction P-N :

La jonction P-N est à la base de la plupart des applications des semi-conducteurs. Elle est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur de type P et d'un semi-conducteur de type N (théoriquement). Dans la zone de contact, les électrons libres du segment N pénètrent dans le segment P et se recombinent avec les trous. De même, les trous du segment P pénètrent dans le segment N et se recombinent avec les électrons. Ce phénomène est appelé diffusion.

Il en résulte, au niveau de la transition des segments, l'apparition d'une zone exempte de charges mobiles appelée Zone de transition (aussi nommée Zone de Charge d'espace ou Zone d'épuisement), où seuls demeurent les atomes d'impuretés fixes (ions accepteurs dans le segment P, ions donneurs dans le segment N) et les atomes de semi-conducteur neutres. Les charges constituées par les ions fixes sont à l'origine d'un champ électrique  $E$  dans la zone de transition, et par la même d'une différence de potentiel  $V_0$  (appelée barrière de potentiel) aux bornes de cette zone. Cette zone possède une grande impédance. Le champ électrique  $E$  tend à maintenir les porteurs majoritaires dans leurs régions respectives et s'oppose ainsi à la cause qui lui donne naissance, ce qui conduit à un état d'équilibre [4], ce phénomène est représenté dans la figure I.3.

Cependant, le champ électrique  $E$  n'interdit pas le passage des porteurs minoritaires présents dans les segments de type P et N (courant de "saturation"  $I_{sat}$ ). Ce mouvement est toutefois équilibré par les porteurs majoritaires qui possèdent l'énergie nécessaire au franchissement de la barrière de potentiel.

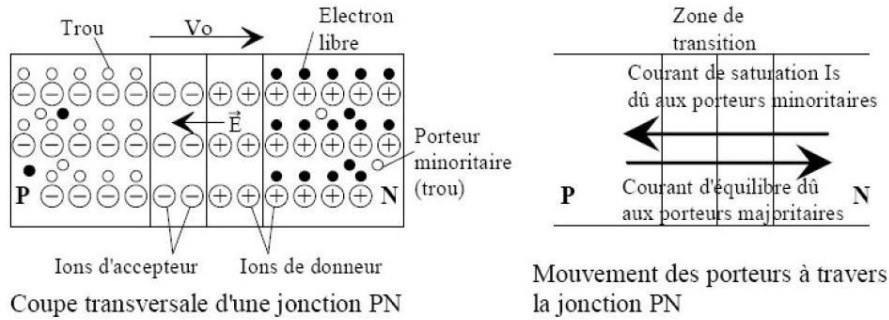


Figure I. 3 : Jonction P-N.

**I-4-c-Principe de Fonctionnement :**

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties : l'une présentant un excès d'électrons, dite dopée de type N, et l'autre un déficit en électrons, dite dopée de type P.

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction P-N a été formé. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule, la figure I.4 représente le principe de la conversion PV[2].

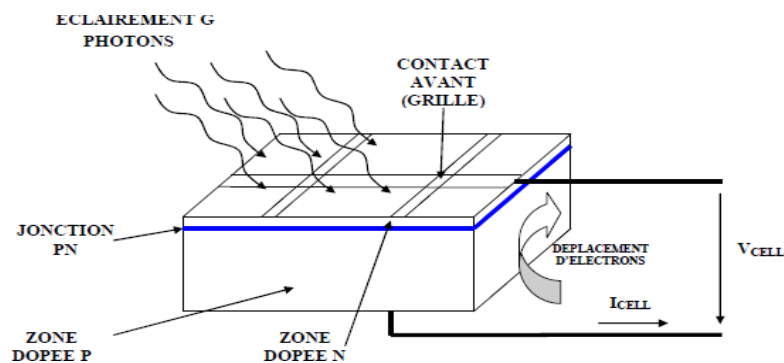


Figure I. 4 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire[7].

#### I-4-d-Les Différents Types de Cellules :

Il existe plusieurs types de cellules en fonction de la structure microscopique du silicium (figure I.5):

- Cellule en silicium monocristallin, (a)
- Cellule en silicium polycristallin, (b)
- Cellule en silicium amorphe, (c)

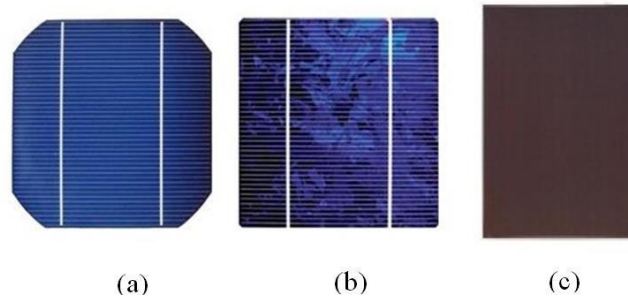


Figure I.5 : Différents types de cellule PV.

##### ➤ Cellule en Silicium Monocristallin:

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

##### ➤ Cellule en Silicium Polycristallin:

Les cellules polycristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes. Leur rendement de 13 % et jusqu'à 20 % au laboratoire [5].

##### ➤ Cellule en Silicium Amorphe:

Les cellules de silicium amorphe diffèrent des cellules présentées précédemment puisque leur structure présente un haut degré de désordre dans la structure des atomes [6]. L'utilisation de silicium amorphe pour les cellules solaires a montré de grands avantages.

#### I-5- L'énergie Solaire Photovoltaïque :

Le soleil est une source d'énergie inépuisable qui est envoyée à la surface le rayonnement sur Terre représente environ 8400 fois la consommation chaque année d'énergie. Cela correspond à une puissance de crête automatique instantanée de 1 kW par mètre carré réparti sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge.

L'énergie solaire photovoltaïque consiste à produire de l'électricité directement à la lumière grâce aux panneaux solaires. L'énergie provient des photons (composants de la lumière) qui entrent en collision et libèrent des électrons, créant un courant électrique. Ce courant continu peut être converti d'une petite puissance calculée en watts crête (Wc) en courant alternatif

grâce à l'onduleur[9]. L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe, stockée dans des batteries (énergie électrique décentralisée), ou d'électricité injectée dans le réseau.

Le générateur solaire photovoltaïque est constitué de modules photovoltaïques composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles .

#### I-6-Les Constituants d'un Module PV :

La production d'un module PV nécessite une étape d'encapsulation, ayant pour objectif d'assembler les cellules en série ou en parallèle afin de les utiliser à des tensions et courants pratiques, tout en assurant leur isolation électrique et leur protection contre les agressions extérieures. Cette protection doit garantir une durée de vie utile des modules PV supérieure à 20 ans.

L'encapsulation consiste à placer un ensemble constitué de cellules et de matériau d'emballage (EVA) entre deux panneaux de verre (procédé de double vitrage) ou entre une feuille de verre et un ensemble constitué de fines couches de polymère (tedlar, mylar) et d'aluminium (procédé de simple vitrage).

Les cellules photovoltaïques sont encapsulées entre deux couches de thermoplastiques manufacturés [8].

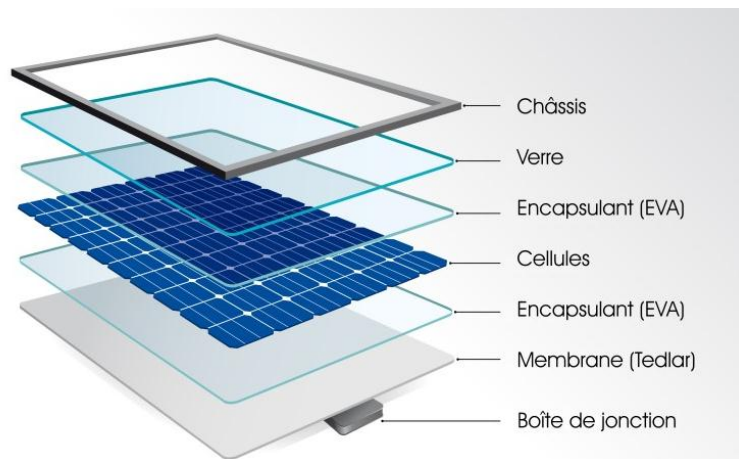


Figure I.6: Les différentes couches constituant un module PV [8]

#### I-7- Les Modèles de la Cellule PV :

Dans cette section, nous explorerons les différents modèles de cellules photovoltaïques. La modélisation des systèmes photovoltaïques vise à fournir des indicateurs de défaut pour les systèmes de diagnostic. Notre objectif est de détecter et d'identifier les anomalies du côté CC du générateur photovoltaïque[8].

**I-7-A-Modèle à une Diode :**

Ce modèle, également désigné par Rp-Model, tient compte non seulement des pertes en tension exprimées par la résistance série  $R_s$ , mais aussi des fuites de courant exprimées par une résistance parallèle  $R_p$ [8].

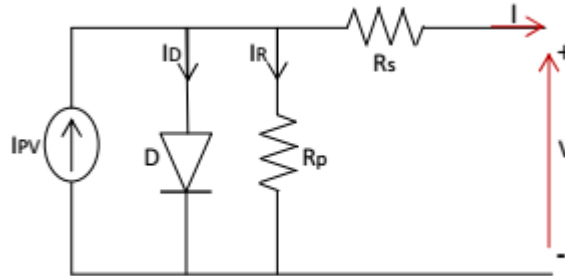


Figure I.7: Circuit Équivalent d'une Cellule PV – Modèle 1-D

Ce modèle, sur lequel se basent les fabricants pour fournir les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires (fiche technique), est considéré comme satisfaisant voire même comme une référence pour cataloguer typiquement les modules solaires.

L'équation du courant fourni par la cellule photovoltaïque est décrite comme suit :

$$I = I_{pv} - I_0 + I_s \left[ \exp \left\{ \frac{(V)}{aV_t} \right\} \right] - \left( \frac{V + IR_s}{R_p} \right) \quad (I.1)$$

$R_p$ : La résistance modélisant les courants de fuites de la jonction

**I-7-B- Modèle Idéal :**

La réflexion précédente nous permet d'aboutir au modèle électrique équivalent de la cellule photovoltaïque représentée dans la figure I-8, appelé le modèle idéal. C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule solaire, car il ne tient compte que du phénomène de diffusion. Le circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire se compose d'une diode et d'une source de courant montés en parallèle [9].

La source du courant produit le photon courant  $I_{ph}$  qui est directement proportionnelle à l'éclairement solaire  $G$ .

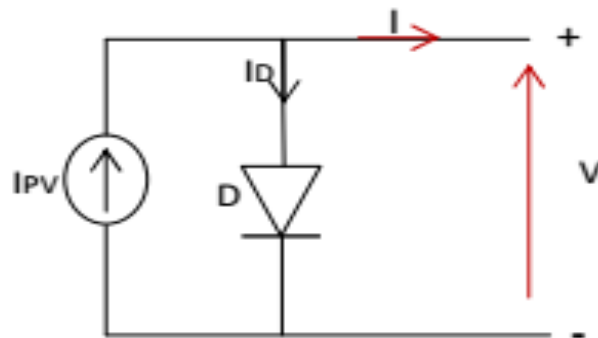


Figure I.8: Circuit Équivalent d'une Cellule PV – Modèle Idéal –

L'équation courant-tension I-V du circuit équivalent est donné comme suit:

$$I = I_{pv} - I_D$$

Avec: 
$$I = I_{pv} - I_0 + I_s \left[ \exp \left\{ \frac{(V)}{aV_t} \right\} - 1 \right] \quad (I.2)$$

Où :

- $I$  : Courant fourni par la cellule [A]
- $I_{pv}$  : Photon-courant de la cellule proportionnel à l'éclairement (G)
- $I_0$  : Courant de saturation inverse de la diode.
- $V_t$  : Potentiel thermodynamique.
- $K$  : La constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23}$  Joules/Kelvin).
- $T$  : La température de la cellule en Kelvin
- $q$  : La charge d'un électron ( $1.6 \times 10^{-19}$  C)
- $a$  : Le facteur d'idéalité de la jonction.
- $V$  : La tension aux bornes de la cellule.

#### I-7-C-Modèle avec Pertes Ohmiques( $R_s$ -Model) :

Ce modèle tient compte de la résistivité du matériau et des pertes ohmiques dues aux niveaux des contacts, ce qui permet une meilleure représentation du comportement électrique de la cellule par rapport au modèle idéal [8]. Ces pertes sont représentées par une résistance série  $R_s$  dans le circuit équivalent représenté ci-dessous:

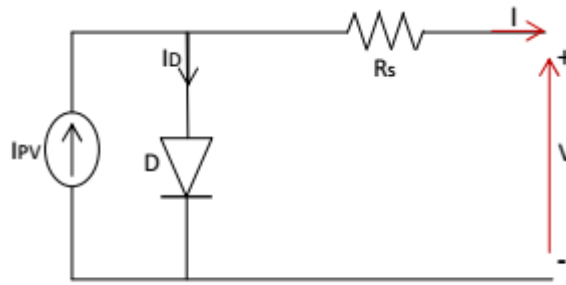


Figure I.9 :Circuit Équivalent d'une Cellule PV –  $R_s$ -Model –

Après analyse du circuit, l'équation courant- tension est donnée comme suit :

Avec :

$$I = I_{pv} - I_0 + I_s \left[ \exp \left\{ \frac{(V + IR_s)}{aV_t} \right\} - 1 \right] \quad (I.3)$$

$R_s$ : La résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions.

### I-7-D .Modèle à Deux Diodes

Le circuit équivalent de la figure I.10 représente le modèle à double diode d'une cellule

PV; la cellule solaire sous éclairciment est modélisée comme une source de photo-courant connectée avec deux diodes idéales et deux résistances : série ( $R_s$ ) et shunt ( $R_p$ ). La diode D1 reproduit le processus de diffusion, tandis que D2 représente la recombinaison des porteurs. Ainsi, le courant traversant la première diode  $I_{D1}$ , est le courant de diffusion et, le courant traversant la deuxième diode  $I_{D2}$ , est le courant de recombinaison dans la région de charge d'espace. Ces derniers, contribuent aux courants de saturation d'une cellule photovoltaïque solaire [10].

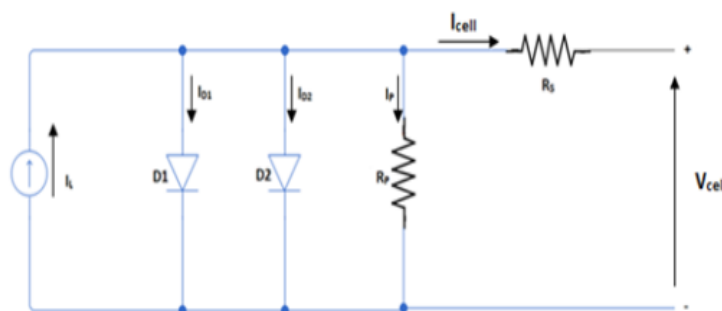


Figure I.10 : Le Schéma de Circuit Équivalent d'une Cellule PV avec Modèle à Deux Diodes, Résistance Série et Résistance Shunt.

L'équation de la caractéristique  $I$ - $V$  contient deux termes exponentiels. Le courant de sortie du générateur PV est donné par l'équation suivante :

$$I_{cel} = I_L + I_{01} \left[ \exp \left\{ \frac{q(V_{cel} - R_s I)}{a_1 k T_{cel}} \right\} - 1 \right] + I_{02} \left[ \exp \left\{ \frac{q(V_{cel} - R_s I)}{a_2 k T_{cel}} \right\} - 1 \right] - \frac{V_{cel} + R_s I}{R_p} \quad (I.4)$$

Où :

$I_{01}$  et  $I_{02}$  : sont les courants de saturation des diodes des première et deuxième diodes, respectivement.

$N_s$  : est le nombre de cellules PV connectées en série dans le module PV

$a_1$  et  $a_2$  : sont les facteurs d'idéalité de la diode qui représentent respectivement les composantes des courants de diffusion et de recombinaison.

Pour plusieurs diodes connectées en série, l'expression devient :

$$I_{Ns} = I_L + I_{01} \left[ \exp \left\{ \frac{q(V_{cel} - R_s I)}{a_1 N_s k T_{cel}} \right\} - 1 \right] + I_{02} \left[ \exp \left\{ \frac{q(V_{cel} - R_s I)}{a_2 N_s k T_{cel}} \right\} - 1 \right] - \frac{V_{cel} + R_s I}{R_p} \quad (I.5)$$

### I-7-E- Modèle Empirique :

Ce modèle décrit le comportement de la cellule PV. L'avantage majeur de ce modèle est le nombre limité des paramètres qui peuvent être facilement trouvés dans les fiches techniques des constructeurs.

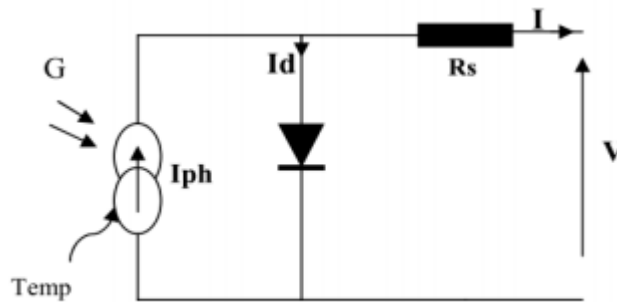


Figure I.11 : Circuit Équivalent simple de la Cellule PV[11]

La relation entre le courant de sortie et la tension aux bornes de la cellule est dérivée de

La relation entre le courant de sortie et la tension aux bornes de la cellule est dérivée de [9]:

$$I_{ph} = \frac{\Phi}{\Phi_{ref}} [ I_{ph_{ref}} + \mu I_{cs} (T - T_{ref}) ] \quad (I.6)$$

$$I_s = I_{s_{ref}} \cdot \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \cdot \exp \left[ \left( \frac{q E_g}{A k} \right) \cdot \left( \frac{1}{T_{ref}} \right) - \left( \frac{1}{T} \right) \right] \quad (I.7)$$

L'équation I.6, en supposant que  $R_{sh} = \infty$  [9]

**I-7-F- Modèle de Bishop :**

Le modèle de Bishop prend en considération l'effet d'avalanche de la cellule, et cela en ajoutant au modèle à une diode un multiplicateur non linéaire  $M(V)$  en série avec la résistance shunt. Ce multiplicateur correspond au dernier terme de l'équation qui donne la relation entre le courant ( $I$ ) et la tension ( $V$ ) d'une cellule PV[12].

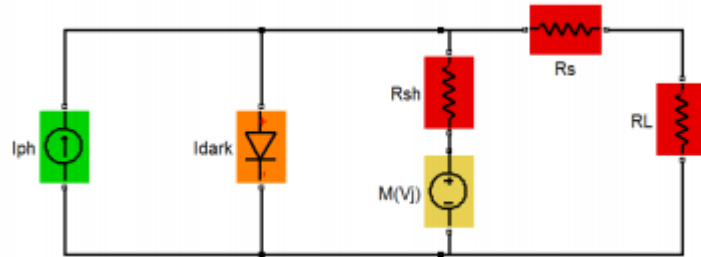


Figure I.12: Schéma Équivalent d'une Cellule PV Modèle de Bishop [11]

**I-8-Générateur photovoltaïque (GPV) :****I-8-A- Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV) :**

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un GPV. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera.

La plupart des panneaux PV commerciaux sont constitués par des sous-réseaux de cellules connectés en série. Chacun de ces sous-réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules PV connectés en série. Le nombre de cellules par sous-réseaux est le fruit d'un compromis économique entre protection et pertes d'une partie importante du GPV en cas de défaut partiel.

Nous pouvons remarquer que comme pour une cellule, la caractéristique électrique  $I(V)$  d'un GPV est non linéaire et présente un point de puissance maximale (PPM). Ce point a également un courant et une tension associés appelés  $I_{opt}$  et  $V_{opt}$  respectivement. Le point de fonctionnement d'un GPV est fonction de l'impédance de la charge qu'il alimente. Cette charge pourrait être une charge résistive ou un bus de tension continue (par exemple, connecté sur une batterie). Dans le cas d'une batterie, c'est elle qui impose le point de fonctionnement du GPV lors d'une connexion directe.

La figure I.13 montre la schématique classiquement adoptée pour un GPV élémentaire. Pour tous les essais que nous avons menés dans cette thèse, nous avons eu à notre disposition des modules PV référencés BP585 constitués de deux fois 18 cellules PV. Leur

environnement de fonctionnement traditionnel comprend la connexion de deux diodes by-pass et d'une diode anti-retour. Les connexions physiques permettent de travailler avec ou sans les diodes en fonction des conditions souhaitées[8].

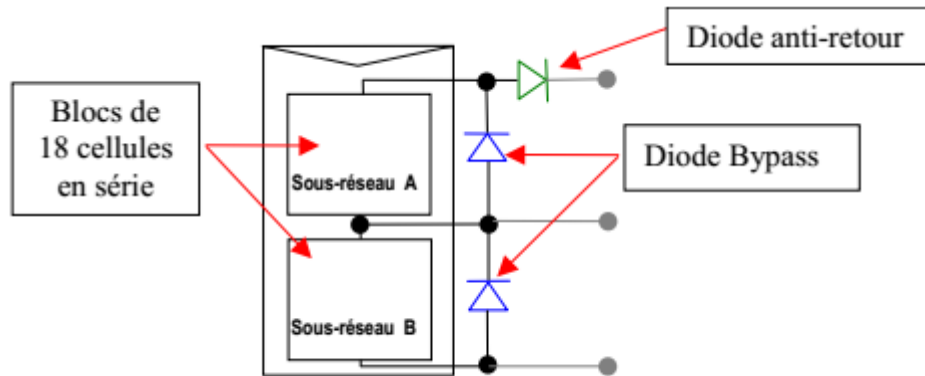


Figure I.13 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour

**I-8-B-Protection d'un générateur photovoltaïque :**

Dans la conception des installations photovoltaïques, une protection efficace est essentielle pour éviter les pannes dues à la connectivité cellulaire et à l'ombrage. Cela inclut plusieurs types de protection, comme les diodes anti-retour et les diodes de by-pass pour éviter les courants inverses et les points chauds. De plus, il est important de protéger le générateur contre les surintensités. Cette protection est cruciale pour assurer la durabilité et la performance des installations photovoltaïques.

Les diodes de by-pass, comme illustré dans la Figure I.14, sont utilisées pour protéger les cellules les plus faibles dans les modules PV, tandis que les diodes anti-retour, représentées dans la Figure I.15, sont essentielles pour éviter les courants inverses entre les strings dans les systèmes PV.

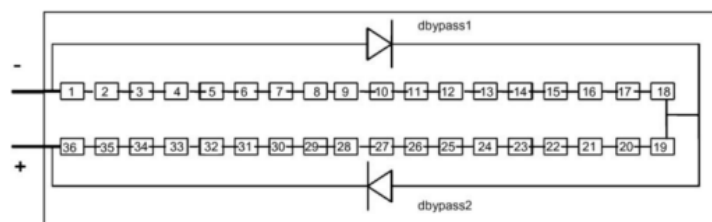


Figure I.14 Module de 36 cellules protégé par deux diodes de by-pass

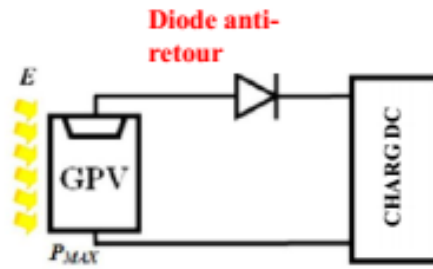


Figure I.15 : diode anti-retour placée à la sortie du string et avant la charge et la connexion

**I-9- La caractéristique I-V de la cellule PV :**

La puissance électrique d'une cellule photovoltaïque est le produit de sa tension et de son courant. Ces deux paramètres dépendent des propriétés électriques de la cellule et de la charge connectée.

➤ **Simulation du panneau photovoltaïque :**

Pour étudier le panneau photovoltaïque sélectionné, basé sur le modèle mentionné précédemment, des simulations sont réalisées à l'aide du logiciel MATLAB – SIMULINK. Les résultats sont présentés comme suit.

La figure (I.16) illustre le schéma global d'une cellule solaire simulée avec MATLAB :

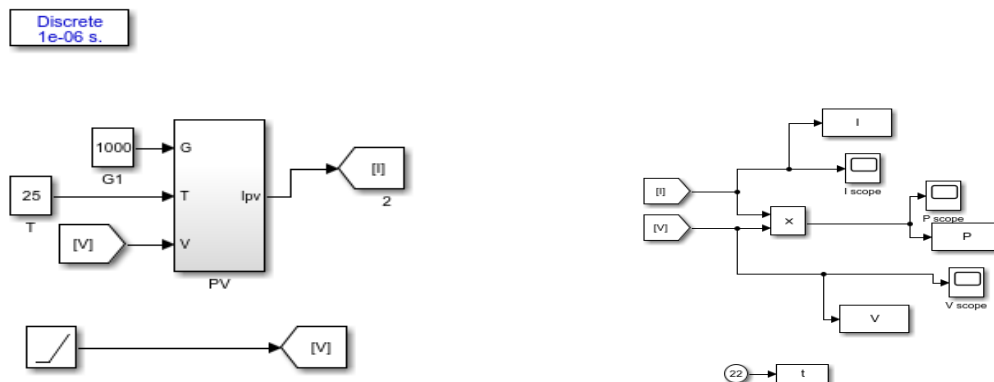


Figure I.16: cellule photovoltaïque sous MATLAB

Les résultats de simulation, représentant  $P = (V)$  et  $I = (V)$  pour une température de 25 °C et une irradiance de 1000 W/m<sup>2</sup> (conditions standards), sont présentés dans la figure I.17.

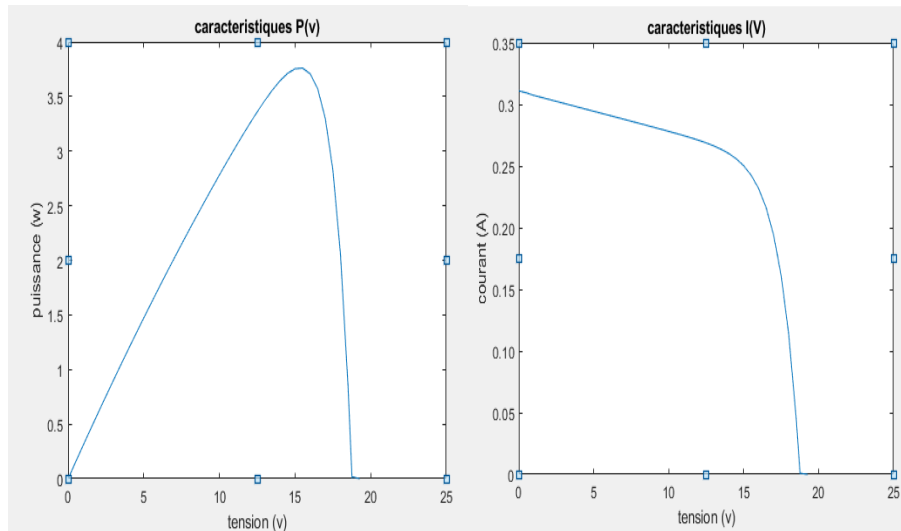


Figure I.17 : Les courbes I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque dans des conditions standard de test (STC) avec une irradiance de 1000 W/m<sup>2</sup> et une température de 25 °C.

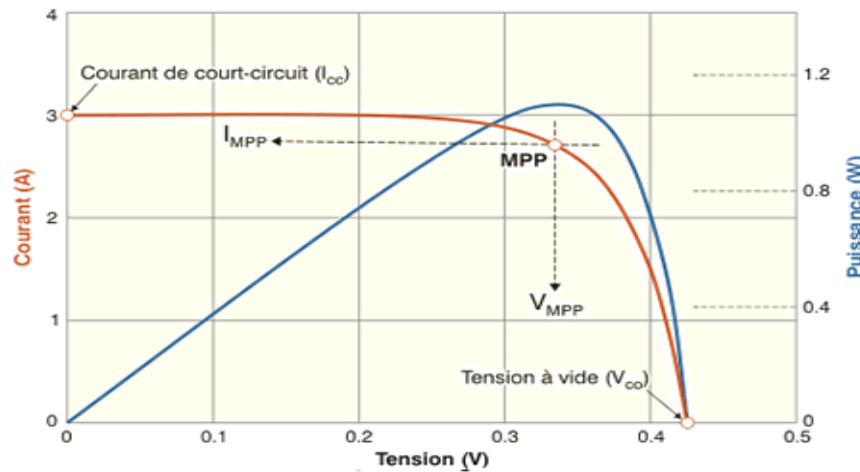


Figure I.18: Représentation conventionnelle de la courbe I(V) et P(V)[13]

La caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque synthétise ses propriétés électriques. Tout dipôle électrique est défini par sa propre caractéristique courant-tension, notamment une cellule photovoltaïque[13].

**I-9-A- Courant de court-circuit (I<sub>cc</sub>) :**

Il représente la quantité de paires électron-trou créées dans la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et des trous (L<sub>n</sub> et L<sub>p</sub>) respectivement [13].

$$I_{ph} = q G (L_n + L_p) \quad (I.8)$$

**I-9-B- Tension en circuit ouvert (Vco) :**

C'est la tension à laquelle la diode fournit un courant égal au courant de court-circuit (Icc) dans l'obscurité (I = 0). Elle est obtenue à partir de l'équation : [13].

$$V_{cc} = \frac{KT}{q} \ln(I_{cc}/I_0 + I) \quad (I.9)$$

Où I0 est le courant de saturation de la diode.

**I-9-C- Puissance débitée :**

Elle est obtenue à partir de l'expression :

$$P = I.V \left[ (I_{ph} - I_0) \exp \left\{ \frac{V + IR_s}{V_t} \right\} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} - \frac{V_{cel} + R_{sl}}{R_p} \quad (I.10)$$

**I-9-D- Le facteur de forme FF :**

Il définit l'efficacité de la cellule solaire et est obtenu comme suit: [24].

$$FF = \frac{V_M \cdot I_M}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I.11)$$

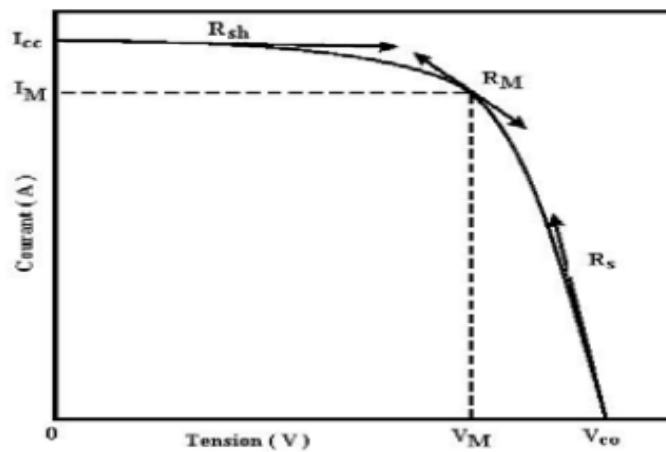


Figure I.19 :Points et valeurs remarquables de la caractéristique courant–tension[13].

VM : Tension correspondante à la puissance maximale fournie.

IM: Courant correspondant à la puissance maximale fournie.

Chacune de ces grandeurs (VM , IM , Vco , Icc ) est représentée sur la figure I-19 [13].

**I-9-F- Le rendement de conversion d'énergie η :**

Il représente le rapport de la puissance maximale générée à la puissance du rayonnement solaire incident [13].

$$\eta = FF \cdot \frac{I_s \cdot V_{co}}{P_o} = \frac{I_m \cdot V_m}{P_o} \quad (I.12)$$

### I-10- Influence des paramètres sur la caractéristique I-V :

La modélisation analytique des cellules solaires nécessite une description détaillée des matériaux utilisés. Tout écart notable des paramètres par rapport aux valeurs nominales révèle un défaut. La modélisation conduit à une équation courant-tension non linéaire, impliquant des variables et des paramètres physiques. [14]

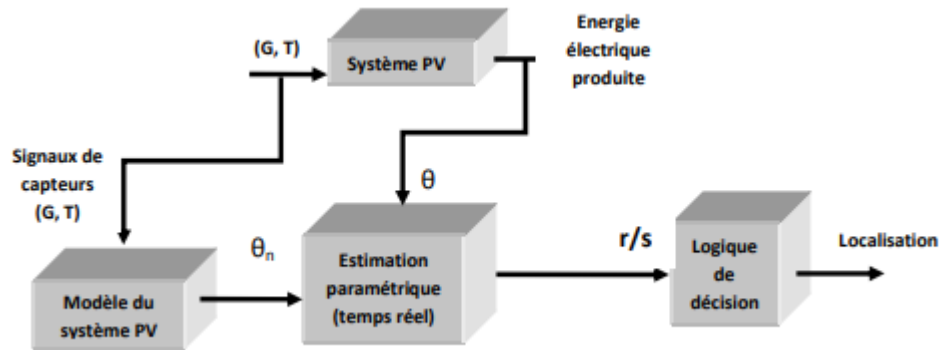


Figure I.20: Génération de résidus/symptômes par estimation des paramètres[14]

La modélisation de la cellule photovoltaïque conduit à une équation courant-tension non linéaire, dérivée des lois et principes de la physique (modèle de connaissance). Cette équation implique diverses variables et paramètres dotés d'une signification physique. [14]

#### I-10-A- Impact du type de connexion sur la caractéristique I-V :

Trois types de connexion des cellules PV sont identifiés : la connexion en série simple, le bloc série-parallèle et la connexion série des blocs série-parallèle. L'effet de ces configurations sur la production d'énergie électrique a été étudié en détail et est présenté ici. Le choix de la configuration de connexion des cellules pour répondre aux besoins énergétiques spécifiques d'une application donnée implique le calcul du nombre de cellules en série pour obtenir la tension requise et le nombre de rangées en parallèle pour obtenir le courant désiré. [14]

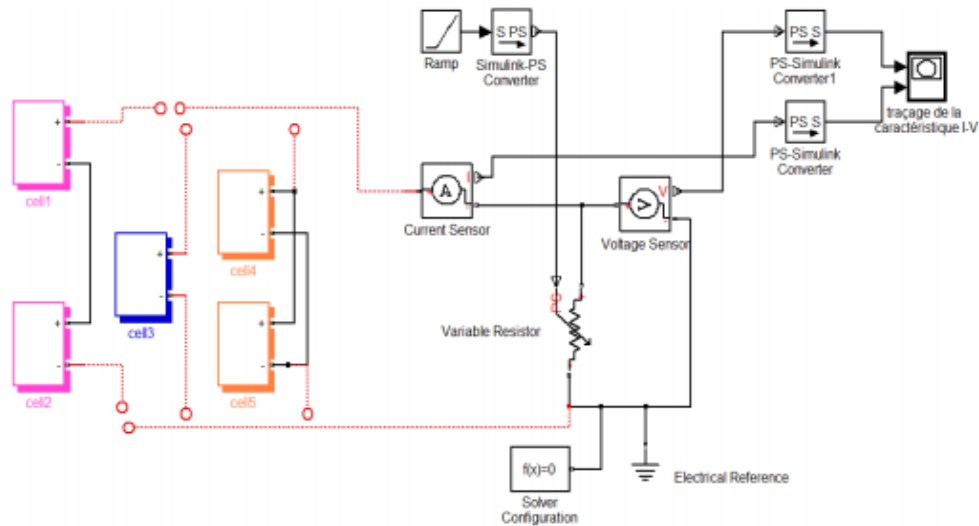
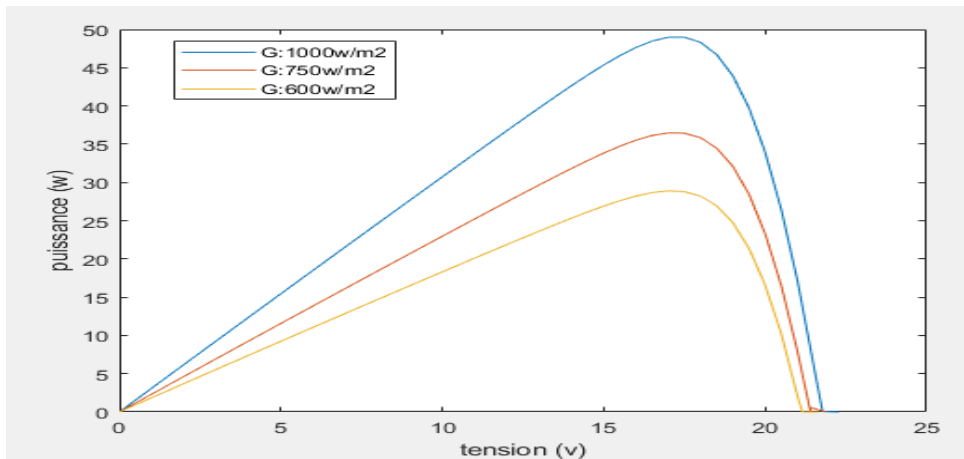


Figure I.21 :Schéma de connexion de cellule en série et en parallèle [14]

### I-10-B- Influence de l'éclairement et de la température sur les courbes I-V et P-V

#### ❖ L'Effet de l'Irradiation Solaire

L'effet de l'irradiation solaire est étudié en variant l'éclairement solaire de  $400 \text{ w/m}^2$  à  $1000 \text{ w/m}^2$ , avec une température fixée à  $T = 25^\circ\text{C}$ . Les caractéristiques I-V et P-V sont illustrées dans la figure I.22. On observe que le courant de court-circuit  $I_{cc}$  est proportionnel à l'éclairement solaire, tandis que la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  reste généralement constante.



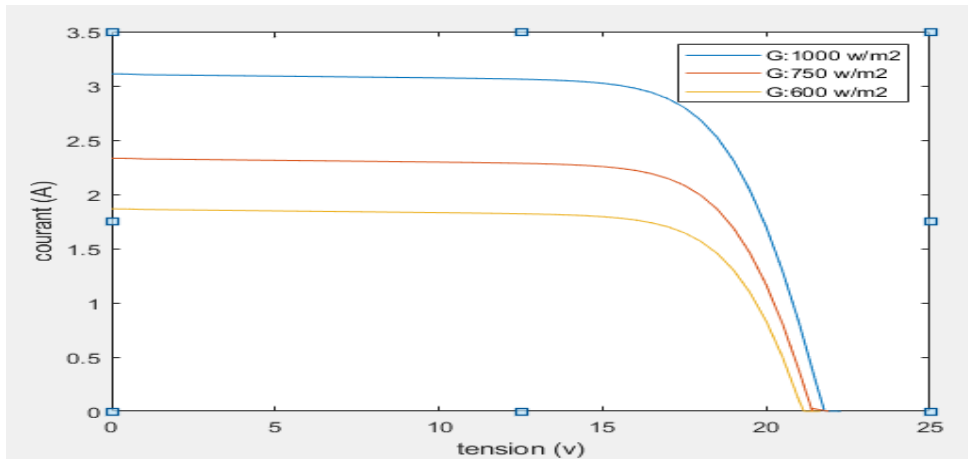
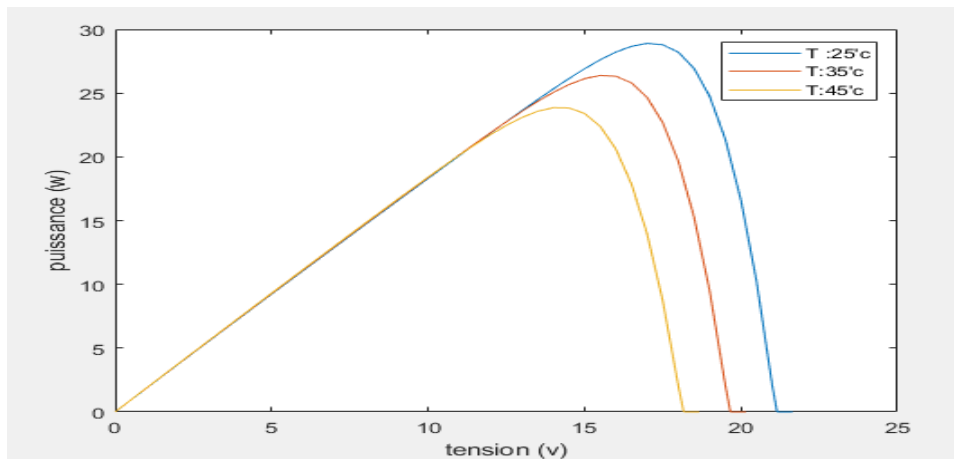


Figure I.22: L'effet de l'irradiation sur les caractéristique I-VetP-V,=25°C

On constate que le courant de court-circuit  $I_{cc}$  varie proportionnellement à l'éclairement solaire, tandis que la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  reste généralement constante.

❖ **L'effet de la Température**

La température est variée entre 25 °C et 45 °C, avec un pas de changement de 10°C. Les courbes I-V et P-V sont illustrées dans la figure I.23.



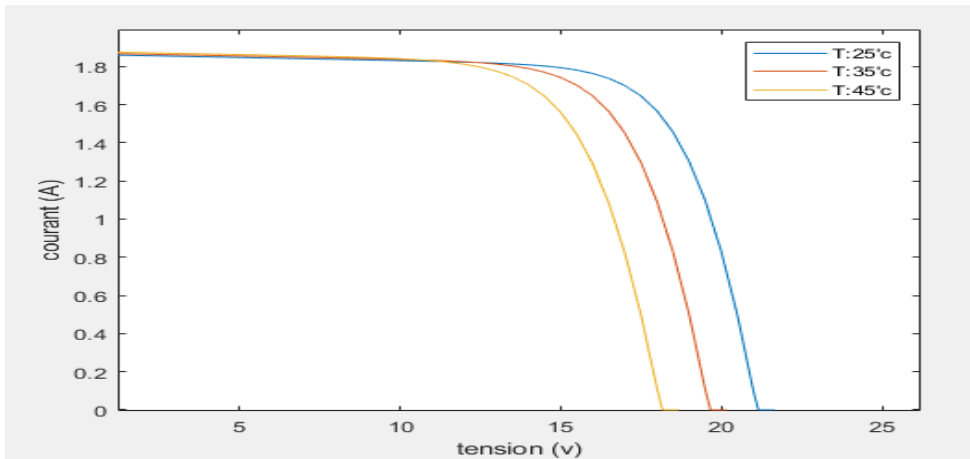


Figure.I.23 : Effet de la température sur les caractéristiques I-V et P-V, 1000 W/m<sup>2</sup>

On remarque que la température n'affecte pas le courant de court-circuit  $I_{cc}$ , mais la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  varie en fonction de la température.

**I-10-c-Association des cellules solaires :**

Les cellules solaires dans les générateurs photovoltaïques sont associées en série et/ou en parallèle. Les deux paragraphes suivants détaillent les caractéristiques de chaque association.

❖ **Association des cellules photovoltaïques en parallèle**

Le groupement des cellules connectées en parallèle est soumis à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée [15 ].

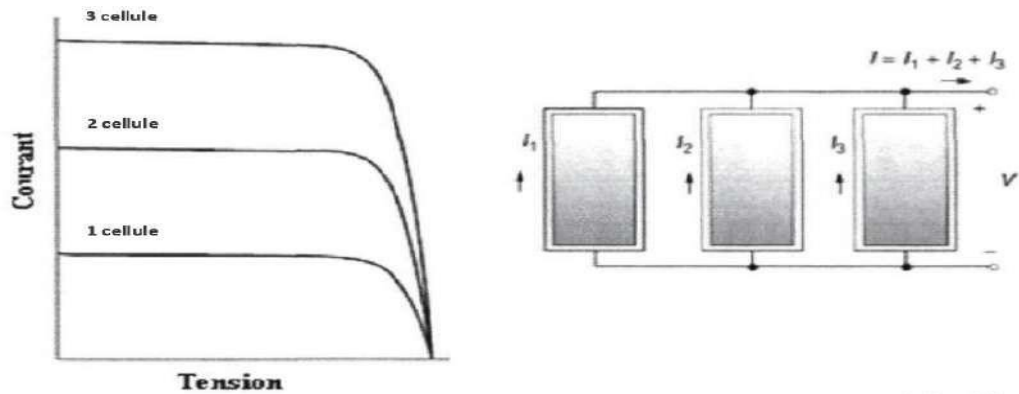


Figure. I.24 :les caractéristiques de 3cellules photovoltaïques

❖ Association des cellules photovoltaïques en série

Le groupement des cellules connectées en série est soumis au même courant et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions à courant donné. Obtenues par l'association des cellules PV en série [15]:

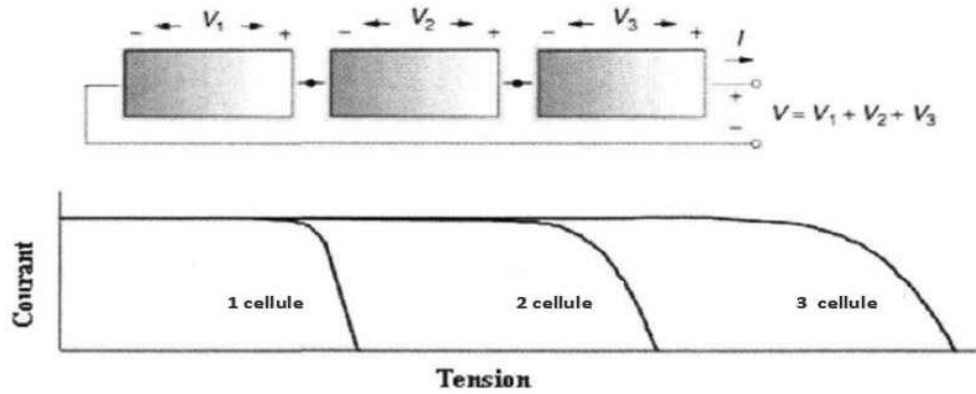


Figure I.25: les caractéristiques de 3 cellules photovoltaïque s'associées en série.

$$I_{SCC} = I_{CC} \text{ et } V_{SCO} = N_s * V_{CO} \quad (I.13)$$

I-10-D- Les zones de fonctionnement du modèle solaire :

Sachant que la caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe  $I = f(V)$  est fixée. La valeur de la charge aux bornes du générateur est responsable de la détermination du point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure ci-dessous représente trois zones essentielles [15]:

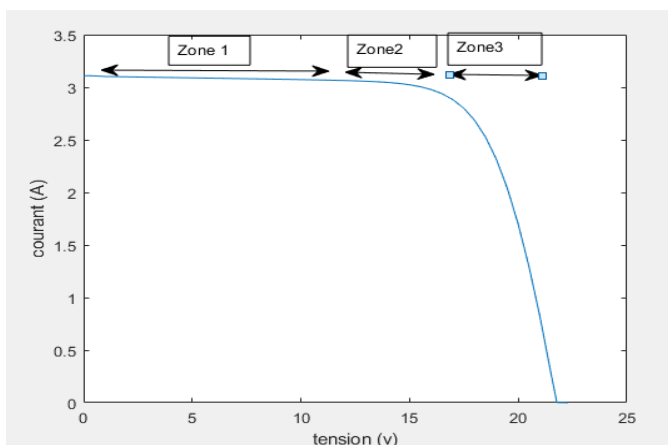


Figure I.26 : Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque

- Zone (1): Dans cette zone, le courant reste constant quelle que soit la valeur de tension, et le générateur solaire fonctionne comme un générateur de courant.
- Zone (2) : dans cette zone qui est comprise entre la zone 1 et la zone 3, le panneau

solaire génère l'énergie et fonctionne en mode nominal, aussi dans cette zone, il existe un point où la puissance générée est maximale.

- Zone (3): Dans cette zone, une décroissance du courant correspondant à une tension presque constante, et le générateur solaire fonctionne comme un générateur de tension.

### **I-11-Avantages et inconvénients d'une installation PV**

#### **I-11-A. Avantage :**

1. Haute fiabilité : L'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées et explique son utilisation dans les engins spatiaux.
2. Modularité : Les panneaux photovoltaïques peuvent être montés de manière simple et adaptée à divers besoins énergétiques, de quelques milliwatts à plusieurs mégawatts.
3. Coût de fonctionnement faible : Les coûts d'entretien sont réduits, et aucune ressource combustible ni personnel hautement spécialisé ne sont nécessaires.
4. Respect de l'environnement : La technologie photovoltaïque produit des installations non polluantes, silencieuses et n'entraînant aucune perturbation du milieu, si ce n'est l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions[16].

#### **I-11-B - Inconvénient :**

1. Coût élevé de fabrication : La fabrication des modules photovoltaïques nécessite une haute technologie et des investissements coûteux.
2. Rendement limité : Le rendement réel de conversion d'un module est relativement faible, entre 10 et 15 %, avec une limite théorique pour une cellule de 28 %.
3. Dépendance aux conditions météorologiques.
4. Coût accru en cas de stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie).
5. Problèmes persistants liés au stockage de l'énergie électrique.
6. Dissipation d'énergie : Le faible rendement des panneaux photovoltaïques est attribuable au fonctionnement des cellules, où une partie de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur[16].

**Conclusion:**

Dans ce premier chapitre, nous avons abordé divers aspects des systèmes d'énergie photovoltaïque, notamment :

- La production d'énergie électrique à partir de l'énergie solaire par le biais de panneaux solaires, qui font partie intégrante du système photovoltaïque, et qui exploitent le rayonnement lumineux solaire ;
- Les différents types de cellules solaires utilisées ;
- Le processus de conversion du rayonnement solaire en énergie électrique, pouvant être stockée ou consommée ;
- Les méthodes de protection du générateur photovoltaïque ;
- L'importance des caractéristiques et des paramètres I-V des cellules photovoltaïques, ainsi que leur mise en œuvre ;
- La nécessité de comprendre le principe de fonctionnement des systèmes photovoltaïques, ainsi que les différentes technologies utilisées pour mieux contrôler le mécanisme dans son ensemble, y compris les diverses applications de ce système ;
- La modélisation des systèmes photovoltaïques en fonctionnement normal, essentielle pour obtenir la caractéristique I-V du système photovoltaïque et le comportement électrique du générateur photovoltaïque.

Ce chapitre a présenté la modélisation d'une cellule photovoltaïque ainsi que les performances du GPV, en mettant en évidence l'influence de certains paramètres sur ses performances.

Pour un fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque, l'utilisation d'un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge est nécessaire, et cela sera traité dans le chapitre suivant.

## ***Chapitre 2:***

*Pour suite du point de  
puissance Maximale MPPT*

**II-1- Introduction :**

Les générateurs photovoltaïques sont utilisés dans diverses applications électriques pour fournir de l'énergie électrique. Pour maximiser la puissance d'un générateur photovoltaïque, une adaptation continue de la charge est nécessaire. Cela peut être réalisé en utilisant un convertisseur DC-DC contrôlé par un mécanisme de suivi du point de puissance maximale (MPPT).

Ce chapitre commence par présenter des définitions et des notions de base sur les convertisseurs DC-DC, ainsi que les modèles mathématiques nécessaires pour étudier leur comportement lors de la simulation du système PV global. Ensuite, nous examinons en détail la technique MPPT par la méthode de perturbation et observation.

La poursuite du point de puissance maximale (MPPT) est une composante essentielle des systèmes photovoltaïques. Depuis la publication de la première loi de commande en 1968, plusieurs techniques ont été développées, adaptées aux sources d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques varient en termes de complexité, de nombre de capteurs requis, de vitesse de convergence, de coût, d'efficacité et de domaine d'application[12].

**II-2- Circuit d'adaptation et Types de Hacheurs :**

Ce sous-chapitre aborde les différentes méthodes de connexion entre la source et la charge, explore les circuits d'adaptation utilisés entre un générateur photovoltaïque et la charge, ainsi que les divers types de hacheurs impliqués dans ce processus.

**II-2-A- Connexion directe entre la source et la charge**

Le système le plus simple pour produire de l'énergie solaire implique un générateur photovoltaïque directement connecté à une charge. Cette configuration minimale offre une simplicité et un coût réduit, car il n'y a pas d'éléments électroniques intermédiaires entre la source et la charge (Figure II.1). Cependant, cette méthode présente des inconvénients, notamment le risque de décharge inverse lorsque le module n'est pas exposé à la lumière solaire, pouvant endommager irrémédiablement le générateur photovoltaïque. Pour éviter cela, une diode anti-retour est souvent ajoutée entre le GPV et la charge. De plus, cette configuration ne permet pas de limiter ou de réguler la tension de la batterie, et elle ne garantit pas le transfert de la puissance maximale disponible du générateur vers la charge [16].

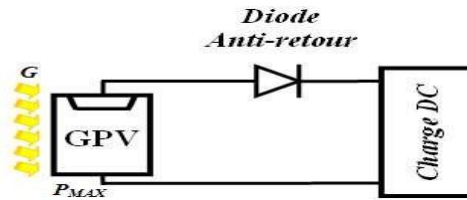


Figure II.1: Principe de la connexion directe entre un GPV et une charge

### II-2-B-Circuit d'adaptation entre un générateur photovoltaïque et la charge :

À la connexion directe entre le générateur et la charge, on note qu'il existe un écart entre l'énergie produite et celle réellement transférée à la charge, dû aux variations de la température et de l'intensité de l'éclairement. Pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire disponible à tout moment et la transférer efficacement à la charge, un étage d'adaptation est nécessaire entre le GPV et la charge. Cet étage d'adaptation assure un contrôle optimal de l'énergie transmise à la charge.

L'adaptation la plus courante en PV est réalisée à l'aide d'un convertisseur statique (DC-DC), choisi en fonction des besoins spécifiques de la charge à alimenter. Ce convertisseur peut être soit survolteur (boost), soit dévolteur (buck), en fonction des exigences de tension de la charge. Par exemple, si la charge est une batterie au plomb, les plages de tension de charge et de décharge de cette dernière permettent de déterminer la structure la plus appropriée pour le circuit de conversion.

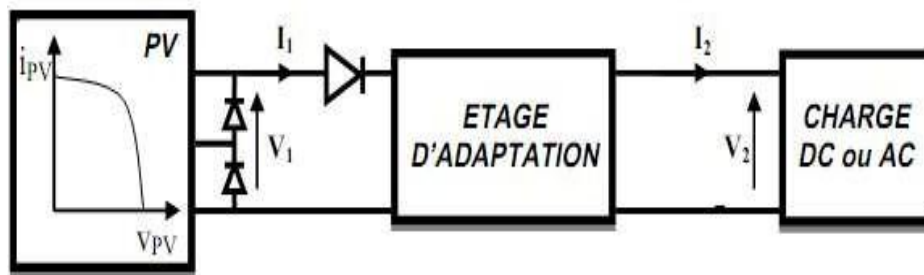


Figure II.2: Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation

### II-2-C-Convertisseur DC-DC :

Le hacheur, ou convertisseur statique, agit comme un adaptateur entre la source (générateur photovoltaïque) et la charge en ajustant le rapport cyclique  $\alpha$  lorsque la charge nécessite une tension supérieure à celle du générateur PV. Ainsi, il permet de suivre le point de puissance maximale en utilisant différentes techniques de commande MPPT[17].

### II-2-C-1-Les types d'hacheurs

Il existe plusieurs types de convertisseurs DC-DC, chacun différant dans sa conception et sa fonctionnalité. On distingue trois types principaux :

- Le hacheur série (Buck)
- Le hacheur parallèle (Boost)
- Le hacheur série-parallèle (Buck-boost)

Dans notre étude, nous avons utilisé le hacheur boost.

#### a) Hacheur parallèle (boost)

Le hacheur parallèle, également appelé Boost, est un convertisseur élévateur capable de produire une tension de sortie supérieure à celle de l'entrée [17].

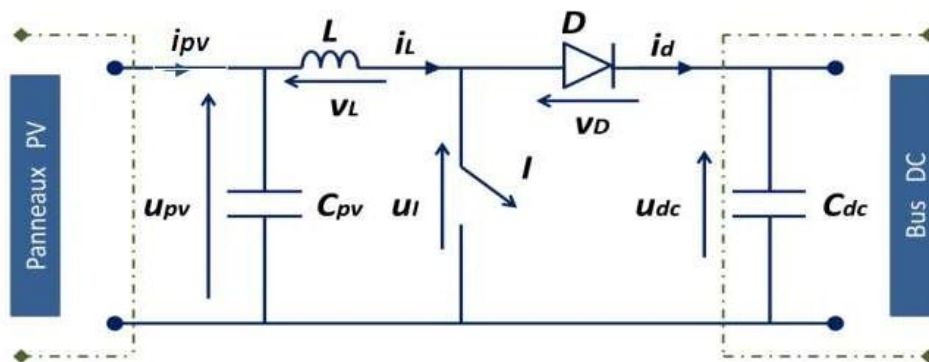


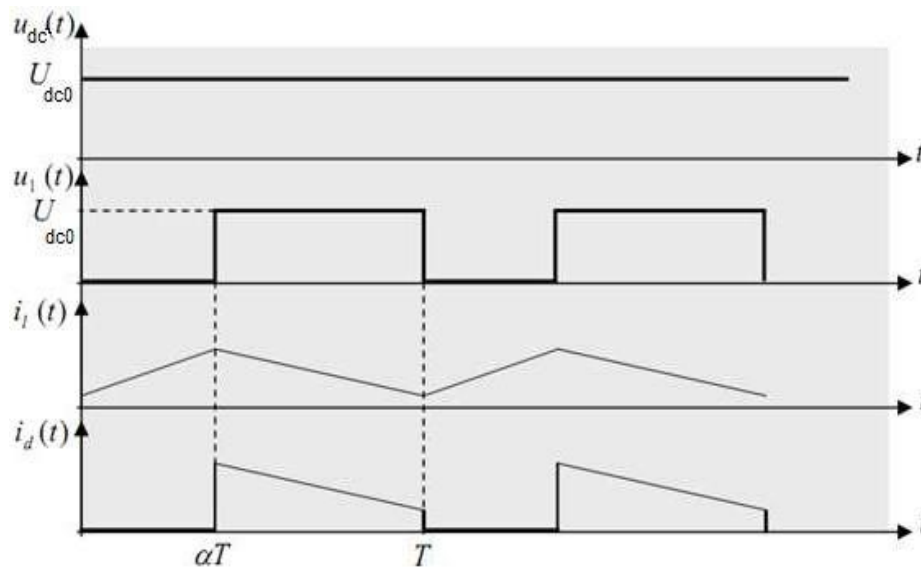
Figure .II.3:Schéma électrique du hacheur « Boost »

- L'inductance permet de lisser le courant prélevé sur la source.
- La capacité C limite l'ondulation de tension en sortie. Son fonctionnement est le suivant :
  - Pendant la première période ( $\alpha T$ ), l'interrupteur (I) est fermé, ce qui permet au courant dans l'inductance de croître progressivement, accumulant ainsi de l'énergie jusqu'à la fin de cette période. Ensuite, lorsque l'interrupteur (I) s'ouvre, l'inductance (L) s'oppose à la diminution du courant ( $i_L$ ) et génère une tension qui s'ajoute à la tension de la source. Cette tension est appliquée à la charge (R) à travers la diode (D). Les équations du hacheur sont données par :[17].

$$\begin{aligned}\frac{dI_L}{dt} &= \frac{1}{L}(U_{pv} - R_L I_L) \\ \frac{dU_{pv}}{dt} &= \frac{1}{C_{pv}}(I_{pv} - I_L)\end{aligned}\quad (\text{II-1})$$

• Lorsque l'interrupteur I est ouvert :

$$\begin{aligned}\frac{dI_L}{dt} &= \frac{1}{L}(U_{pv} - R_L I_L - U_{dc}) \\ \frac{dU_{pv}}{dt} &= \frac{1}{C_{pv}}(I_{pv} - I_L)\end{aligned}\quad (\text{II-2})$$



**Figure II.4:** Hacheur élévateur en régime de fonctionnement continu. Le modèle moyen de ce convertisseur sur une période de découpage est donc

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L}(U_{pv} - R_L I_L - (1 - D_{pv})U_{dc}) \quad (\text{II-3})$$

$$\frac{dU_{pv}}{dt} = \frac{1}{C_{pv}}(I_{pv} - I_L)$$

### b). Dimensionnement de la capacité $C$ et l'inductance $L$

Les relations suivantes [18] expriment la tension et le courant de sortie en fonction des entrées

$$V_{out} = V_{in} / (1 - \alpha) \quad (\text{II.4})$$

$$I_{out} = I_{in} (1 - \alpha) \quad (\text{II.5})$$

Pour déterminer les valeurs des éléments passifs, on utilise les relations suivantes [18] :

$$L > (1 - \alpha) 2 * R / (2 * f) \quad (\text{II.6})$$

$$C > V_{out} * \alpha / (R * \Delta V * f) \quad (\text{II.7})$$

## II-3-Optimisation de la puissance du générateur PV: Étude du MPPT

### II-3-1- La commande de la puissance maximale du générateur photovoltaïque :

Le changement des conditions climatiques va affecter la puissance de sortie du générateur photovoltaïque. L'utilisation des algorithmes MPPT, permet d'assurer une puissance de sortie maximale sous des conditions environnementales à l'aide des données par variation du rapport cyclique du convertisseur statique.

Plusieurs algorithmes MPPT sont décrits dans la littérature. Dans cette section, nous nous intéressons à la méthode de perturbation et d'observation ainsi qu'à la méthode de logique floue de la conductance.

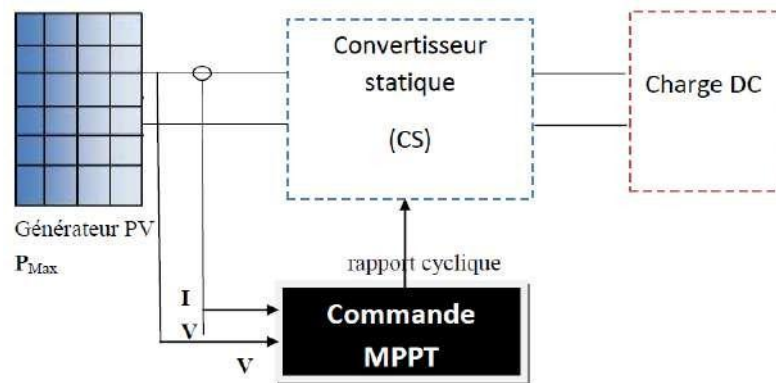


Fig.II.5:Diagramme du système photovoltaïque étudié

### II-3-1-Quête du Maximum Power Point Tracker (MPPT) :

Le régulateur de charge solaire MPPT, composant fondamental du système solaire, joue un rôle crucial dans la capture de l'énergie générée par les cellules solaires et la régulation de la puissance continue selon la tension système approuvée. Il fonctionne comme un convertisseur CC/CC, modulant le courant électrique en impulsions similaires au PWM. Cependant, il possède l'avantage d'utiliser de manière optimale l'énergie produite par les cellules solaires en réduisant la tension tout en augmentant le courant [19].

Le principe fondamental du régulateur MPPT est d'extraire l'énergie électrique maximale des cellules solaires en les exploitant à leur tension la plus efficace, connue sous le nom de Point de Puissance Maximum (PPM). Ensuite, le régulateur travaille pour réduire la tension totale du panneau pour correspondre à la tension de charge et obtenir le courant de charge maximal pour la batterie. De plus, il peut alimenter efficacement les charges électriques CC [19].

**II-3-2- Efficacité du régulateur MPPT :**

Plusieurs conditions améliorent l'efficacité du régulateur MPPT par rapport au régulateur PWM :

- Temps froid : Les panneaux solaires fonctionnent de manière optimale à des températures plus froides, rendant le MPPT plus efficace pour extraire l'énergie maximale des cellules.
- Profondeur de décharge de la batterie élevée : Le MPPT accélère le processus de charge de la batterie, surtout lorsque la tension de la batterie est basse [19].

**II-3-3- Effets des facteurs environnementaux sur le régulateur MPPT :**

Les caractéristiques de la cellule solaire sont significativement influencées par les facteurs environnementaux suivants :

- Insolation
- Temperature
- Conditions de partiel ombrage Les impacts de ces facteurs environnementaux sont expliqués comme suit.

**II-3-4- Indice de Performance de l'Installation Photovoltaïque (Facteur de Qualité):**

L'indice de performance est l'une des valeurs les plus critiques pour évaluer l'efficacité d'une installation photovoltaïque. En essence, l'indice de performance représente le rapport entre le rendement énergétique réel et le rendement énergétique théoriquement atteignable. Il est largement indépendant de l'orientation de l'installation photovoltaïque et du rayonnement sur l'installation photovoltaïque. Par conséquent, l'indice de performance permet des comparaisons des installations photovoltaïques connectées au réseau dans divers endroits dans le monde.

Plus la valeur d'une installation photovoltaïque se rapproche de 100 %, plus l'installation fonctionne efficacement. Cependant, il n'est pas pratiquement possible d'atteindre une valeur de 100 % car le fonctionnement de l'installation photovoltaïque entraîne toujours des pertes, qui sont inévitables (par exemple, pertes thermiques dues au chauffage des panneaux photovoltaïques). Néanmoins, des installations photovoltaïques performantes peuvent atteindre un indice de performance allant jusqu'à 80 % [8].

**II-3-4-A. Facteurs Environnement aux:**

- Temperature des panneaux photo voltaïques
- Rayonnement solaire et dissipation d'énergie
- Ombrage ou salissure des panneaux photovoltaïques
- Ombrage ou salissure du dispositif de mesure (par exemple, SunnySensor Box) [8].

**II-3-4-B. Autres Facteurs:**

- Période d'enregistrement
- Pertes dans les lignes
- Différentes technologies solaires du dispositif de mesure (par exemple, SunnySensor Box) et des panneaux photovoltaïques
- Orientation du dispositif de mesure (par exemple, Sunny Sensor Box)
- Coefficient d'efficacité des panneaux photovoltaïques
- Coefficient d'efficacité de l'onduleur [8].

**II-4-La méthode de perturbation et d'observation (P&O) :**

La méthode de perturbation et d'observation (P&O) est une approche largement répandue pour la recherche de MPPT, car elle est simple et nécessite uniquement des mesures de la tension  $V_{PV}$  et du courant  $I_{PV}$  du générateur photovoltaïque. Elle peut détecter le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et de la température.

Le principe de cet algorithme consiste à effectuer une perturbation sur la tension et le courant du panneau PV, puis à calculer la puissance fournie par ce panneau à l'instant  $k$ ,  $P_{PV}(k)$ . Cette valeur  $P_{PV}(k)$  est comparée à la valeur  $P_{PV}(k-1)$  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 inversée en direction opposée au dernier cycle [18].

La figure (II.6) montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode P&O tel qu'il doit être implémenté. D'après cette figure, la tension et le courant  $V$  et  $I$  sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante  $P(k)$ .

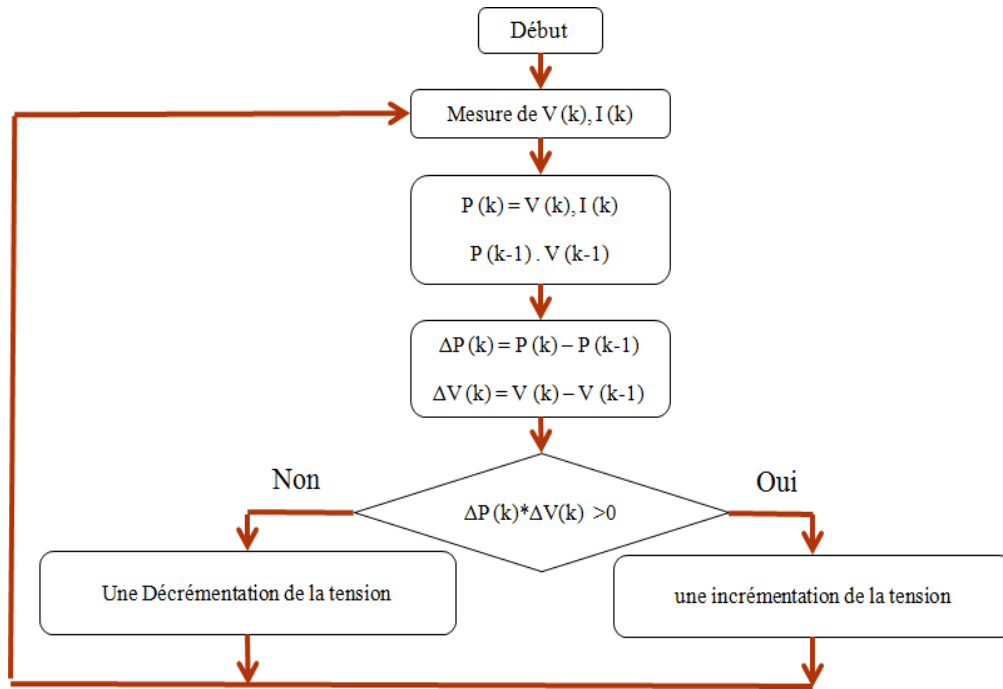


Figure .II.6 :Algorithme de la méthode P&O

- Si  $\Delta P * \Delta V$  est positif, ce la signifie que l'on s'approche du PPM. Ainsi, d'autres perturbations dans la même direction vont déplacer le point de fonctionnement vers le PPM.
- Si  $\Delta P * \Delta V$  est négatif, le point de fonctionnement est déplacé loin du PPM, et la direction de la perturbation doit être inversée pour avancer vers le PPM.

La figure (II.7) illustre le principe de l'algorithme sur la courbe P-V.

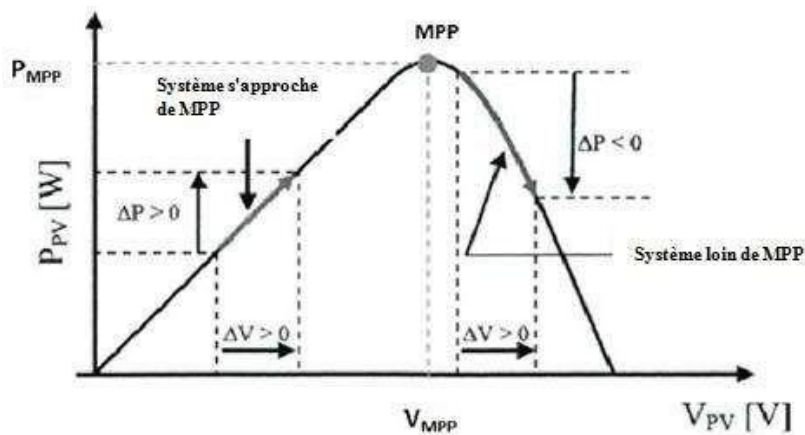
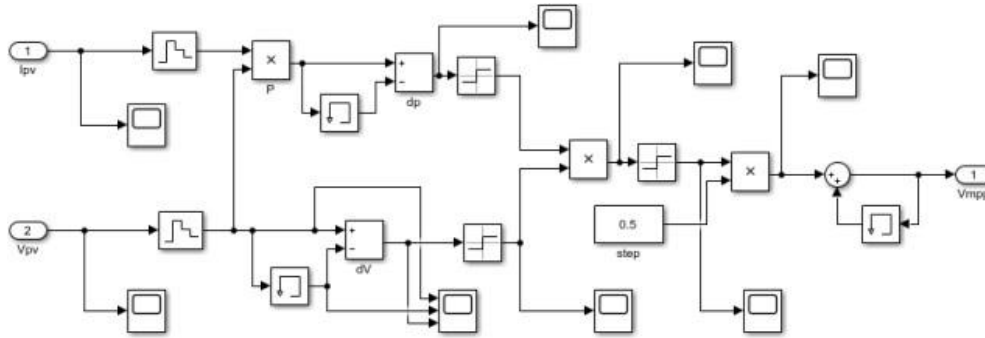


Figure . II.7:Principe de la commande P&O sur la courbe P-V[8].

**II-5- Simulation du Contrôle MPPT Numérique "P&O":**

En pratique, les conditions conventionnelles idéales sont rarement rencontrées, et la variation de ces conditions est aléatoire et imprévisible. Les changements de lumière solaire et de température affectent directement les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. Par conséquent, l'intégration d'un contrôle MPPT est essentielle [8].



La Figure II-8 : le diagramme bloc de l'algorithme (P&O).

**II-5-A-Simulation de la méthode MPPT :**

- Les paramètres des simulations ont regroupés dans le tableau (II.1) pour les conditions standard [T=25°C ; G= 1000w/m<sup>2</sup>; AM=1.5]:

Les paramètres du module		La valeur de chaque paramètre
La puissance maximale	<b>P<sub>max</sub></b>	49W
La tension maximale	<b>V<sub>max</sub></b>	17V
Le courant maximale	<b>I<sub>max</sub></b>	2.88A
La tension de circuit ouvert	<b>V<sub>co</sub></b>	21.80V
Le courant de court-circuit	<b>I<sub>cc</sub></b>	3.11A
Nombre de cellule en série	<b>N<sub>s</sub></b>	36
Nombre de cellule en parallèle	<b>N<sub>p</sub></b>	1
La valeur de résistance série	<b>R<sub>s</sub></b>	0.45Ω
La valeur de résistance parallèle	<b>R<sub>p</sub></b>	310.0248Ω

**Tableau II.01:** les paramètres du module photovoltaïque à étudier.

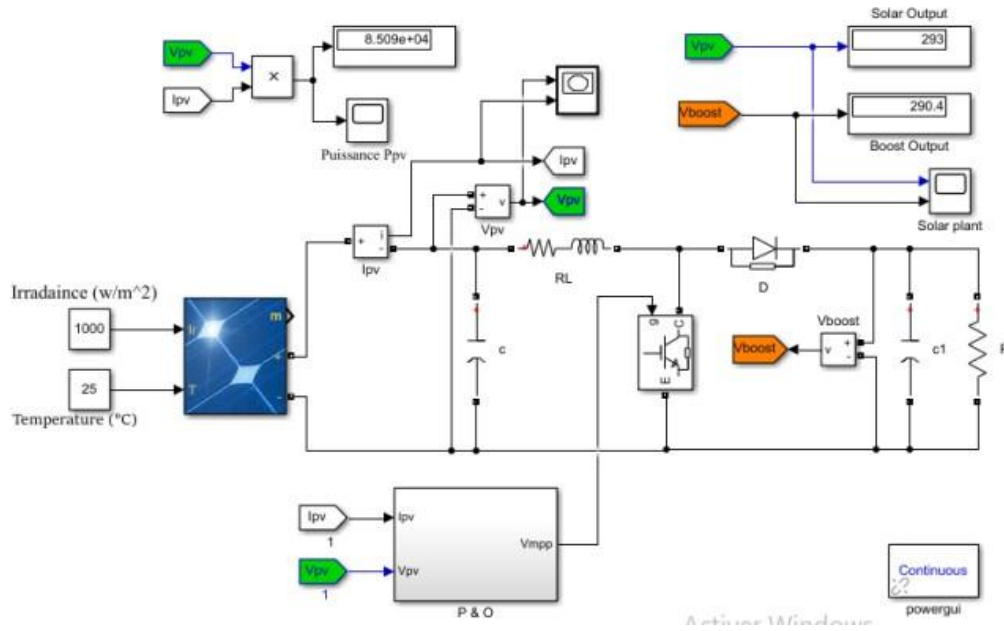


Figure II-9 : le schéma du convertisseur Boost contrôlé par MPPT.

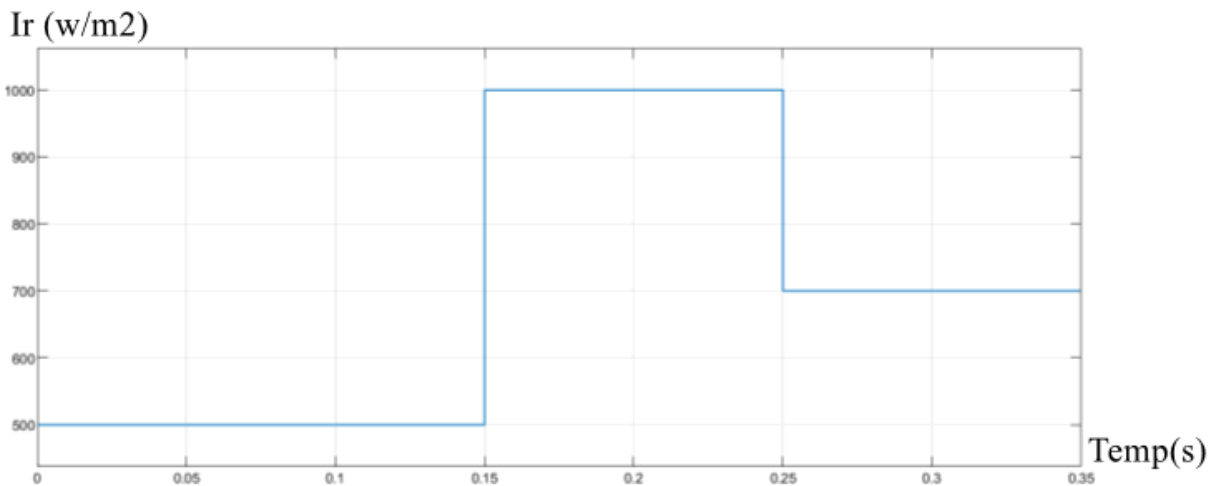
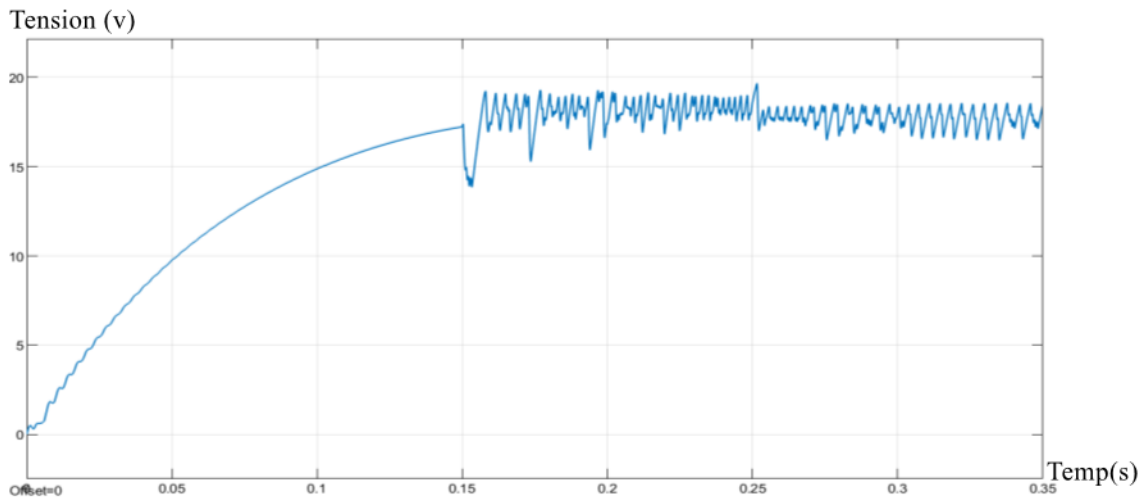


Figure II.10: Irradiation solaire

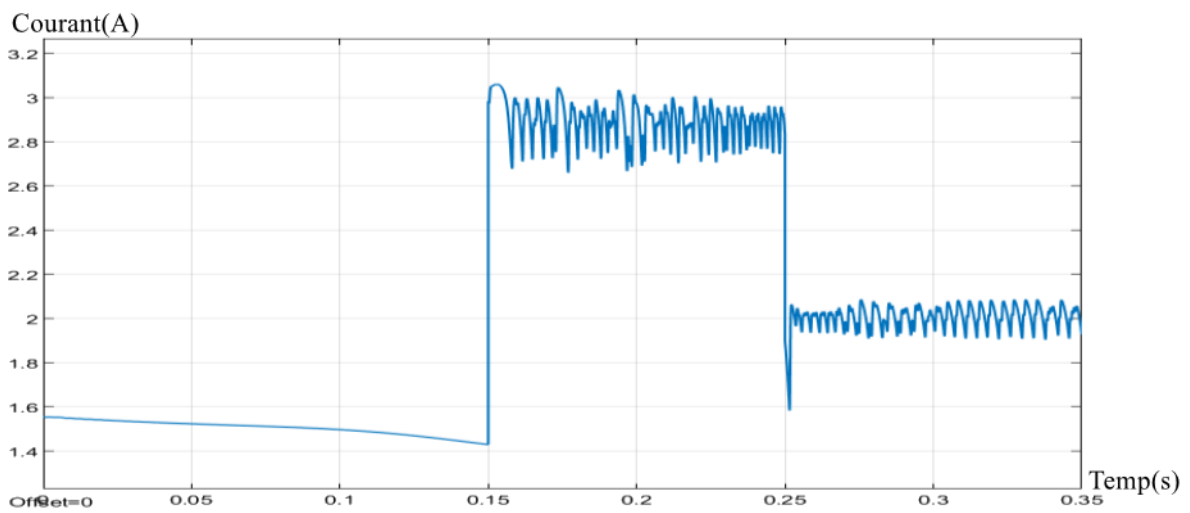
### II.5-2- Résultats de Simulation :

L'application de la méthode P&O nous a permis de tirer les remarques suivantes :

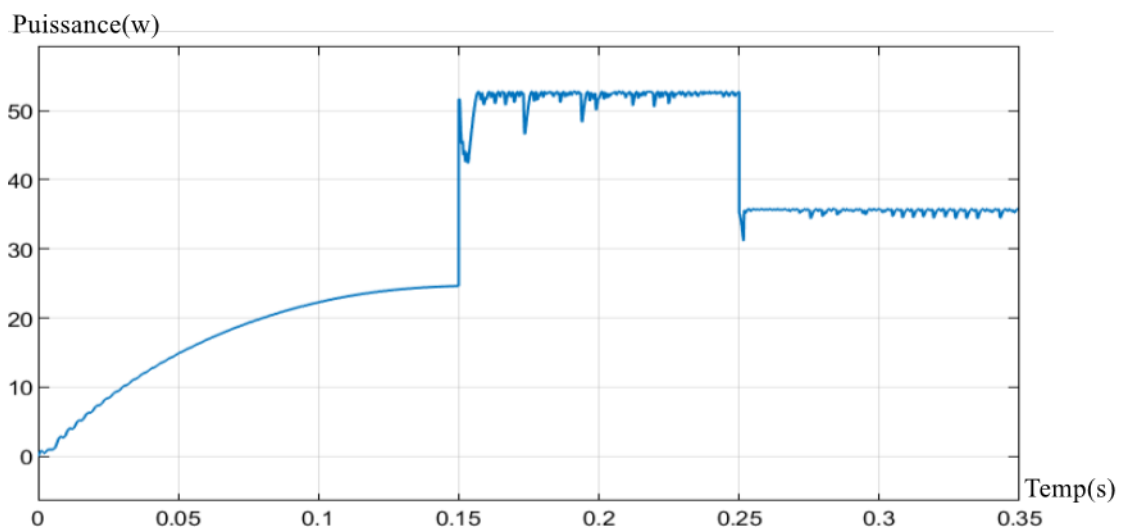
Nous supposons pour l'algorithme testé que la température ambiante est constante à 25°C. L'objectif est de vérifier le comportement de l'algorithme de la commande **P&O** en présence d'une irradiance de 500 à 1000 puis à 700 aux instants 0, 0,15 et 0,25 s respectivement, ainsi que sa capacité à maintenir le fonctionnement au point de puissance maximale. Les résultats trouvés sont illustrés dans les figures suivantes :



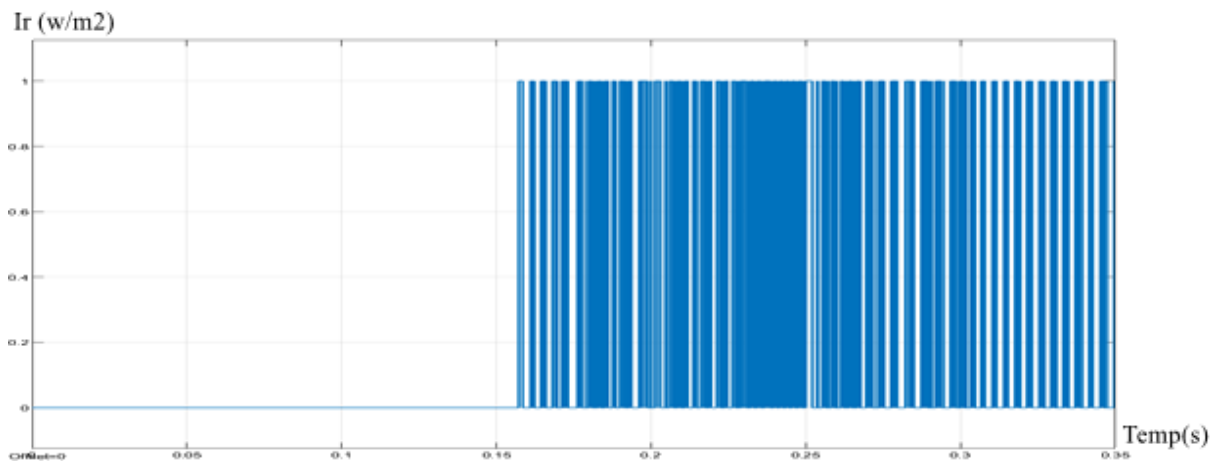
**Figure II.11:** Variation de la tension de sortie du PV



**Figure II.12:** Variation du courant de sortie du PV



**Figure II.13:** Puissance de sortie du panneau PV



**Figure II.14:**Rapport cyclique

En effet, de par le fonctionnement de l'algorithme P&O, même lorsque le point de puissance maximale est atteint, le système est sans cesse de nouveau perturbé. Ces oscillations ont pour principale conséquence une perte de puissance. La réduction des pertes d'oscillations rend l'algorithme P&O trop lent à retrouver le nouveau point de fonctionnement optimal.

**Conclusion :**

En résumé, ce chapitre a fourni une exploration approfondie des stratégies employées pour maximiser le suivi du point de puissance (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques. Nous avons acquis des connaissances sur les principes fondamentaux et les différentes techniques utilisées dans le MPPT, reconnaissant son rôle essentiel dans l'optimisation de la conversion d'énergie au sein des systèmes solaires.

Le chapitre a commencé par une introduction soulignant l'importance du MPPT et sa fonction critique en tant que composant central dans les systèmes d'énergie solaire. Nous avons compris que le MPPT fonctionne comme un convertisseur CC/CC sophistiqué, captant habilement l'énergie générée par les cellules solaires.

L'approche Perturbation et Observation (P&O), une stratégie de contrôle MPPT prominente, a été parfaitement élucidée. Nous avons acquis une compréhension globale de la manière dont cette méthode perturbe efficacement la tension PV pour déterminer le point de puissance maximum, illustrant son applicabilité pratique.

Enfin, nous avons présenté les résultats de simulation de la méthode de contrôle MPPT numérique,

Offrant des insights précieux sur les performances des systèmes photovoltaïques dans des conditions diverses. Ce chapitre est consacré à l'étude des techniques MPPT les plus populaires, telles que la Perturbation et Observation (P&O). Cette technique de suivi du point de puissance maximum (MPPT) est utilisée dans les systèmes photovoltaïques pour extraire le maximum de puissance.

Dans le but de faire une étude comparative entre les méthodes classiques et les méthodes récentes basées sur l'intelligence artificielle, nous opterons pour l'application de la technique basée sur la logique floue, qui sera traitée dans le chapitre suivant....

*Chapitre 3:*  
*Commande Mppt Basée sur l'*  
*approche Floue*

### III-1- Introduction :

Plusieurs applications industrielles nécessitent l'utilisation de méthodes modernes de contrôle, permettant d'obtenir une réponse rapide et des performances dynamiques élevées. Parmi ces méthodes, on cite le réglage par la logique floue (RLF), qui se distingue par sa robustesse et son insensibilité aux variations des paramètres.

La logique floue constitue aujourd'hui une approche alternative. Elle présente plusieurs avantages tels que le raisonnement proche de celui de l'homme, sa capacité à contrôler des performances dynamiques et ses qualités intéressantes de robustesse. L'intelligence artificielle fait partie des techniques informatiques modernes qui recherchent des méthodes avancées pour effectuer le travail et aboutir à des conclusions similaires à celles de l'intelligence humaine.

L'utilisation de la logique floue s'est répandue dans de nombreux domaines, notamment le contrôle de certaines propriétés physiques telles que la température et la tension électrique, ainsi que la commande des machines industrielles pour optimiser leurs performances.

Afin d'examiner les améliorations que présente cette méthode floue, une étude comparative avec la méthode dite conventionnelle a été effectuée. Pour ce faire, le système MPPT flou proposé est étudié par simulation en utilisant MATLAB/SIMULINK.

### III-2- Applications et Commande de la Logique Floue dans les Systèmes MPPT

La logique floue, en tant qu'outil puissant de l'intelligence artificielle, a trouvé de nombreuses applications dans divers domaines industriels et de recherche. Son aptitude à gérer l'incertitude et à modéliser des systèmes complexes en fait une méthode de choix pour l'optimisation et le contrôle avancé. Dans le contexte des systèmes photovoltaïques, la logique floue est particulièrement utile pour maximiser l'efficacité de la conversion de l'énergie en améliorant la recherche du point de puissance maximale (MPPT). Cette section explore d'abord les principaux domaines où la logique floue est appliquée, avant de se concentrer sur son utilisation spécifique pour le contrôle MPPT. À travers cette étude, nous mettons en lumière les avantages de la logique floue par rapport aux méthodes conventionnelles et démontrons son potentiel à améliorer les performances des systèmes photovoltaïques.

#### III-2-1- Les principaux domaines de recherche et d'application de la logique Floue :

Parmi les domaines d'application de la logique floue, on peut citer [20]:

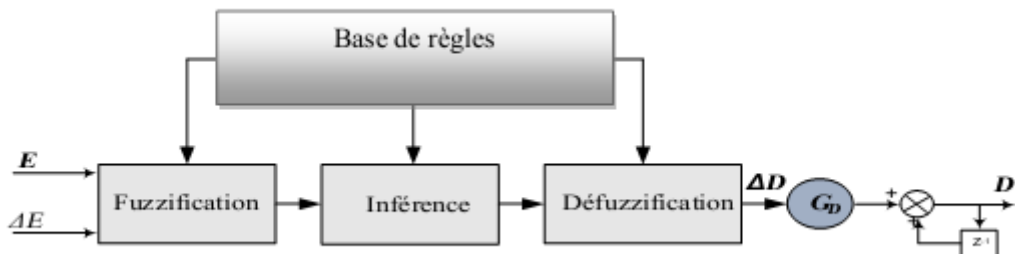
- **L'automatisation** : Production de fer et d'acier, purification de l'eau, chaînes et robots de fabrication.

- **L'instrumentation** : Capteurs, instruments de mesure.
- **La conception/Jugement** : Consultation, investissement et développement, horaires de train.
- **Les ordinateurs** : Opérateurs, unités arithmétique micro-ordinateurs.
- **Le traitement d'information** : Base de données, recherche d'information, modélisation de système.

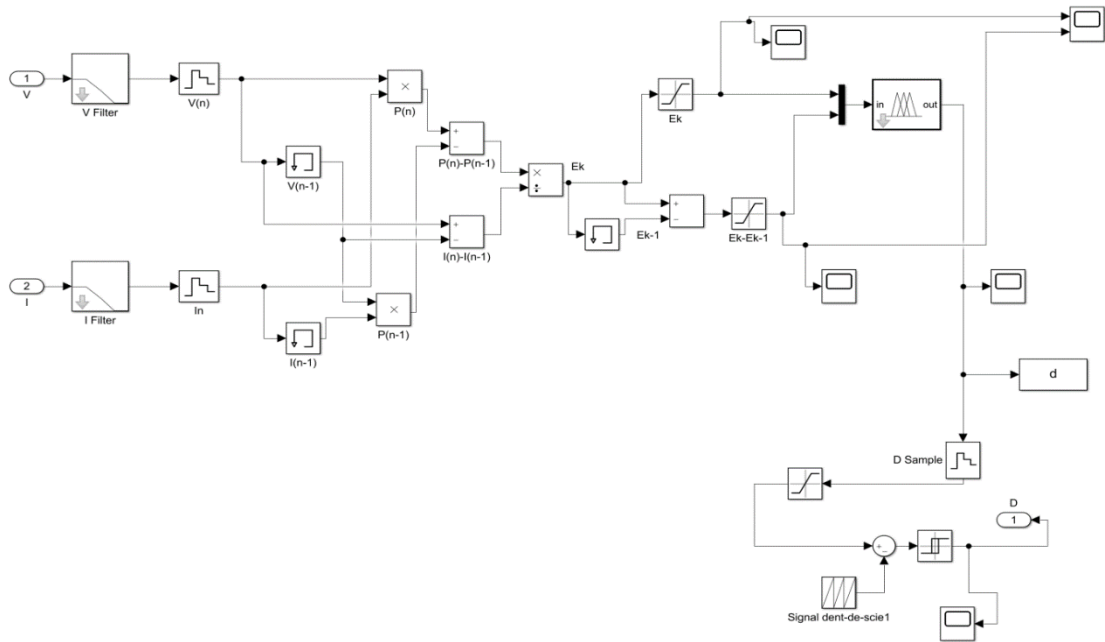
### III-2-2-La commande MPPT basée sur la logique floue ;

Récemment, la commande par logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point maximum de puissance (MPPT). Cette commande offre l'avantage d'être robuste, relativement simple à élaborer, et 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 (figure III.1).

Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées, qui sont l'erreur ( $E$ ) et le changement d'erreur ( $\Delta E$ ), ainsi qu'une variable de sortie ( $dD$ ), qui représente la variation du rapport cyclique. La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée [21].



**Figure III.1:**Principe de la commande à logique floue.



**Figure III.2:**Le rapport cyclique optimal du régulateur de logique floue

Après que le régulateur flou ait été modifié dans MATLAB, le fichier FIS a été créé afin d'être appelé dans le système Simulink. Sur la Figure III.2, nous pouvons observer la performance du régulateur flou en lisant la sortie du régulateur flou à différentes valeurs des entrées.

**III-2-2-A-Fuzzification des Variables d'Entrée:**

La fuzzification permet de rendre flous les variables d'entrée. Une étape préliminaire consiste à définir un intervalle de variation maximale autorisée pour les variables d'entrée. Le but de la fuzzification est de transformer les variables d'entrée en variables linguistiques ou variables floues. Dans notre cas, nous avons deux variables d'entrée : l'erreur ( $k$ ) et la variation d'erreur  $\Delta E$  à l'instant  $k$ , définies comme suit :[21]

$$E(K) = \frac{Ppv(k) - Ppv(k-1)}{Vpv(k) - Vpv(k-1)} \tag{III.1}$$

$$\Delta E(k) = e(k) - e(k - 1) \tag{III.2}$$

Ou  $Ppv(k)$  et  $Vpv(k)$  sont respectivement la puissance et la tension du GPV.

D'après l'entrée ( $k$ ), on peut déterminer la position du point de fonctionnement de la charge par rapport au point de puissance maximale de la courbe puissance-tension. Cette valeur joue un rôle crucial dans la réduction du temps de montée [20].

Donc :

- Si  $(k)$  est positif, le point de fonctionnement est à gauche du point de puissance maximale.
- Si  $(k)$  est négatif, le point de fonctionnement est à droite du point de puissance maximale.
- $(k)$  est Zéro au point de puissance maximale.

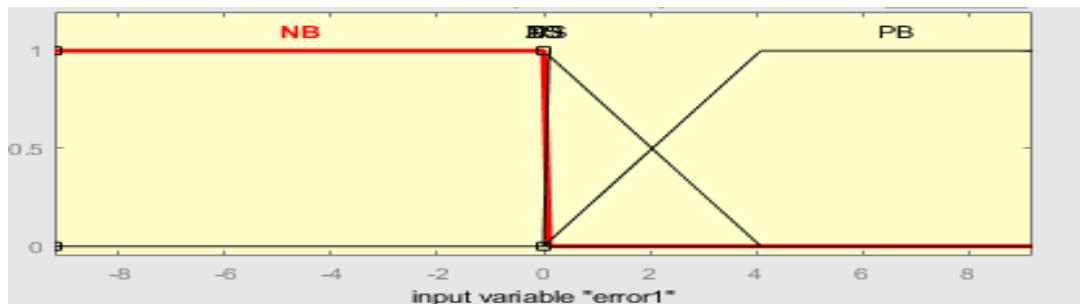
D'après l'entrée  $\Delta E(k)$ , on peut déterminer la valeur de la variation de l'erreur de l'entrée du contrôleur flou, qui représente la direction du point de fonctionnement. Cette valeur réduit le dépassement de la réponse du système. Dans ce cas, pour atteindre le point de puissance maximale, on doit :

- Pousser vers la droite le point de fonctionnement qui se situe à gauche du point de puissance maximale, ce qui signifie qu'on doit augmenter la tension.
- Pousser vers la gauche le point de fonctionnement qui se situe à droite du point de puissance maximale, ce qui signifie qu'on doit diminuer la tension.

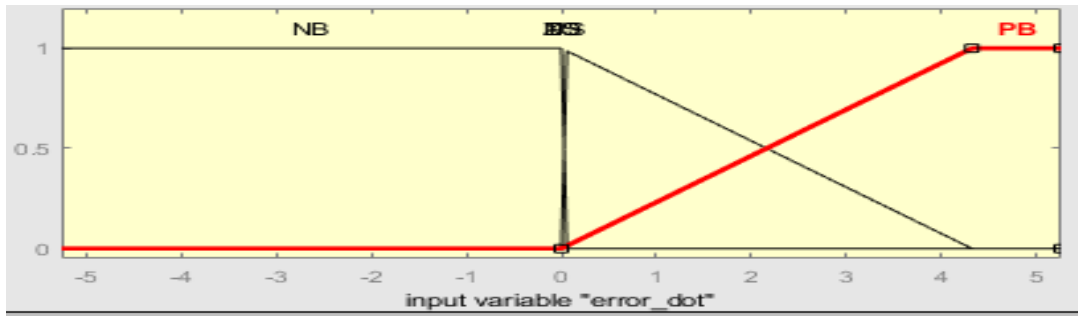
On signale que l'augmentation du rapport cyclique  $dDpv$  provoque l'augmentation de la tension et vice versa. En utilisant les bases des sous-ensembles flous, on peut exprimer les variables d'entrée et de sortie en termes de variables linguistiques. Ainsi, ces variables seront qualifiées :

- négative big (NB).
- negative small (NS).
- zéro (Z).
- positive small (PS).
- Positive big (PB).

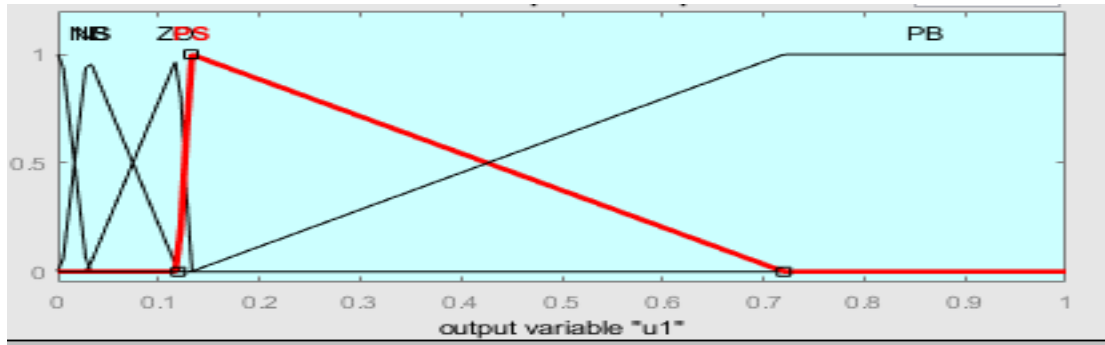
Ainsi, on choisit des variables linguistiques pour déterminer la proximité du point de fonctionnement par rapport au PPM, dans le but d'y parvenir le plus rapidement possible [21]. La figure (III.2) illustre les fonctions d'appartenance des 5 sous-ensembles flous des variables d'entrée ainsi que la variable de sortie.



(a)



(b)



(c)

**Figure III.2:** Fonctions d'appartenances de :

(a) L'entrée error E; (b) L'entrée error DE , (c) La sortie D.

**III-2-2-B-Méthode d'inférence :**

Un tableau d'inférence anti-diagonale classique est dressé grâce à l'étude de MacVicar-Whelon, ce système flou ayant des ensembles flous qui sont l'erreur E et le changement de l'erreur  $\Delta E$ . La sortie de cette table de règles est le changement du rapport cyclique  $\Delta D$  [21].

**Table III.1:** Règles du contrôleur logique floue

$\Delta D$		$\Delta E$				
		<i>NB</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PB</i>
<i>E</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NS</i>	<i>NB</i>	<i>NS</i>
	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>
	<i>Z</i>	<i>PB</i>	<i>NB</i>	<i>NS</i>	<i>PS</i>	<i>NB</i>
	<i>PS</i>	<i>NB</i>	<i>PS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>PB</i>
	<i>PB</i>	<i>NB</i>	<i>NS</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>NS</i>

On utilise la méthode Mamdani comme une méthode floue (opération MAX-MIN). On prend un exemple de règle d'après la table (III.1) :

**Si E est PB et  $\Delta E$  est Z, alors dD est défini comme PS.** Ce qui signifie : Si le point de fonctionnement est loin du point de puissance maximale PPM vers le côté gauche, et le changement de la pente de la courbe ( $PPV = (VPV)$ ) est environ Zéro, alors diminuer le rapport cyclique dD largement.

Nous avons choisi la méthode Mamdani comme une méthode floue avec (opération MAX-MIN). Elle consiste à utiliser l'opérateur MIN pour le ET et l'opérateur MAX pour le OU.

### III-2-2-C-Défuzzification :

En fin, il nous faut réaliser l'opération inverse de la fuzzification, ici nous devons calculer une valeur numérique compréhensible par l'environnement extérieur à partir d'une définition floue est c'est le but de la défuzzification [22].

La défuzzification peut fonctionner selon deux algorithmes:

- ✓ La méthode du critère maximale MCM.
- ✓ La méthode du centre de gravité.

- **La méthode du critère maximale MCM:**

Cette stratégie génère une commande qui représente la valeur moyenne de toutes les actions de contrôle locales ayant des fonctions d'appartenance maximales.

- **Méthode du centre de gravité :**

La méthode de défuzzification la plus utilisée est celle de la détermination du centre de gravité du dernier ensemble flou combiné. Le dernier ensemble flou combiné est défini par l'union de tous les ensembles en utilisant la méthode d'agrégation maximale. Pour une représentation de données échantillonnées, le centre de gravité  $\Delta D$  est calculé comme suit [23]:

La sortie du contrôleur flou, notée  $D(k)$ , est calculée selon la formule suivante :

$$D(k) = D(k - 1) + GD \times \Delta D(k) \quad (\text{III.3})$$

GD : La sortie du contrôleur flou est  $\Delta D$  qui représente la variation du rapport cyclique du convertisseur DC-DC

Les valeurs de sortie sont défuzzifiées et multipliées par le facteur d'échelle pour construire le signal de contrôle. Son rôle est de régler le contrôleur flou pour obtenir la poursuite du PPM.

### III-3-Résultats de simulation et interprétations de la méthode MPPT-Floue :

Dans cette section, nous avons développé un contrôleur flou pour le suivi du point de puissance maximale d'une source photovoltaïque, simulé dans Simulink/MATLAB. Ce contrôleur est basé sur les blocs de base d'un système flou, à savoir la Fuzzification, l'Inference et la Defuzzification, qui lisent respectivement les entrées du système flou, programment le processus de la plante, et convertissent ce programme en action de sortie. Les formes trapézoïdales des fonctions d'appartenance des entrées et des sorties ont été proposées, ainsi que la méthode d'inférence floue de Mamdani et la méthode du centroïde comme processus de défuzzification pour ce contrôleur. L'ensemble du système, comprenant le PV, le convertisseur buck-boost, le contrôleur flou et la charge, a été modélisé et simulé sous différentes variations d'irradiance. Les résultats indiquent que le contrôleur flou proposé a bien fonctionné et est valide pour être implémenté dans un système en temps réel.

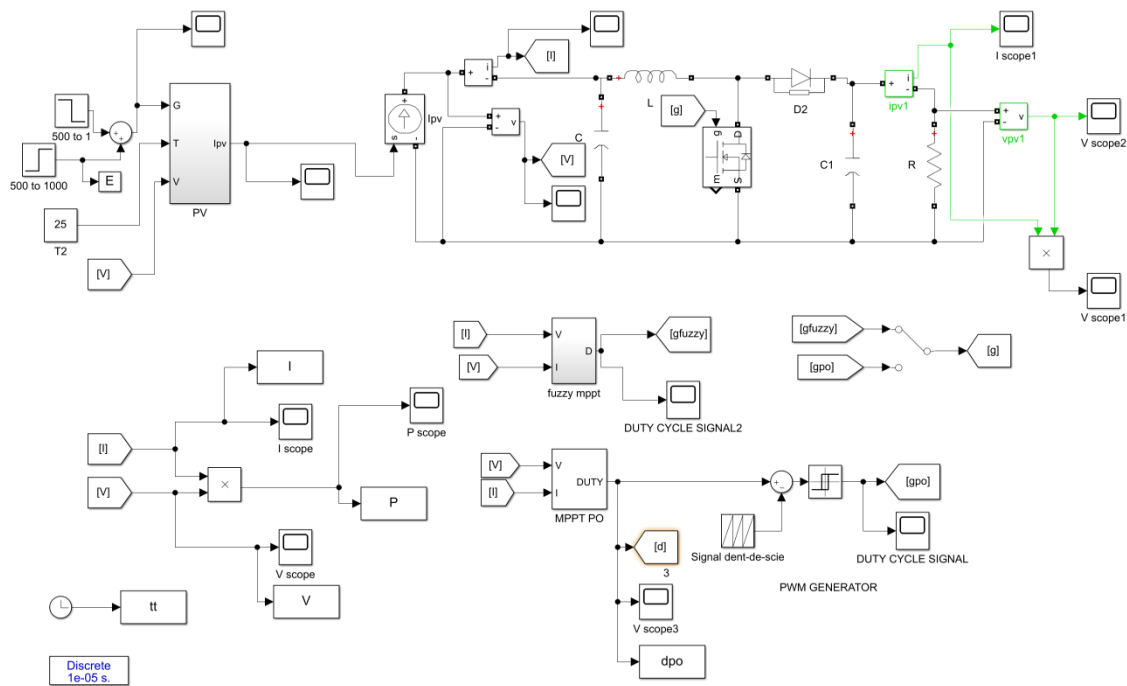


Figure III.3: Simulation du système flou basé sur le suivi du point de puissance maximale des

PV

Le modèle de simulation présenté sur la Figure III.3 a été implémenté dans Simulink/MATLAB à différentes variations de l'irradiance. Afin de vérifier la performance du régulateur flou et l'efficacité du convertisseur, les lectures de la puissance d'entrée et de sortie du MPPT ont été prises à des irradiances solaires de  $500 \text{ W/m}^2$ ,  $1000 \text{ W/m}^2$  et  $700 \text{ W/m}^2$ , et le rapport cyclique a également été observé aux mêmes valeurs de radiation. Pour l'algorithme test

Nous supposons pour l'algorithme testé que la température ambiante est constante à  $25^\circ\text{C}$ . L'objectif est de vérifier le comportement de l'algorithme de la commande floue en présence d'une irradiation de 500 à 1000 puis à 700 aux instants 0, 0,15 et 0,25 s respectivement, ainsi que sa capacité à maintenir le fonctionnement au point de puissance maximale. Le test est réalisé en appliquant les mêmes conditions citées dans le chapitre précédent. Les résultats trouvés sont illustrés dans les figures suivantes :

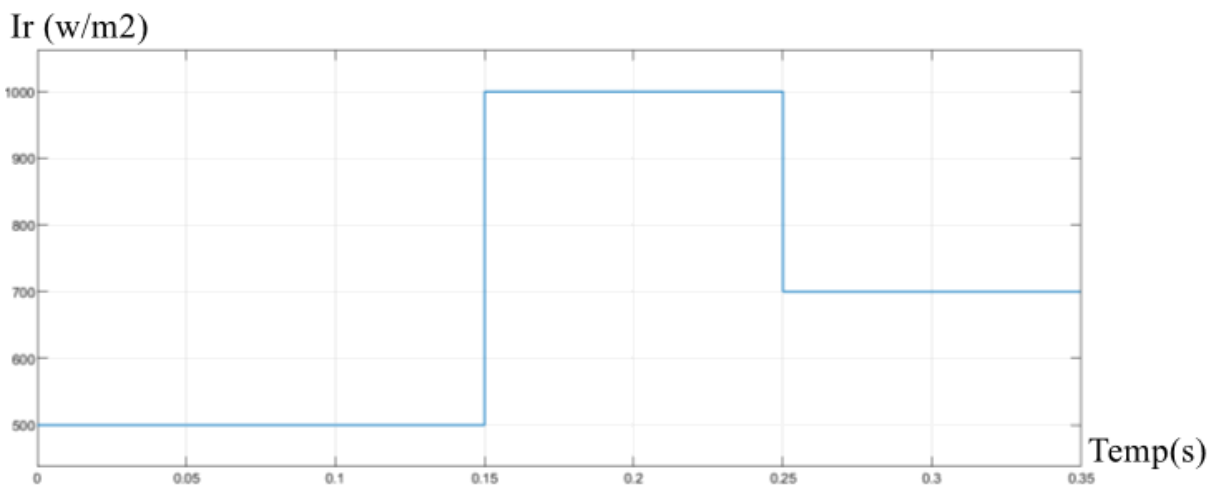


Figure III.4 :Variation de l'éclairement ( $\text{W/m}^2$ )

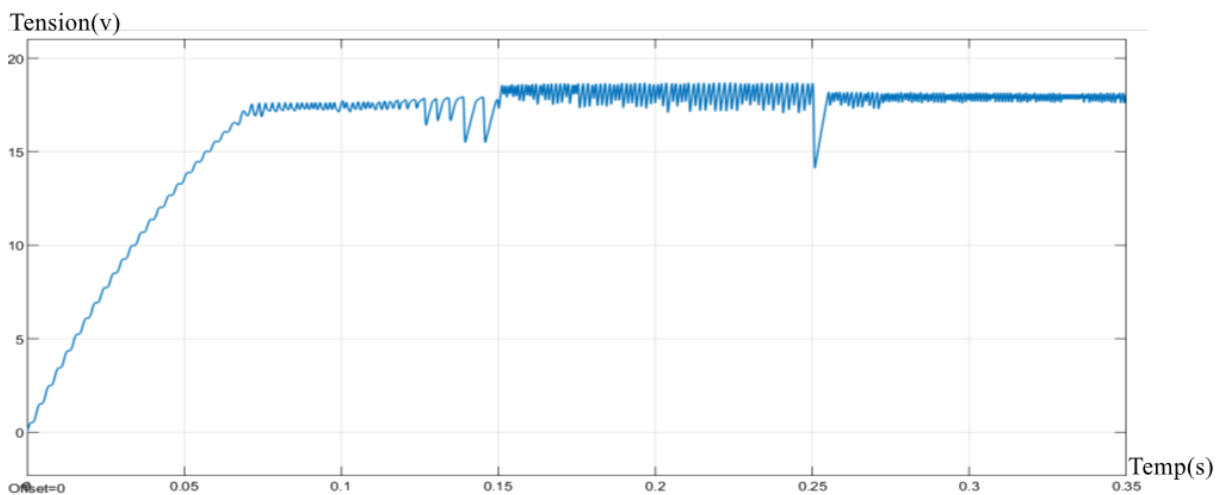
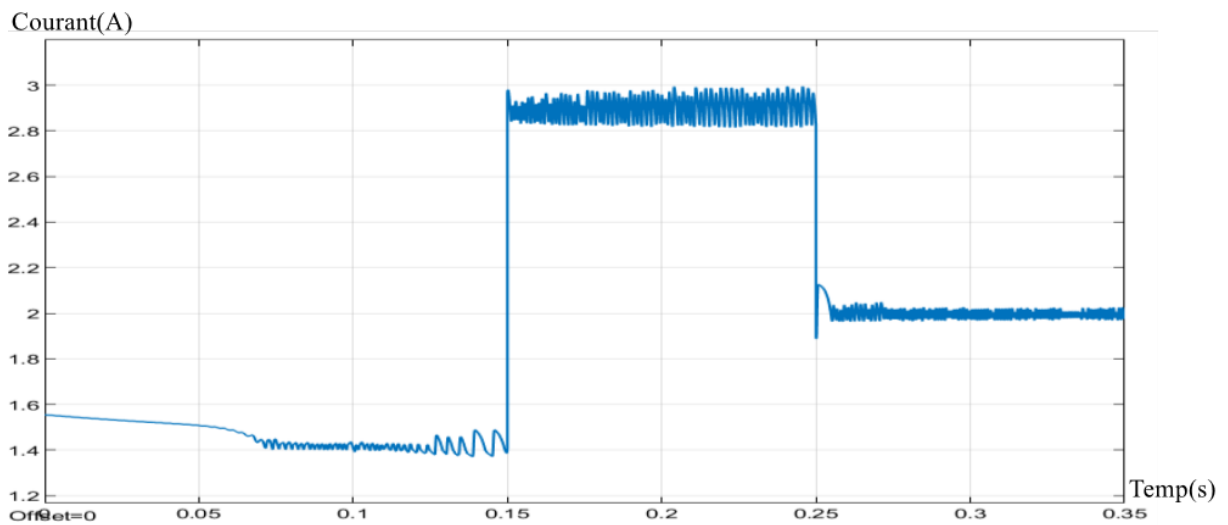
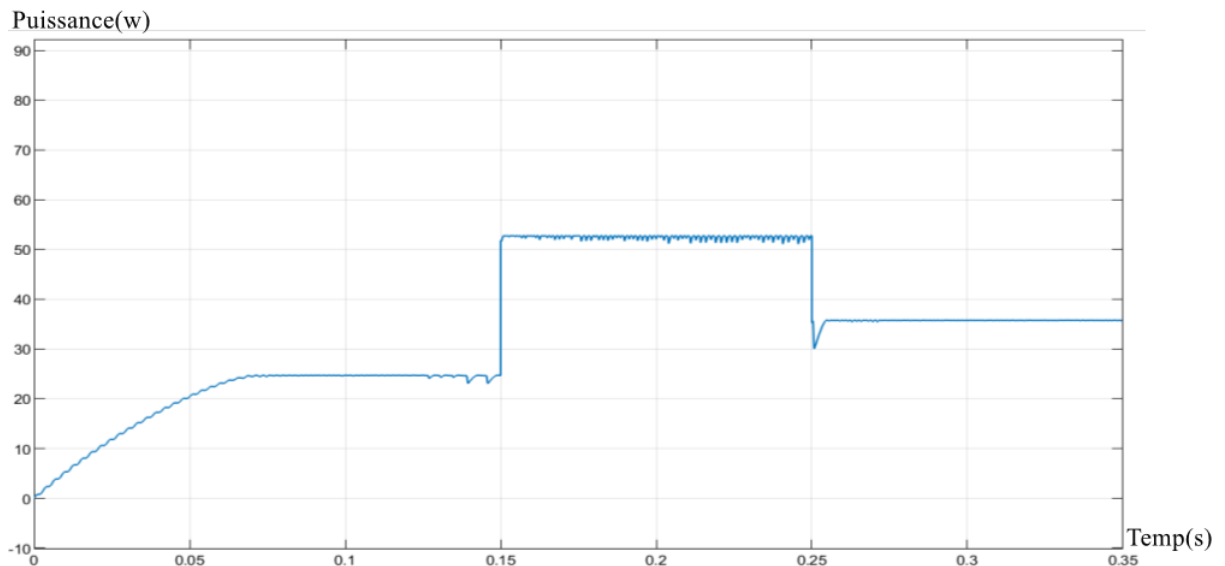


Figure III.5: Variation de la tension PV desortie.



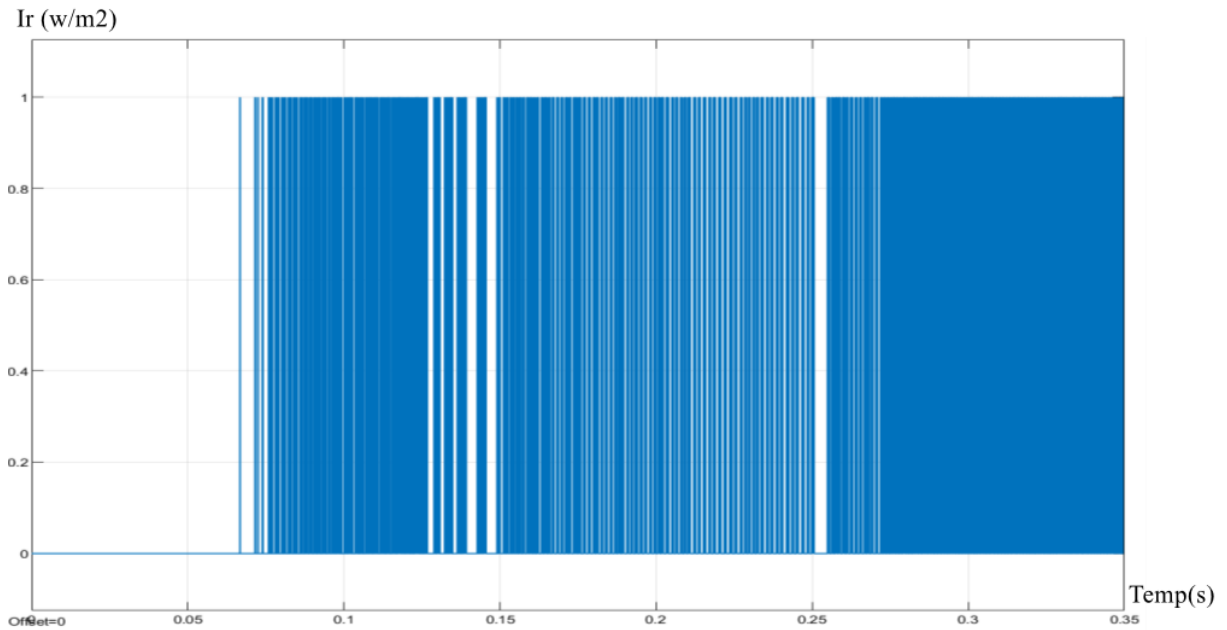
**Figure .III.6:** Variation du courant PV desortie.



**Figure .III.7 :** Puissance de sortie du panneau PV.

L'analyse des résultats nous a permis de conclure :

- Pour la tension de sortie (figure III.5), on constate qu'elle reste presque constante (valeur de tension optimale).
- En revanche, le courant de sortie du PV (figure III.6) varie de manière significative avec l'irradiation solaire.
- Enfin, pour la courbe de puissance (figure III.7), l'algorithme flou montre une bonne poursuite de la puissance de référence et une relation de proportionnalité entre cette dernière et l'éclairement.

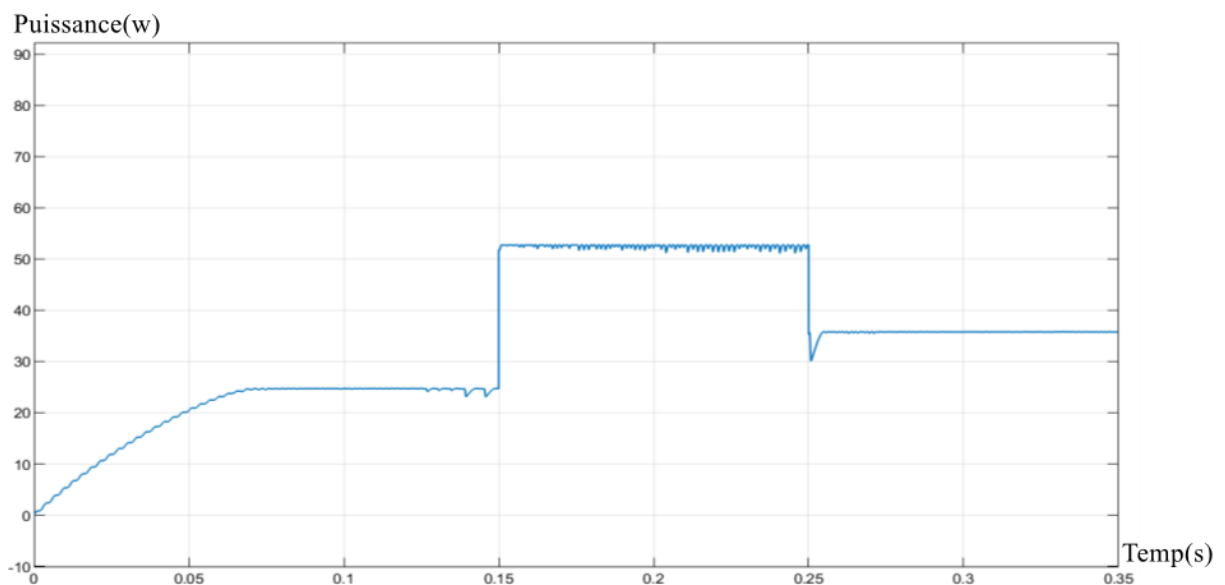


**Figure .III.8 : Cycle signal**

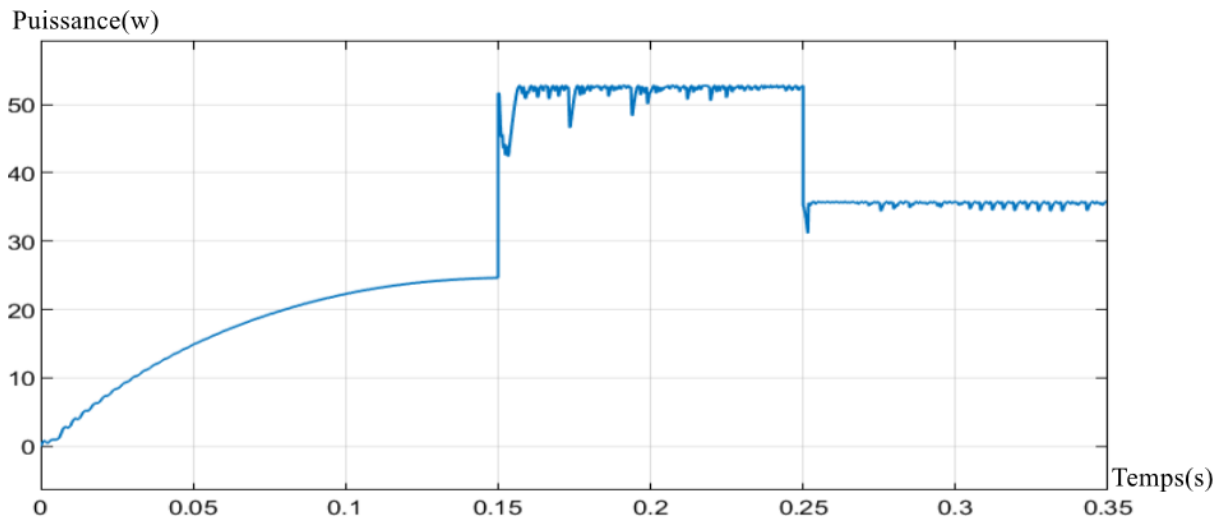
D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque l'absence d'oscillations dans les courbes de la puissance, de la tension et du courant dans le régime permanent, avec un temps de réponse plus court.

#### **IV) comparative entre MPPT Floue et MPPT classiques (P&O) :**

Pour montrer l'intérêt de la commande floue par rapport aux commandes classiques, une étude comparative a été faite.



**Techniques MPPT Floue**



Technique MPPT (P&O)

**Figure III.9:** les deux techniques MPPT

Dans ce comparative, on a présenté brièvement la logique floue, appliqué dans la poursuite de la MPPT d'un générateur solaire.

- Cette méthode a donné des résultats plus précis dans un temps de réponse court.
- MPPT basée sur la logique floue est plus adaptatif au changement brusque du rayonnement solaire

**Conclusion :**

En se basant sur les résultats trouvés, on peut conclure que la technique MPPT basée sur la logique floue est meilleure que les deux autres techniques classiques P&O .

Cet article présente la comparaison entre MPPT basé sur la logique floue et la méthode conventionnelle de MPPT P&O. Les caractéristiques P-V et I-V du panneau ont été modélisées dans MATLAB-SIMULINK pour examiner la performance des deux contrôleurs. Basé sur les résultats de la simulation, il peut être conclu que les deux contrôleurs peuvent aider le panneau PV à délivrer une puissance maximale. Cependant, la performance du MPPT basé sur la logique floue est meilleure. Le MPPT flou peut suivre le MPP plus rapidement que le MPPT conventionnel, même en cas de variations de l'irradiance solaire. De plus, le MPPT flou a la capacité de réduire la tension perturbée lorsque le MPP a été reconnu. Cette action permet de maintenir une sortie de puissance plus stable par rapport au MPPT conventionnel où la puissance de sortie fluctue en raison de plus grandes variations de tension autour du point de tension MPP.

# *Conclusion General*



## **Conclusion General**

L'énergie solaire est considérée comme l'énergie de l'avenir. L'exploitation de cette énergie se fait par des générateurs solaires qui transforment l'énergie venant du soleil en énergie électrique.

L'énergie électrique produite par des panneaux solaires est caractérisée par un certain point de fonctionnement où la puissance générée est maximale. Ce générateur solaire est soumis aux conditions atmosphériques y compris le rayonnement solaire et la température qui influe sur la position du point de fonctionnement du générateur. Par conséquent, il existe un mécanisme indispensable dans les systèmes de l'énergie solaire permettant de suivre le point de puissance maximale. Ce mécanisme de suivi est une unité de contrôle qui suit le comportement du générateur photovoltaïque, en conséquence, il génère un signal pour commander l'hacheur intercalé entre le générateur photovoltaïque et la charge, afin d'améliorer le comportement et d'optimiser le rendement du générateur solaire.

Le présent travail est une tentative pour étudier et discuter différents types de techniques MPPT. Les techniques MPPT les plus populaires sont étudiées, telles que: Perturbation et Observation ainsi qu'une technique récente: le contrôle à base de la logique floue.

La méthode Perturbation et Observation (P&O) a été utilisée dans ce travail à cause de sa simplicité, mais elle présente quelques problèmes tels que :

- Le choix de la période d'échantillonnage
- Le Problème de dérivation du vrai point MPPT lors d'une augmentation brusque de l'ensoleillement, ce qui cause des pertes de puissance.

On a introduit un étage d'adaptation, un convertisseur de type "élevateur" boost qui nous a permis d'augmenter la tension de sortie de GPV pour l'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement.

Finalement, On a implémenté la logique floue, pour commander le point de puissance maximale d'un système photovoltaïque, qui se base sur l'expérience de l'opérateur. Cette technique a donné de très bonnes performances telles que l'amélioration de la réponse du système photovoltaïque, elle réduit non seulement le temps de réponse dans le suivi du point de puissance maximale ; mais elle a aussi éliminé les fluctuations autour de ce point. Ce qui montre l'efficacité de ce contrôleur floue pour les systèmes photovoltaïques dans des

conditions d'environnement stables et instables (Ou la température et l'éclairement varient au cours du temps). Les résultats obtenus pour la conversion d'énergie prouvent qu'avec le contrôleur MPPT flou, il y a une existence d'un compromis entre rapidité en transitoire et stabilité en régime permanent.

Comme perspectives, on propose l'approche de certains points tels que :

L'application de d'autres techniques basées sur les méthodes d'optimisations

- Algorithmes génétiques;
- PSO;
- Recuit simulé;
- on recommande une réalisation pratique de ce contrôleur flou.

## **Références et bibliographiques**

## Références et bibliographiques

- [1] **C.Cabal**, "Optimisation Energétique De L'étage D'adaptation Electronique Dédie A La Conversion Photovoltaïque ", Université De Toulouse, 2003.
- [2] **Trishanesram, Patridlet L.Chapman**, "Comparison Of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking", Ieee, 2007.
- [3] **G.F.Tchokth**, "Commande Des Hacheurs Mppt Par La Logique Floue", Mémoire De Magister, Enp, 2006.
- [4] **M. E.Elhawary**, "Electric Power Application Of Fuzzy Systems", Ieee Press, 1998.
- [5] **Belhadj Mohammed**, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome", Centre Universitaire De Bechar, Institut Des Sciences Exactes.
- [6] **Salaheddine Mansour**, " Etude De Dimensionnement Optimal D'une Station Solaire Autonome En Site Isolé", Mémoire De Master, Université De Tlemcen, Année Universitaire 2013-2014.
- [7] [Http://Www.Energy.Gov.Dz/Francais/Index.Php?Page=Potentiels](http://Www.Energy.Gov.Dz/Francais/Index.Php?Page=Potentiels).
- [8] **Clarence Semassou**, "Aide A La Décision Pour Le Choix De Sites Et Systèmes Energétiques Adaptés Aux Besoins Du Bénin", Mémoire De Doctorat, Ecole Doctorale De L'université Bordeaux, 1<sup>Ed</sup> 2009-2011.
- [9] **Arslane M**, "Energie Renouvelable", Université De Msila, 2018/2019.
- [10] **Aoun Nouar**, " Etude Et Modélisation Des Différents Modèles De La Cellule Photovoltaïque Etablis Sur Base De Valeurs Nominales ", Mémoire De Magister, Université Mentouri, Constantine, 2010.
- [11] **Bouziane Afaf**, "Evaluation Du Rayonnement Solaire En Algérie Pour Des Applications Photovoltaïques ", Mémoire De Master, Université Mohamed Boudiaf, Msila, 2017/2018.
- [12] **Abid Abderrahmane**, "Application De La Logique Floue Pour La Poursuite De Point De Puissance Maximale D'un Système Photovoltaïque", Mémoire De Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2014/2015.
- [13] **Djeriou Salim**, "Simulation D'un Système Photovoltaïque Alimentant Une Machine Asynchrone", Mémoire De Magister, Université Ferhat Abbas, Setif, 2011.
- [14] **Mohammed Bilal Danoune, Ahmed Djafour, Abdelmoumen Gougui, Narimane Khelfaoui, Halima Boutli**, "caractérisation de panneaux photovoltaïques utilisant diode unique et les modèles à double diode une étude comparative avec validation expérimentale", Le 5<sup>ème</sup> Séminaire international sur les énergies nouvelles et renouvelables, Ghardaïa, Algérie, 24-25, 2018 octobre.
- [15] **Bensalah Belqassim Et Filali Mohammed**, "Etude Et Réalisation D'un Circuit De

- Commande Avec MPPT D'un Hacheur Pour Système Photovoltaïque ",Mémoire DeMaster,UniversitéDeTlemcen,2014/2015.
- [16] **ZenakhiAsma**, "EtudeParSimulationDuFonctionnementD'unSystème Photovoltaïque Menu D'une Commande MPPT", Mémoire de Master, UniversitéAbouBekrbelkaïd,Tlemcen,2016.
- [17] **F.TazerartEt R.Abdelli**, "Gestion D'un Système Photovoltaïque AvecStockage", Mémoire De Master, Université Abdelrahmane Mira, Bejaïa,2015/2016.
- [18] **M.BilalDanoune**, Ahmed Djafour, A.Gougui, N.Khelfaoui, H.Boutelli, "StudyAnd Performance Analysis Of Three Conventional Mppt Algorithms Used InPhotovoltaic Applications", International Conference On Communications AndElectricalEngineeringIccee'18ElOued (Algeria),December18-19,2018.
- [19] **Sedrati Youcef** et **Nouar Hatem**, "Implémentation De L'algorithme P&O PourUn Système Photovoltaïque", Mémoire De Master, Université KasdiMerbah,Ouargla,2015/2016.
- [20] **N.Aouchiche,M.S. Aït CheikhEtA.Malek**"PoursuiteDuPointDePuissanceMaximale D'un Système Photovoltaïque Par Les Méthodes De L'incrémentationDeConductance Et La Perturbation&Observation",Article,Centre DeDéveloppementDesEnergiesRenouvelables,CderB.P.62,Algiers.
- [21] **Tahar Laamayad**, "Intelligence Artificielle", Cours E-Learn, Université KasdiMerbah,Ouargla.
- [22] **Y.Lasmi**, " Optimisation De La Poursuite Du Point De Puissance Maximale(MPPT) D'un Système Photovoltaïque Par Les Techniques Intelligents", MémoireDeMagisterUniversité De Setif,2013.
- [23] **ZerguineBilal**, "ModélisationSystèmeDeProductionElectriqueParLaCellulePhotovoltaïq ue", Mémoire De Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba,Année 2010.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ