

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

Réf : ...../2022



## MEMOIRE

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

**Domaine** : Sciences et Technologie

**Filière** : Electrotechnique

**Spécialité** : Réseaux électriques

**Par** : **Hadjadj Dounia** et **Belkhiri Omnia**

**Thème**

**Etude des Caractéristiques d'un Capteur Solaire  
Photovoltaïque et Evaluation de ses Performances Sous  
Différentes Conditions Climatiques.**

Soutenu publiquement, le 18/Juin/2022 devant le jury composé de :

|                        |            |              |                      |
|------------------------|------------|--------------|----------------------|
| M. FERAGA Chams-Eddine | Professeur | Univ. Guelma | Président /Encadreur |
| M. LADJIMI Abdelaziz   | Professeur | Univ. Guelma | Examinateur          |
| Mme. Guerroui Assia    | MCB        | Univ. Guelma | Examinateur          |

**Année Universitaire : 2021/2022**

## *Remerciement*

*Au nom d'Allah le plus miséricordieux le plus gracieux*

*Tout d'abord, nous voudrions remercier M **FERAGA Chams-Eddine**, Professeur à l'Université du 8 mai 1945, Guelma, pour son encadrement et ses conseils généreux et avisés qu'il a prodigués. Il était comme un père pour nous et ne nous quittait à aucun moment. Il était tout le temps disponible avec des clarifications et des réponses aux questions que nous avions sur le travail. Il n'a jamais cessé de nous donner des idées sur ce projet, il nous a témoigné sa confiance, sans oublier sa qualité humaine. Qu'il trouve ici, notre plus profonde gratitude.*

*De plus, nous tenons à exprimer nos sincères remerciements au **Dr AZOUZI Ahamidet**, qui nous a accompagné dans nos travaux pratiques et ne nous a épargné aucun de ses équipements et a été un soutien tout au long de ce travail. Nous tenons aussi à remercier également toute son équipe, à savoir : **Dr AZIZI Amina**, l'Architecte **M<sup>elle</sup> AZOUZI Reyane** et la **Doctorante M<sup>me</sup> BECHIR Samia**.*

*Nos sincères remerciements au Président du Jury, M. **LADJIMI Abdelaziz**, Professeur à l'Université du 8 mai 1945 de Guelma, à Mme. **GUERROUI Assia**, maître de conférences à l'Université du 8 mai 1945 de Guelma, pour avoir accepté de faire partie du jury.*

*Nous remercions également tous nos chers collègues de la promotion réseaux électriques. En fin, Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## ***DEDICACE***

*Nous dédions cet humble travail à :*

*Nos chers parents pour leurs prières de réussite pour nous et leurs sacrifices,*

*Qui n'ont cessé de nous encourager, qu'Allah les protège et prend soin d'eux,*

*À nos sœurs et nos frère, à notre famille en général, et à tous nos amies.*

# SOMMAIRE

|   |    |
|---|----|
| Introduction générale .....   | 1  |
| <b>Chapitre I : Aperçu sur les systèmes photovoltaïques</b>                         |    |
| Introduction.....   | 3  |
| I.1. Notions de base sur la cellule photovoltaïque .....                            | 4  |
| I.2. Principe de production d'électricité .....                                     | 4  |
| I.3. Caractéristique courant-tension d'une cellule.....                             | 5  |
| I.4. Constitution d'une cellule photovoltaïque .....                                | 7  |
| I.5. Type des cellules photovoltaïques .....  | 8  |
| I.6. Composition d'un panneau photovoltaïque .....                                  | 9  |
| I.7. Assemblage des modules photovoltaïques.....                                    | 10 |
| I.7.1. Montage de modules photovoltaïques en série .....                            | 11 |
| I.7.2. Montage de modules photovoltaïques en parallèle .....                        | 11 |
| I.8. Les avantages de l'énergie photovoltaïque .....                                | 12 |
| I.9. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....                             | 12 |
| Conclusion .....  | 12 |
| <b>Chapitre II : Modélisation et Simulation d'un capteur solaire photovoltaïque</b> |    |
| Introduction.....   | 13 |
| II.1. Les modèles de la cellule PV.....   | 13 |
| II.2. Simulation du capteur solaire PV.....   | 16 |
| II.2.1. Simulation de l'Influence de l'Éclairement.....                             | 16 |
| II.2.2. Simulation de l'Influence de la température.....                            | 17 |
| II.2.3. Simulation de l'Influence de la température météorologiques.....            | 18 |
| Conclusion .....  | 20 |

## **Chapitre III : Étude expérimentale des caractéristiques d'un capteur solaire photovoltaïque**

|   |    |
|---|----|
| Introduction.....   | 21 |
| III.1. Caractéristiques géographiques du site.....                    | 21 |
| III.2. Description du banc d'essais expérimental.....                 | 21 |
| III.2.1. Les appareils de mesure utilisés .....                       | 22 |
| III.3. Méthode de déroulement du processus expérimentale.....         | 23 |
| III.3.1. Procédure expérimentale .....                                | 24 |
| III.3.2. Relation entre les paramètres électriques.....               | 24 |
| III.3.2.1. Le Courant de court-circuit, $I_{cc}$ .....                | 24 |
| III.3.2.2. La Tension à circuit ouvert, $V_{co}$ .....                | 24 |
| III.3.2.3. La Puissance de sortie.....                                | 25 |
| III.3.3. Relation entre la tension et le courant électrique.....      | 25 |
| III.3.4. Variation temporelle du courant et de potentiel .....        | 26 |
| III.3.5. Variation temporelle de l'éclairement et la température..... | 27 |
| III.3.6. Variation temporelle de la puissance.....                    | 28 |
| III.3.7. Variation temporelle du courant en ciel nuageux.....         | 29 |
| III.3.8. Orientation d'un panneau solaire .....                       | 29 |
| III.3.9. Inclinaison des panneaux solaires.....                       | 30 |
| Conclusion .....  | 31 |
| Conclusion générale .....   | 32 |
| Bibliographies .....  | 33 |
| Résumé.....   | 34 |

## **LISTE DES FIGURES**

### **Chapitre I : Aperçu sur les systèmes photovoltaïques**

|  |    |
|--|----|
| Figure I.1 : de principe de production et répartition de l'électricité PV .....    | 3  |
| Figure.I.2 : Le principe d'une cellule photovoltaïque .....                        | 4  |
| Figure.I.3 : Caractéristique courant-tension .....                                 | 5  |
| Figure.I.4 : Caractéristique courant-tension (point de puissance maximale) .....   | 6  |
| Figure.I.5 : Caractéristique puissance-tension (point de puissance maximale) ..... | 6  |
| Figure. I.6.Composition d'un panneau photovoltaïque.....                           | 9  |
| Figure. I.7.Configuration des différentes structures PV.....                       | 10 |
| Figure. I.8.branchement de panneaux en série.....                                  | 11 |
| Figure. I.9.branchement de panneaux en parallèle.....                              | 11 |

### **Chapitre II : Modélisation et Simulation d'un capteur solaire photovoltaïque**

|   |    |
|---|----|
| Figure. II.1: Schéma équivalent électrique de la cellule PV.....  | 13 |
| Figure. II. 2 : Schéma Bloc de simulation du capteur PV sous Matlab /Simulink.....                                  | 16 |
| Figure. II.3: Courbes (I-V) à différents éclairagements et températures et un $T= 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ..... | 16 |
| Figure. II.4: Courbes (P-V) à différents éclairagements et températures et un $T= 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ..... | 17 |
| Figure. II. 5 : Courbes (I-V) à différentes températures et éclairement fixe $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ ....       | 17 |
| Figure. II. 6 : Courbes (P-V) à différentes températures et éclairement fixe $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ ...        | 18 |
| Figure. II.7: Courbes (I-V) et (P-V) à $G=125\text{W}/\text{m}^2$ et $T=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....           | 18 |
| Figure. II. 8 : Courbes (I-V) et (P-V) à $G=240\text{ W}/\text{m}^2$ et $T=27\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....        | 19 |
| Figure. II. 9 : Courbes (I-V) et (P-V) à $G=455\text{ W}/\text{m}^2$ et $T=19\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....        | 19 |
| Figure. II. 10 : Courbes (I-V) et (P-V) à $G=775\text{ W}/\text{m}^2$ et $T=12\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....       | 19 |
| Figure. II.11: Courbes (I-V) et (P-V) à $G=896\text{ W}/\text{m}^2$ et $T=21\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....         | 20 |

### ***Chapitre III : Étude expérimentale des caractéristiques d'un capteur solaire photovoltaïque***

|   |    |
|---|----|
| Figure.III.1 : Capteur solaire photovoltaïque.....  | 22 |
| Figure III.2. Disposition du circuit électrique de mesures.....                                   | 23 |
| Figure.III.3 : Evolution du courant en fonction de tension.....                                   | 25 |
| Figure.III.4 : Evolution de la puissance en fonction de la tension.....                           | 25 |
| Figure.III.5 : courbe de courant en fonction du temps.....  | 26 |
| Figure.III.6 : courbe de tension en fonction du temps.....  | 26 |
| Figure.III.7 : courbe de l'éclairement en fonction du temps.....                                  | 27 |
| Figure.III.8 : courbe de température en fonction du temps.....                                    | 28 |
| Figure.III.9 : Evolution de la puissance produite.....  | 28 |
| Figure.III.10 : courbe de courant en fonction du temps en ciel nuageux entre 10h30min et 11h..... | 29 |

## **LISTE DES TABLEAUX**

### **Chapitre I : Aperçu sur les systèmes photovoltaïques**

Tableau.I.1:les différents types des cellules solaires .....8

### **Chapitre II: Modélisation et Simulation d'un capteur solaire photovoltaïque**

Tableau. II.1: Valeurs de  $E_g$  pour différents type de matériaux semi-conducteurs.....15

Tableau.II.2 : caractéristiques électriques obtenus par simulations et mesures .....20

### **Chapitre III : Étude expérimentale des caractéristiques d'un capteur solaire photovoltaïque**

Tableau III.1 : Données géographiques du site.....21

Tableau III.2: Caractéristiques du panneau solaire.....22

## Symboles

PV : photovoltaïque.

GPV : générateur photovoltaïque.

E<sub>g</sub> : Energie de gap

STC : standard test condition

FF : Facteur de forme

DC : (Courant Continu) Direct Current

G : Eclairement (W/m<sup>2</sup>)

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

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

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

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

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

P<sub>inc</sub> : La puissance du rayonnement solaire incident

S : Surface de la cellule solaire en (m<sup>2</sup>).

R<sub>sh</sub> : Résistances parallèle shunt (Ω).

R<sub>s</sub>: Résistance série (Ω).

I<sub>pV</sub> : Le courant du panneau photovoltaïque (A).

V<sub>pV</sub> : La tension du panneau photovoltaïque (V).

P<sub>pV</sub> : La puissance du panneau photovoltaïque (W).

N<sub>s</sub>: Nombre de modules dans le panneau en série.

N<sub>p</sub>: Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

I<sub>D</sub> : Courant de diode,

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

I<sub>o</sub>: Le courant de saturation (A).

q : La constante de charge d'électron, égale à  $1.6 \cdot 10^{-19}$  C

k : la constante de Boltzmann, égale à  $1.38 \cdot 10^{-23}$  j/k

q : Charge d'électron  $1,602 \cdot 10^{-9}$  C

A : Le facteur d'idéalité de diode.

G<sub>STC</sub> : éclairement effective et de référence [W/m<sup>2</sup>]

T<sub>STC</sub> : température effective et de référence en Kelvin [K]

$I_{ph,STC}$  : courant photonique sous condition de référence [A] ;

$k_I$  : coefficient de température de  $I_{ph}$  [A/K].

### Introduction générale :

Le solaire photovoltaïque, dont la capacité nette a pour la première fois crû davantage que tous les autres combustibles, et notamment plus que le charbon. Et de fait, la capacité photovoltaïque (PV) installée au cours de ses dernières années ne cesse de s'accroître, à titre d'exemple : au cours de l'année 2016 sa production s'est accrue de 74 GW, ou milliers de mégawatts, moitié plus que l'année précédente [1].

Malgré son succès récent, la production d'électricité solaire ne représente encore qu'environ 1,5 % de la production mondiale d'électricité – 312 TéraWattheures (TWh - milliards de Kilowattheures) pour le PV et 13 TWh pour le solaire thermodynamique à concentration (CSP) en 2016. Autant dire que sa marge de progression reste très importante. Et pour l'instant, dans la très grande majorité des cas, la fameuse variabilité de sa production n'est simplement pas un problème.

Le photovoltaïque est simplement la conversion ou la production d'électricité à partir de la lumière. Jacques Bequerel, un physicien français a découvert dans les années 1890, que certains matériaux produisent du courant électrique lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Ce phénomène est appelé effet photoélectrique et constitue la base de la science et de la technologie du photovoltaïque.

En effet, la technologie photovoltaïque (PV) existe depuis plus de 50 ans et couvre diverses applications innovantes. Dans ce contexte, citons : l'avion solaire suisse (Solar Impulse 2) qui a réalisé le plus long vol sans escale de l'histoire, réalisant le premier tour du monde aérien à énergie solaire en 2015. La large gamme d'applications photovoltaïques comprend l'éclairage public, à savoir : les bâtiments, les rues, les feux de circulation et la navigation. Les transports, tels que : les véhicules à énergie solaire, les bateaux et navires. Les télécommunications, l'astronomie et l'alimentation électrique spatiale.

Ce travail consiste essentiellement à faire une étude et analyse des caractéristiques électriques obtenues par le biais de mesures expérimentales effectuées sur un capteur solaire photovoltaïque sous des conditions climatiques variables.

## **Introduction générale**

Le premier chapitre présente une vue d'ensemble des matériaux et composants photovoltaïques de base, le phénomène photovoltaïque, le principe de fonctionnement d'un capteur solaire et ses paramètres caractéristiques.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les équations décrivant le modèle mathématique du capteur solaire et, plus important encore, on étudie et on analyse les caractéristiques électriques, à savoir : le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert et la puissance maximale, et ce, par le biais des scénarios de simulations sous environnement MATLAB/Simulink, dans des conditions de rayonnement solaire et de température variables. Ce qui nous mène à faire une comparaison des performances du capteur solaire obtenus par simulation et ceux des mesures expérimentales.

Le troisième chapitre présente l'étude et analyse des caractéristiques électriques d'un capteur solaire photovoltaïque fixe, dans des conditions de rayonnement solaire et de température variables à un site situé dans la ville d'Annaba en Algérie. En déduisant et en comparant les caractéristiques, telles que : le courant, la tension et la puissance restitués à différents moments. Ce qui nous a conduit par la suite à des observations intéressantes et conclusions intéressantes.

En fin de ce travail nous élaborons une conclusion générale.

## *Chapitre I : Aperçu sur les systèmes photovoltaïques*

### **Introduction**

Dans un concept de respect de l'environnement et de transition énergétique, le recours à l'énergie photovoltaïque est en plein essor. Son usage se démocratise et les panneaux photovoltaïques font partie désormais du quotidien. En effet, l'énergie solaire est produite grâce à la technologie photovoltaïque qui absorbe la chaleur du soleil et la convertit en énergie électrique. L'énergie est collectée et transmise afin d'être utilisée comme source de courant électrique, qui à son tour est utilisée à des fins diverses, à savoir : industrielles et domestiques.

Ainsi, le solaire est l'énergie renouvelable la plus abondante sur terre et la plus rapide à déployer. C'est aussi celle sur laquelle, l'innovation technologique s'est le plus fortement concentrée et qui a connu ces dernières années, les gains de productivité les plus élevés, rendant ces installations désormais très compétitives.

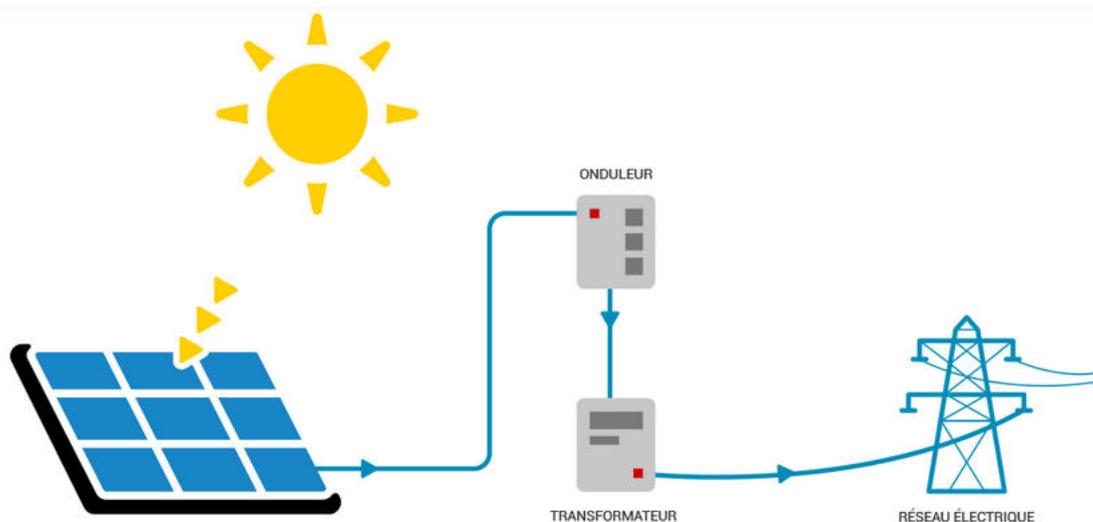


Figure .I.1 : Principe de production et répartition de l'électricité PV.

Notons que, les centrales photovoltaïques sont constituées de panneaux photovoltaïques qui produisent du courant dès qu'ils sont exposés à la lumière, d'un onduleur qui convertit le courant continu en courant alternatif et d'un transformateur qui élève la tension à celle du réseau de distribution.

Dans ce chapitre, nous présenterons brièvement dans une première partie quelques notions de base sur la cellule photovoltaïque. Dans la deuxième partie, nous donnons les principales technologies solaires photovoltaïques. Enfin, nous citerons les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque.

### **I.1. Notions de base sur la cellule photovoltaïque:**

La cellule solaire, élément unitaire d'un module photovoltaïque, est aussi l'élément actif dans lequel se produit l'effet photovoltaïque. Celui-ci permet au matériau de cellule de capter l'énergie lumineuse des rayons solaires (photons) et de la transformer en énergie électrique caractérisée par un déplacement de charges, positives et négatives [1].

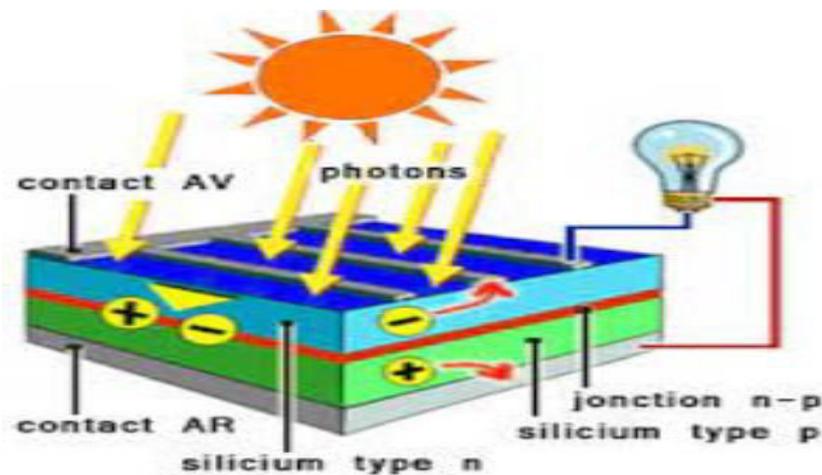


Figure .I.2 Principe d'une cellule photovoltaïque

### **I.2. Principe de production d'électricité :**

Les grains de lumière (les photons) heurtent la surface du matériau photovoltaïque disposé en cellules ou en couche mince, Ils transfèrent leur énergie aux électrons présents dans la matière, qui se mettent alors en mouvement dans une direction particulière. Le courant électrique continu qui se crée est alors recueilli par des fils métalliques très fins connectés les uns aux autres et acheminé à la cellule suivante [2].

### I.3. Caractéristique courant-tension d'une cellule

La puissance électrique délivrée par une cellule photovoltaïque est le produit de la tension par le courant qu'elle génère. Ces deux grandeurs, courant et tension, dépendent à la fois des propriétés électriques de la cellule mais aussi de la charge électrique à ses bornes. Les propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant-tension. Tout dipôle électrique est entièrement défini par sa caractéristique courant-tension, qui lui est propre. Une cellule photovoltaïque, en tant que dipôle électrique, dispose de sa propre caractéristique courant-tension, ainsi qu'illustré ci-dessous [3]:

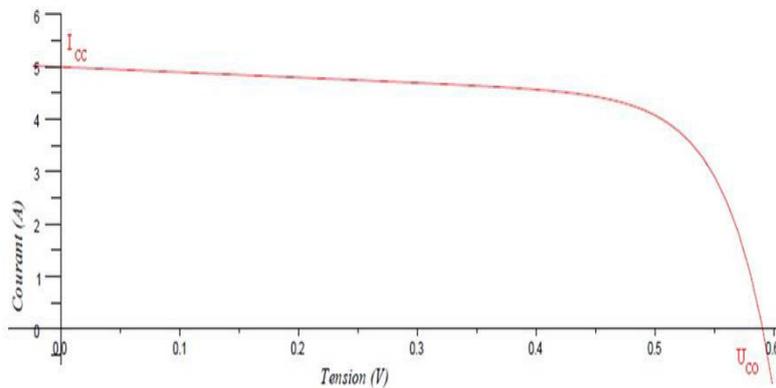


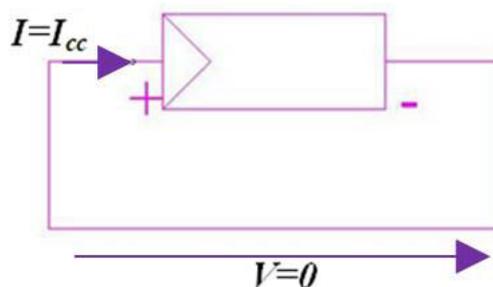
Figure .I.3 : Caractéristique courant-tension.

Cette caractéristique courant-tension est une relation entre la tension et le courant délivrés par la cellule photovoltaïque.

#### -Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ):

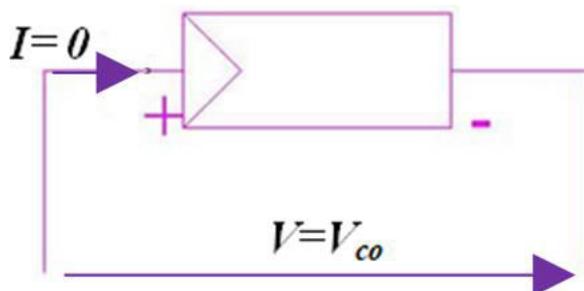
Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle (+) est relié au pôle (-) (la tension à ses bornes est alors nulle).

Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule  $P = V \times I$  est nulle.



**-La tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ):**

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle (+) et le pôle (-) sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule  $P = V \times I$  est nulle.



La puissance fournie par la cellule est tout simplement le produit du courant et de la tension. A partir de la caractéristique courant-tension, il est intéressant de dessiner le graphe de la puissance ( $P = V \times I$ ) en fonction de la tension  $V$ , qu'on appelle aussi caractéristique puissance-tension :

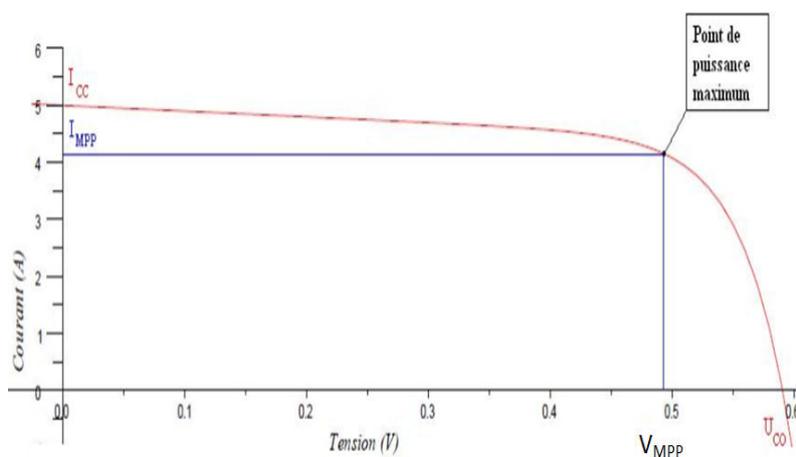


Figure .I.4 : Caractéristique courant-tension (point de puissance maximale).

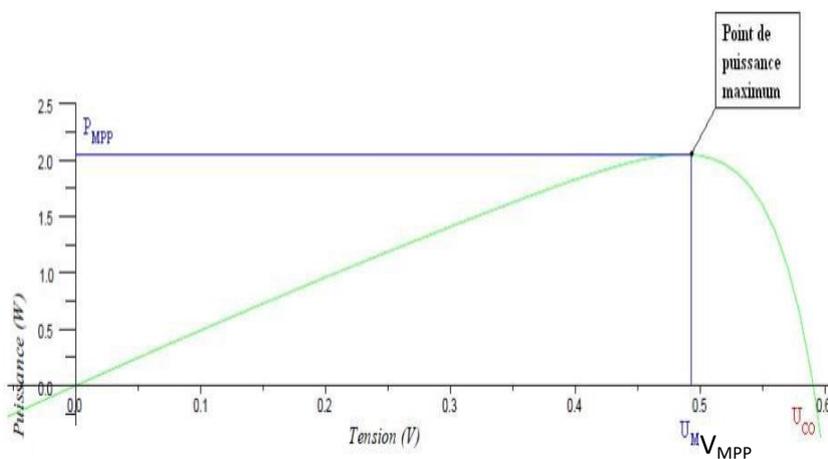


Figure .I.5 : Caractéristique puissance-tension (point de puissance maximale).

On retrouve bien les deux cas énoncés précédemment (cellule en court-circuit et cellule en circuit ouvert) pour lesquels la puissance fournie est nulle.

Par ailleurs, la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque met en évidence un point de puissance maximum  $P_{MPP}$  ( $MPP$  signifie en anglais Maximal Power Point, soit Point de Puissance Maximum). Ce point de puissance maximum est le produit d'un courant et d'une tension donnés. On appelle respectivement  $I_{MPP}$  et  $V_{MPP}$  le courant et la tension correspondant au point de puissance maximum, d'où  $I_{MPP} \times V_{MPP} = P_{MPP}$ .

**-Rendement de conversion d'énergie ( $\eta$ ):**

C'est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident  $P_{inc}$ . On appelle rendement rapport de la puissance maximale fournie ( $P_{max}$ ) sur la puissance du rayonnement solaire incident ( $P_{inc}$ ) [2]:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{S \times G} \quad (I.1)$$

$S$ : Surface de la cellule solaire en ( $m^2$ ).

$G$ : éclairement ( $W/m^2$ ).

**-Facteur de forme  $F_F$**

Appelé aussi facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule  $P_{max}$  et le produit du courant de court-circuit  $I_{cc}$  par la tension de circuit-ouvert  $V_{co}$  (la puissance maximale d'une cellule idéale). Il indique la qualité de la cellule ; Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes il diminue avec l'élévation de la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites  $R_s$  et  $R_{sh}$  [3].

$$F_F = \frac{P_{max}}{V_{co} \times I_{cc}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (I.2)$$

**I.4.Constitution d'une cellule photovoltaïque :**

**-Une couche active ou l'absorbeur** constitué d'un premier matériau accepteur d'électrons et d'un second matériau donneur d'électrons, formant une jonction donneur-accepteur ;

**-Des contacts métalliques avant et arrière** constituant les électrodes positive (+) et négative (-) chargées de collecter le courant généré ;

**-Des couches supplémentaires** comme un antireflet ou une couche plus fortement dopée permettant d'améliorer les performances de la cellule : meilleure absorption de la lumière, meilleure diffusion des porteurs de charges dans le matériau etc.

Ainsi, ce qui différencie une technologie solaire d'une autre, c'est principalement la nature de l'absorbeur. De ses propriétés physico-chimiques dépendent les procédés de dépôt utilisés, la nature et les caractéristiques des autres composants de la cellule (antireflet, électrodes...) ainsi que son architecture globale : type de substrat, épaisseur, positionnement des électrodes.

### **I.5.Type des cellules photovoltaïques :**

Les cellules sont assemblées en modules ou panneaux : leur nombre détermine la taille de ces derniers (voir figure .I.3). Pour les protéger des intempéries, elles sont prises entre deux plaques de verre trempé. On distingue deux sortes de cellules solaires. La majorité (90 %) des modèles en service se compose de lamelles « cristallines » de silicium. Dites « monocristallines » ou « polycristallines », selon le mode de fabrication, elles mesurent 0,2 millimètres d'épaisseur. Plus confidentielles, les cellules « minces » sont épaisses de 0,01 millimètres seulement. Principal avantage, leur coût de fabrication. Inconvénient, un rendement moindre imposant une surface de captage accrue pour obtenir une puissance équivalente à celle des cellules cristallines. En effet, les cellules solaires les plus utilisées qui dépendent du silicium, et elles sont classées en trois types dans le tableau suivant [2,3] :

| <i>Cellules et module</i>  | <i>Caractéristiques</i>  | <i>Avantages et inconvénients</i>   | <i>Usage</i>  |
|--|--|---|---|
| <b>Silicium monocristallin</b><br>  | -Très bon rendement 14 à 20 %.<br>-Puissance : 100 à 150Wc/m <sup>2</sup> . 7 m <sup>2</sup> /kWc<br>-Durée de vie : importante (30 ans).    | -Matière première largement disponible.<br>-Rendement faible sous faible éclairement.<br>-perte de rendement avec l'élévation de la température.<br>-Coût de fabrication : élevé.         | -Appareil de faible puissance.<br>-Application spatiale.                                    |
| <b>Silicium Poly cristallin</b><br> | -Bon rendement 11 à 15 %<br>-Puissance : 100Wc/m <sup>2</sup> . 8m <sup>2</sup> /kWc.<br>-Durée de vie : importante (30 ans) monocristallins | -Rendement faible sous faible éclairement et faible en plein soleil<br>-perte de rendement avec l'élévation de la température<br>-Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux. | -Générateurs à toutes tailles (relié au réseau où en sites isolés).                         |
| <b>Silicium Amorphe</b><br>         | -Rendement faible : 5 à 9 %<br>-Puissance : 50Wc/m <sup>2</sup> . 16 m <sup>2</sup> /kWc<br>-Durée de vie : assez importante (20 ans).       | -Fonctionnement sous faible éclairement.<br>-Rendement faible.<br>-Peu sensible aux températures élevées.<br>-Coût de fabrication : peu couteux.  | -Appareil de faible puissance.<br>-Production d'énergie (calculatrice et montres solaires). |

Tableau. I.1:les différents types de cellules solaires.

Principalement, la répartition entre les différentes technologies est 91 % de silicium cristallin (dont 56 % de polycristallin) et 9 % de couches minces (CdTe 4%, a-Si 1,6% et CI(G)S 3,5%), les autres technologies, à savoir les cellules organiques n'ayant pas atteint le stade de la production de masse. Globalement, la maturation des technologies est lente, de l'ordre de plusieurs décennies, mais les rendements continuent de s'améliorer.

### **I.6. Composition d'un panneau photovoltaïque :**

Un panneau photovoltaïque cristallin est un assemblage de plusieurs couches de matériaux :

-Le châssis (10 à 15% du poids total du panneau) est le plus souvent constitué d'aluminium, matériau solide et résistant naturellement aux intempéries et aux rayons ultraviolets. Il est en outre facilement recyclable [3,4].

-Le verre trempé (75 % du poids total du panneau), permet de protéger mécaniquement le panneau (pluie, grêle, chocs, etc.), tout en étant totalement transparent aux rayons solaires.

-L'encapsulant EVA est une fine couche de polymère assurant la parfaite étanchéité des cellules à l'eau et à l'air, évitant ainsi les court-circuits et l'oxydation. La technologie « bi-verre » substitue à ce polymère une couche de 2 mm de verre, assurant un meilleur rendement dans le temps, une plus grande durabilité, et un meilleur taux de revalorisation au moment du recyclage.

-Les cellules photovoltaïques (3 à 5 % du poids total du panneau) sont essentiellement constituées de silicium auquel sont ajoutés certains éléments chimiques sous forme de dopage (quantités très faibles).

-La face arrière du panneau est protégée des chocs, de l'humidité et des UV par une couche de Tedlar (polymère) de 1 à 2 mm d'épaisseur.

-La boîte de jonction (2 % du poids total du panneau) est composée de polymères et de métaux pour la partie conducteur électrique (essentiellement du cuivre mais aussi possiblement d'autres métaux conducteurs comme le nickel, l'étain, le fer l'aluminium,...).

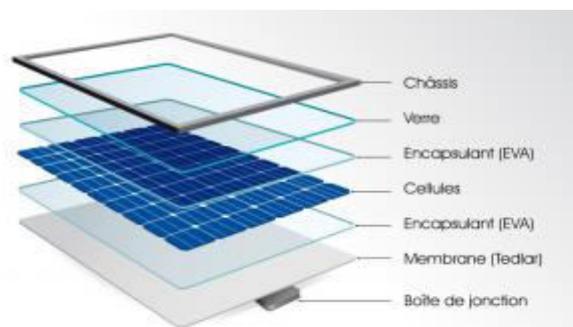


Figure. I.6.Composition d'un panneau photovoltaïque.

Les cellules sont connectées entre elles par un fins ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+) (figure I.6).

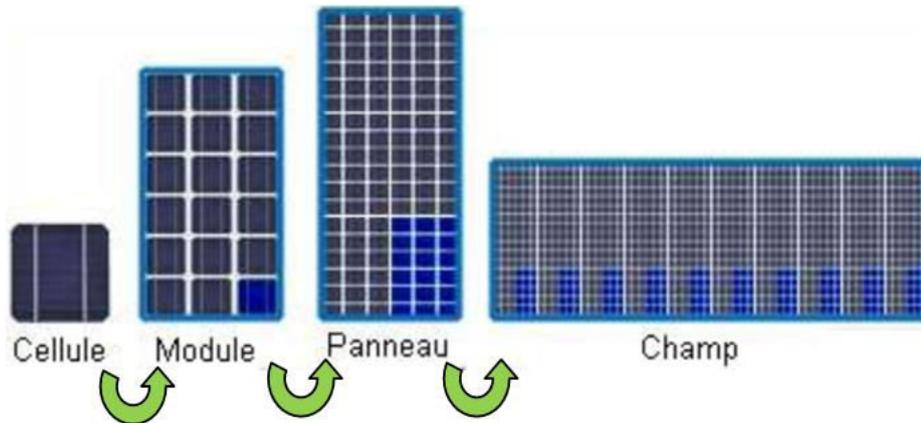


Figure. I.7. Configuration des différentes structures PV.

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées (Voir figure. I.7). Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour  $N_s$  cellules en série, constituant des branches elles-mêmes  $N_p$  en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

$$P_{pv} = N_s \times V_{pv} \times N_p \times I_{pv} \quad (I.3)$$

Où :

$P_{pv}$  : la puissance disponible en sortie du Panneau solaire.

$V_{pv}$  : la tension à la sortie du Panneau solaire.

$I_{pv}$  : le courant de sortie du Panneau solaire.

### **I.7. Assemblage des modules photovoltaïques**

Pour que les panneaux solaires fonctionnent au sein d'un système photovoltaïque, il faut plusieurs modules, reliés les uns avec les autres. Il existe deux façons de les brancher : en série ou en parallèle. Ces deux options sont bien différentes, et on utilise l'une ou l'autre en fonction des besoins.

### I.7.1. Montage de modules photovoltaïques en série :

Lorsque l'on branche des modules photovoltaïques en série, cela additionne les voltages, tout en conservant un ampérage identique. Il s'effectue normalement entre des modules de même ampérage. Dans le cas contraire, l'ensemble s'aligne sur l'ampérage le plus faible.

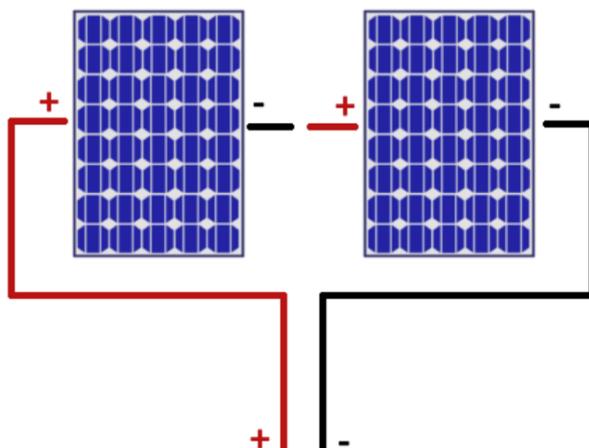


Figure. I.8. branchement de panneaux en série.

Pour un branchement en série, il faut relier les pôles positifs d'un module aux pôles négatifs d'un autre module.

### I.7.2. Montage de modules photovoltaïques en parallèle :

Lors d'un montage de modules en parallèle, ce sont les intensités qui s'additionnent, tandis que la tension reste identique. Le résultat est donc inverse d'un branchement en série. Il s'effectue normalement entre des modules de même voltage, et ce, afin d'éviter tout risque de surtension ou de court-circuit. Les intensités peuvent quant à elles être différentes, puisqu'elles s'additionnent. Ce type de branchement est utilisé lorsqu'on souhaite une forte intensité.

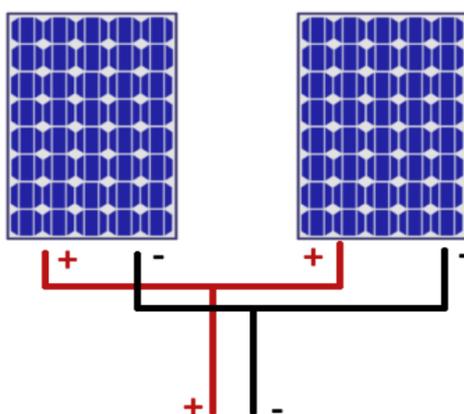


Figure. I.9. branchement de panneaux en parallèle.

Pour un branchement en parallèle, il faut relier les bornes positives entre elles. Il en est de même pour les bornes négatives. Notons que, lors d'une installation de système photovoltaïque à domicile, il faut choisir le système le plus adapté aux besoins.

### **I.8. Les avantages de l'énergie photovoltaïque :**

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages [2] :

- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique et les systèmes photovoltaïques sont fiables.
- Comme leur taille est petite, et leur opération est silencieuse, l'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques notamment à la grêle).
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue elle avoisine une durée de 25 ans.

### **I.9. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :**

Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable [2,3].

- Le coût d'installation très élevé.
  - Faible rendement de conversion.
  - Augmentation du coût de l'installation, cas de stockage de l'énergie avec des batteries.
- Pollution à la fabrication.

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur le système photovoltaïque, en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque. Nous avons donné les principales technologies solaires photovoltaïques, ainsi que les avantages et les inconvénients des systèmes PV. Dans le chapitre suivant nous aborderons la modélisation et simulation d'un capteur solaire photovoltaïque dans des conditions climatiques variables.

## Chapitre II: Modélisation et Simulation d'un capteur solaire photovoltaïque

### Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les équations qui régissent le fonctionnement du capteur solaire photovoltaïque, qui vont être utilisées dans la simulation du générateur PV sous MATLAB/Simulink. Ce qui nous permettra de tracer ses caractéristiques essentielles, à savoir : courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) pour des conditions météorologiques (éclairage et température) différentes. Par la suite nous comparons les valeurs des paramètres électriques avec des données obtenus par une étude expérimentale.

### II.1. Les modèles de la cellule PV

Un capteur solaire photovoltaïque est une diode à jonction PN de grande surface qui, exposée à la lumière (photons), génère une tension électrique. En effet, ce comportement peut être modélisé avec un circuit équivalent [5]. Dans ce contexte, Il existe plusieurs modèles qui ont été proposés pour représenter un capteur PV, on citera deux modèles : le modèle à une diode et le modèle à deux diodes.

La figure. II.1 présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairage. Il correspond à un générateur de courant  $I_{ph}$  qui produit un courant proportionnel à la puissance lumineuse incidente monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma [6,7].

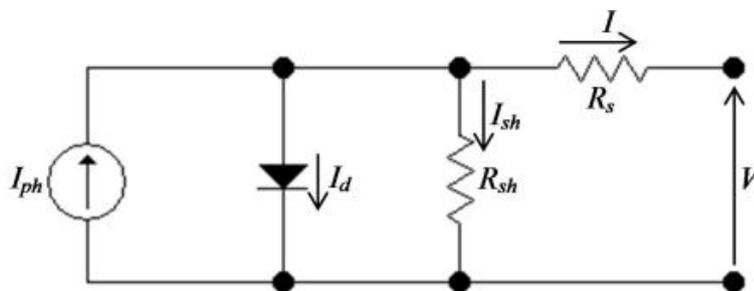


Figure. II.1: Schéma équivalent électrique de la cellule PV

Ces deux résistances ont une grande influence sur la caractéristique de fonctionnement courant-tension du capteur solaire. Où la résistance série  $R_s$  est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. Tandis que, la

résistance shunt  $R_{sh}$  est due au courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont elle a été réalisée [8,9].

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (\text{II.1})$$

Le photo-courant  $I_{ph}$ , proportionnel à l'éclairement réel  $G$ , avec une correction selon la température réelle  $T$  :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{STC}} \times (I_{ph,STC} + k_I(T - T_{STC})) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$G$  et  $G_{STC}$ : éclairement effective et de référence [ $W/m^2$ ] ;

$T$  et  $T_{STC}$ : température effective et de référence en Kelvin [ $K$ ] ;

$I_{ph,STC}$ : courant photonique sous condition de référence [ $A$ ] ;

$k_I$ : coefficient de température de  $I_{ph}$  [ $A/K$ ].

- Le courant de jonction  $I_D$  (courant traversant la diode) est donné par

$$I_D = I_o \times \left( e^{\frac{q(V+R_S I)}{A k T}} - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

-Le potentiel thermique est donné par l'expression suivante :

$$V_t = \frac{k T}{q}$$

Où :

$T$  : La température effective ou réelle

$q$  : La constante de charge d'électron, égale à  $1.6.10^{-19} C$

$k$  : la constante de Boltzmann, égale à  $1.38.10^{-23} J/k$

$A$  : Le facteur d'idéalité de diode (1 à 2).

En remplaçant l'équation (II.3) dans l'équation (II.1), on obtient :

$$I = I_{ph} - I_o \times \left( e^{\frac{q(V+R_S I)}{A k T}} - 1 \right) - I_{sh} \quad (\text{II.4})$$

Le courant dérivé par la résistance shunt  $I_{sh}$  prend l'expression :

$$I_{sh} = \frac{V+I.R_s}{R_{sh}} \quad (II.5)$$

Le courant de saturation inverse de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression :

$$I_o = I_{o,STC} \times \left(\frac{T}{T_{STC}}\right)^3 \times \exp \left[ \left(\frac{q E_g}{A k T}\right) \times \left(\frac{1}{T_{STC}}\right) - \left(\frac{1}{T}\right) \right] \quad (II.6)$$

Notons que,  $E_g$  est l'énergie de Gap de la cellule ; sur le tableau II.1, sont données ses valeurs pour différents type de matériaux semi-conducteurs.

Tableau.II.1.Valeurs de l'énergie de Gap pour différents type de matériaux semi-conducteurs.

| <b>Matériaux semi-conducteurs</b> | <b>Energie de Gap de la cellule : <math>E_g</math> (eV)</b> |
|-----------------------------------|---|
| Silicium cristallin (Si)          | 1.12  |
| Silicium amorphe (a-Si)           | 1.7   |
| indium et sélénium (CIS)          | 1.03  |
| tellurure de cadmium (CdTe)       | 1.5   |

Dans notre travail on adopte un capteur solaire de 36 cellules. Sachant que de  $N_s$  est le nombre de cellules en série le potentiel thermique s'écrit :

$$V_t = \frac{N_s k T}{q}$$

La résistance série et parallèle en Ohm ( $\Omega$ ) d'un capteur solaire PV par rapport à celle d'une cellule solaire s'écrivent :

$$R_s = N_s \times R_{s,cellule}$$

$$R_{sh} = N_s \times R_{sh,cellule}$$

Rappelons que l'indication *STC* signifie en anglo-saxon Standard Test Conditions pour  $G_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T_{STC} = 25^\circ\text{C}$

## II.2. simulation du capteur solaire PV

Les caractéristiques du capteur utilisé dans la simulation sont présentées dans le tableau III.2 du chapitre suivant. Le modèle de simulation du capteur PV, développé sous Matlab/Simulink est représenté à la figure ci-dessous.

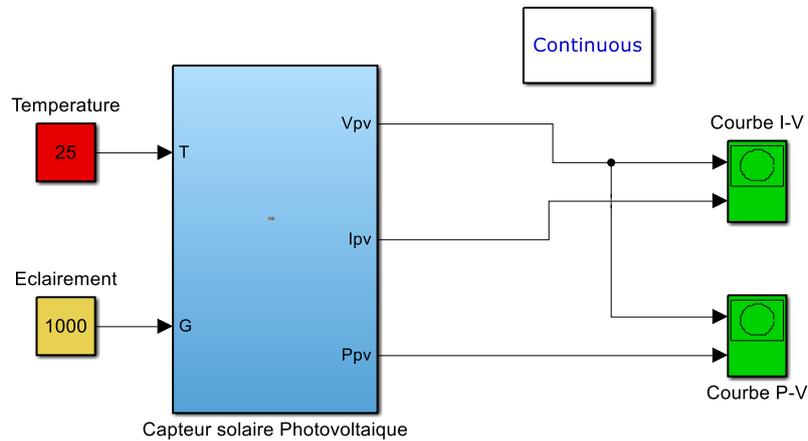


Figure. II. 2 : Schéma Bloc de simulation du capteur PV sous matlab /Simulink.

Les résultats de simulation du capteur photovoltaïque représentés par les figures (II. 3) à (II.10), représentent les caractéristiques (I-V) et (P-V) sous différentes contraintes d'éclairement et de température.

### II.2.1. Simulation de l'Influence de l'Éclairement :

Les deux scénarios de simulations représentés aux figures (II.3) et (II.4) sont effectués pour différents niveaux de rayonnement  $G$  ( $W/m^2$ )=[896 775 455 240 125], en maintenant la température constante  $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ , en supposant que la vitesse de circulation de l'air ambiant est constantes.

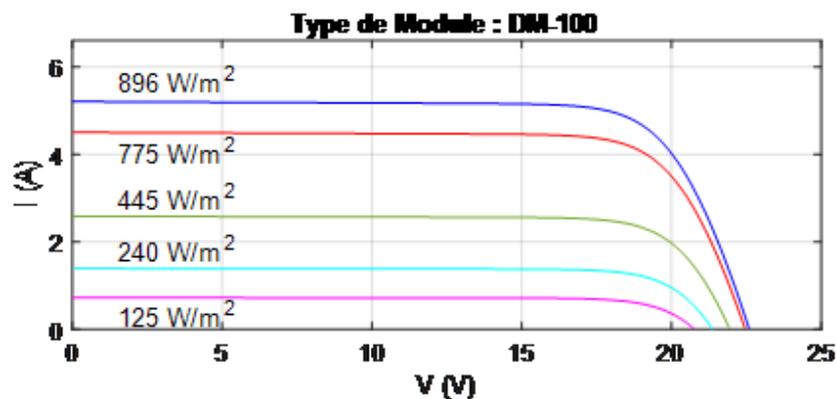


Figure. II.3: Courbes (I-V) à différents éclairements et à une température  $T= 25\text{ }^\circ\text{C}$ .

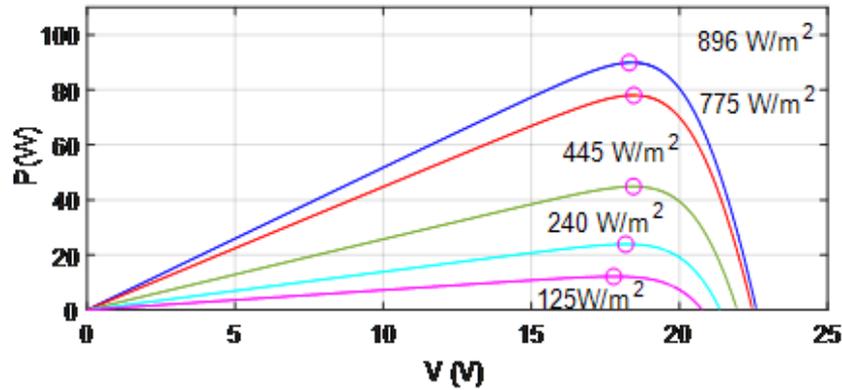


Figure. II.4: Courbes (P-V) à différents éclairagements et à une température  $T= 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Il en ressort, que le courant subit une variation considérable, quand l'éclairement augmente entraînant une élévation du courant de court-circuit  $I_{cc}$ . En revanche, la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

### II.2.2. Simulation de l'Influence de la température :

Les deux tests de simulations représentés aux figures II.5 et II.6 sont effectués en fonction de la température  $T(^{\circ}\text{C})=[50\ 45\ 27\ 21\ 12]$  à un éclairement constante  $G=1000\text{W/m}^2$ . En supposant toujours que la vitesse de circulation de l'air ambiant est constante.

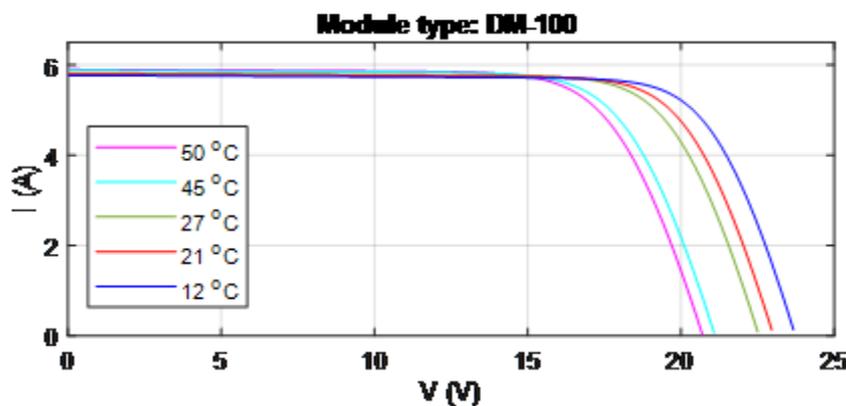


Figure. II. 5 : Courbes (I-V) à différentes températures et à éclairement fixe  $G=1000\text{W/m}^2$ .

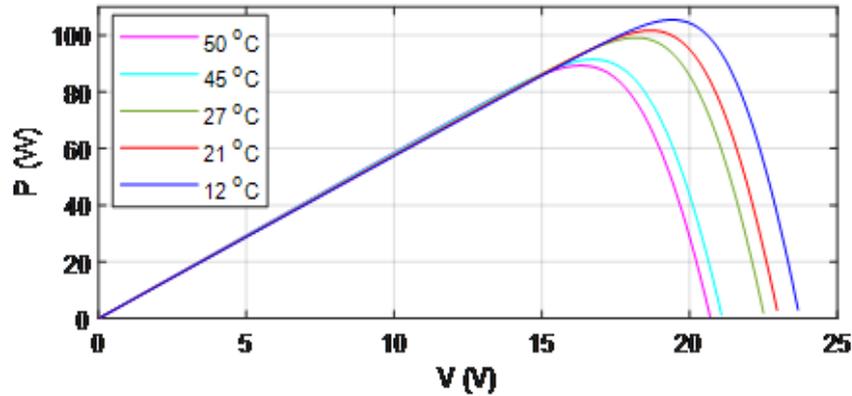


Figure. II. 6 : Courbes (P-V) à différentes températures et à éclairement fixe  $G=1000W/m^2$ .

L'examen des figures II.5 et II.6 montre que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , ainsi qu'une diminution de la puissance maximale. Pour ce faire, on conclut que la température est un paramètre très important dans le fonctionnement du capteur solaire, du fait que les propriétés électriques d'un semi conducteur sont très sensibles à celle-ci.

### II.2.3. Simulation selon des valeurs réelles des conditions météorologiques:

On réalise des scénarios de simulations dans un environnement similaire aux conditions climatiques enregistrées lors mesures expérimentales, ce qui nous permet de faire une comparaison entre les valeurs obtenus par les mesures réelles et de simulations.

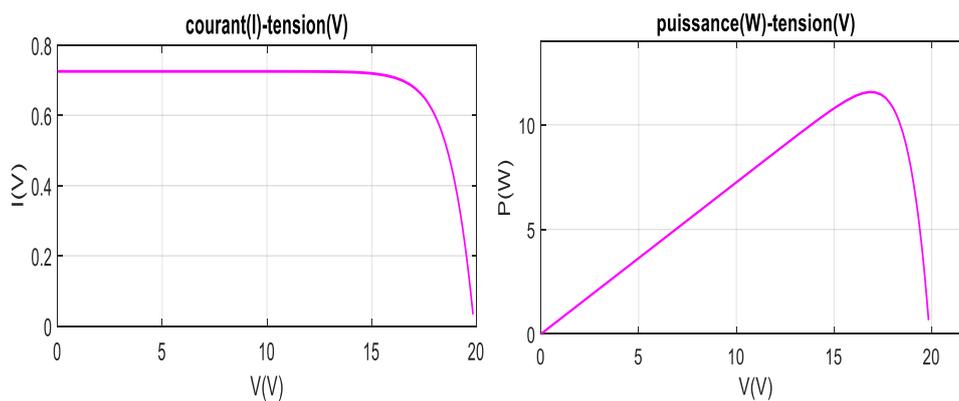


Figure. II. 7: Courbes (I-V) et (P-V) à  $G=125W/m^2$  et  $T=26\text{ }^\circ\text{C}$

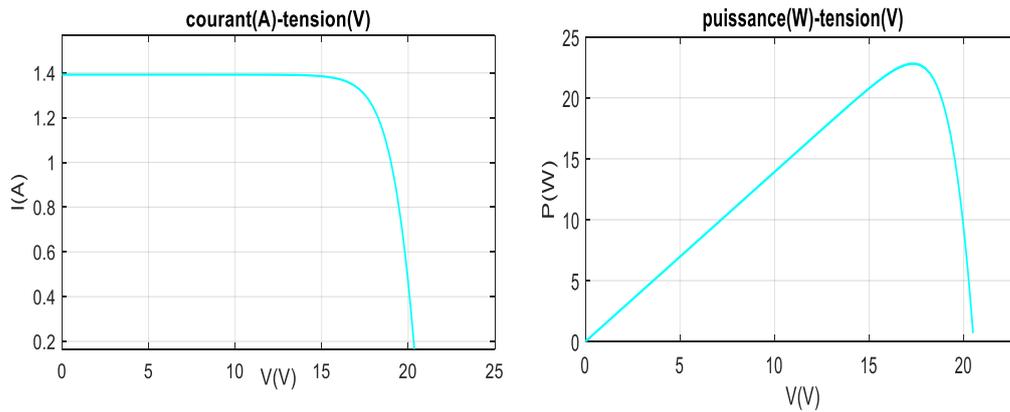


Figure. II. 8 : Courbes (I-V) et (P-V) à  $G=240 \text{ W/m}^2$  et  $T=27 \text{ }^\circ\text{C}$ .

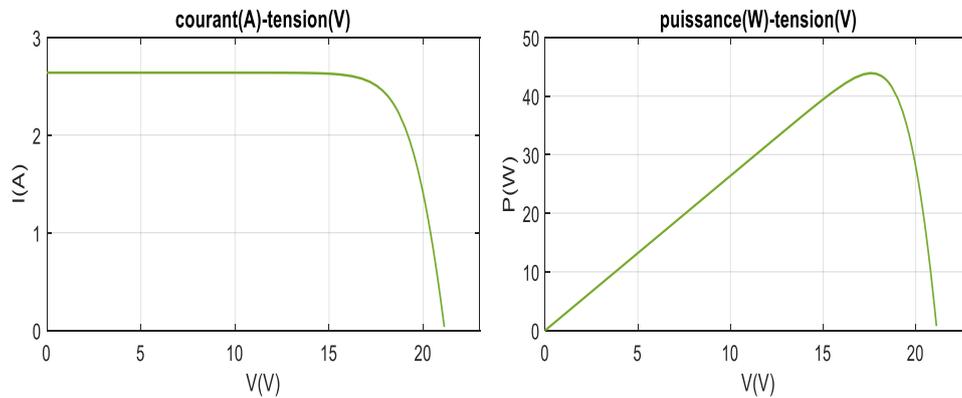


Figure. II. 9 : Courbes (I-V) et (P-V) à  $G=455 \text{ W/m}^2$  et  $T=19 \text{ }^\circ\text{C}$ .

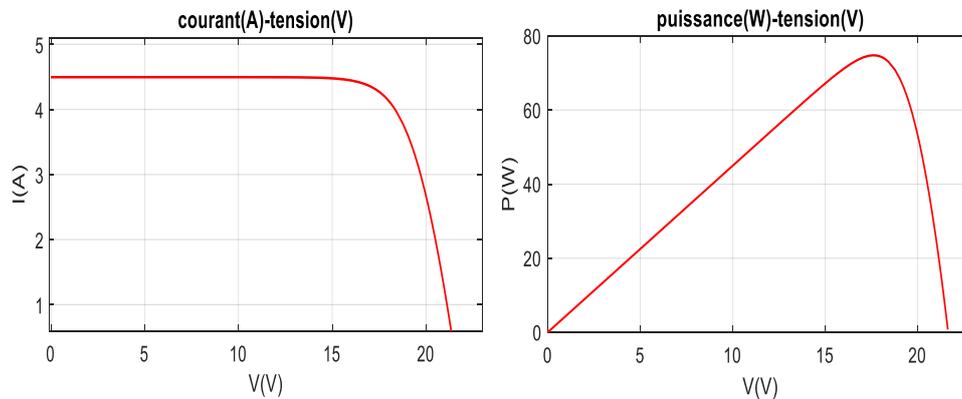


Figure. II. 10 : Courbes (I-V) et (P-V) à  $G=775 \text{ W/m}^2$  et  $T=12 \text{ }^\circ\text{C}$ .

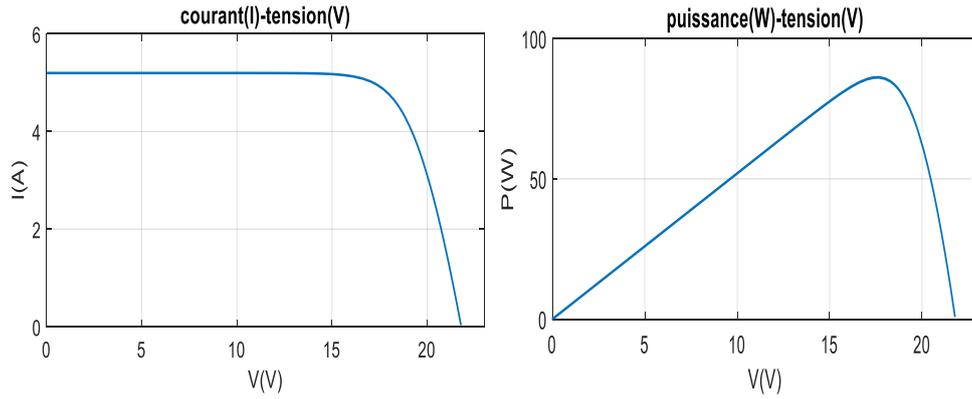


Figure. II.11: Courbes (I-V) et (P-V) à  $G=896 \text{ W/m}^2$  et  $T=21 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Les caractéristiques électriques du capteur solaire sont présentées dans le tableau suivant, où les valeurs des paramètres électriques obtenus par simulation et par des mesures sont énumérées.

Tableau. II.2 : caractéristiques électriques obtenus par simulations et mesures.

| <i>Caractéristiques</i>                  | <i>Résultats de simulations</i> |                      |                       | <i>Résultats de mesures</i> |                      |                       |
|--|---------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------|
|  | $I_{cc} \text{ (A)}$            | $V_{co} \text{ (V)}$ | $P_{max} \text{ (W)}$ | $I_{cc} \text{ (A)}$        | $V_{co} \text{ (V)}$ | $P_{max} \text{ (W)}$ |
| $G=896 \text{ W/m}^2 T=21^\circ\text{C}$ | 5.19                            | 21.76                | 85.61                 | 4.72                        | 19.5                 | 62.78                 |
| $G=775 \text{ W/m}^2 T=12^\circ\text{C}$ | 4.49                            | 21.5                 | 74.78                 | 3.68                        | 19.9                 | 46.62                 |
| $G=455 \text{ W/m}^2 T=19^\circ\text{C}$ | 2.68                            | 21.12                | 42.43                 | 2.51                        | 20.3                 | 35.32                 |
| $G=240 \text{ W/m}^2 T=27^\circ\text{C}$ | 1.45                            | 20.52                | 23.74                 | 1.39                        | 19                   | 17.38                 |
| $G=125 \text{ W/m}^2 T=26^\circ\text{C}$ | 0.72                            | 19.78                | 11.56                 | 0.58                        | 18.8                 | 8.1                   |

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équations décrivant le modèle mathématique du capteur solaire, ce qui nous a permis de faire des scénarios de simulations sous environnement MATLAB/Simulink et montrer l'influence des différents paramètres climatiques sur ses caractéristiques essentielles (I-V) et (P-V). Enfin, nous avons présentés les valeurs des paramètres du capteur PV obtenus par simulation et par des mesures, et ce pour une éventuelle étude comparative.

*Chapitre III: Étude expérimentale des caractéristiques d'un capteur solaire photovoltaïque*

### **Introduction**

Ce chapitre présente l'étude et analyse des caractéristiques électriques d'un capteur solaire photovoltaïque fixe, dans des conditions de rayonnement solaire et de température variables à un site situé dans la ville d'Annaba en Algérie. En déduisant et en comparant les caractéristiques, telles que : le courant, la tension et la puissance restitués à différents moments. Ce qui nous conduira par la suite à des observations intéressantes et conclusions essentielles concernant l'évaluation des performances du capteur PV et ses applications.

### **III.1. Caractéristiques géographiques du site**

L'emplacement exact utilisé pour l'étude expérimentale est l'Innovation Center (GRP Cluster Annaba innovation center A.I.C) bâti de la commune d'Elbouni dans la ville d'Annaba, au nord de l'Algérie. Les détails géographiques et météorologiques de ce site, pour un  $Azimuth=0^\circ$  (*vrai sud*) sont représentées sur le Tableau III.1.

| <i>Caractéristiques géographiques du site</i> |                    |                     |                   |        |
|---|--------------------|---------------------|-------------------|--------|
| Nom du site                                   | Latitude en degrés | Longitude en degrés | Altitude en mètre | Albédo |
| Annaba  | 36.9               | 7.76                | 23                | 0.3    |

Tableau III.1 : Données géographiques du site

### **III.2. Description du banc d'essais expérimental :**

Le système photovoltaïque fixe par rapport à la position du soleil est un module PV utilisé durant notre étude jouant le rôle d'un capteur solaire de type *Divel Solar-100M(36)*, existant au niveau du site cité précédemment (voir Figure (III.1)). Avec une puissance de crête nominale ( $P_{max}$ ) de **100 W**, une tension de puissance maximale ( $V_{mp}$ ) de 18,35 V et un courant de puissance maximum ( $I_{mp}$ ) de **5,45 A**.



Figure.III.1: Capteur solaire photovoltaïque.

Les caractéristiques du module solaire utilisé sont illustrées dans le Tableau (III.2)

| <i>Paramètres électriques</i>                                | <i>Module solaire de type :<br/>Divel Solar-100M(36)</i> |
|--|--|
| -Puissance maximale ( $P_{max}$ ) :                          | 100W(WP)   |
| -Tension à $P_{max}$ ( $V_{mp}$ ) :                          | 18.35 V  |
| -Courant à $P_{max}$ ( $I_{mp}$ ) :                          | 5.45A  |
| -Tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) :                    | 22.7V  |
| -Courant en court-circuit ( $I_{sc}$ ):                      | 5.8A   |
| -Type de cellules: 36Pcs,<br>125×125 Silicium Monocristallin |  |

Tableau III.2: Caractéristiques du panneau solaire.

### III.2.1. Les appareils de mesure utilisés :

Pour déterminer les performances thermiques et électriques du capteur solaire photovoltaïque dont les dimensions et les caractéristiques géométriques sont indiquées au tableau III.2, on doit mesurer un certain nombre de paramètres indispensables pour le déroulement des manipulations, pour ce faire nous avons utilisé les instruments énumérés ci-dessous :

- 1-Pyranometer électronique pour mesurer le rayonnement global.
- 2-Thermomètre pour mesurer la température.
- 3-Appareils de mesure de courant et tension (I-V) du module PV.
- 4-Resistance variable.

### III.3.Méthode de déroulement du processus expérimentale :

Le banc expérimental pour l'étude se compose de systèmes PV fixe, composé d'un module PV avec les bornes de système appliquées au circuit électrique de la figure III.2. Ce système a été installé pour avoir la même orientation, sud face à des azimuts nuls avec une inclinaison de module de 35° Sud (ce qui se rapproche de la latitude de l'emplacement), ayant une tension nominale en circuit ouvert de condition de test standard (STC) de 22,7 V, un courant de court-circuit de 5,8 A et une puissance de crête de 100 W. Où STC est une abréviation pour la "*condition de test standard*" par laquelle le module PV est testé et calibré qui est : un niveau d'insolation de 1000 W/m<sup>2</sup>, une masse d'air de 1,5 AM et une température de cellule de 25°C.

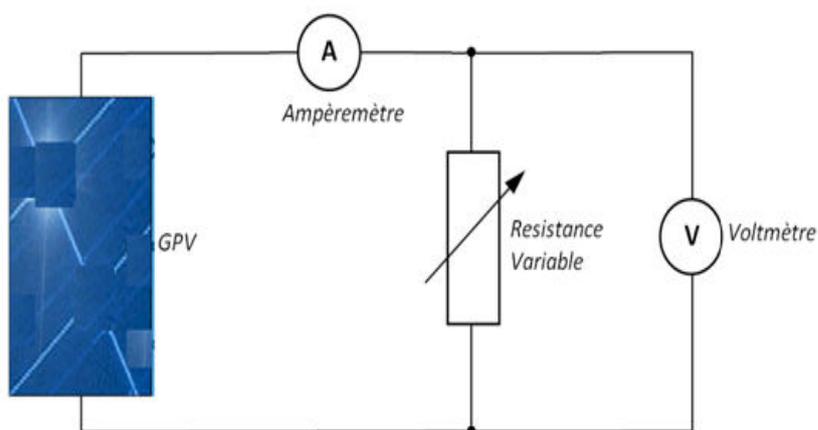


Figure III.2. Disposition du circuit électrique de mesures.

Tandis que le système PV restait fixe par rapport à la position du Soleil. On utilise un rhéostat de type potentiomètre, dont l'impédance dans le circuit (Figure III.2) est variée. Le courant et la tension correspondants à chaque point ont été surveillés et enregistrés à l'aide de l'ampèremètre et du voltmètre. Ce processus a été effectué toutes les 1 h pendant 3 jours entre la fenêtre solaire de 9h00 à 12h30 pour le premier jour (correspondant au 20 mars 2022) et de 9h30 à 13h00 pour le deuxième (correspondant au 21 mars 2022) et le troisième jour (correspondant au 23 mars 2022).

L'un des principaux problèmes rencontrés lors des mesures était le changement/baisse spectaculaire des valeurs observées dans certains cas en raison de changements soudains de l'éclairement. En effet, contrairement à d'autres mois de l'année, le mois de Mars a un gradient d'insolation très variable car le ciel est souvent nuageux dans la zone côtière (ville d'Annaba), de sorte que chaque changement d'insolation implique une grande différence dans les valeurs observées.

### **III.3.1. Procédure expérimentale :**

### **III.3.2. Relation entre les paramètres électriques :**

Les paramètres d'un capteur solaire photovoltaïque ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $P_{max}$ ,  $F_F$  et  $\eta$ ), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différents capteurs éclairés dans des conditions identiques [10,11].

#### **III.3.2.1. Le Courant de court-circuit, $I_{cc}$ :**

D'après les principes PV de base [11], le courant circulant dans le circuit ci-dessus (Figure III.2) à chaque instant, peut être donné comme :

$$I = I_{ph} - I_D \quad (III.1)$$

D'après les graphiques (figures III.3 et III.4), lorsque la résistance de charge est nulle, le courant dans le circuit devient le maximum (courant de court-circuit). À ce stade, la tension  $V = 0$  et de l'Eq. (III.1), le courant de court-circuit devient :

$$I_{cc} = I(V = 0) = I_{ph} \quad (III.2)$$

Il s'agit donc, du courant obtenu en court-circuitant les bornes du capteur solaire (en prenant  $V=0$  dans le schéma de la Figure III.2). Ce courant croît linéairement avec l'intensité d'illumination du capteur et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [12].

#### **III.3.2.2. La Tension à circuit ouvert, $V_{co}$ :**

A partir des graphiques (figures III.3 et III.4), la tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse le capteur solaire est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la Résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse[12]. En annulant le courant débité par le capteur solaire, de l'équation (III.1) On peut écrire :

$$V_{co} = \left(\frac{nkT}{q}\right) \times \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1\right) \quad (III.3)$$

Il ressort, que la relation théorique entre le potentiel et le courant électrique est une fonction logarithmique comme elle est indiquée dans le (Chap. II). C'est la tension pour laquelle le

courant débité par le capteur solaire photovoltaïque est nul (C'est la tension maximale d'un générateur photovoltaïque).

### III.3.2.3. La Puissance de sortie

La puissance fournie au circuit extérieur par le capteur solaire photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée  $P_{max}$ ) pour un point de fonctionnement  $P_{max}$  ( $I_{max}$ ,  $V_{max}$ ) de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et  $I_{cc}$  et tension comprise entre 0 et  $V_{co}$ ). Le produit ( $V_{max} \times I_{max}$ ) donne la puissance maximale qui représente 80% environ du produit ( $V_{co} \times I_{cc}$ ) [12].

### III.3.3. Relation entre la tension et le courant électrique :

On faisant varier la résistance (rhéostat) et à chaque fois nous mesurons le potentiel et le courant électrique aux bornes du générateur PV. Ce processus nous permet d'élaborer les Courbes I-V et P-V, qui peuvent être représentées comme suit :

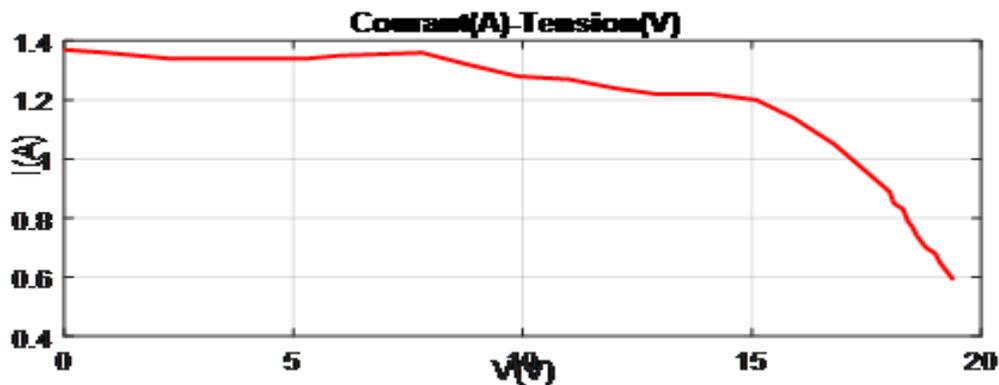


Figure.III.3: Evolution du courant en fonction de tension.

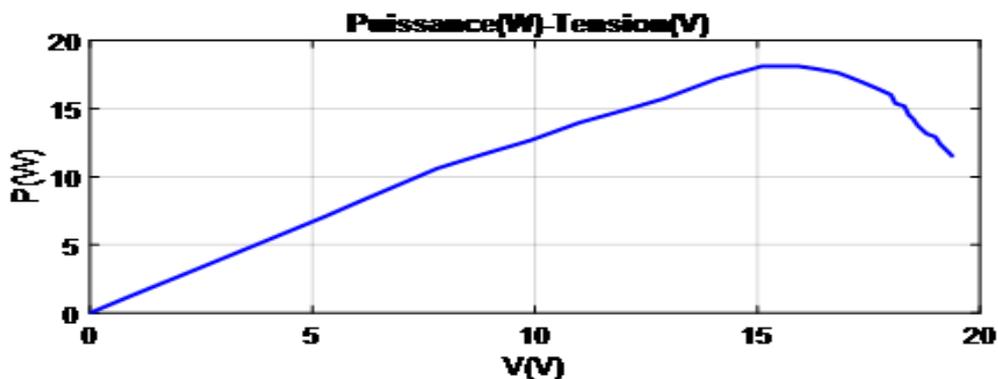


Figure.III.4: Evolution de la puissance en fonction de la tension.

Les Figures III.3 et III.4 donnent les résultats surveillés et mesurés pour le jour du 21 mars 2022 à 10h19min, sous les conditions climatiques suivantes : Eclairement :  $775\text{W/m}^2$ , Température ambiante :  $21,6\text{ }^\circ\text{C}$ .

### III.3.4. Variation du courant et de la tension en fonction du temps:

Dans les figures ci-dessous on mesure la tension à circuit ouvert  $V_{co}$  et le courant de court-circuit  $I_{cc}$  aux bornes du capteur solaire photovoltaïque durant la journée du 21 mars 2022. Le module est orienté vers le sud (Angle d'azimut= $0^\circ$ ).

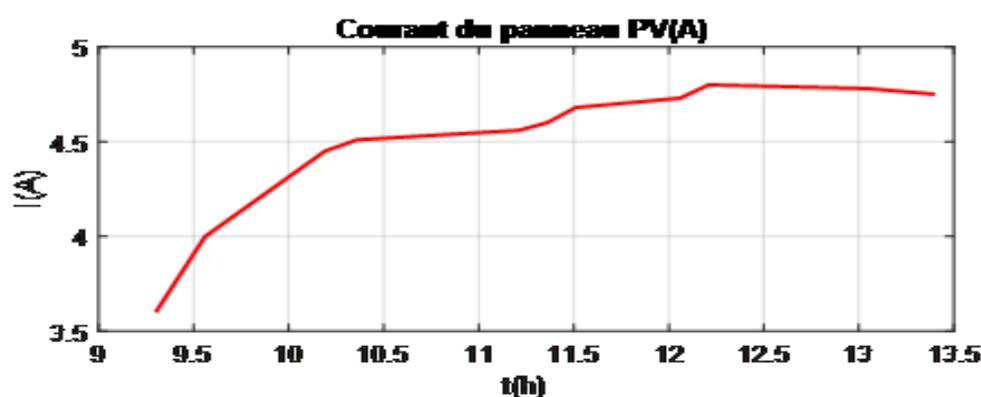


Figure.III.5: Courbe de courant en fonction du temps.

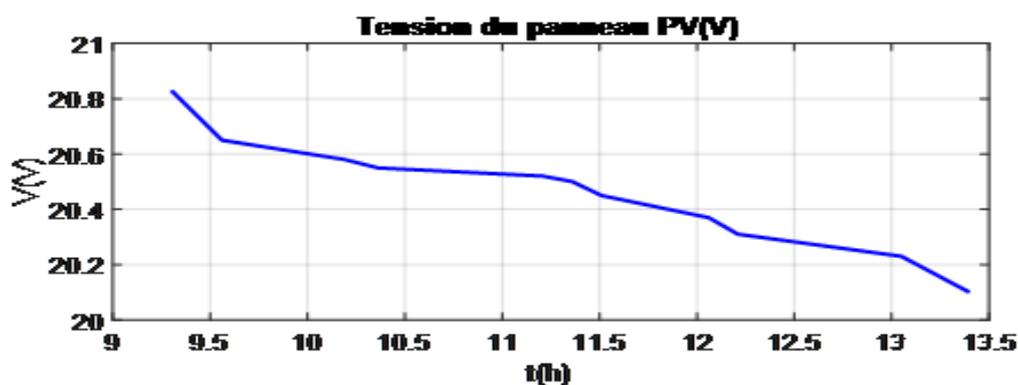


Figure.III.6 : Courbe de tension en fonction du temps.

De par l'examen des figures.III.5 et III.6, on observe :

- Une tension qui démarre d'une valeur initiale de  $20.83\text{V}$  à  $9\text{h}:20\text{min}$ , ensuite elle décroît pour atteindre une valeur minimale de  $20.1\text{V}$  à  $13\text{h}:25\text{min}$ .

- Un courant qui prend une valeur initiale de  $3.6A$  à  $9h:20min$ , puis il enregistre une valeur maximale qui vaut  $4.8A$  vers  $12h:10min$ , ensuite il décroît progressivement.
- Une variation de courant directement proportionnelle à deux paramètres, à savoir : l'intensité du rayonnement solaire reçue et la position du capteur solaire.

### III.3.5. Variation de l'éclairement et la température au cours de la journée :

La figure III.7 présente l'évolution de l'éclairement solaire global journalier au cours de la période d'étude (21 mars 2022). On constate, que l'éclairement est faible en début de journée par rapport à celui atteint à midi, qui vaut  $G=883W/m^2$ . Il en ressort, que l'éclairement varie en fonction des conditions climatique.

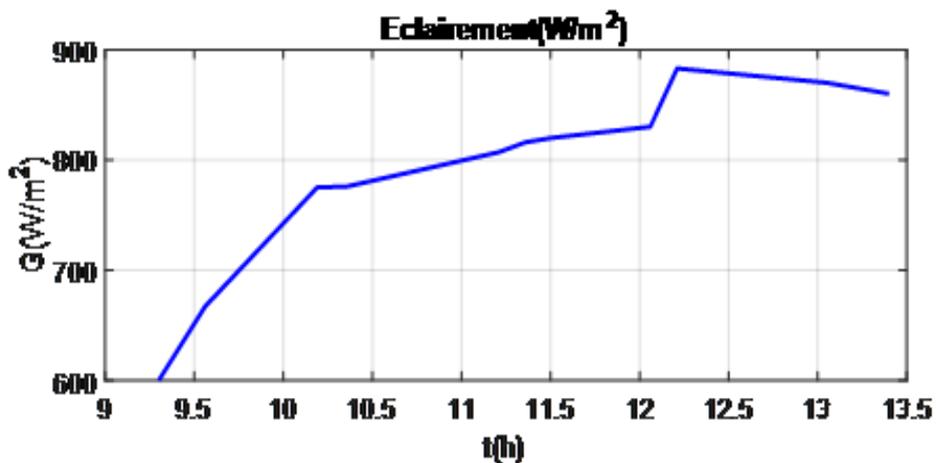


Figure.III.7 : Courbe de l'éclairement en fonction du temps.

La connaissance de la température est indispensable pour l'étude du système photovoltaïque, la Figure III.8 représenté l'évolution horaire de la température ambiante de la journée du 21 mars 2022. Elle atteint la valeur  $T_{ambiante} = 24\text{ }^{\circ}C$ , à l'instant  $t = 11:27min$ .

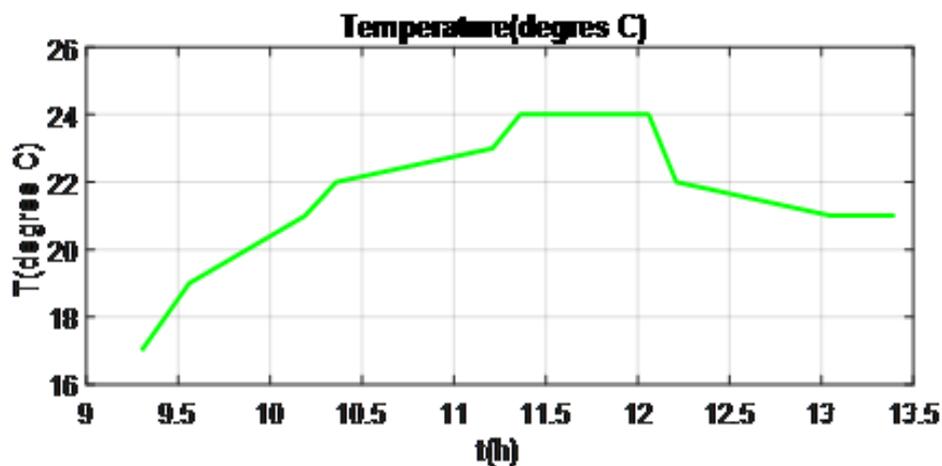


Figure.III.8 : Courbe de température en fonction du temps.

### III.3.6. Variation de la puissance au cours de la journée :

Sachant que la puissance est le produit du courant et de la tension ( $P = V_{max} \times I_{max}$ ) où  $V_{max}$  est  $I_{max}$  sont respectivement la tension et le courant maximale. La figure.III.9 représente son l'évolution en fonction de temps.

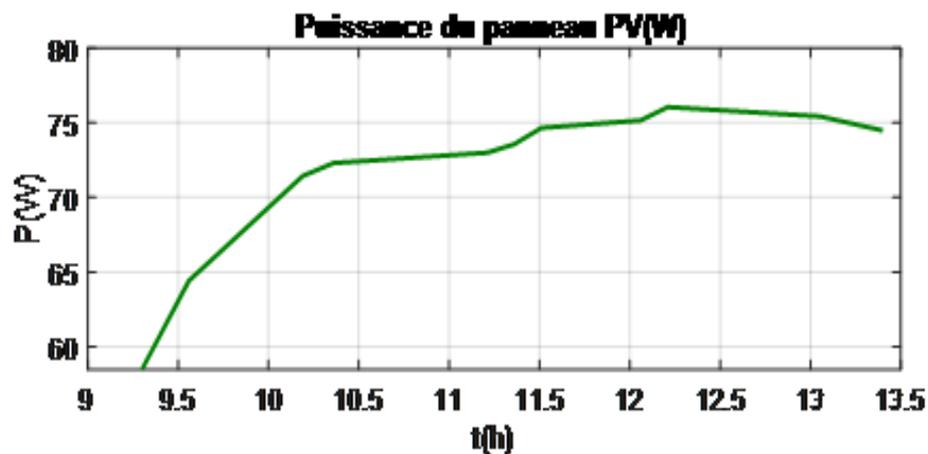


Figure.III.9: Courbe de la puissance produite.

D'après la figure ci-dessus, la puissance produite par ce module est variable tout au long de la journée. Il peut être conclu à partir du graphique que la puissance maximale quotidienne moyenne de ce capteur solaire, augmente à partir du lever du soleil et culmine vers midi, puis diminue progressivement vers le coucher du soleil.

### III.3.7. Variation temporelle du courant en ciel nuageux :

La présence de nuages affectera le fonctionnement du panneau. Ils diminuent le rendement des panneaux durant le passage d'ombre lié aux nuages intermittent qui couvrent partiellement le ciel.

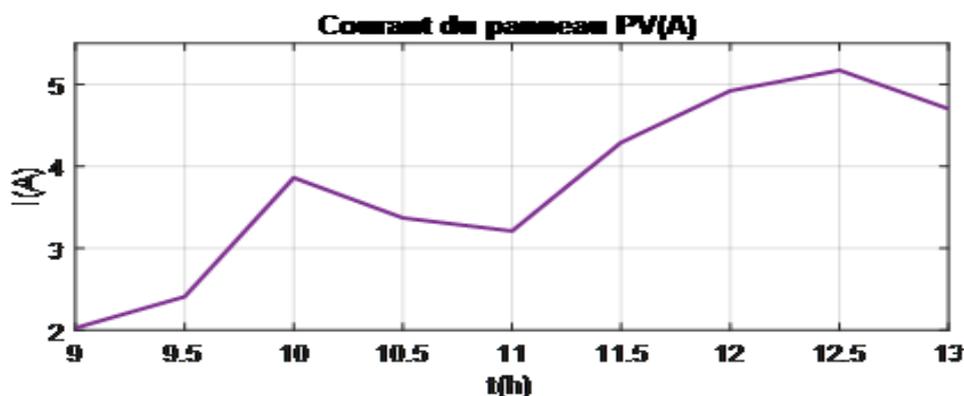


Figure.III.10: Courbe de courant en fonction du temps en ciel nuageux entre 10h30min et 11h.

La figure III.10 présente l'évolution du courant au cours de la journée du 23 mars 2022. On remarque que le courant restitué par le capteur solaire est faible durant la phase de passage de nuage par rapport au reste de la journée (ciel dégagé). On peut dire que le courant varie en fonction des conditions climatiques.

### III.3.8. Orientation d'un panneau solaire

L'angle que forme un panneau solaire avec l'axe nord-sud, représente également un paramètre fondamental, c'est l'orientation des panneaux solaires. Le rayonnement du soleil permet à la lumière de se réfléchir dans toutes les directions. La Terre est en mouvement continu, il n'est pas possible de déplacer les panneaux solaires qui sont fixés durant toute la journée [1].

Le soleil se lève à l'est et se couche à l'ouest. Si on souhaite capter un maximum de rayons solaires durant toute la journée, c'est donc vers le sud qu'il faut incliner les panneaux, et ce, pour les pays qui se situent dans l'hémisphère nord. Il s'agit vraiment de l'orientation optimale pour les panneaux solaires.

Ainsi, on en déduit qu'une orientation sud-est ou sud-ouest peut tout à fait convenir. Une orientation est, ou ouest bien qu'offrant moins de performances, peut également être envisagée. En revanche, on doit éliminer le nord, nord-est et nord-ouest du fait que la production d'électricité serait alors beaucoup trop faible.

### **III.3.9. Inclinaison des panneaux solaires**

Un autre paramètre s'avère l'un des plus importants c'est l'inclinaison du panneau solaire, autrement dit, l'angle qu'il forme par rapport à l'horizontale. Selon les études menées sur ce sujet, l'inclinaison optimale correspond à l'angle qui permettra aux capteurs d'être positionnés perpendiculairement aux rayons du soleil [1,3].

Le problème, c'est qu'un angle à  $90^\circ$  ne peut pas être conservé tout au long de la journée étant donné que le soleil se déplace et que son angle varie en fonction des saisons. En effet, pour que le capteur solaire bénéficie de la meilleure intensité lumineuse, et donc restituer un rendement maximal : en hiver, il faudrait qu'il soit incliné à  $60^\circ$  environ, contre  $45^\circ$  au printemps et  $20^\circ$  en été. Par conséquent, un angle d'inclinaison moyen compris entre  $30^\circ$  et  $35^\circ$  par rapport à une ligne horizontale est préconisé.

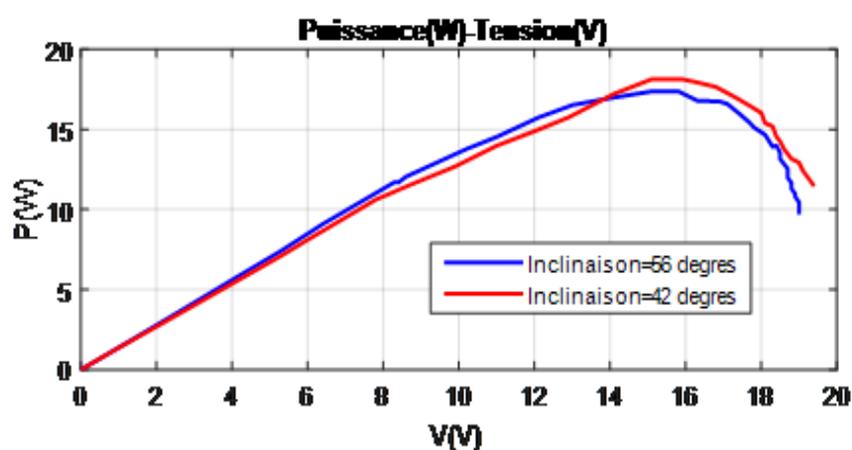


Figure.III.11: Evolution de la puissance en fonction de la tension pour une inclinaison variable.

La Figures III.10 donne les résultats surveillés et mesurés pour le jour du 21 mars 2022 à 10h 19 min et à 10h 36 min sous les conditions climatiques respectives suivantes : Eclairement  $775\text{W/m}^2$  et  $776\text{W/m}^2$  et une température ambiante identique qui vaut  $21,6^\circ\text{C}$ .

### *Chapitre III: Étude expérimentale des caractéristiques d'un capteur solaire photovoltaïque*

Compte tenu de cette dépendance angulaire, la puissance fournie par un module dépend beaucoup de son inclinaison et de son orientation, et ce parce que le soleil est toujours en mouvement.

#### **Conclusion:**

Dans cette partie, qui représente le maillon essentiel de notre travail, nous avons abordé une étude expérimentale sur un capteur solaire photovoltaïque. Après une présentation succincte du site où le déroulement des expériences a été effectué, nous avons abordé la description du dispositif expérimentale (le banc d'essais expérimental) ainsi que la méthode de déroulement de ce processus. A priori, les premiers résultats obtenus confirment la fiabilité du capteur solaire photovoltaïque utilisé. En effet, à partir de nos résultats, on constate que: Le courant, la tension et la puissance restitués par le capteur solaire photovoltaïque sont proportionnels à l'intensité du rayonnement reçue sur la surface du capteur photovoltaïque. Pour ce faire, le rôle de l'inclinaison des capteurs photovoltaïque est très important pour l'évolution de cette quantité d'énergie (rayonnement reçue), car celle-ci est en relation directe avec le rayonnement capté à la surface du capteur. Dans ce contexte, un angle d'inclinaison de  $35^\circ$  a été adopté pour cette étude, il est presque égal à la latitude du lieu d'expérience. Entre autre, il est à noter, que les conditions climatiques, à savoir : le vent, l'augmentation de température et le passage de nuages, affectent considérablement la production d'électricité du capteur solaire photovoltaïque.

### Conclusion générale

Ce travail a été effectué au sein de l'Innovation Center dans la ville d'Annaba. On a traité dans une première étape, une étude par simulation du comportement d'un capteur solaire PV fixe, puis dans une seconde étape des mesures expérimentales sont effectuées afin d'évaluer ses performances sous différentes conditions climatiques.

Dans ce contexte, dans le premier chapitre nous avons présenté un aperçu sur les systèmes photovoltaïques, à savoir : les matériaux et composants photovoltaïques de base, le phénomène photovoltaïque, le principe de fonctionnement d'un capteur solaire et ses paramètres caractéristiques.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les équations décrivant le model mathématique du capteur solaire et, plus important encore, on a étudié et analyser les caractéristiques électriques, à savoir : le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert et la puissance maximale, et ce, par le biais des scénarios de simulations sous environnement MATLAB/Simulink, dans des conditions de rayonnement solaire et de température variables. Dans cette optique des observations intéressantes ont été faites, qui ont conduit à des conclusions essentielles concernant la comparaison des performances du capteur solaire obtenus par simulation et ceux des mesures expérimentales.

Dans la dernière partie, à partir des résultats obtenus, on a pu constater que: le courant, la tension et la puissance délivrés par le capteur solaire photovoltaïque sont proportionnels à l'intensité du rayonnement reçue sur la surface du capteur solaire. Aussi, son inclinaison est en relation directe avec le rayonnement capté à sa surface. Un angle d'inclinaison presque similaire à la latitude du lieu d'expérience valant  $35^\circ$  a été adopté pour cette étude. Entre autre, il est à noter, que les conditions climatiques, à savoir : le vent, l'augmentation de température et le passage de nuages, affectent considérablement la production d'électricité du capteur solaire photovoltaïque.

**Bibliographies**

- [1] Jacques, Bernard. « Energie solaire calculs et optimisation », Ellipse Edition. (2004).
- [2] Anne Labouret , Pascal Cumunel , Jean-Paul Braun et Benjamin Faraggi «Cellules solaires Les Bases De L'énergie Photovoltaïque », 5e Edition, Editions Techniques Et Scientifiques Françaises,2010.
- [3] Soler Robert, «L'énergie solaire Des fondamentaux aux technologies d'aujourd'hui et de demain», Lavoisier, Paris. 2019.
- [4] Savita Nema, R.K.Nema, Gayatri Agnihotri, «Matlab/simulink based study of photovoltaic cells/modules/array and their experimental verification», International journal of energy and environment, Volume 1, Issue 3, 2010, pp.487-500.
- [5] Dariga meekhun « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique », thèse de Doctorat, Toulouse, 2010.
- [6] S. M. Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [7] Zigha ali « Etude et simulation d'un système hybride photovoltaïque éolien », mémoire de Master, Université de Constantine, 2014.
- [8] Belkahla A. «Modélisation et Commande d'un système photovoltaïque sur la base des modèles à une et deux diodes utilisant Matlab / Simulink », Mémoire de Master, Université de Guelma, 2019.
- [9] Cabal Cédric « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédiée à la conversion photovoltaïque », thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [10] Zhang Y, Gao S, Gu T. Prediction of I-V characteristics for a PV panel by combining single diode model and explicit analytical model. Solar Energy. 2017; 144:349-355
- [11] Mohd Saifuzam Jamri and Tan Chee Wei, Modeling and control of a photovoltaic Energy System Using the State- space averaging technique American Journal of Applied Sciences 7 (5): 682-691, 2010.
- [12] Savita Nema, R.K.Nema, Gayatri Agnihotri, Matlab / simulink based study of photovoltaic cells / modules / array and their experimental verification Internatinal journal of energy and environment, Volume 1, Issue 3, 2010 pp.487-500.

**Titre : Etude des Caractéristiques d'un Capteur Solaire Photovoltaïque et Evaluation de ses Performances Sous Différentes Conditions Climatiques.**

**Résumé :** Dans le cadre de notre travail, une étude expérimentale des caractéristiques électriques d'un capteur solaire photovoltaïque est présentée. Cette étude a été faite dans la ville d'Annaba. Dans une première étape, nous avons traités la modélisation qui nous a permis d'effectuer des scénarios de simulations sous MATLAB/Simulink, puis évalués les performances des caractéristiques essentielles du capteur PV sous des conditions climatiques différentes. Ce qui nous a aidés à comparer les résultats obtenus par simulation avec ceux des mesures. Dans une seconde étape, nous focalisons notre attention à l'étude expérimentale d'un système PV installé au sein de l'Innovation Center (GRP Cluster Annaba innovation center A.I.C) bâti de la commune d'Elbouni dans la ville d'Annaba. Enfin, nous exposons l'ensemble des résultats obtenus expérimentalement

**Mots-clés :** énergie renouvelable, capteur solaire, caractéristique I-V, température, éclairage, simulation.

**العنوان:** دراسة خصائص جهاز الاستشعار الكهروضوئي وتقييم أدائه لمختلف الظروف المناخية.

**الملخص:**

كجزء من عملنا ، يتم تقديم دراسة تجريبية للخصائص الكهربائية لمستشعر الطاقة الشمسية الكهروضوئية. تمت هذه الدراسة في مدينة عنابة. في الخطوة الأولى ، تعاملنا مع النمذجة التي سمحت لنا بتنفيذ سيناريوهات المحاكاة في إطار برنامج Matlab Simulink، ثم قمنا بتقييم أداء الخصائص الأساسية لمستشعر PV في ظل ظروف مناخية مختلفة. ساعدنا هذا في مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها عن طريق المحاكاة مع نتائج القياسات. في خطوة ثانية ، نركز اهتمامنا على الدراسة التجريبية لنظام الكهروضوئية المركب داخل مركز الابتكار (GRP Cluster Annaba Innovation Centre A.I.C) في بلدية البوني في مدينة عنابة. أخيرًا ، نقدم جميع النتائج التي تم الحصول عليها تجريبياً.

**الكلمات المفتاحية:** الطاقة المتجددة ، لمستشعر الكهروضوئية ، خاصية I-V ، درجة الحرارة ، الإشعاع الضوئي، المحاكاة.