

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

Réf : ...../2021



## MEMOIRE

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

**Domaine** : Sciences et Technologie

**Filière** : Electrotechnique

**Spécialité** : Réseaux électriques

**Par** : **Benredjem Sami** et **Djeroud Ines**

**Thème**

**Effet des Différents Types de Modèle sur les Caractéristiques  
de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque**

Soutenu publiquement, le 14/Juillet /2021 devant le jury composé de :

M. BOULOUH Messaoud	Professeur	Univ. Guelma	Président
M. FERAGA Chams-Eddine	MCA	Univ. Guelma	Encadreur
M. SEBBAGH Abdenmour	MCA	Univ. Guelma	Examineur

**Année Universitaire : 2020/2021**

---

## Remerciement

---

### Remerciement

Au terme de ce travail, nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux qui nous a donné la force et la patience durant ces années d'étude.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadreur **Dr. FERAGA Chams-Eddine**, pour ses précieux conseils, son aide et sa disponibilité.

Nous tenons tout particulièrement à remercier les enseignants du département de **Génie Électrotechnique et Automatique** de l'Université **8 Mai 1945 Guelma** pour leur disponibilité et encouragement, ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Nos reconnaissances vont aussi à messieurs les membres de jury, pour l'honneur qu'ils auront fait en acceptant de juger ce travail.

Nous remercions enfin tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail et qui n'ont pas pu être cités ici.

# Sommaire

---

## Sommaire

Introduction générale	1
<b>CHAPITRE I – Généralités sur l'énergie solaire</b>	
I.1. Introduction	3
I.2. Rayonnement solaire	3
I.2.1. Le rayonnement direct	3
I.2.2. Le rayonnement diffus	3
I.2.3. Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol	3
I.2.4. Le rayonnement global	3
I.3. Spectre solaire	4
I.4. Durée d'insolation	5
I.5. Principe de la conversion photovoltaïque	5
I.6. Cellule photovoltaïque	6
I.6.1. Paramètres d'une cellule photovoltaïque	7
I.7. Module photovoltaïque	8
I.7.1. Association des modules photovoltaïque	8
I.7.1.1. Association en série	8
I.7.1.2. Association en parallèle	9
I.7.1.3. Association mixte	10
I.8. Protection d'un GPV	10
I.9. Critères influant sur le générateur PV	11
I.9.1. Influence de l'éclairement	11
I.9.2. Influence de la température	13
I.10. Conclusion	14
<b>CHAPITRE II – Différents modèles d'une cellule photovoltaïque</b>	
II.1. Introduction	15
II.2. Caractéristiques de fonctionnement d'une cellule solaire	15
II.3. Différents modèles de la cellule solaire	16
II.3.1. Modèle idéal de la cellule PV	16
II.3.2. Circuit à diode unique avec résistance série	17
II.3.3. Circuit à diode unique avec résistance série et résistance parallèle	18
II.3.3. Modèle à double diodes	19
II.3.4. Modèle à trois diodes	20



# Sommaire

---

III.5.6.2. Interprétation des résultats	45
III.6. Conclusion	45
<b>CHAPITRE IV – Extraction du maximum de puissance du générateur PV</b>	
IV.1. Introduction	46
IV.2. Principe du contrôle de puissance maximale (MPPT)	46
IV.3. Perturbation et observation, P&O	47
IV.4. Convertisseur DC-DC élévateur (Boost)	48
IV.5. Analyse par simulation du comportement du système PV	49
IV.5.1. Simulation du comportement du générateur PV avec charge résistive	50
IV.5.2. Simulation du comportement du système PV avec le contrôleur MPPT	52
IV.5.3. Comparaison entre les trois modèles de cellules PV	55
IV.6. Conclusion	56
Conclusion générale	57

# Listes de figures et tableaux

---

## Liste des figures

### CHAPITRE I – Généralités sur l'énergie solaire

Figure I.1 : Rayonnement solaire globale	4
Figure I.2 : Spectre du rayonnement solaire	5
Figure I.3 : Schéma d'une cellule photovoltaïque	6
Figure I.4 : - (A) cellule monocristalline	7
- (B) cellule poly cristalline	7
- (C) silicium amorphe	7
Figure I.5 : Caractéristique résultante d'un groupement de $N_s$ cellules en série	9
Figure I.6 : Caractéristique résultante d'un groupement de $N_p$ cellules en parallèle	10
Figure I.7 : Caractéristiques courant-tension pour NP. NS modules	10
Figure I.8 : Architecture d'un panneau photovoltaïque avec diodes de protection, et activation de la diode by-pass lors de la défaillance d'une cellule	11
Figure I.9 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$	12
Figure I.10 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$	12
Figure I.11 : Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$	13
Figure I.12 : Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$	14

### CHAPITRE II – Différents modèles d'une cellule photovoltaïque

Figure II.1 : Le circuit équivalent de la cellule PV avec diode unique.	16
Figure II. 2 : Le circuit équivalent de la cellule PV avec diode unique et une résistance séries.	17
Figure II.3 : Le schéma de circuit équivalent du PV avec modèle à diode unique, résistance série et résistance shunt	18
Figure II.4 : Le schéma de circuit équivalent de la cellule PV avec modèle à deux diodes, résistance série et résistance shunt.	19
Figure II.5 : Le schéma de circuit équivalent de la cellule PV avec modèle à trois diodes, résistance série et résistance shunt.	20

### CHAPITRE III – Caractéristiques des différents types de modèles étudiés

Figure III.1 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ pour un éclairement variable	23
Figure III.2 : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ pour un éclairement variable	24
Figure III.3 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ pour un éclairement variable	25
Figure III.4 : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ pour un éclairement variable	25
Figure III.5 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ pour un éclairement variable	27
Figure III.6 : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ pour un éclairement variable	27

## Listes de figures et tableaux

---

Figure III.7 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ pour un éclairage variable	28
Figure III.8 : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ pour un éclairage variable	28
Figure III.9 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ pour un éclairage variable	30
Figure III.10 : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ pour un éclairage variable	30
Figure III.11 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ pour un éclairage variable	31
Figure III.12 : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ pour un éclairage variable	31
Figure III.13 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ pour $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$	33
Figure III.14 : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ pour $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$	33
Figure III.15 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ pour $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$	34
Figure III.16 : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ pour $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$	34
Figure III.17 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ pour $G = 200 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$	36
Figure III.18 : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ pour $G = 200 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$	36
Figure III.19 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ pour $G = 200 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$	37
Figure III.20 : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ pour $G = 200 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$	37
Figure III.21 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ pour $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 10^\circ\text{C}$	39
Figure III.22 : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ pour $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 10^\circ\text{C}$	39
Figure III.23 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ pour $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 75^\circ\text{C}$	41
Figure III.24 : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ pour $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 75^\circ\text{C}$	41
Figure III. 25 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ pour $G = 200 \text{ W/m}^2$ et $T = 10^\circ\text{C}$	42
Figure III. 26 : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ pour $G = 200 \text{ W/m}^2$ et $T = 10^\circ\text{C}$	43
Figure III. 27 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ pour $G = 200 \text{ W/m}^2$ et $T = 75^\circ\text{C}$	44
Figure III. 28 : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ pour $G = 200 \text{ W/m}^2$ et $T = 75^\circ\text{C}$	44

### CHAPITRE IV – Extraction du maximum de puissance du générateur PV

Figure IV.1 : schéma de principe de la commande MPPT.	46
Figure IV.2 : Diagramme schématique de suivi de puissance de la méthode perturbation et d'observation.	47
Figure IV.3 : Organigramme de la méthode Perturb et Observe	48
Figure IV.4 : circuit de base d'un hacheur Boost	49
Figure IV.5 : Schéma d'un générateur PV avec sa charge	50
Figure IV.6 : Résultats de simulation du GPV à la charge résistive pour le modèle à une seule diode	50
Figure IV.7 : Résultats de simulation du GPV à la charge résistive pour le modèle à deux diodes	51
Figure IV.8 : Résultats de simulation du GPV à la charge résistive pour le modèle à trois diodes	51

## Listes de figures et tableaux

---

Figure IV.9 : Schéma d'un système PV avec la commande MPPT	52
Figure IV.10 : Résultats de simulation du GPV avec commande MPPT pour le modèle à une seule diode	53
Figure IV.11 : Résultats de simulation du GPV avec commande MPPT pour le modèle à deux diodes	53
Figure IV.12 : Résultats de simulation du GPV avec commande MPPT pour le modèle à trois diodes	54
Figure IV.13 : Eclairement solaire en $W/m^2$	54
Figure IV.14 : Résultats de simulation de la puissance délivrée par le système PV basée sur les trois modèles	55

## Listes de tableaux

Tableau II.1. Paramètres électriques et thermiques disponibles dans la fiche technique du fabricant	22
Tableau III.1 : Valeurs obtenues pour le modèle à une diode ( <b>cellule</b> )	24
Tableau III.2 : Valeurs obtenues pour le modèle à une diode ( <b>panneau</b> )	26
Tableau III.3 : Valeurs obtenues pour le modèle à deux diodes ( <b>cellule</b> )	27
Tableau III.4 : Valeurs obtenues pour le modèle à deux diodes ( <b>panneau</b> )	29
Tableau III.5 : Valeurs obtenues pour le modèle à trois diodes ( <b>cellule</b> )	30
Tableau III.6 : Valeurs obtenues pour le modèle à trois diodes ( <b>panneau</b> )	32
Tableau III.7 : Valeurs obtenues pour les trois modèles ( <b>Cellule</b> )	33
Tableau III.8 : Valeurs obtenues pour les trois modèles ( <b>Panneau</b> )	35
Tableau III.9 : Valeurs obtenues pour les trois modèles ( <b>Cellule</b> )	36
Tableau III.10 : Valeurs obtenues pour les trois modèles ( <b>Panneau</b> )	38
Tableau III.11 : Valeurs obtenues pour les trois modèles ( <b>Cellule</b> )	40
Tableau III.12 : Valeurs obtenues pour les trois modèles ( <b>Cellule</b> )	42
Tableau III.13 : Valeurs obtenues pour les trois modèles ( <b>Cellule</b> )	43
Tableau III.14 : Valeurs obtenues pour les trois modèles ( <b>Cellule</b> )	45

---

## Liste de symboles

---

### symboles

**GPV** : générateur photovoltaïque.

**PV** : photovoltaïque.

**AM** : Air Mass.

**PPM** : Point de Puissance Maximale.

**MPPT** : Maximum Power Point Tracking.

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

**G** : Eclairement ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

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

**I<sub>0</sub>** : Le courant de saturation (A).

**R<sub>p</sub>** : Résistances parallèle shunt ( $\Omega$ ).

**R<sub>s</sub>** : Résistance série ( $\Omega$ ).

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

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

**FF** : Facteur de forme.

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

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

**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).

**K** : coefficient de Boltzman ( $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J / K}$ ).

**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).

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

**a** : Le facteur de non idéalité de la jonction de la diode.

**D** : Rapport cyclique.

**V<sub>cell</sub>** : Tension aux bornes de la cellule (V).

**I<sub>cell</sub>** : Courant fournie par la cellule (A).

**T<sub>cell</sub>** : Température de la cellule ( $^{\circ}\text{C}$ ).

# **Introduction générale**

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Le besoin quotidien en énergie augmente jour après jour, c'est pour cela que dans tout les pays en recherche toujours à produire de l'énergie et couvrir la consommation. La majorité de la production d'énergie dans le monde est basée sur les sources fossiles (les combustibles) comme le gaz naturel et le pétrole.

Ces sources fossiles sont d'une part épuisables et non renouvelables, et d'une autre part elles augmentent la pollution à cause des émissions de gaz dans l'air.

En revanche, les énergies renouvelables sont des énergies illimitées et non polluantes, du fait qu'elles sont des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse.

L'énergie solaire se décompose en deux types qui sont : l'énergie solaire thermique qui sert à produire des calories donc de la chaleur, et l'énergie solaire photovoltaïque qui nous donne de l'électricité, et c'est cette énergie qui fera l'objet de cet étude.

Les systèmes photovoltaïques fournissent une énergie en courant continu, mais qui est variable selon les conditions climatiques (éclairage et température). Pour l'adapter aux différents récepteurs on utilise des convertisseurs statiques.

En effet, dans ce présent mémoire nous présentons la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque, constituée par : générateur photovoltaïque, hacheur survolteur et le contrôleur MPPT (P&O), pour déduire l'impact des différents types de modèle de la cellule solaire sur ses caractéristiques de fonctionnement.

Dans le premier chapitre, nous faisons un rappel sur les généralités de l'énergie solaire photovoltaïques. Où nous présentons, le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et les paramètres qui agissent sur ses caractéristiques de fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre nous traitons les modèles mathématiques que nous allons considérer dans cet étude ; à savoir : le modèle à diode unique, le modèle à deux diodes et le modèle à trois diodes.

Dans le troisième chapitre, nous réalisons des tests de simulation sous Matlab/Simulink dans des conditions météorologiques variables pour évaluer les performances des trois modèles représentatifs de la cellule PV

## Introduction générale

---

En fin, dans le dernier chapitre, nous présentons la modélisation et la simulation du système PV muni d'un contrôleur MPPT, qui utilise la méthode de perturbation et observation (P&O), et ce afin d'en extraire le maximum de puissance.

# **Généralités sur L'énergie Solaire**

## I.1. Introduction :

L'énergie solaire est une source d'énergie inépuisable, propre et disponible dans le monde entier. C'est pour ça que l'homme cherche depuis toujours à la mettre en profit. L'élément qui convertit cette énergie propre en énergie électrique s'appelle la cellule photovoltaïque.

L'énergie électrique produite par la cellule PV est continue, ce qui nous permet de la stocker dans des batteries pour l'utiliser une autre fois.

Ce chapitre est consacré à la présentation des phénomènes liés à l'énergie PV et les paramètres qui agissent sur les caractéristiques de fonctionnement du générateur PV.

## I.2. Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et 4.10-6m. Sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent [1].

En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature :

- **Le rayonnement direct** : est le rayonnement reçu directement du soleil par la cellule. Ce rayonnement représente la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus, et on peut le mesurer par un pyrhéliomètre.
- **Le rayonnement diffus** : Il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols [2].
- **Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol** : représente le rayonnement réfléchi par le sol ou par d'autres objets tels que l'eau, la neige ...
- **Le rayonnement global** : c'est l'énergie rayonnante totale venue du soleil figure I.1, qui atteint une surface horizontale à la surface de la Terre au cours d'une unité de temps précise. Il est d'environ 1.000 W/m<sup>2</sup> pour un rayonnement solaire vertical, et c'est la résultante des trois types de rayonnement précédents.

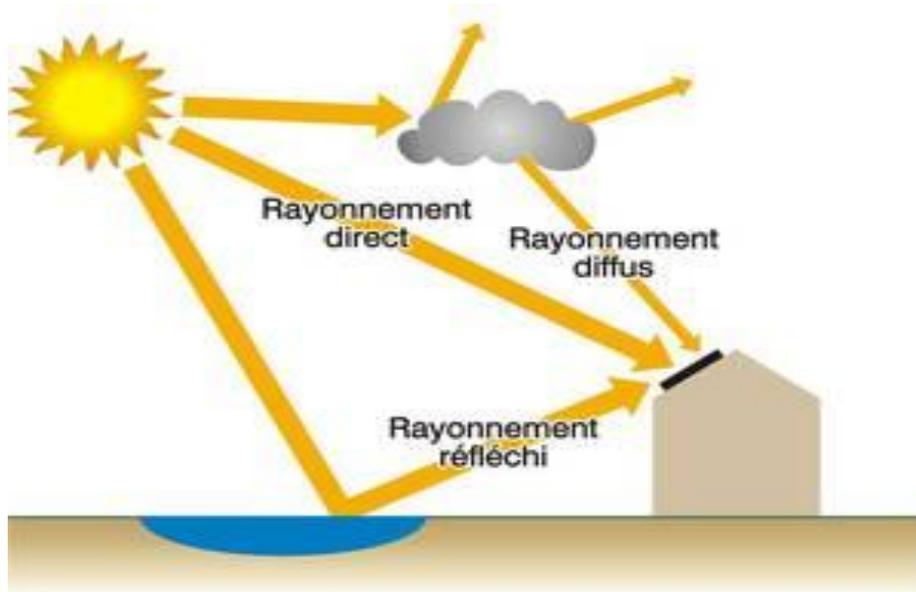


Figure I.1 : Rayonnement solaire globale

### I.3. Spectre solaire :

Le soleil émet des particules, appelées photons, en très grandes quantités. C'est le rayonnement solaire. Ces flux de photons qu'on appelle également radiations ou rayons, voyagent dans l'espace à la vitesse de 300 000 km/s (c'est la vitesse de la lumière) et atteignent la terre à différentes longueurs d'ondes.

On distingue par leur longueur d'onde les différents types de rayons : c'est le spectre solaire.

Les rayons de longueur d'ondes très courtes (les rayons x, gamma,), extrêmement dangereux sont heureusement arrêtés dès les couches supérieures de l'atmosphère.

Les rayons de longueur d'onde très longue (ondes radio) sont très faibles à la surface de terre. Nous parviennent essentiellement :

- Les Ultraviolets (UV), de 200 nm à 380 nm, invisibles, sans échauffer, provoquent des dommages sur les cellules.
- La Lumière visible, de 380 à 780 nm, visibles, ils nous permettent de distinguer les formes et les couleurs.
- Les Infrarouges (IR), de 780 à 1000 nm, invisibles, chauffent la matière solide ou gazeuse qu'ils rencontrent.

La figure suivante (figure I.2) montre une analyse spectrale du rayonnement solaire :

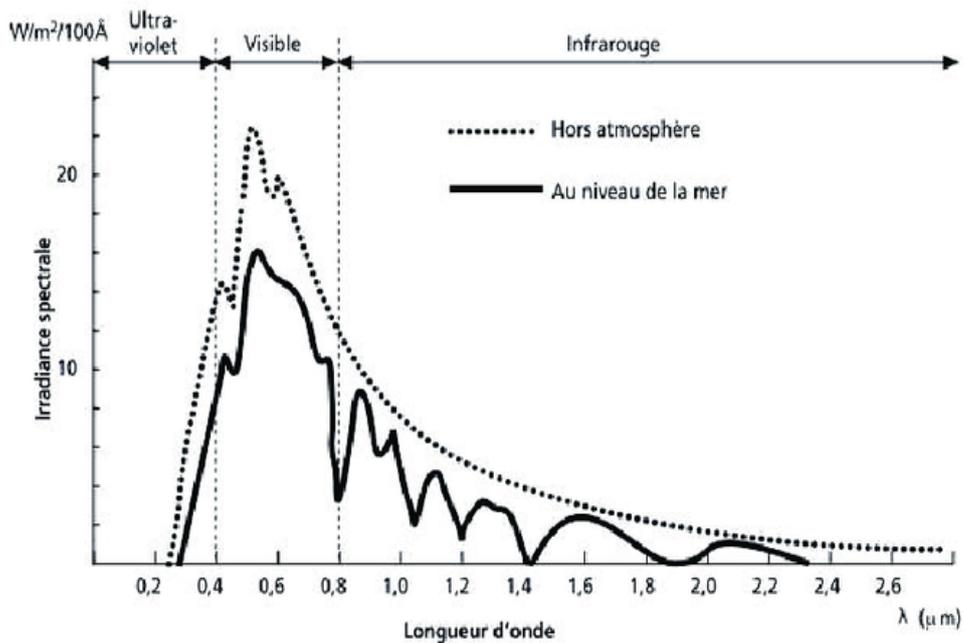


Figure I.2 : Spectre du rayonnement solaire

### I.4. Durée d'insolation :

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell– Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages [3].

### I.5. Principe de la conversion photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est généralement un dispositif semi-conducteur qui convertit la lumière du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Quand la lumière tombe sur une cellule solaire, les photons entrants peuvent être absorbés, réfléchis ou traversés. Pour qu'un photon soit absorbé par la cellule solaire, l'énergie du photon doit être supérieure à l'énergie de la bande interdite de la cellule

Le photon est ensuite absorbé pour générer paires de porteurs de charge mobiles (par exemple, électron et trou) qui sont ensuite séparés par la structure du périphérique (comme une jonction p – n).

Cela produit une différence de potentiel et produit ainsi du courant électrique. L'effet photovoltaïque est illustré par divers matériaux. Dans la plupart des boîtiers, des matériaux semi-conducteurs (comme le silicium) dans la forme de jonction p-n sont utilisées dans le commerce pour produire cellules solaires

### I.6. Cellules photovoltaïques :

La cellule solaire est une composante optoélectronique qui sert à transformer la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque ». Elle a des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants, car elle est construite à l'aide de matériaux semi-conducteurs.

Ce matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p figure I.3. Les contacts de la face éclairée de la cellule ont la structure d'une grille afin de n'occulter qu'une faible partie de la surface (5 à 10%). La face arrière peut être entièrement métallisée [4].

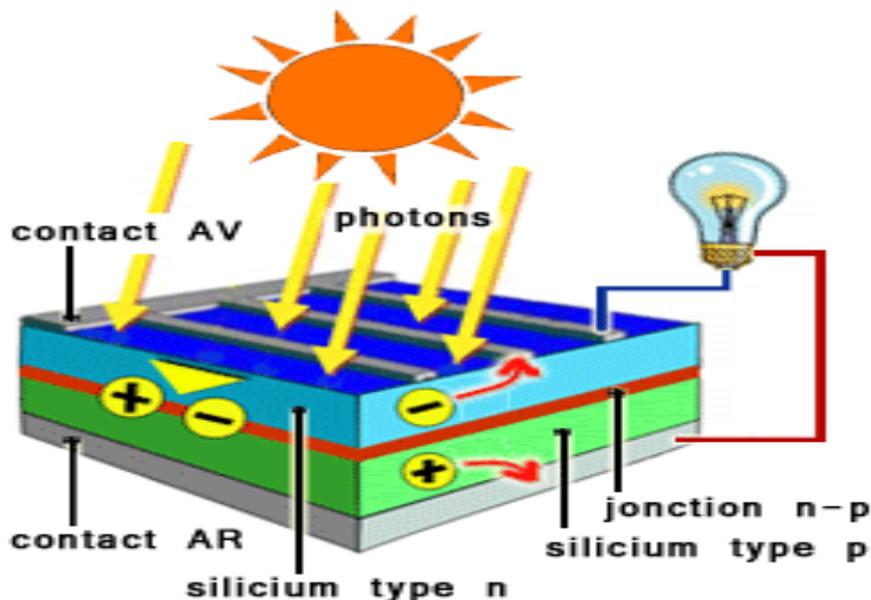


Figure I.3 : Schéma d'une cellule photovoltaïque

Les cellules solaires les plus utilisées sont à base de silicium, et sont classées selon trois types comme le suit :

- **Les cellules monocristallines** : c'est le type le plus coûteux à cause de sa fabrication compliquée, mais aussi a le meilleur rendement.
- **Les cellules poly cristallin** : grâce à la facilité de leur conception, leur coût de fabrication est moins important que ce de monocristallines, mais aussi elles ont un rendement plus faible.
- **Les cellules amorphes** : Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres [2].

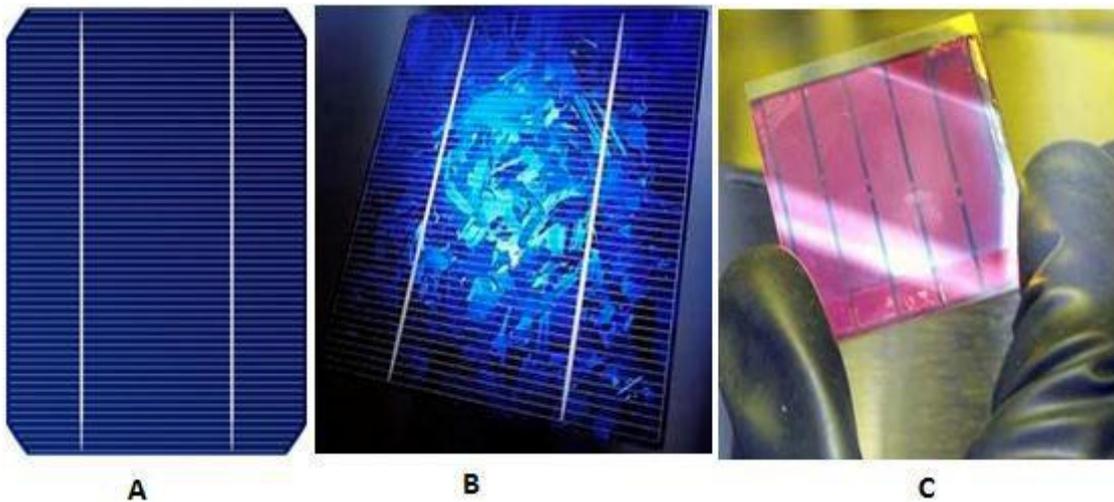


Figure I.4 :- (A) Cellule monocristalline  
- (B) Cellule poly cristalline  
- (C) Silicium amorphe

### I.6.1. Paramètres d'une cellule photovoltaïque :

**La puissance maximale** : l'obtention de la puissance la plus optimale est l'objectif principale de l'utilisateur de générateur PV, on peut avoir cette puissance dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>).

**Tension de circuit-ouvert,  $V_{co}$**  : Tension à vide aux bornes de la cellule PV lorsque l'éclairement est maximal.

**Courant de court-circuit,  $I_{cc}$**  : Courant débité par une cellule court-circuiter pour un éclairement " plein soleil ".

### Rendement énergétique ( $\eta$ ) :

C'est le rapport entre la puissance électrique optimale fournie par la cellule PV  $P_m(I_m, V_m)$  et la puissance de radiation incidente  $P_{inc}$ . Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{inc}} = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{inc}} \quad (I.1)$$

Où :

$P_{inc} = G \cdot S$  est égale au produit de l'éclairement  $G$  et de la surface totale  $S$  du générateur PV.

**Facteur de forme FF** : on dit facteur de forme ou facteur de remplissage, rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et le produit du courant de court-circuit  $I_{cc}$  par la tension de circuit-ouvert  $V_{co}$  donné par :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (I.2)$$

### I.7. Module photovoltaïque :

Un module photovoltaïque est un ensemble de cellules assemblées en série afin de produire plus de puissance, car une cellule PV délivre au maximum quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Les modules sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire.

#### I.7.1. Association des modules photovoltaïque :

##### I.7.1.1. Association en série :

L'association en série des modules pour obtenir une tension plus élevée que celle d'un seul module, par l'addition des tensions à courant constant. Si  $N_s$  modules sont connectés en série la borne positive (+) du premier et la borne négative (-) du module  $N$  sont les sorties [5].

La caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions pour  $N_s$  modules. La figure I.5 montre la caractéristique résultante d'une association en série.

$$I_{sc} = I_{cc} \quad (I.3)$$

$$V_{sco} = N_s \cdot V_{co} \quad (I.4)$$

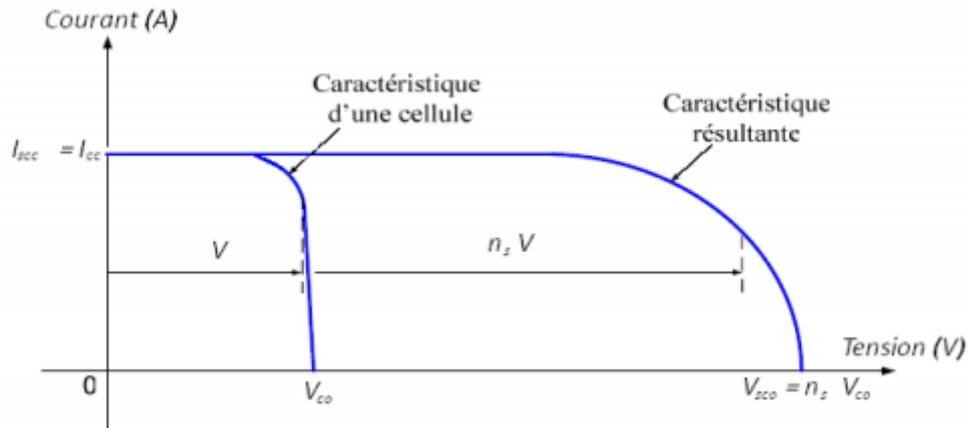


Figure I.5 : Caractéristique résultante d'un groupement de  $N_s$  cellules en série

### I.7.1.2. Association en parallèle :

Dans un groupement de modules connectés en parallèle, ils sont soumis à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à une tension constante (l'inverse du regroupement en série) [5].

La caractéristique  $I=f(V)$  est représentée dans la figure suivante (figure I.6) :

$$I_{pcc} = N_p \cdot I_{cc} \quad (I.5)$$

$$V_{pco} = V_{co} \quad (I.6)$$

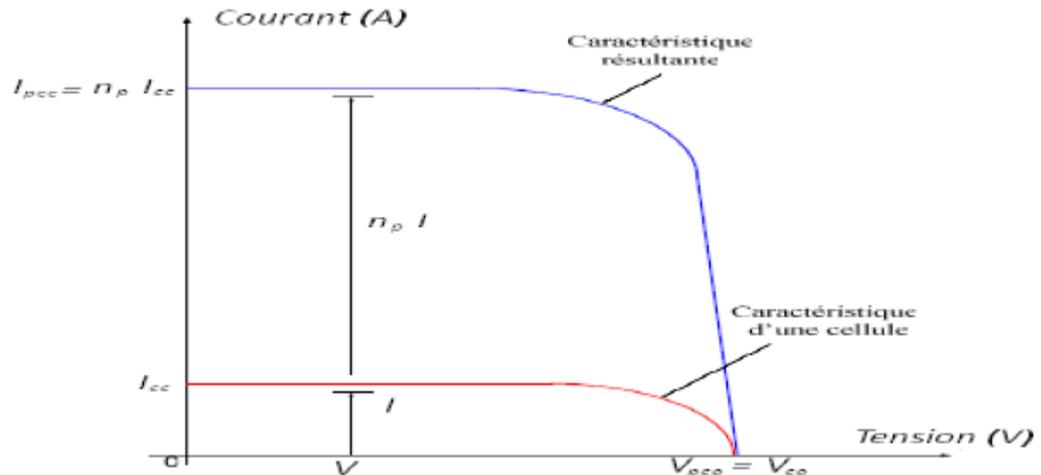


Figure I.6 : Caractéristique résultante d'un groupement de  $N_p$  cellules en parallèle

### I.7.1.3. Association mixte :

Généralement en pratique les générateurs photovoltaïques GPV sont constitués d'un champ série-parallèle sous obligation des besoins énergétiques spéciaux [5].

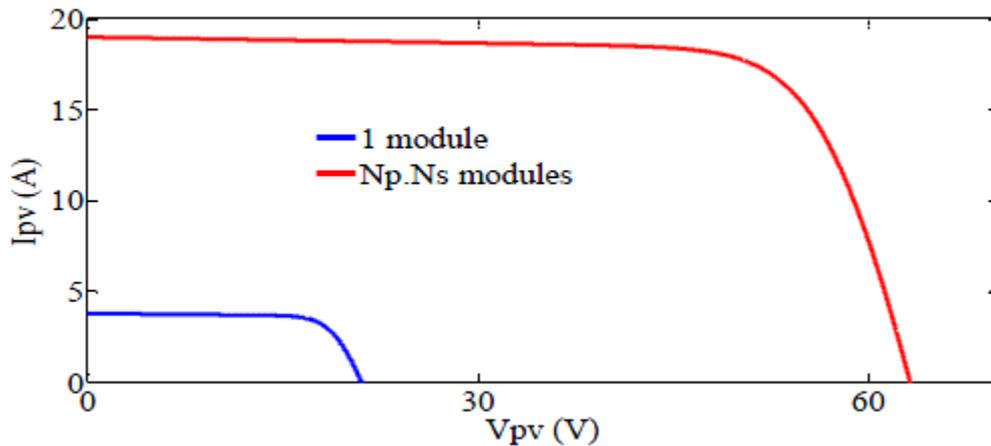


Figure I.7 : Caractéristiques courant-tension pour  $N_p \cdot N_s$  modules

### I.8. Protection d'un GPV :

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en série et en panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles figure I.8 [6].

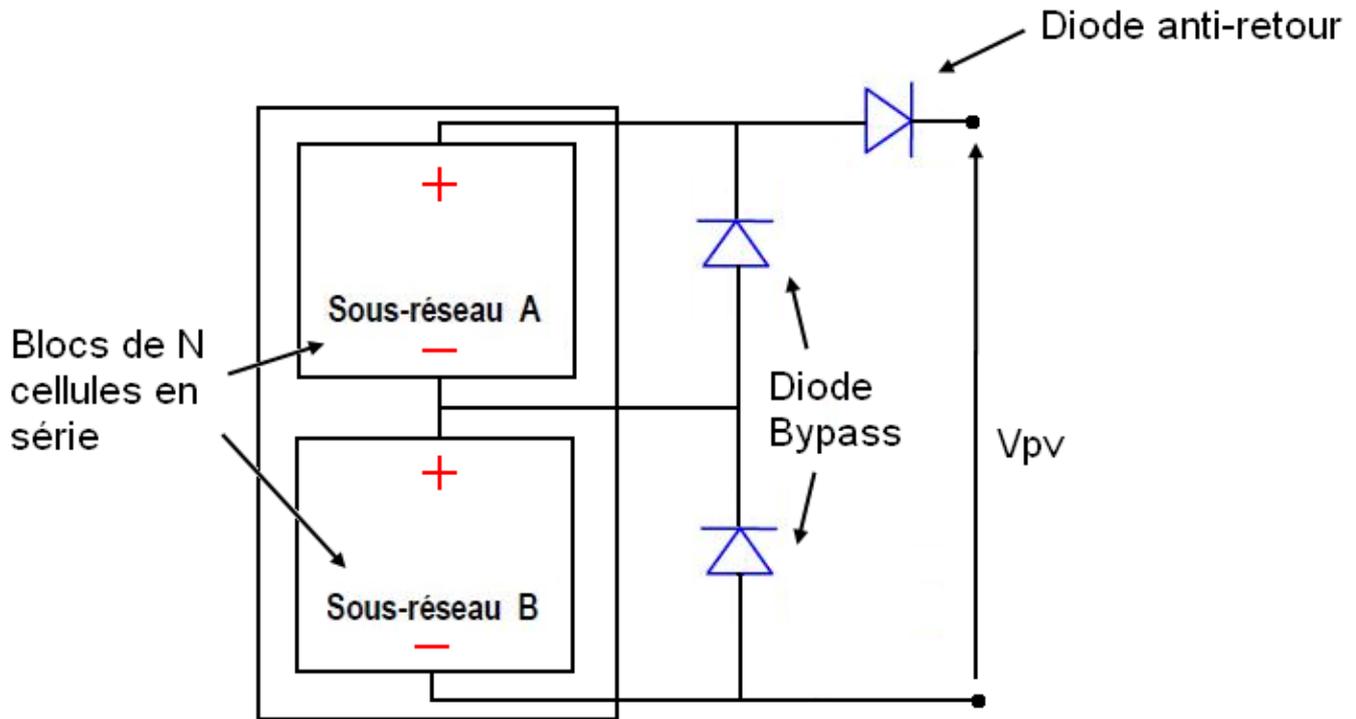


Figure I.8 : Architecture d'un panneau photovoltaïque avec diodes de protection, et activation de la diode by-pass lors de la défaillance d'une cellule

La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit [6].

Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. En effet, la mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance [7].

### I.9. Critères influant sur le générateur PV :

#### I.9.1. Influence de l'éclairement :

L'énergie électrique générée par une cellule photovoltaïque est le résultat de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface.

## CHAPITRE I : Généralités sur l'énergie solaire

La figure I.9 représente la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque à une température constante.

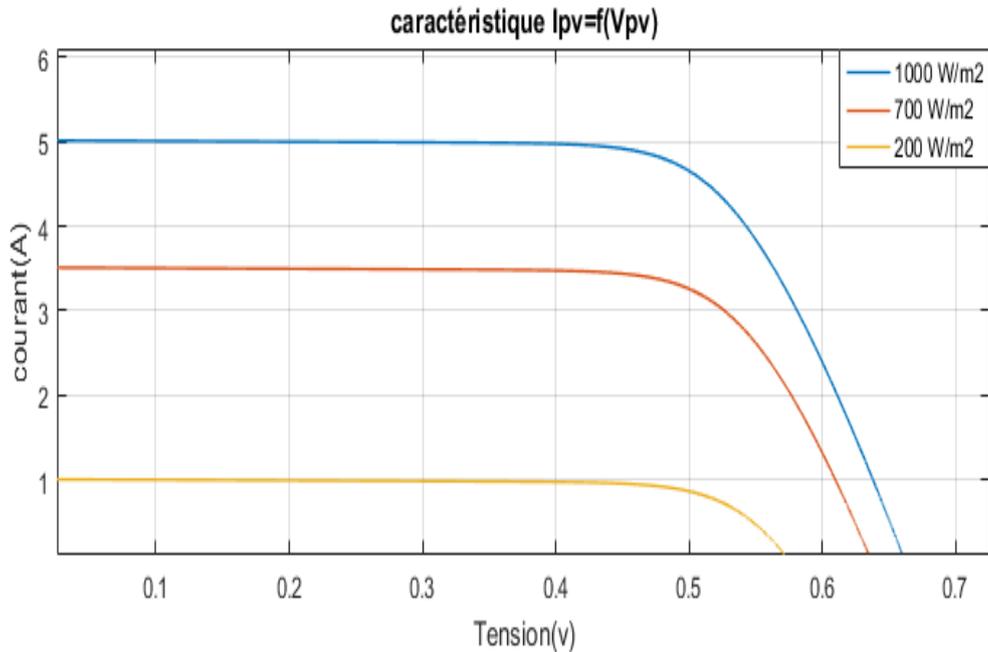


Figure I.9 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$

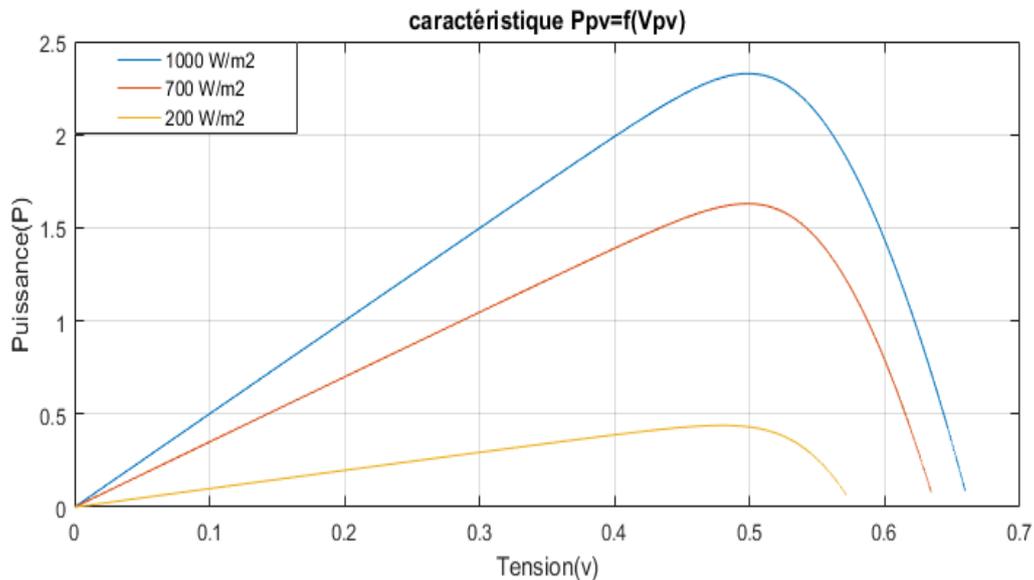


Figure I.10 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P=f(V)$

On remarque que le courant est directement proportionnelle avec le rayonnement lumineux, d'un autre côté la tension optimale varie très peu avec l'éclairement.

### I.9.2. Influence de la température :

Quand la température diminue, la tension à vide augmente, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres figure 1.11. La diminution du courant de saturation est la principale cause de la chute de courant à basse température.

Aussi, on considère en première approximation que le fonctionnement optimal du générateur PV correspond sensiblement à un fonctionnement à tension optimale constante [8].

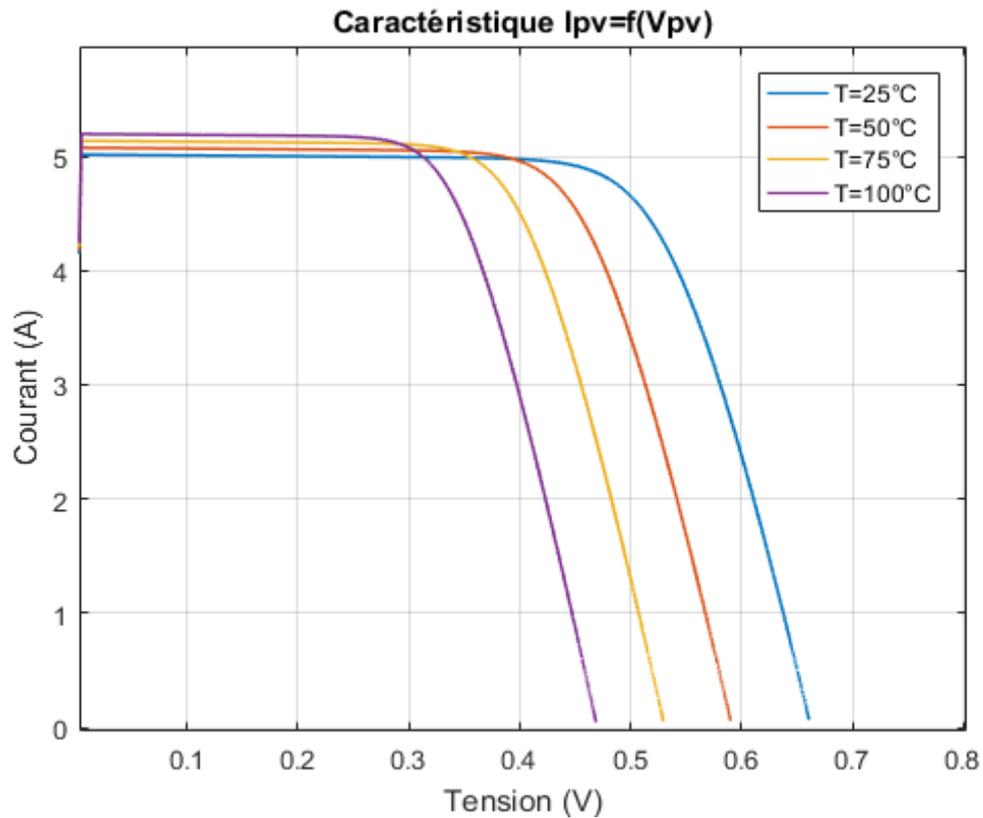


Figure I.11 : Influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$

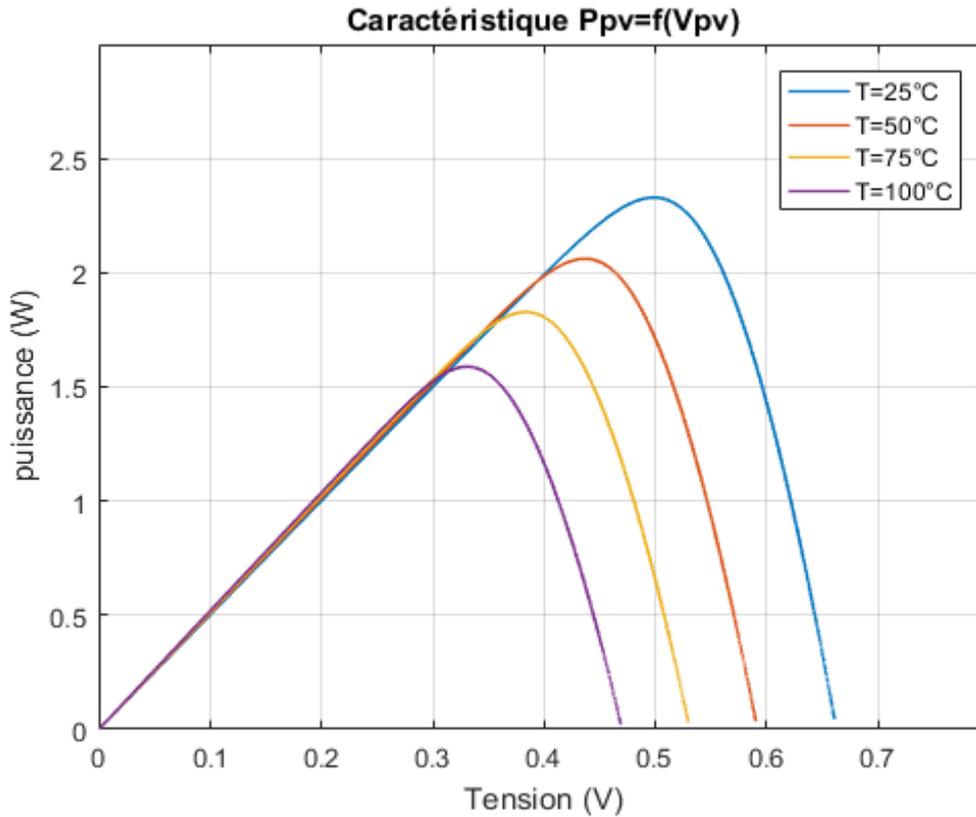


Figure I.12 : Influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$

### I.10. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur l'énergie PV, où nous avons traité la cellule PV, son principe de fonctionnement ainsi que ses paramètres et les types d'association des modules PV ; ainsi que les critères importants qui influent sur le rendement d'un générateur PV.

# **Différents Modèles d'une Cellule Photovoltaïque**

### **I.1. Introduction :**

Dans ce chapitre tous les modèles de cellule PV ; à savoir : modèle idéal à diode unique, modèle  $R_s$  à diode unique, modèle  $R_p$  à diode unique, le modèle à deux diodes et le modèle à trois diodes sont traités.

### **II.2. Caractéristiques de fonctionnement d'une cellule solaire :**

La cellule solaire dans sa conception est basée essentiellement sur un matériau semi-conducteur qui reproduit le comportement d'une diode à jonction p-n dont sa caractéristique I-V est donnée par l'équation de Shockley [9] :

$$I_D = I_0 \left[ \exp \left( \frac{q V_D}{a k T_{cell}} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.1})$$

Où

$I_D$  : est le courant généré par la diode.

$V_D$  : est la tension aux bornes de la diode.

$I_0$  : est le courant de saturation inverse de la diode.

$q$  : est la charge électronique ( $q = 1,602 \times 10^{19}$  Coulombs).

$T_{cell}$  : est la température de la cellule en Kelvin.

$a$  : est la diode facteur d'idéalité (sans dimension).

$k$  : est la constante de Boltzmann ( $k = 1,38065 \times 10^{23}$  J/K).

La tension thermique de la diode est donnée par :

$$V_T = \frac{akT_{cell}}{q} \quad (\text{II.2})$$

Maintenant l'équation (II.1) devient : Tapez une équation ici.

$$I_D = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.3})$$

### II.3. Différents modèles de la cellule solaire :

Il existe différents modèles de circuits électriques de cellules photovoltaïques qui ont été largement décrits dans la littérature. Habituellement, une cellule PV est représentée par une source de courant ( $I_L$ ), une ou deux diodes (D) en parallèle avec la source de courant, une résistance série ( $R_S$ ) ou une résistance parallèle ( $R_p$ ) ou les deux en même temps.

#### II.3.1. Modèle idéal de la cellule PV :

Dans des conditions idéales, la cellule solaire est électriquement équivalente à une source de courant en parallèle avec une diode, comme le montre la figure II.1. Le courant généré par la lumière, également connu sous le nom de photo-courant, est représenté par  $I_L$ , le courant de diode par  $I_D$  et le courant de sortie et la tension aux bornes de la cellule solaire par  $I_{cell}$  et  $V_{cell}$ , respectivement. Le courant de sortie  $I_{cell}$  disponible à partir de la cellule PV est donné comme [10] :

$$I_{cell} = I_L - I_D \quad (\text{II.4})$$

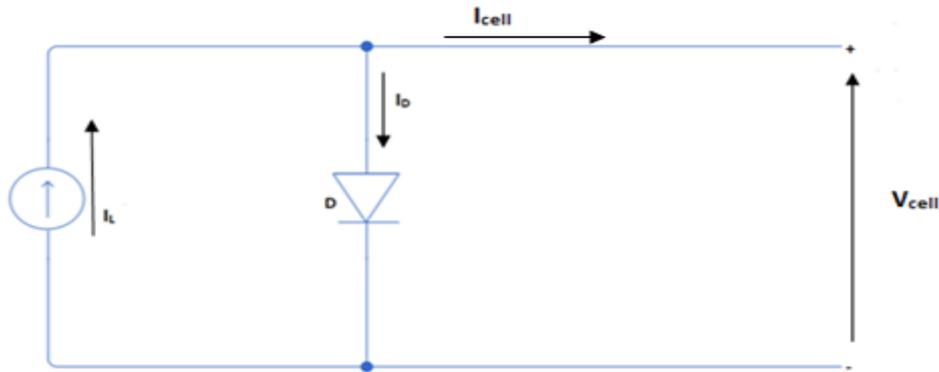


Figure II.1 : Le circuit équivalent de la cellule PV avec diode unique.

En remplaçant la valeur d' $I_D$  de l'équation (II.3) dans l'équation (II.4), on obtient :

$$I_{cell} = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_{cell}}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.5})$$

Le photo-courant  $I_L$  augmente linéairement avec l'éclairement solaire. Si le courant de diode  $I_D$  est faible, le courant délivré par la cellule PV est élevé. Le facteur d'idéalité de la diode  $a=1$  représente un comportement idéal de la diode. En revanche, une valeur de  $a$  supérieure à 1 représente une condition non idéale [11].

Nous pouvons voir à partir de l'équation (II.3) que le modèle de cellule idéal a trois paramètres à trouver qui sont : le photo-courant  $I_L$ , le courant d'obscurité  $I_0$  et le facteur d'idéalité de la diode  $a$ . Par conséquent, ce modèle idéal est également appelé modèle 3-p (trois paramètres) comme indiqué dans la figure II.1.

Ce modèle de cellule idéal peut être utilisé pour démontrer le principe de base de la cellule PV, toutefois, il n'est jamais utilisé pour reproduire les conditions de fonctionnement réelles et donner l'information sur la puissance maximale délivrée par la cellule PV [12].

### II.3.2. Circuit à diode unique avec résistance série :

Son utilisation est couramment utilisée dans la littérature car elle nécessite de faibles ressources de calcul. Le modèle est construit avec un paramètre supplémentaire qui prend en compte les pertes de puissance par effet Joule en utilisant une résistance série comme illustré à la figure II.2 [11].

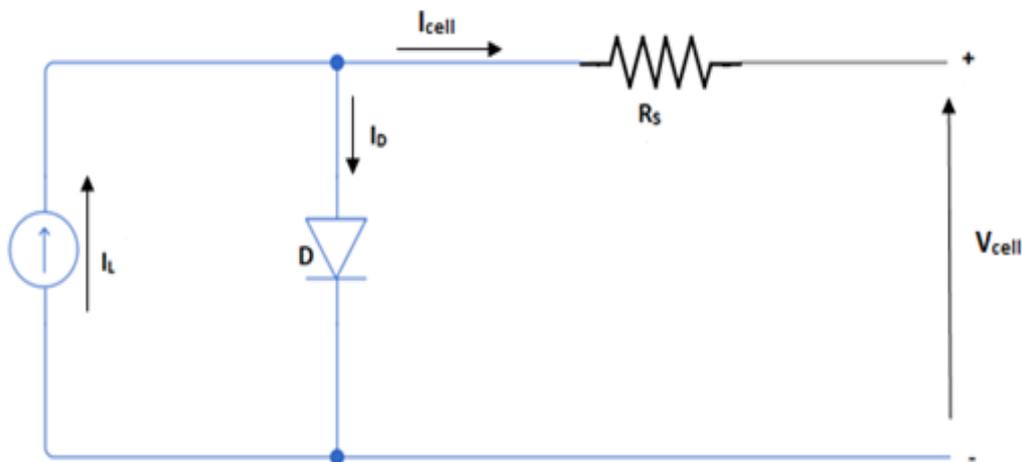


Figure II.2 : Le circuit équivalent de la cellule PV avec diode unique et une résistance série.

Et exprimé selon : (II.4)

$$I_{cell} = I_L - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q (V_{cell} + R_s I)}{akT_{cell}} \right) - 1 \right] \quad (II.6)$$

Où

$G$  : est le rayonnement solaire modélisé comme source de courant  $I_s$ .

$R_s$  : est la résistance série interne.

$I_D$  : est le courant de jonction p-n.

$I_{cell}$  : est le courant de sortie.

$V_{cell}$  : est la tension aux bornes.

### II.3.3. Circuit à diode unique avec résistance série et résistance parallèle :

Un modèle plus utile comprend une seconde source exprimant l'inefficacité qui se produit à l'intérieur de la cellule. A vrai dire, une résistance parallèle, qui sert à reproduire l'effet des courants de fuite internes empêchant la pleine utilisation du photo-courant généré [9].

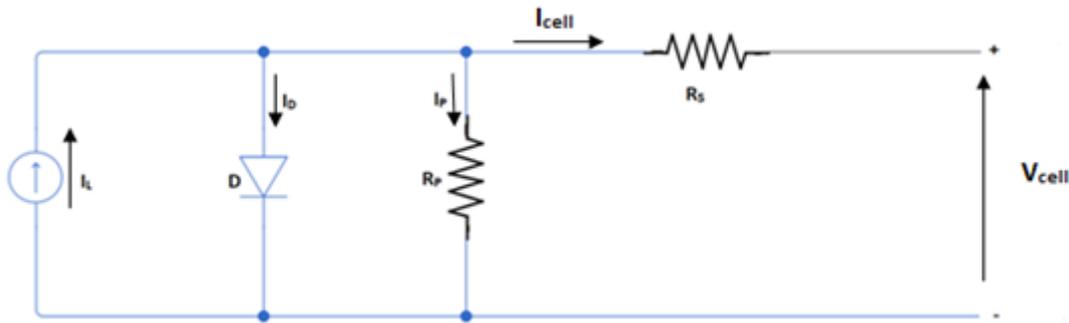


Figure II.3 : Le schéma de circuit équivalent du PV avec modèle à diode unique, résistance série et résistance shunt

Le schéma de circuit équivalent de la cellule PV avec une diode unique, une résistance série et une résistance shunt est illustré à la figure II.3, où  $R_p$  est la résistance shunt et  $I_p$  le courant shunt. L'équation fondamentale pour le système de générateur PV avec une diode, une résistance série et une résistance shunt est donnée par :

$$I_{cell} = I_L - I_D - I_P \quad (II.7)$$

$$I_{cell} = I_L - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q (V_{cell} + R_s I)}{akT_{cell}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + R_s I}{R_p} \quad (II.8)$$

II.3.4. Modèle à double diode :

Le circuit équivalent de la figure II.4 représente le modèle à double diode d'une cellule PV ; la cellule solaire sous éclairage 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  $D_1$  reproduit le processus de diffusion, tandis que  $D_2$  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 [13].

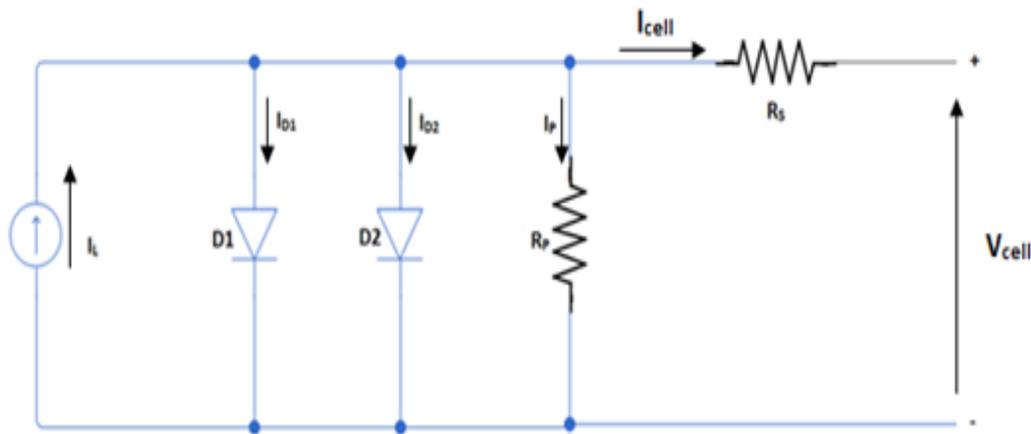


Figure II.4 : Le schéma de circuit équivalent de la cellule PV avec modèle à deux diodes, résistance série et résistance shunt.

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

$$I_{cell} = I_L - I_{01} \left[ \exp \left( \frac{q (V_{cell} + R_s I)}{a_1 k T_{cell}} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp \left( \frac{q (V_{cell} + R_s I)}{a_2 k T_{cell}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + R_s I}{R_p} \quad (II.9)$$

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 :

$$I_{Ns} = I_L - I_{01} \left[ \exp \left( \frac{q (V + R_s I)}{a_1 N_s k T_{cell}} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp \left( \frac{q (V + R_s I)}{a_2 N_s k T_{cell}} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (II.10)$$

### II.3.5. Modèle à trois diodes :

Pour tenir compte de l'influence du courant de fuite à travers les périphéries, une autre diode peut être ajoutée en parallèle avec les deux autres diodes du modèle à deux diodes. Ce modèle (voir figure II.5) exige un processus de résolution vraiment compliqué [13].

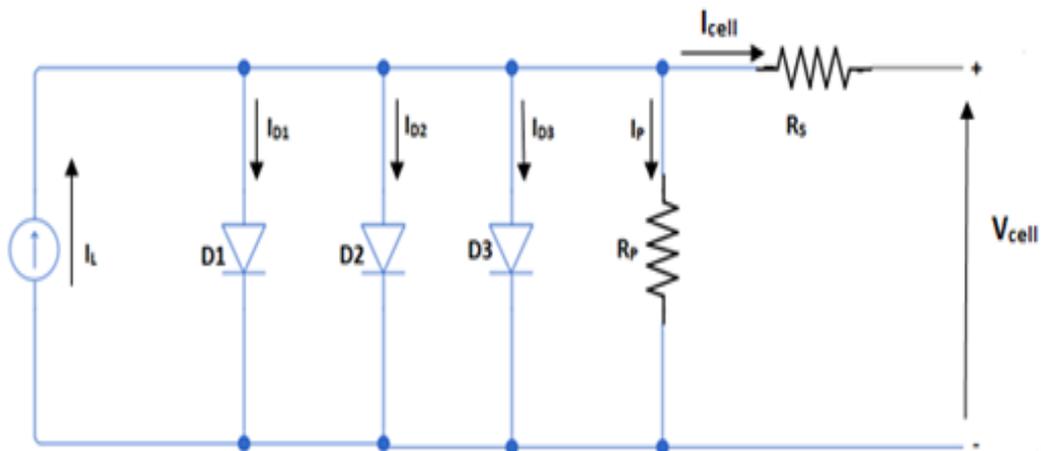


Figure II.5 : Le schéma de circuit équivalent de la cellule PV avec modèle à trois diodes, résistance série et résistance shunt.

L'équation du courant de ce modèle est :

$$I_{cell} = I_L - I_{D1} - I_{D2} - I_{D3} - I_p \quad (II.11)$$

$$\begin{aligned} I_{cell} = I_L - I_{01} \left[ \exp \left( \frac{q (V_{cell} + R_s I_{cell})}{a_1 k T_{cell}} \right) - 1 \right] \\ - I_{02} \left[ \exp \left( \frac{q (V_{cell} + R_s I_{cell})}{a_2 k T_{cell}} \right) - 1 \right] \\ - I_{03} \left[ \exp \left( \frac{q (V_{cell} + R_s I_{cell})}{a_3 k T_{cell}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \end{aligned} \quad (II.12)$$

La fiche technique d'un panneau photovoltaïque fournie par le fabricant comprend généralement peu de paramètres électriques et thermiques, comme indiqué dans le tableau II.1.

Toutes ces valeurs sont mesurées dans des conditions d'essai standard qui sont à 1,5 masse d'air (AM), 1000 W/m<sup>2</sup>, et Température de 25°C. Habituellement, les modèles sont connus par le nombre inconnu de valeurs des paramètres qui ne peuvent pas être déduits directement des valeurs de la fiche technique. Dans la section précédente, les modèles et leurs paramètres associés sont décrits.

Tableau II.1 Paramètres disponibles dans la fiche technique du fabricant

<i>Paramètres</i>	<i>Symboles et Unités</i>
<b><i>Paramètres électriques</i></b>	
<i>Courant de court-circuit</i>	$I_{cc}$ (A)
<i>Tension en circuit ouvert</i>	$V_{co}$ (V)
<i>Courant maximal</i>	$I_m$ (A)
<i>Tension maximale</i>	$V_m$ (V)
<i>Puissance nominale maximale</i>	$P_{max}$ (W)
<b><i>Paramètres thermiques</i></b>	
<i>Le coefficient du courant en fonction de la température</i>	$K_I$ (A/°C)
<i>Le coefficient de tension en fonction de la température</i>	$K_V$ (V/°C)
<i>La température de fonctionnement de la cellule</i>	NOCT (°C)
<b><i>Conditions standards du test (STC)</i></b>	
<i>Température de la cellule</i>	$T_{cell}$ (°C)
<i>Irradiation</i>	$G=1000$ W/m <sup>2</sup>
<i>Air mass</i>	AM = 1.5

#### **II.4. Conclusion :**

Dans ce chapitre, toutes les méthodes de modélisation ont été discutées tout en parlant des sens de chaque élément dans les différents modèles et leurs rôles dans le circuit. Aussi, on a cité les paramètres de la cellule qu'on doit connaître pour faire notre étude. Dans le chapitre suivant nous allons simuler les différents modèles et discuter nos résultats.

**Caractéristiques des Différents  
Types de Modèles Etudiés**

### III.1. Introduction :

Dans cette section on traite par simulation numérique sous l'environnement Matlab/Simulink les différents modèles du générateur photovoltaïque présentés dans le chapitre précédent, et ce, afin d'évaluer d'une part, leurs performances en fonction de la variation de l'éclairement et de la température. Et d'estimer d'une autre part, l'ordre de grandeurs des paramètres du GPV tels que : le courant la tension et la puissance. Ce qui nous permet de classer les trois modèles représentatifs de la cellule PV.

### III.2. Simulation du modèle d'un générateur PV à une diode :

Il est conçu à partir d'un circuit électrique équivalent qui régit le comportement réel d'une cellule PV. Entre autres, il est capable de donner un comportement fortement non linéaire, similaire à celui des jonctions semi-conductrices qui constituent la base de sa fabrication.

#### III.2.1. Simulation du modèle d'une cellule PV :

Les courbes descriptives de la cellule PV obtenues par simulation sont représentées aux figures ci-dessous pour différents éclairement ; à savoir : **200 W/m<sup>2</sup>**, **700 W/m<sup>2</sup>** et **1000 W/m<sup>2</sup>** :

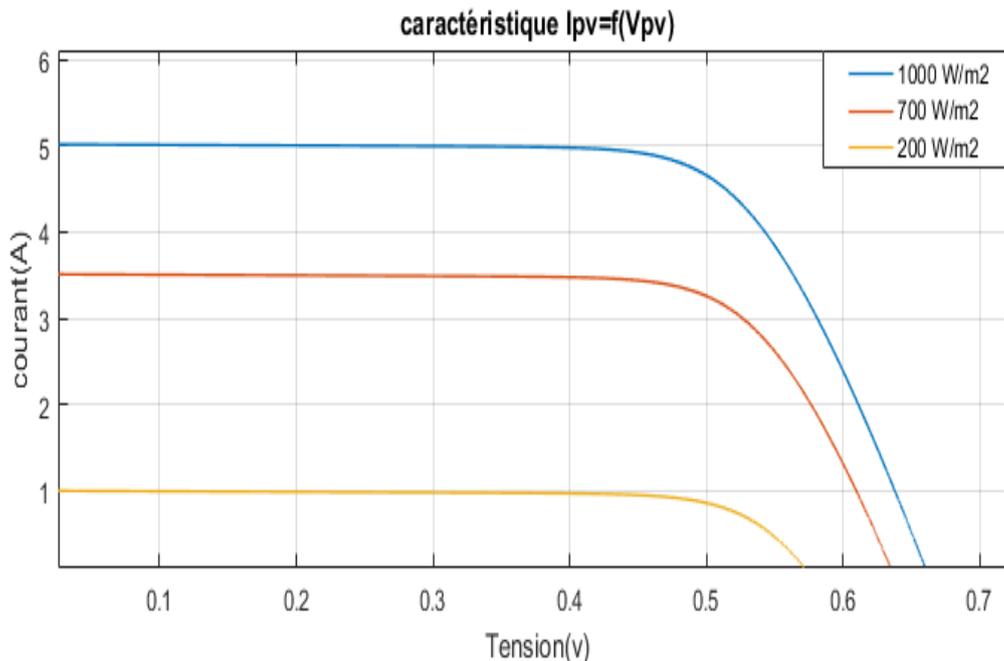


Figure III.1 : Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  pour un éclairement variable

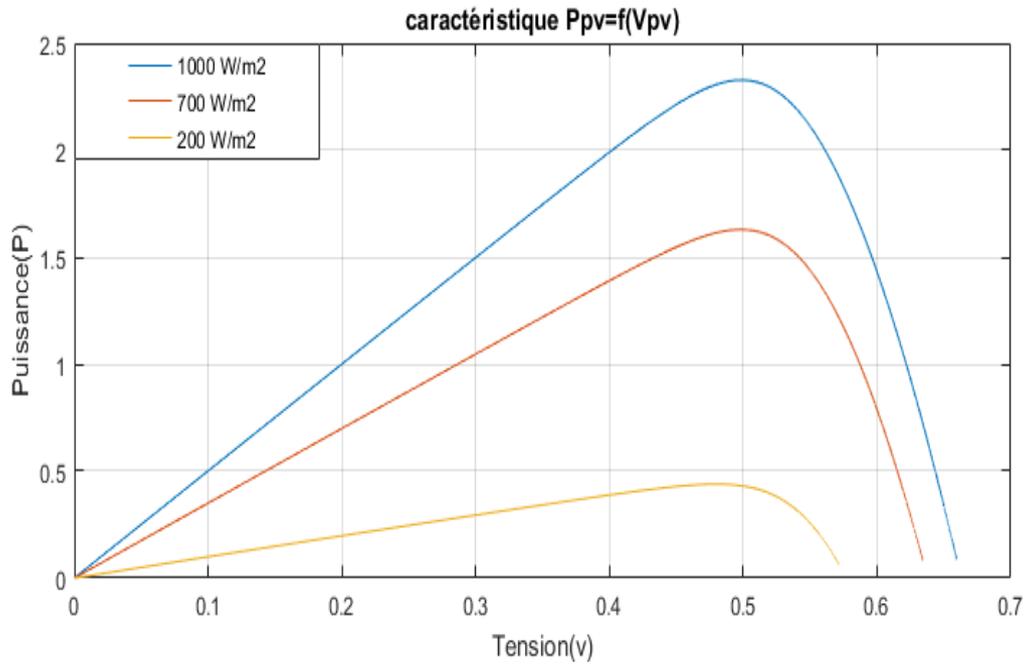


Figure III.2 : Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  pour un éclairement variable

Tableau III.1 : Valeurs obtenues pour le modèle à une diode (**cellule**)

<i>Modèle à une diode (Cellule)</i>					
<i>Caractéristiques</i>	<i><math>V_m</math> [V]</i>	<i><math>I_m</math> [A]</i>	<i><math>P_{max}</math> [W]</i>	<i><math>V_{co}</math> [V]</i>	<i><math>I_{cc}</math> [A]</i>
<i><math>G=1000 \text{ W/m}^2</math></i>	<i>0.4967</i>	<i>4.686</i>	<i>2.328</i>	<i>0.6595</i>	<i>5.016</i>
<i><math>G=700 \text{ W/m}^2</math></i>	<i>0.5008</i>	<i>3.252</i>	<i>1.629</i>	<i>0.6343</i>	<i>3.512</i>
<i><math>G=200 \text{ W/m}^2</math></i>	<i>0.4814</i>	<i>0.4814</i>	<i>0.439</i>	<i>0.5715</i>	<i>1.003</i>

### III.2.2. Résultats de simulation pour un panneau solaire :

Pour les éclairagements :  $200 \text{ W/m}^2$ ,  $700 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$  nous réalisons ce test de simulation illustrés par les figures III.3 et III.4, qui montrent les courbes descriptives d'un panneau solaire.

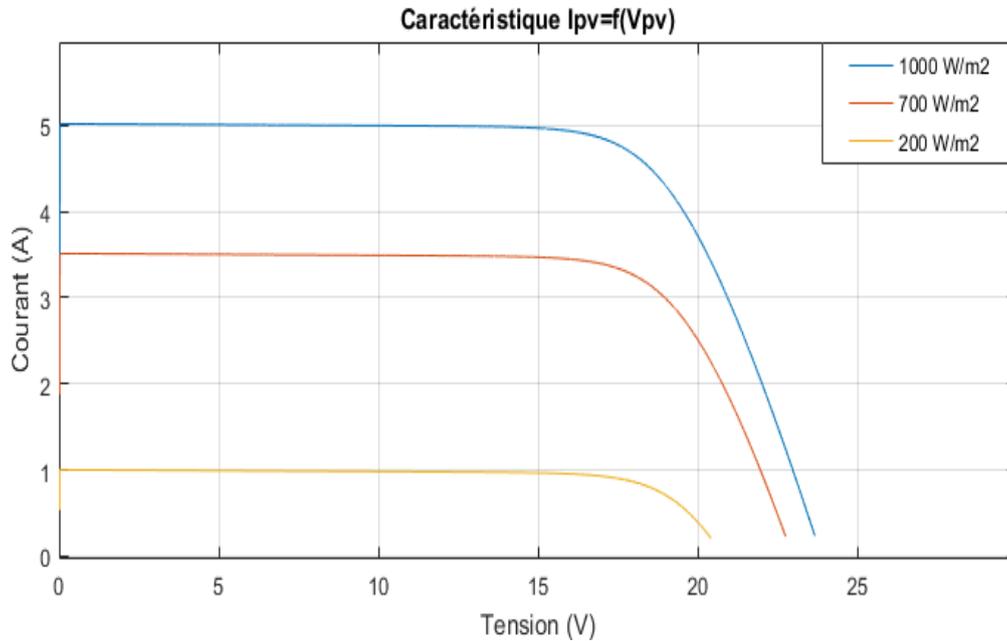


Figure III.3 : Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  pour un éclairage variable

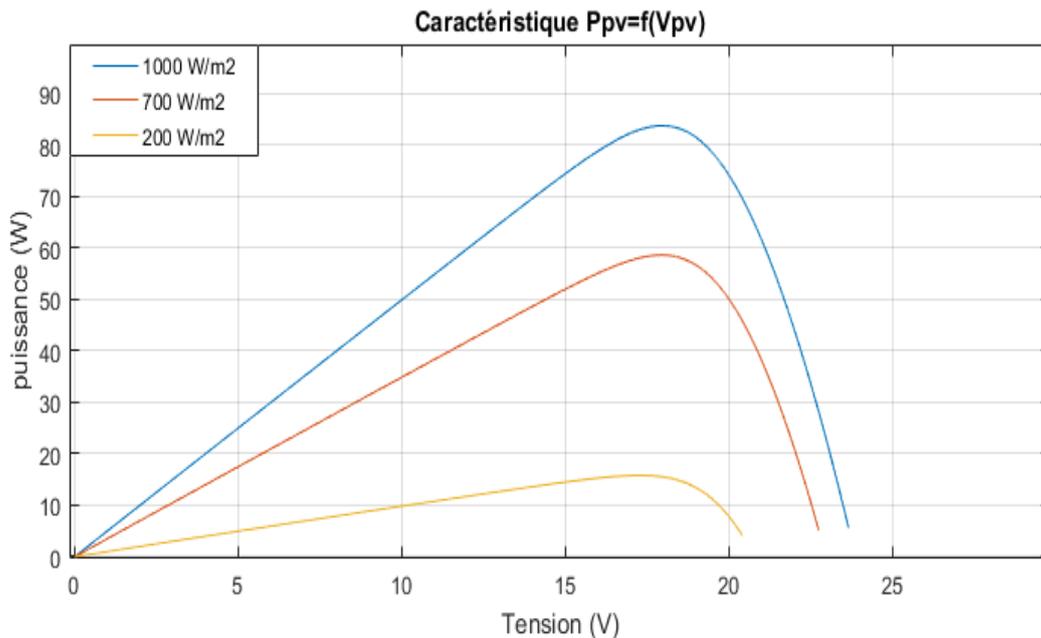


Figure III.4 : Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  pour un éclairage variable

Tableau III.2 : Valeurs obtenues pour le modèle à une diode (**panneau**)

<i>Modèle à une diode (Panneau)</i>					
<i>Caractéristiques</i>	<i>V<sub>m</sub> [V]</i>	<i>I<sub>m</sub> [A]</i>	<i>P<sub>max</sub> [W]</i>	<i>V<sub>co</sub> [V]</i>	<i>I<sub>cc</sub> [A]</i>
<i>G=1000 W/m<sup>2</sup></i>	17.96	4.666	83.81	23.51	5.017
<i>G=700 W/m<sup>2</sup></i>	17.97	3.263	58.65	22.74	3.512
<i>G=200 W/m<sup>2</sup></i>	17.29	0.9142	15.81	20.4	1.003

### III.2.3. Interprétation des résultats :

Les résultats de simulation des figures III.1 et III.2 montrent que, le courant de court-circuit  $I_{cc}$  délivré par la cellule PV est proportionnel à l'éclairement solaire. Il en découle immédiatement une puissance maximale  $P_{max}$  en sortie qui varie aussi proportionnellement avec l'irradiation.

En contrepartie, nous enregistrons une réduction de la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  au fur et à mesure que l'éclairement diminue. En effet, lorsque l'éclairement varie de **1000 W/m<sup>2</sup>** à **700 W/m<sup>2</sup>** la tension en circuit ouvert diminue d'une valeur qui vaut  $\Delta V = 0.0252 V$ .

L'examen des résultats obtenus pour le panneau solaire fig.III.3 et fig.III.4 nous permet de noter les constatations suivantes :

- Une valeur du courant de court-circuit  $I_{cc}$  identique à celui de la cellule PV parce que le panneau est constitué de cellules en série.
- Une réduction de la puissance maximale qui vaut  $\Delta P = 25,16 W$  lorsque l'éclairement passe de **1000 W/m<sup>2</sup>** à **700 W/m<sup>2</sup>**.
- Une tension en circuit ouvert qui diminue d'une valeur estimée de  $\Delta V = 0.77 V$  pour les mêmes conditions susnommées.

### III.3. Simulation du modèle d'un générateur PV à deux diodes :

Plusieurs chercheurs optent pour ce modèle mathématique représentatif de la cellule PV. Ce dernier est conçu à partir d'un circuit électrique équivalent. Ses éléments sont : une source de courant ( $I_L$ ), connecté en parallèle avec deux diodes ( $D_1$  et  $D_2$ ), une résistance série ( $R_s$ ) avec une résistance parallèle ( $R_p$ ).

#### III.3.1. Simulation du modèle d'une cellule PV :

Un test de simulation est réalisé pour différents éclairement ; à savoir : **200 W/m<sup>2</sup>**, **700 W/m<sup>2</sup>** et **1000 W/m<sup>2</sup>**. Les courbes décrivant le comportement de la cellule PV obtenues sont représentées aux figures ci-dessous :

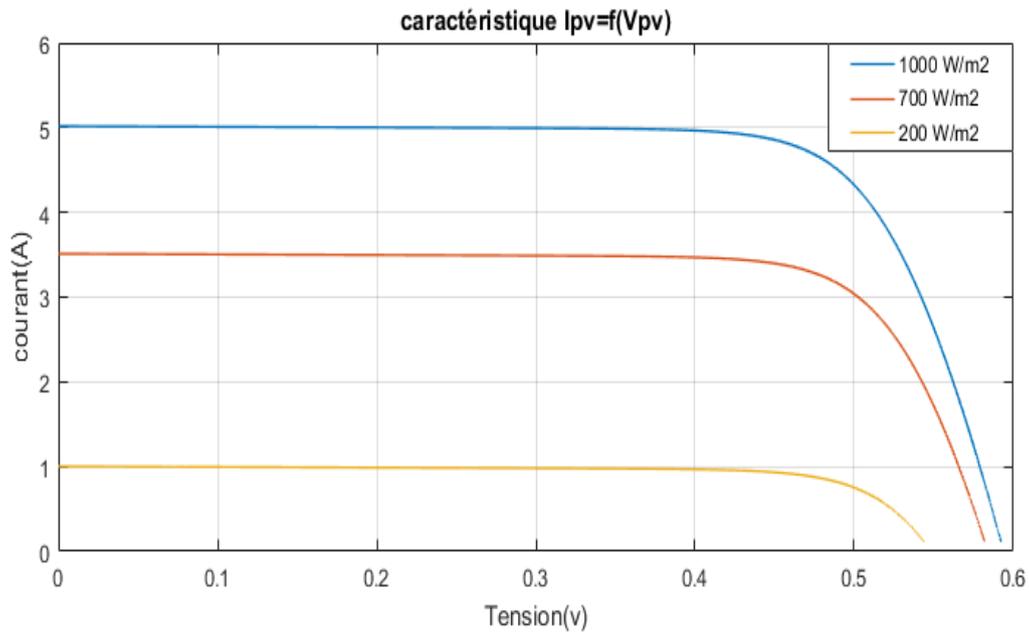


Figure III.5 : Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  pour un éclairage variable

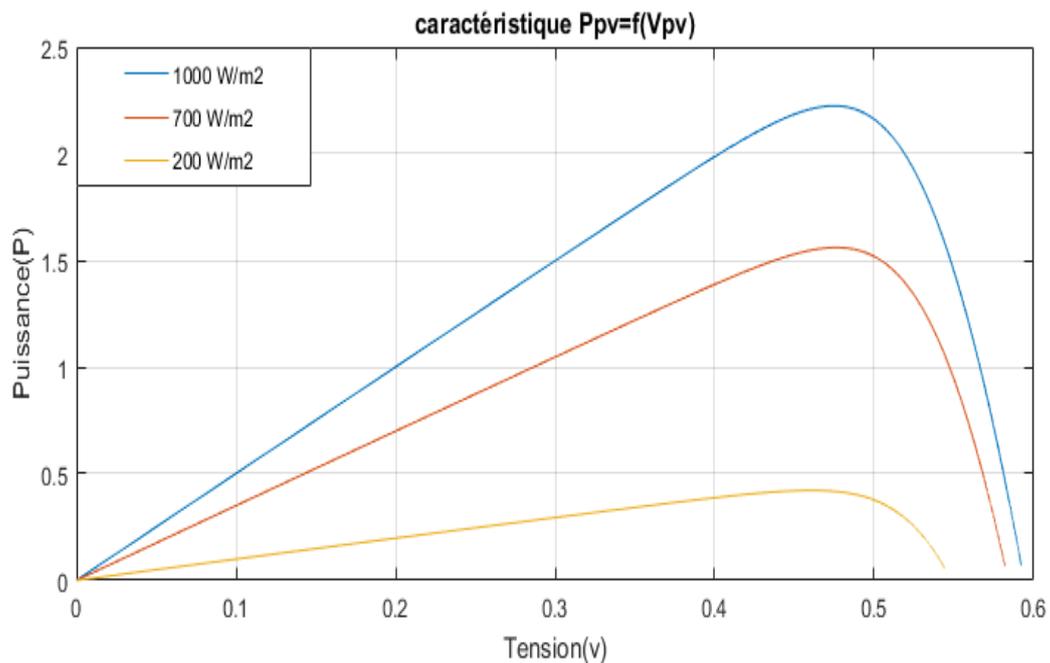


Figure III.6 : Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  pour un éclairage variable

Tableau III.3 : Valeurs obtenues pour le modèle à deux diodes (**cellule**)

<i>Modèle à deux diodes (Cellule)</i>					
<i>Caractéristiques</i>	<i><math>V_m</math> [V]</i>	<i><math>I_m</math> [A]</i>	<i><math>P_{max}</math> [W]</i>	<i><math>V_{co}</math> [V]</i>	<i><math>I_{cc}</math> [A]</i>
<i><math>G=1000 \text{ W/m}^2</math></i>	<i>0.4763</i>	<i>4.67</i>	<i>2.224</i>	<i>0.5921</i>	<i>5.017</i>
<i><math>G=700 \text{ W/m}^2</math></i>	<i>0.4804</i>	<i>3.246</i>	<i>1.559</i>	<i>0.5819</i>	<i>3.512</i>
<i><math>G=200 \text{ W/m}^2</math></i>	<i>0.4596</i>	<i>0.9173</i>	<i>0.4216</i>	<i>0.544</i>	<i>1.003</i>

### III.3.2. Résultats de simulation pour un panneau solaire :

Nous réalisons ce test de simulation illustrés par la figure III.7 et figure III.8 Pour les éclairagements :  $200 \text{ W/m}^2$ ,  $700 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$ . Il montre Les courbes descriptives d'un panneau solaire à la base de deux diodes.

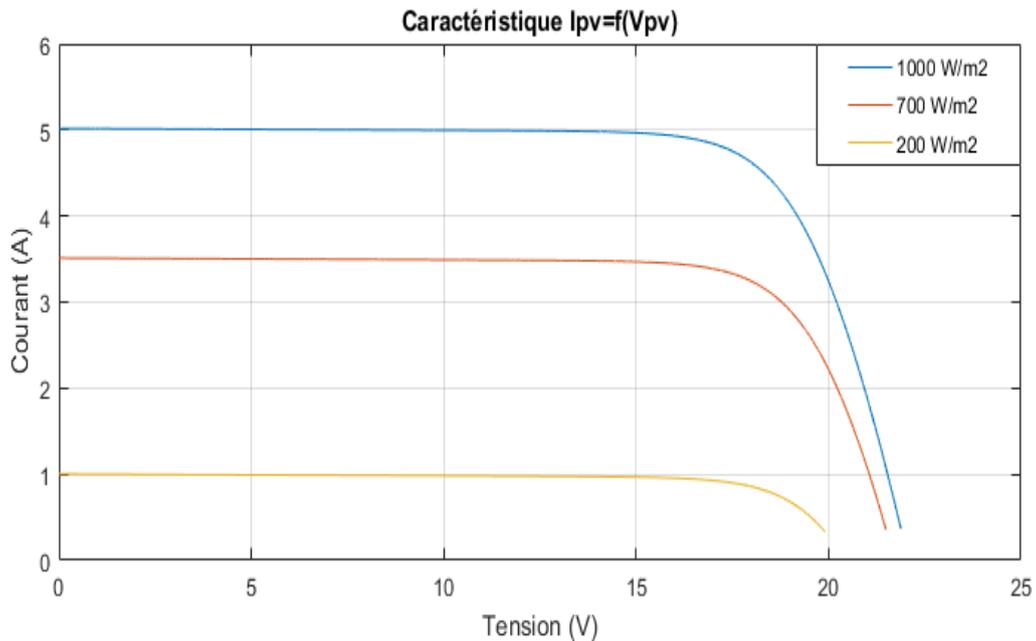


Figure III.7 : Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  pour un éclairage variable

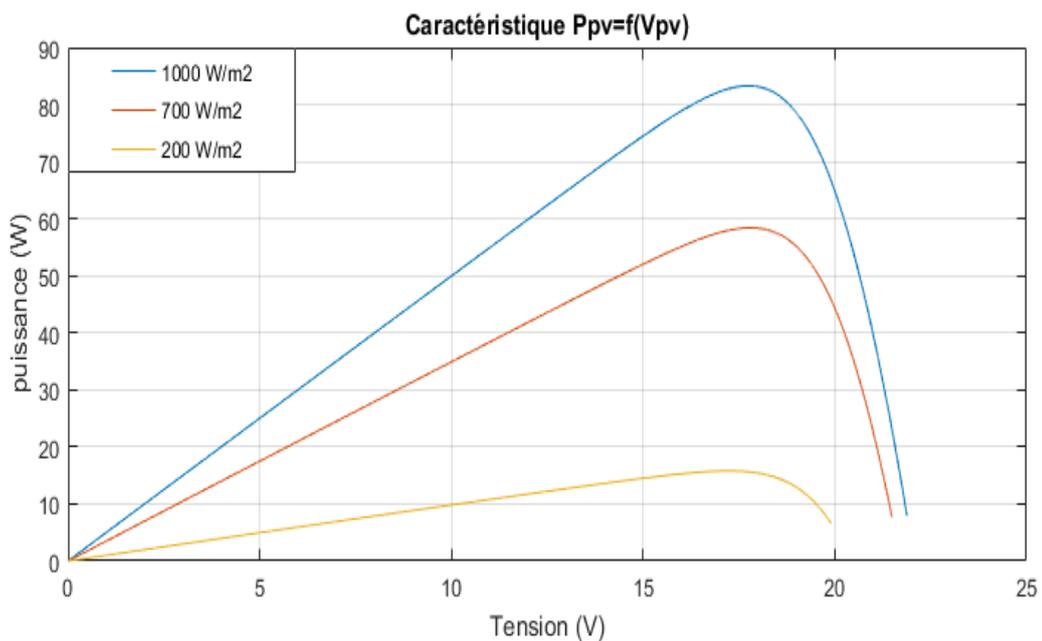


Figure III.8 : Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  pour un éclairage variable

## CHAPITRE III : Caractéristiques des différents types de modèles étudiés

Tableau III.4 : Valeurs obtenues pour le modèle à deux diodes (**panneau**)

<i>Modèle à deux diodes (Panneau)</i>					
<i>Caractéristiques</i>	<i>V<sub>m</sub> [V]</i>	<i>I<sub>m</sub> [A]</i>	<i>P<sub>max</sub> [W]</i>	<i>V<sub>co</sub> [V]</i>	<i>I<sub>cc</sub> [A]</i>
<i>G=1000 W/m<sup>2</sup></i>	17.77	4.688	83.3	21.88	5.017
<i>G=700 W/m<sup>2</sup></i>	17.73	3.294	58.41	21.49	3.512
<i>G=200 W/m<sup>2</sup></i>	17.15	0.9205	15.79	19.9	1.003

### III.3.3. Interprétation des résultats :

L'examen des figures : figure III.5 et figure III.6 montre que la diminution de l'éclairement influe directement sur la valeur du courant de court-circuit  $I_{cc}$ , ainsi que la puissance maximale délivrée  $P_{max}$  par la cellule PV.

Lorsque l'irradiation solaire est réduite d'une valeur valant  $300 \text{ W/m}^2$ , la tension de circuit ouvert se réduit d'une valeur de  $\Delta V = 0.0102 \text{ V}$ .

Pour la même variation de l'éclairement, et pour le panneau solaire on constate qu'après l'examen des figures : figure III.7 et figure III.8 :

- Une réduction de la puissance maximale de  $\Delta P = 24,89 \text{ W}$ .
- Une faible diminution de la tension de circuit ouvert de valeur  $\Delta V = 0.39 \text{ V}$ . Par contre, le courant de court-circuit  $I_{cc}$  conserve les mêmes valeurs obtenues pour la cellule solaire.

### III.4. Simulation du modèle d'un générateur PV à trois diodes :

Dans la littérature Il existe plusieurs modèles de circuits électriques qui décrivent une cellule photovoltaïque. Parmi ces modèles, on rencontre celui à trois diodes. Ainsi, le circuit équivalent est constitué de trois diodes en parallèle ( $D_1$ ,  $D_2$  et  $D_3$ ).

#### III.4.1. Simulation du modèle d'une cellule PV :

Les figures figure III.9 et figure III.10 représentent les tests de simulations de la cellule PV pour différents éclairement ; à savoir :  $200 \text{ W/m}^2$ ,  $700 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$  :

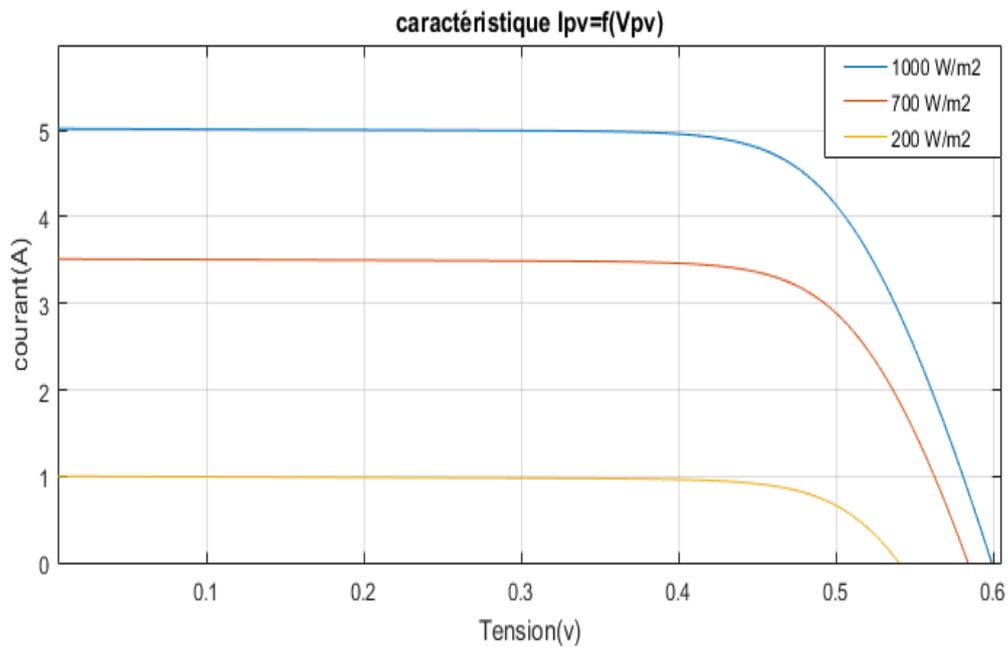


Figure III.9 : Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  pour un éclairage variable

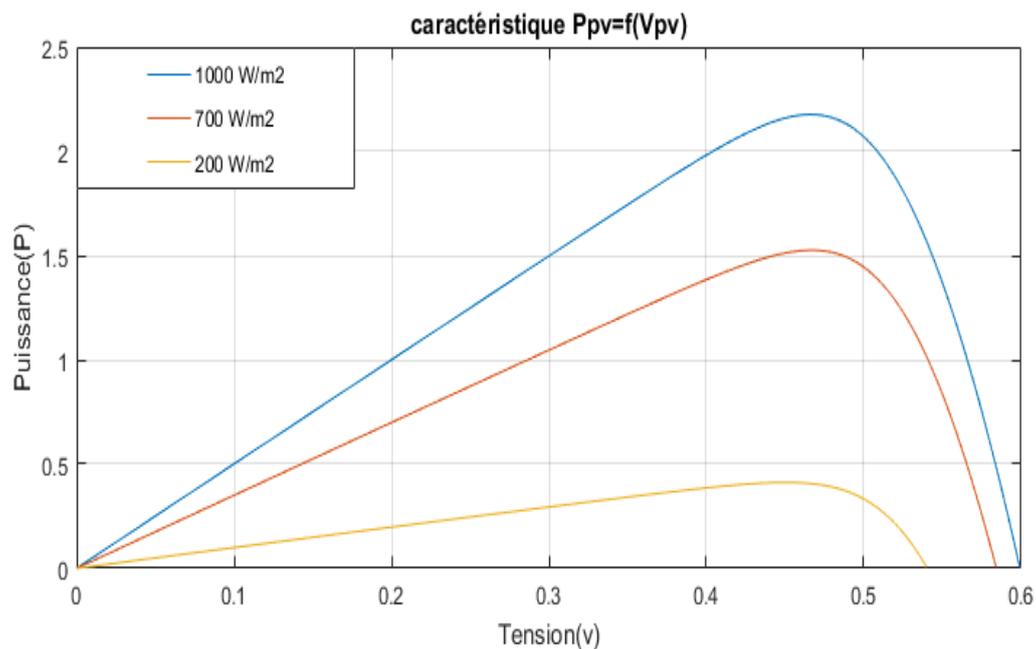


Figure III.10 : Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  pour un éclairage variable

Tableau III.5 : Valeurs obtenues pour le modèle à trois diodes (**cellule**)

<i>Modèle à trois diodes (cellule)</i>					
<i>Caractéristiques</i>	$V_m$ [V]	$I_m$ [A]	$P_{max}$ [W]	$V_{co}$ [V]	$I_{cc}$ [A]
$G=1000 \text{ W/m}^2$	0.4642	4.689	2.177	0.5991	5.016
$G=700 \text{ W/m}^2$	0.4687	3.255	1.526	0.584	3.512
$G=200 \text{ W/m}^2$	0.4478	0.919	0.411	0.5401	1.003

### III.4.2. Résultats de simulation pour un panneau solaire :

Nous réalisons ces tests de simulation de Pour les éclaircements :  $200 \text{ W/m}^2$ ,  $700 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$ . Ainsi les deux figures : figure III.11 et figure III.12 montrent les courbes descriptives d'un panneau solaire.

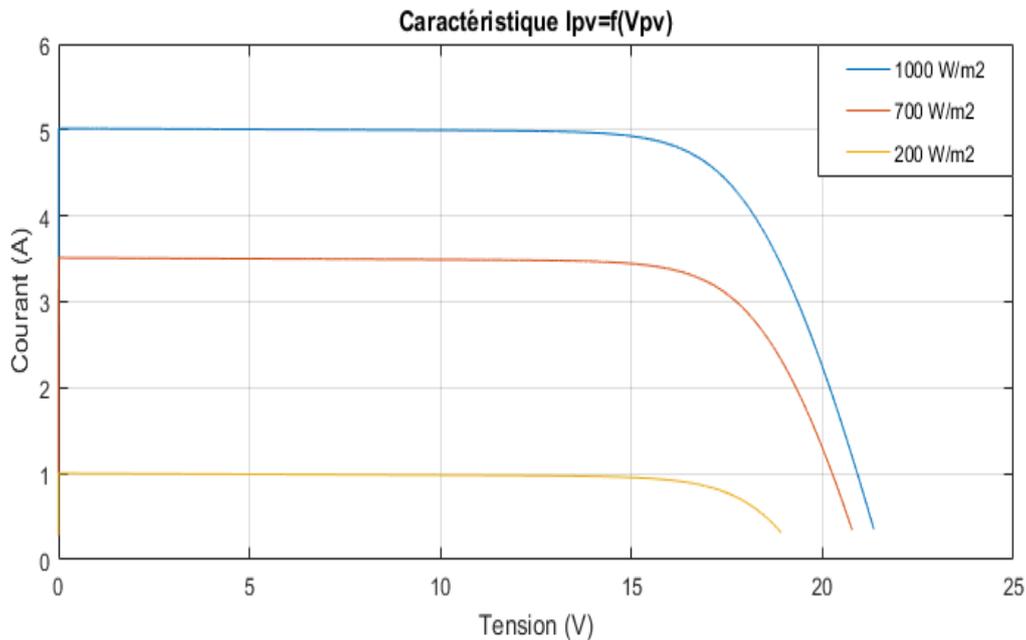


Figure III.11 : Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  pour un éclaircissement variable

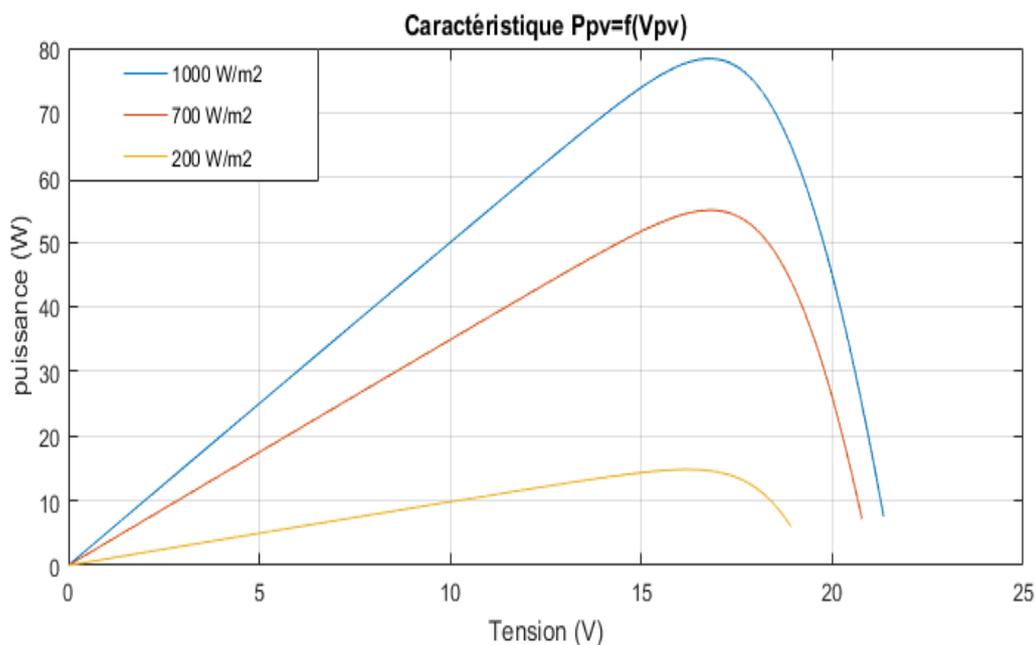


Figure III.12 : Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  pour un éclaircissement variable

Tableau III.6 : Valeurs obtenues pour le modèle à trois diodes (**panneau**)

<i>Modèle à trois diodes (Panneau)</i>					
<i>Caractéristiques</i>	<i>V<sub>m</sub> [V]</i>	<i>I<sub>m</sub> [A]</i>	<i>P<sub>max</sub> [W]</i>	<i>V<sub>co</sub> [V]</i>	<i>I<sub>cc</sub> [A]</i>
<i>G=1000 W/m<sup>2</sup></i>	16.79	4.667	78.37	21.34	5.017
<i>G=700 W/m<sup>2</sup></i>	16.76	3.278	54.93	20.77	3.512
<i>G=200 W/m<sup>2</sup></i>	16.16	0.9172	14.83	18.92	1.003

### III.4.3. Interprétation des résultats :

D'après les résultats obtenues aux figures : figure III.9 et figure III.10 on remarque que le courant  $I_{cc}$  varie directement avec le rayonnement lumineux (la relation est proportionnelle). Nous enregistrons aussi une augmentation de la puissance maximale  $P_{max}$  lorsque l'éclairement croit de  $200 \text{ W/m}^2$  à  $700 \text{ W/m}^2$ . Cet accroissement est estimée à une valeur de  $\Delta P = 1.115 \text{ W}$ .

L'examen des figures : figure III.11 et figure III.12 montre que dans le cas d'un panneau solaire et pour la même variation de l'éclairement on observe que :

- La tension de circuit ouvert augmente d'une valeur de  $\Delta V = 1.85 \text{ V}$ .
- Le courant reste proportionnel à l'éclairement.
- Une augmentation considérable de la puissance maximale qui vaut  $\Delta P = 40.1 \text{ W}$ .

### III.5. Comparaison des résultats pour les trois modèles :

Afin de classer les trois modèles représentatifs de la cellule PV. On réalise des scénarios de simulation, pour des conditions d'éclairement et de température variables.

#### III. 5.1.1. Comparaison entre les trois modèles de cellules PV [ $G=1000 \text{ W/m}^2$ $T= 25^\circ\text{C}$ ] :

Les figures : figure III.13 et figure III.14 représentent les simulations de la cellule PV pour un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ .

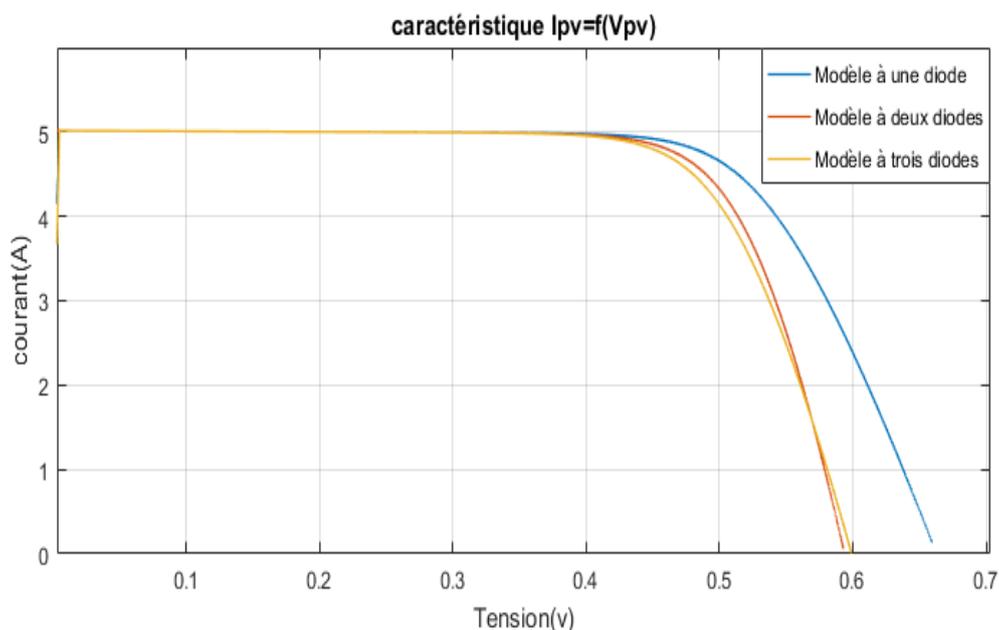


Figure III.13 : Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  pour  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$

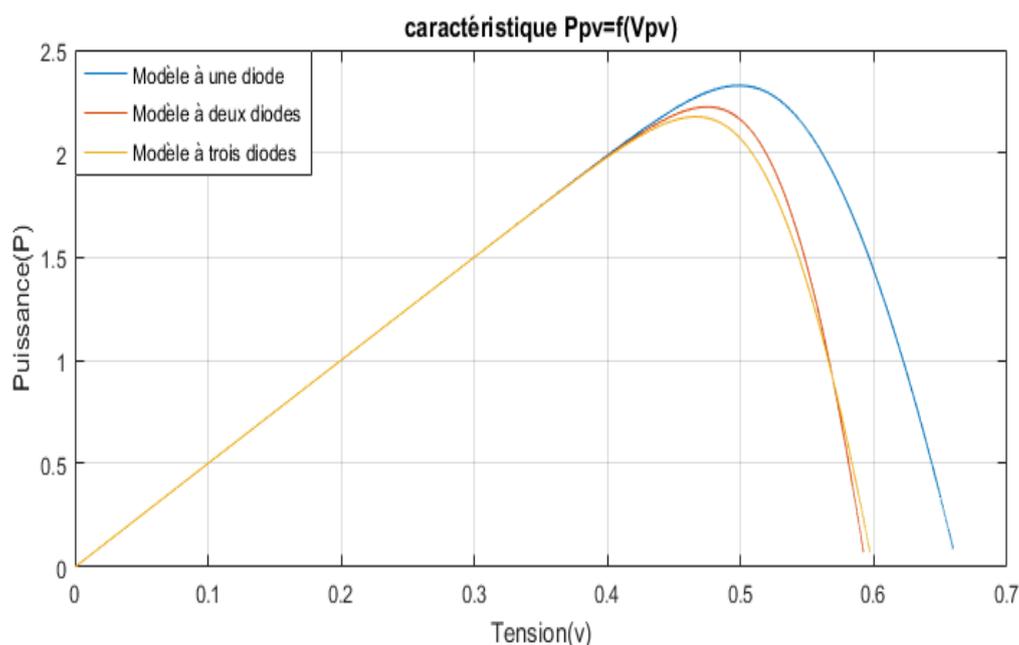


Figure III.14 : Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  pour  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$

Tableau III.7 : Valeurs obtenues pour les trois modèles (**Cellule**)

<i>Valeurs pour <math>G=1000 \text{ W/m}^2</math> et <math>T=25^\circ(\text{Cellule})</math></i>					
<i>Caractéristiques</i>	<i><math>V_m</math> [V]</i>	<i><math>I_m</math> [A]</i>	<i><math>P_{max}</math> [W]</i>	<i><math>V_{co}</math> [V]</i>	<i><math>I_{cc}</math> [A]</i>
<i>à une diode</i>	0.4991	4.664	2.328	0.6595	5.016
<i>à deux diodes</i>	0.4763	4.67	2.224	0.5921	5.017
<i>à trois diodes</i>	0.4642	4.689	2.177	0.5991	5.016

### III. 5.1.2. Comparaison entre les trois modèles de panneaux solaires

[ $G=1000 \text{ W/m}^2$   $T=25^\circ\text{C}$ ] :

Les figures : figure III.15 et figure III.16 représentent les simulations panneau solaire pour un éclairage de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ .

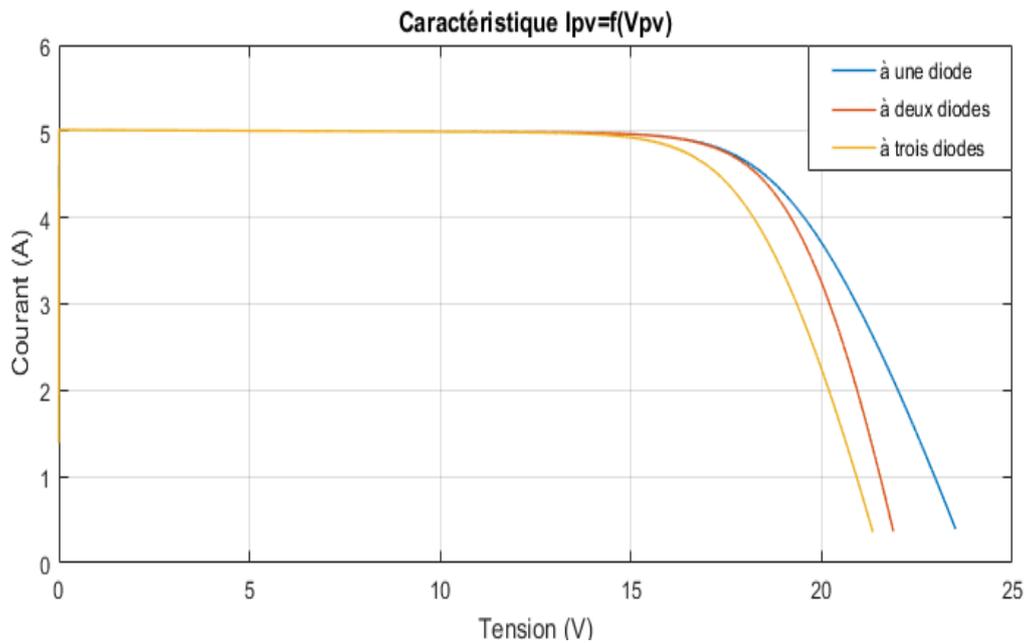


Figure III.15 : Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  pour  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$

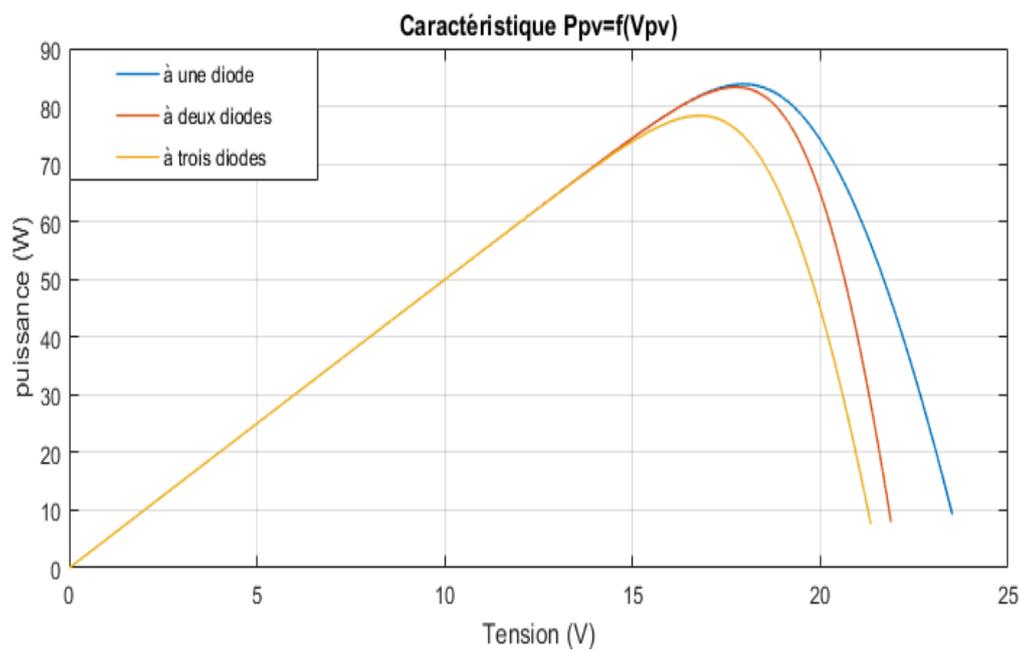


Figure III.16 : Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  pour  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$

## CHAPITRE III : Caractéristiques des différents types de modèles étudiés

Tableau III.8 : Valeurs obtenues pour les trois modèles (**Panneau**)

<i>Valeurs pour <math>G=1000 \text{ W/m}^2</math> et <math>T=25^\circ</math> (Panneau)</i>					
<i>Caractéristiques</i>	<i><math>V_m</math> [V]</i>	<i><math>I_m</math> [A]</i>	<i><math>P_{max}</math> [W]</i>	<i><math>V_{co}</math> [V]</i>	<i><math>I_{cc}</math> [A]</i>
<i>à une diode</i>	17.96	4.666	83.81	23.51	5.017
<i>à deux diodes</i>	17.77	4.688	83.3	21.88	5.017
<i>à trois diodes</i>	16.79	4.667	78.37	21.34	5.017

### III.5.1.3. Interprétation des résultats :

L'examen des résultats montrent que le modèle à une diode délivre une puissance maximale plus grande que le modèle à deux diodes d'une valeur qui est égale à  $\Delta P = 0.104 \text{ W}$ , de même pour le modèle à trois diodes, elle est estimée à  $\Delta P = 0.151 \text{ W}$ . La tension en circuit ouvert du modèle à deux diodes est inférieure à celle du modèle à une diode d'une valeur  $\Delta V = 0.0674 \text{ V}$ . Elle est aussi inférieure à celle du modèle à trois diodes d'une valeur qui vaut  $\Delta V = 0.007 \text{ V}$ , par contre le courant  $I_L$  est presque stable.

D'après les résultats d'un panneau solaire on constate :

- le courant  $I_{cc}$  reste tel qu'il est, de valeur égale à **5.017 A**.
- la puissance maximale  $P_{max}$  du modèle à une diode est supérieure à celle du modèle à deux diodes de  $\Delta P = 0.51 \text{ W}$  et pour le modèle à trois diodes d'une valeur  $\Delta P = 5.44 \text{ W}$ .
- la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  du modèle à trois diodes est la plus petites parmi les trois modèles.

### III.5.2.1. Comparaison entre les trois modèles de cellules PV [ $G=200 \text{ W/m}^2$ $T=25^\circ\text{C}$ ] :

Les figures : figure III.17 et figure III.18 représentent les simulations de la cellule PV pour un éclairage de  $200 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ .

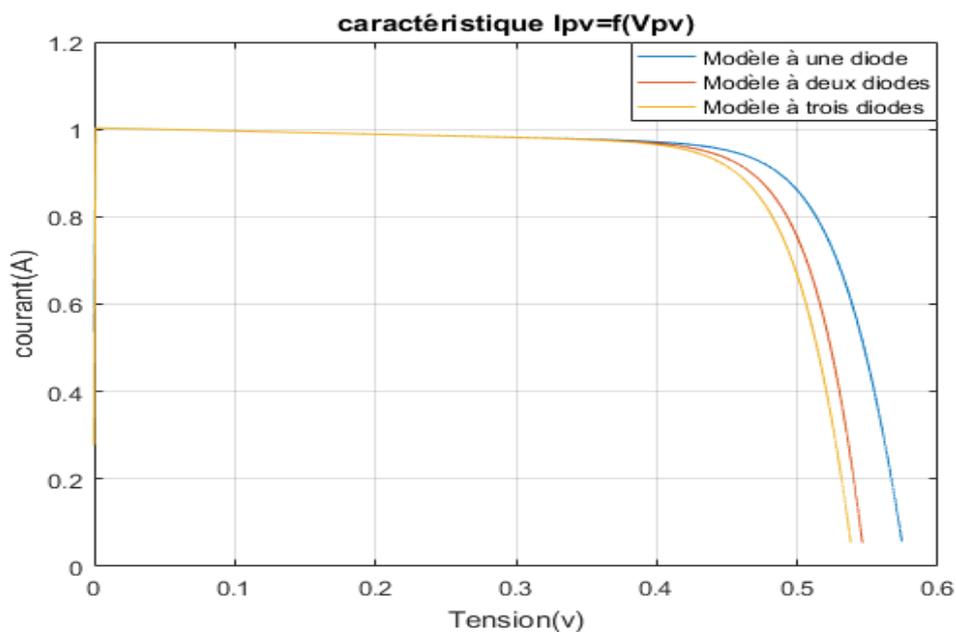


Figure III.17 : Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  pour  $G=200 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$

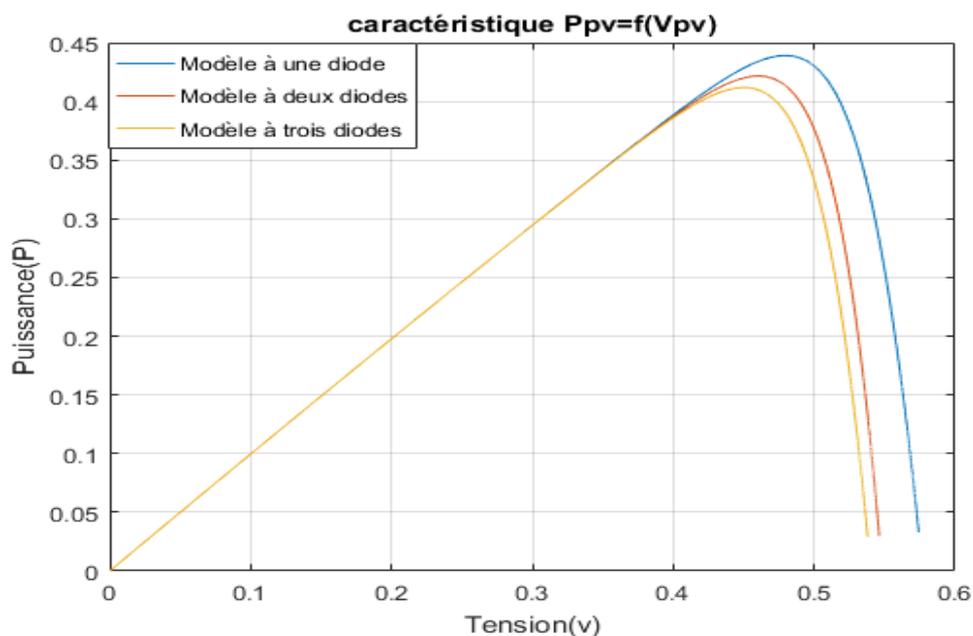


Figure III.18 : Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  pour  $G=200 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$

Tableau III.9 : Valeurs obtenues pour les trois modèles (Cellule)

<i>Valeurs pour <math>G=200 \text{ W/m}^2</math> et <math>T=25^\circ</math> (Cellule)</i>					
<i>Caractéristiques</i>	<i><math>V_m</math> [V]</i>	<i><math>I_m</math> [A]</i>	<i><math>P_{max}</math> [W]</i>	<i><math>V_{co}</math> [V]</i>	<i><math>I_{cc}</math> [A]</i>
<i>à une diode</i>	0.4814	0.9118	0.439	0.5743	1.003
<i>à deux diodes</i>	0.4619	0.9128	0.4216	0.5462	1.003
<i>à trois diodes</i>	0.4519	0.9112	0.4118	0.538	1.003

### III.5.2.2. Comparaison entre les trois modèles de panneaux solaires

[ $G=200 \text{ W/m}^2$   $T=25^\circ\text{C}$ ] :

Les figures : figure III.19 et figure III.20 représentent les simulations panneau solaire pour un éclairement de  $200 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ .

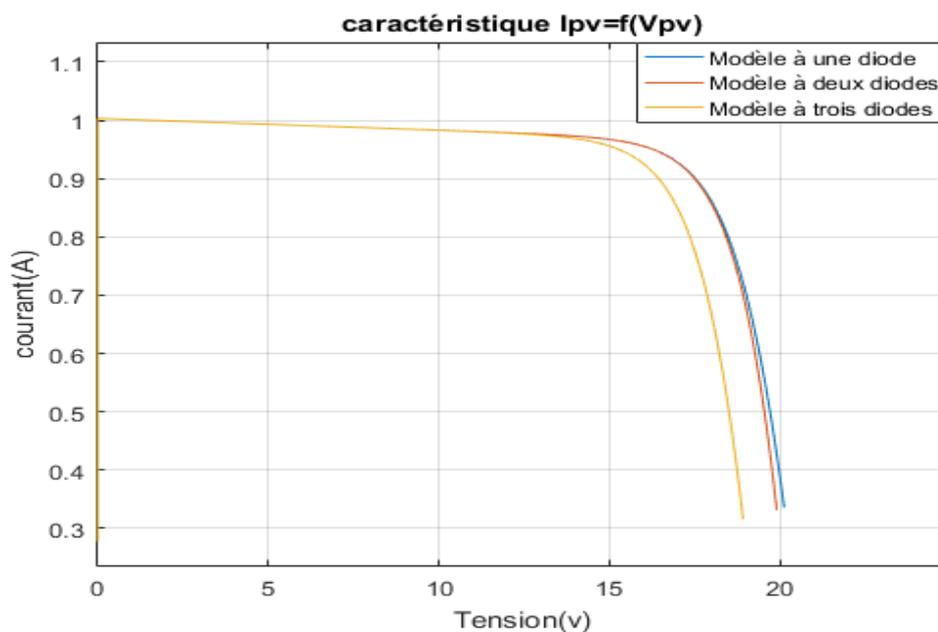


Figure III.19 : Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  pour  $G=200 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$

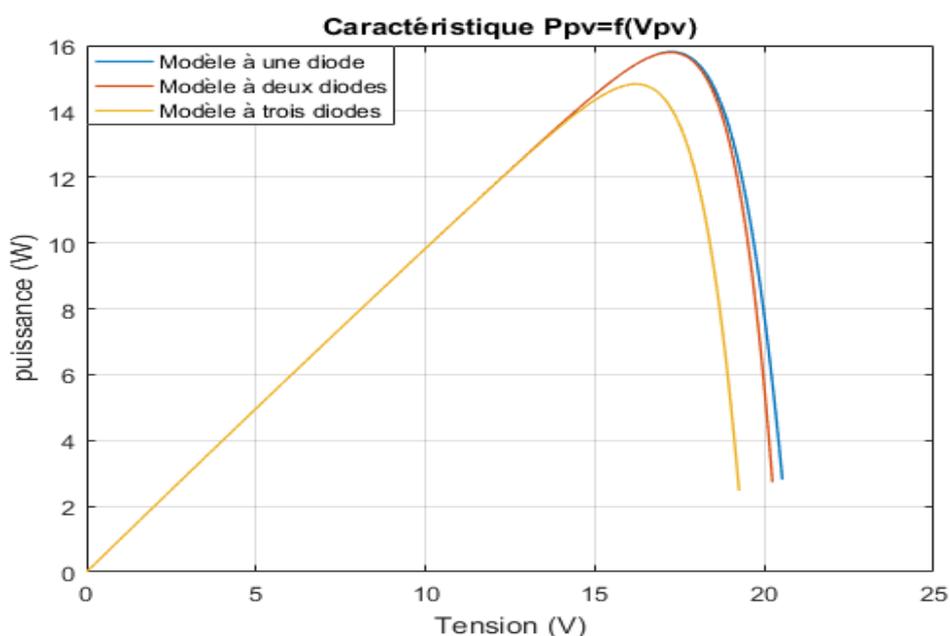


Figure III.20 : Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  pour  $G=200 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$

## CHAPITRE III : Caractéristiques des différents types de modèles étudiés

Tableau III.10 : Valeurs obtenues pour les trois modèles (**Panneau**)

<i>Valeurs pour <math>G=200 \text{ W/m}^2</math> et <math>T=25^\circ\text{C}</math> (panneau)</i>					
<i>Caractéristiques</i>	<i><math>V_m</math> [V]</i>	<i><math>I_m</math> [A]</i>	<i><math>P_{max}</math> [W]</i>	<i><math>V_{co}</math> [V]</i>	<i><math>I_{cc}</math> [A]</i>
<i>à une diode</i>	17.18	0.9189	15.79	20.12	1.003
<i>à deux diodes</i>	17.18	0.9189	15.79	19.9	1.003
<i>à trois diodes</i>	16.22	0.9138	14.83	18.92	1.003

### III.5.2.3. Interprétation des résultats :

Pour  $G=200 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$  On constate tout d'abord que le courant  $I_{cc}$  reste stable pour les trois modèles d'une valeur qui est égale à **1.003 A**.

Pour la puissance les résultats obtenus montrent que le modèle à une diode génère une puissance maximale élevée (**0.439 W**) par rapport aux autres modèles dans les conditions climatiques susnommées.

On peut voir aussi, que la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  pour le modèle à une diode est plus grande que la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  du modèle à deux diodes d'une valeur qui est égale à  $\Delta V = 0.0281 \text{ V}$ , elle est supérieure à celle du modèle à trois diodes d'une valeur qui vaut  $\Delta V = 0.0363 \text{ V}$ .

Pour un panneau solaire on observe que les résultats d'un modèle à une diode et à deux diodes sont presque identiques.

- Le courant  $I_{cc}$  ne varie pas pour les trois modèles.
- La puissance maximale pour le modèle à trois diodes est inférieure à la puissance maximale des autres modèles (à une diode et à deux diodes) d'une valeur de  $\Delta P = 0.96 \text{ W}$ , de même pour la tension en circuit ouvert qui est inférieur d'une valeur qui vaut  $\Delta V = 1.2 \text{ V}$ .

### III.5.3.1. Comparaison entre les trois modèles de cellules PV [ $G=1000 \text{ W/m}^2$ $T=10^\circ\text{C}$ ] :

Les figures : figure III.21 et figure III.22 représentent les simulations de la cellule PV pour un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $10^\circ\text{C}$ .

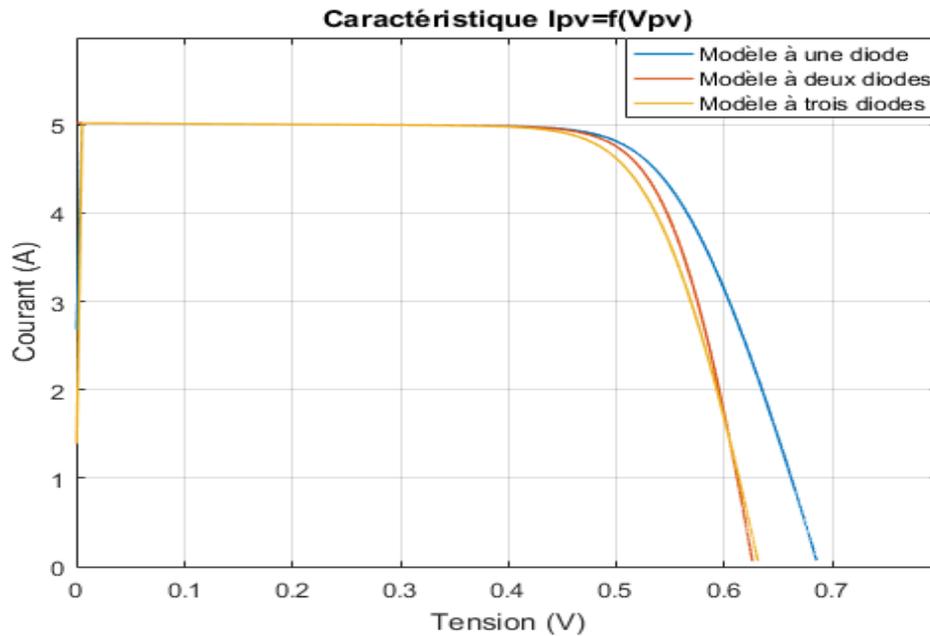


Figure III.21 : Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  pour  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=10^\circ\text{C}$

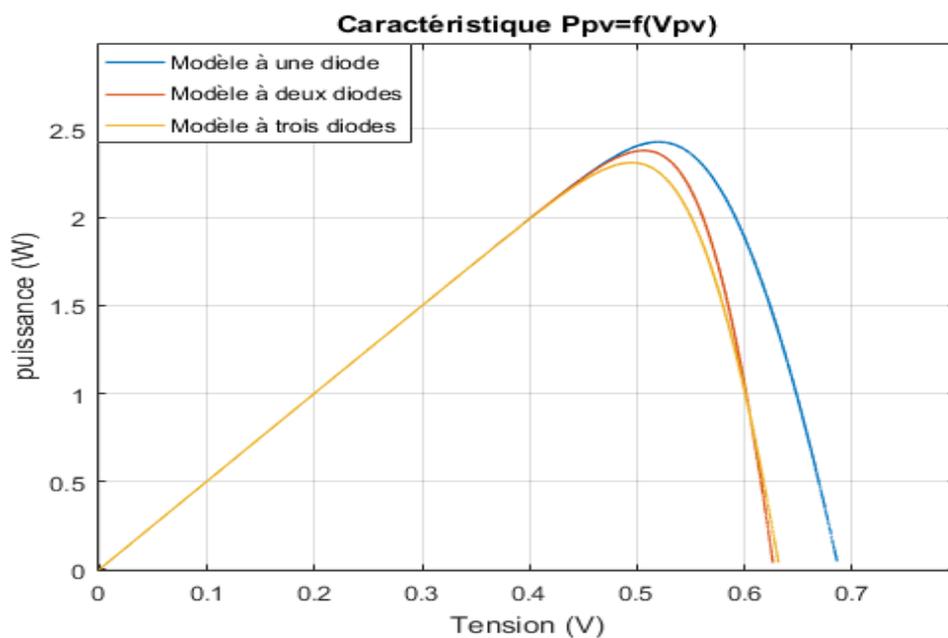


Figure III.22 : Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  pour  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=10^\circ\text{C}$

## CHAPITRE III : Caractéristiques des différents types de modèles étudiés

Tableau III.11 : Valeurs obtenues pour les trois modèles (**Cellule**)

<i>Valeurs pour <math>G=1000 \text{ W/m}^2</math> et <math>T= 10^\circ\text{C}</math> (Cellule)</i>					
<i>Caractéristiques</i>	<i><math>V_m</math> [V]</i>	<i><math>I_m</math> [A]</i>	<i><math>P_{max}</math> [W]</i>	<i><math>V_{co}</math> [V]</i>	<i><math>I_{cc}</math> [A]</i>
<i>à une diode</i>	<i>0.5215</i>	<i>4.656</i>	<i>2.428</i>	<i>0.6857</i>	<i>5.016</i>
<i>à deux diodes</i>	<i>0.5069</i>	<i>4.529</i>	<i>2.379</i>	<i>0.6261</i>	<i>5.017</i>
<i>à trois diodes</i>	<i>0.49949</i>	<i>4.669</i>	<i>2.311</i>	<i>0.6312</i>	<i>5.016</i>

### III.5.3.2. Interprétation des résultats :

L'examen des figures de simulation montre que pour  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=10^\circ\text{C}$ , le courant  $I_{cc}$  ne varie pas dans les trois modèles.

Pour la puissance maximale  $P_{max}$  on observe que le modèle à trois diodes génère une puissance faible par rapport au modèle à une diode d'une chute de puissance qui est égale à  $\Delta P = 0.117 \text{ W}$  et par rapport au modèle à deux diode d'une valeur qui vaut

$$\Delta P = 0.068 \text{ W}.$$

Au niveau de la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  la valeur du modèle à trois diodes est supérieure que la tension en circuit ouvert du modèle à deux diode d'une valeur de  $\Delta V = 0.0051 \text{ V}$  et inférieure à la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  du modèle à une diode d'une valeur qui vaut  $\Delta V = 0.545 \text{ V}$ .

### III.5.4.1. Comparaison entre les trois modèles de cellule PV [ $G=1000 \text{ W/m}^2$ $T=75^\circ\text{C}$ ] :

Les figures : figure III.23 et figure III.24 représentent les simulations de la cellule PV pour un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $75^\circ\text{C}$ .

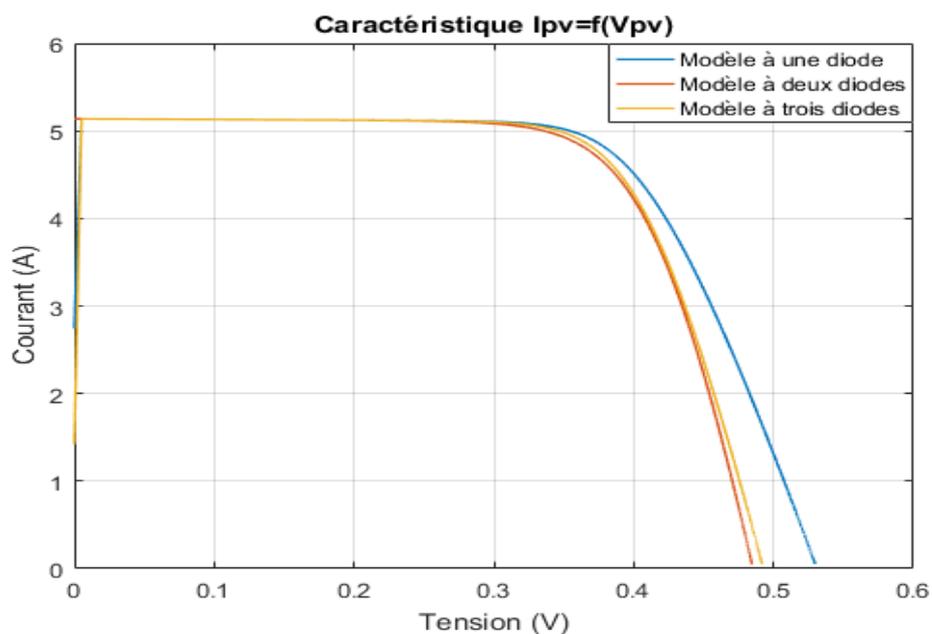


Figure III.23 : Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  pour  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=75^\circ\text{C}$

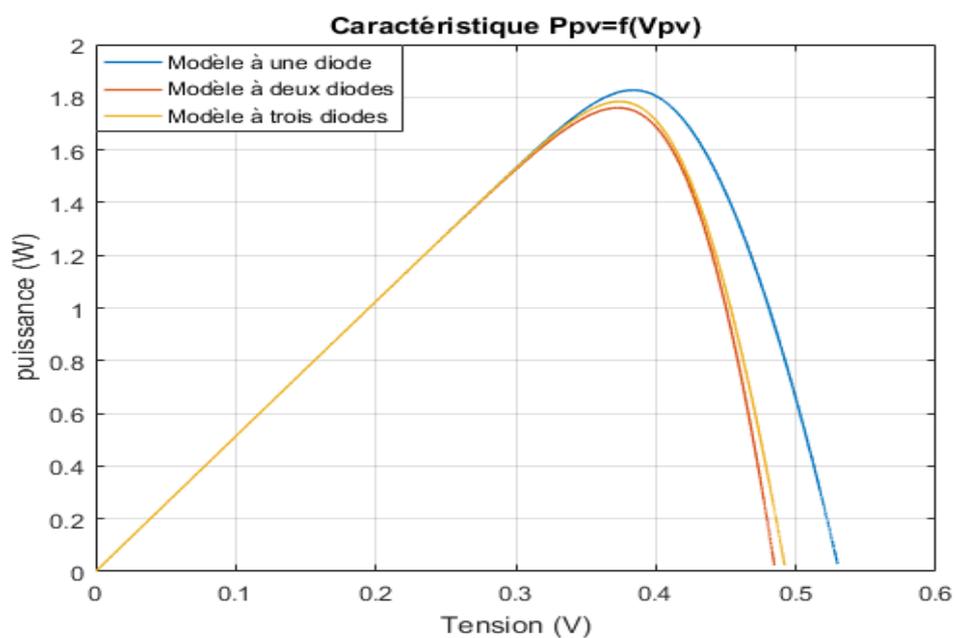


Figure III.24 : Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  pour  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=75^\circ\text{C}$

## CHAPITRE III : Caractéristiques des différents types de modèles étudiés

Tableau III.12 : Valeurs obtenues pour les trois modèles (**Cellule**)

<i>Valeurs pour <math>G=1000 \text{ W/m}^2</math> et <math>T=75^\circ\text{C}</math></i>					
<i>Caractéristiques</i>	<i><math>V_m</math> [V]</i>	<i><math>I_m</math> [A]</i>	<i><math>P_{max}</math> [W]</i>	<i><math>V_{co}</math> [V]</i>	<i><math>I_{cc}</math> [A]</i>
<i>à une diode</i>	0.3847	4.749	1.827	0.5298	5.137
<i>à deux diodes</i>	0.3754	4.751	1.759	0.4846	5.137
<i>à trois diodes</i>	0.373	4.782	1.784	0.4919	5.137

### III.5.4.2. Interprétation des résultats :

D'après ces résultats on voit que la cellule à base du modèle à trois diodes délivre une puissance  $P_{max}$  plus grande que celle du modèle à deux diodes d'une valeur de

$\Delta P = 0.025 \text{ W}$ . Notons que, que sa puissance maximale  $P_{max}$  est inférieure à la puissance maximale du modèle à une diode d'une valeur qui est égale à  $\Delta P = 0.043 \text{ W}$ .

Le courant  $I_{cc}$  est toujours stable et ne varie pas, tandis que la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  du modèle à deux diodes est inférieure à la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  du modèle à trois diode d'une valeur qui vaut,  $\Delta V = 0.0073 \text{ V}$  et elle est inférieure à celle du modèle à une diode d'une valeur qui est égale à  $\Delta V = 0.0452 \text{ V}$ .

### III.5.5.1. Comparaison entre les trois modèles de cellules PV [ $G=200 \text{ W/m}^2$ $T=10^\circ\text{C}$ ] :

Les figures : figure III.25 et figure III.26 représentent les simulations de la cellule PV pour un éclairage de  $200 \text{ W/m}^2$  et une température de  $10^\circ\text{C}$ .

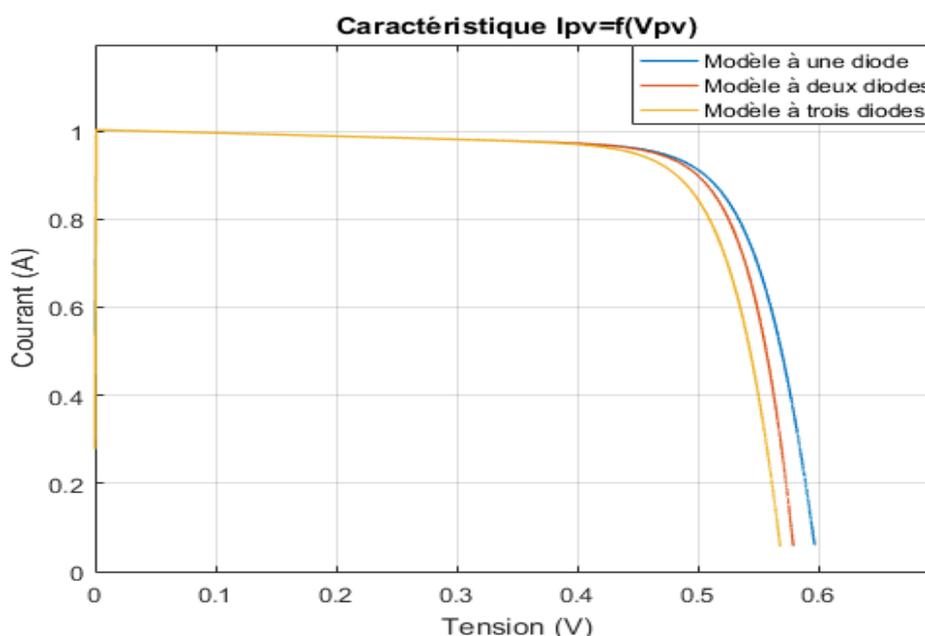


Figure III. 25 : Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  pour  $G=200 \text{ W/m}^2$  et  $T=10^\circ\text{C}$

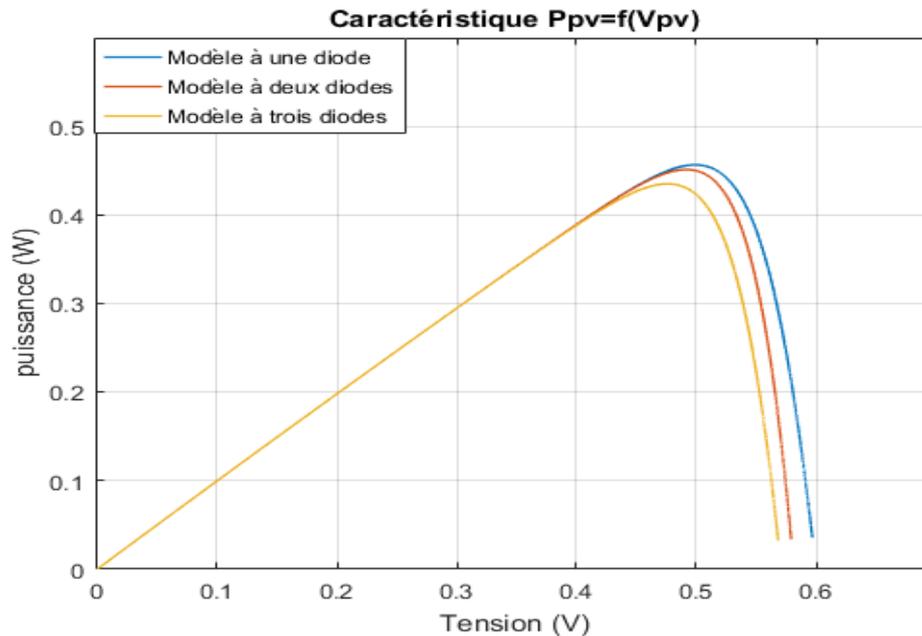


Figure III. 26 : Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  pour  $G=200 \text{ W/m}^2$  et  $T=10^\circ\text{C}$

Tableau III.13 : Valeurs obtenues pour les trois modèles (**Cellule**)

<i>Valeurs pour <math>G=200 \text{ W/m}^2</math> et <math>T= 10^\circ\text{C}</math></i>					
<i>Caractéristiques</i>	<i><math>V_m</math> [V]</i>	<i><math>I_m</math> [A]</i>	<i><math>P_{max}</math> [W]</i>	<i><math>V_{co}</math> [V]</i>	<i><math>I_{cc}</math> [A]</i>
<i>à une diode</i>	0.4991	0.9142	0.4563	0.5969	1.003
<i>à deux diodes</i>	0.4934	0.9137	0.4509	0.5792	1.003
<i>à trois diodes</i>	0.4782	0.9091	0.4348	0.5684	1.003

### III.5.5.2. Interprétation des résultats :

Dans les conditions de courbes représentées aux figures : figure III.25 et figure III.26, on constate que la cellule basé sur le modèle à trois diodes délivre une puissance maximale  $P_{max}$  faible par rapport aux deux autres modèles.

Le courant  $I_{cc}$  reste tel qu'il est dans les trois modèles, par contre, la tension en circuit ouvert du modèle à trois diodes est inférieure à la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  du modèle à une diode d'une valeur  $\Delta V = 0.0285 \text{ V}$  et pour le modèle à deux diodes d'une valeur qui vaut  $\Delta V = 0.0108 \text{ V}$ .

### III.5.6.1. Comparaison entre les trois modèles de cellules PV [ $G=200 \text{ W/m}^2$

$T=75^\circ\text{C}$ ] :

Les figures : figure III.27 et figure III.28 représentent les simulations de la cellule PV pour un éclairage de  $200 \text{ W/m}^2$  et une température de  $75^\circ\text{C}$ .

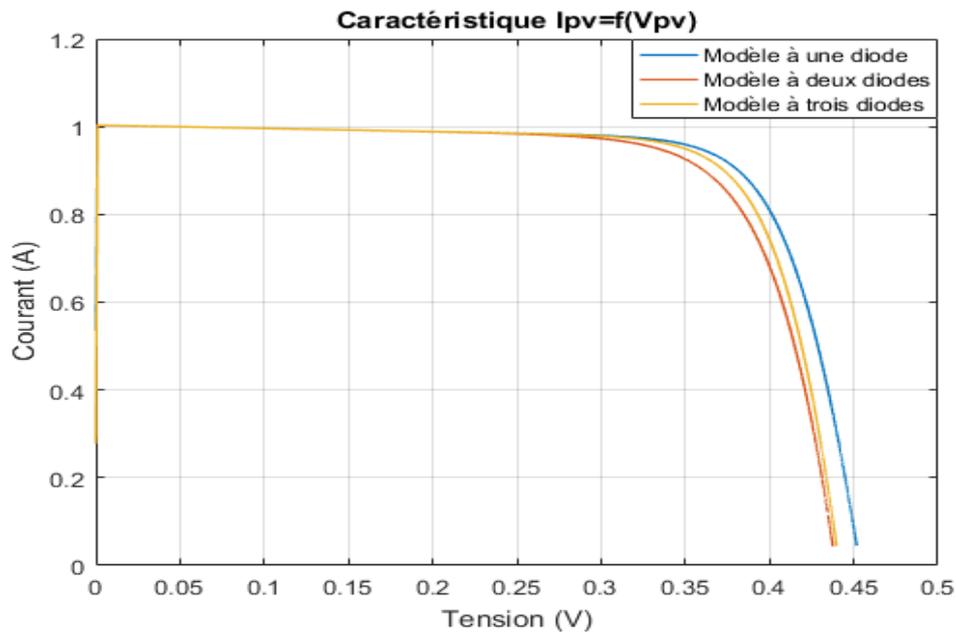


Figure III. 27 : Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  pour  $G=200\text{W/m}^2$  et  $T=75^\circ\text{C}$

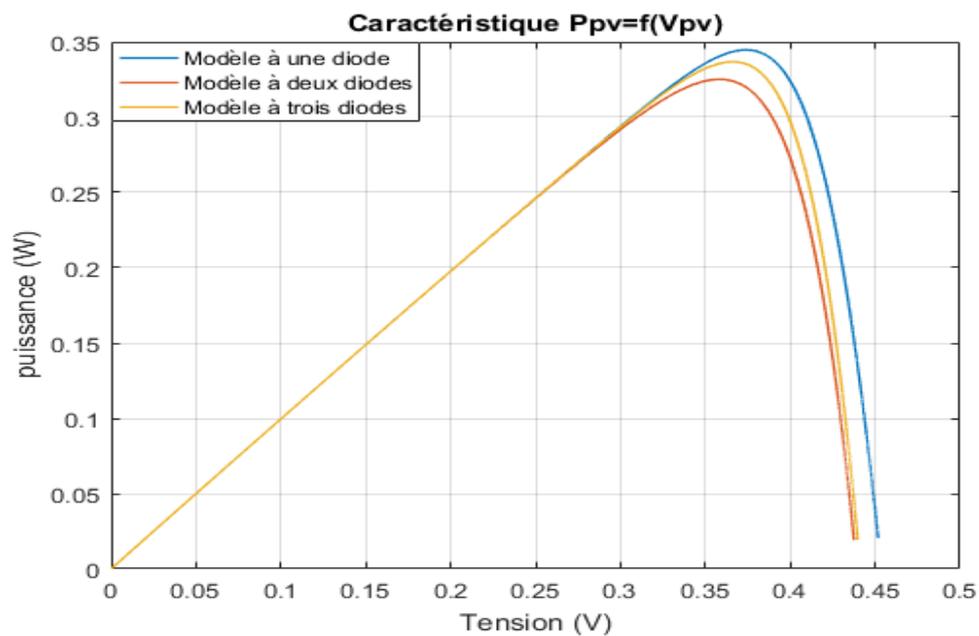


Figure III. 28 : Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  pour  $G=200\text{W/m}^2$  et  $T=75^\circ\text{C}$

## CHAPITRE III : Caractéristiques des différents types de modèles étudiés

Tableau III.14 : Valeurs obtenues pour les trois modèles (Cellule)

<i>Valeurs pour <math>G=200 \text{ W/m}^2</math> et <math>T=75^\circ\text{C}</math></i>					
<i>Caractéristiques</i>	<i><math>V_m</math> [V]</i>	<i><math>I_m</math> [A]</i>	<i><math>P_{max}</math> [W]</i>	<i><math>V_{co}</math> [V]</i>	<i><math>I_{cc}</math> [A]</i>
<i>à une diode</i>	<i>0.3745</i>	<i>0.9202</i>	<i>0.3447</i>	<i>0.4518</i>	<i>1.003</i>
<i>à deux diodes</i>	<i>0.3601</i>	<i>0.9187</i>	<i>0.3251</i>	<i>0.4376</i>	<i>1.003</i>
<i>à trois diodes</i>	<i>0.3666</i>	<i>0.9026</i>	<i>0.3368</i>	<i>0.4398</i>	<i>1.003</i>

### III.5.6.2. Interprétation des résultats :

À partir de résultats de simulations des figures : figure III.27 et figure III.28, on constate :

Un courant de court-circuit  $I_{cc}$  stable.

Le modèle à deux diodes à une valeur de tension en circuit ouvert  $V_{co}$  inférieure que celle des autres modèles.

La puissance maximale  $P_{max}$  de la cellule conçue à base du modèle à trois diodes délivre une puissance maximale plus que celle délivrée par le modèle à deux diodes d'une valeur qui vaut  $\Delta P = 0.0117 \text{ W}$  et moins que la puissance maximale  $P_{max}$  du modèle à une diode d'une valeur qui est égale à  $\Delta P = 0.0079 \text{ W}$ .

### III.6. Conclusion :

Les simulations réalisés dans ce chapitre sous l'environnement Matlab/Simulink des différents modèles du générateur photovoltaïque ; à savoir : le modèle à une diode, à deux et à trois diodes, et ce dans des conditions climatiques variables nous ont permis d'évaluer d'une part, les performances et d'estimer d'une autre part, l'ordre de grandeurs des paramètres du GPV tels que : le courant la tension et la puissance. Ce qui nous a permet de classier les trois modèles représentatifs de la cellule PV. En effet, la cellule PV réalisé à base du modèle à une diode délivre une puissance nettement supérieure à celles des deux autres modèles. Pour les éclairagements élevés et températures élevées le modèle à deux diodes et celui à trois diodes délivrent presque des puissances en sortie similaires. Pour les valeurs basses de l'éclairément et des températures élevées le modèle à trois diodes fournies une puissance supérieure à celle du modèle à deux diodes. En fin pour les faibles valeurs d'éclairément et de températures, le modèle à deux diodes délivre une puissance supérieure comparativement à celui à trois diodes.

# **Extraction du Maximum de Puissance du Générateur PV**

### IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous étudions l'extraction du maximum de puissance d'une chaîne de production d'énergie PV, en utilisant un panneau solaire dont son modèle est basé sur le circuit équivalent à une diode, à deux et trois diodes.

### IV.2. Principe du contrôle de puissance maximale (MPPT) :

Dans la littérature, une commande de puissance maximale (MPPT) combinée à un convertisseur DC/DC permet à un générateur photovoltaïque de produire la puissance continue maximale, quelles que soient les conditions météorologiques (éclairage et température).

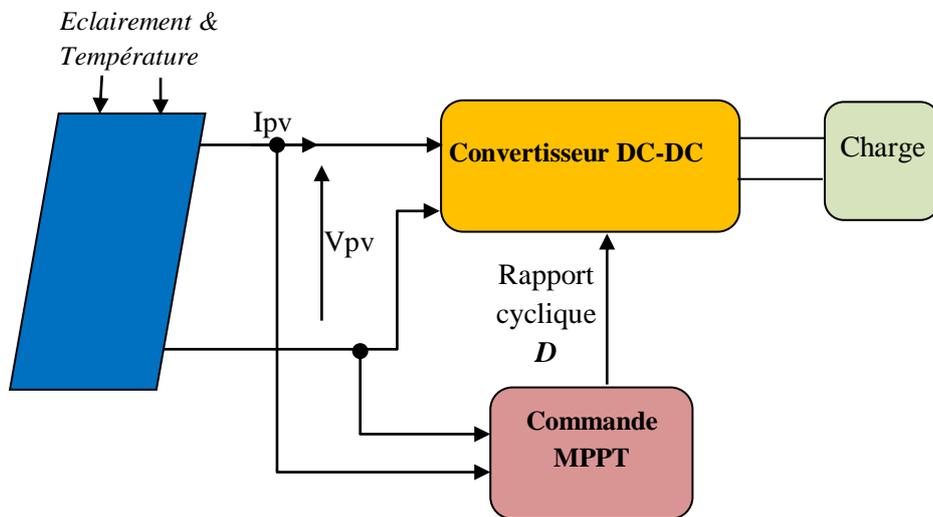


Figure IV.1 : schéma de principe de la commande MPPT

Le premier système avec MPPT a été introduit en 1968. Par la suite, de nombreuses techniques MPPT ont été développées et largement adaptées pour garantir le point de puissance maximale. Ces techniques diffèrent par leur complexité, leur coût, leur efficacité, leur réponse et leur robustesse.

Le circuit MPPT se compose de deux composants de base, un convertisseur continu-continu et son contrôleur, illustré à la figure IV.1. Ce contrôle consiste à agir sur le rapport cyclique du convertisseur statique pour placer le générateur à sa valeur optimale ( $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$ ), quelles que soient les variations des conditions météorologiques ou les changements brusques de charges qui peuvent survenir à tout moment [3].

Sur la figure IV.1, la tension d'entrée de l'étage de puissance  $V_{pv}$  et le courant  $I_{pv}$  sont utilisés par le contrôleur pour le suivi du MPP. Dans ce cas, le paramètre de contrôle de l'étage de puissance  $D$  est continuellement tourné jusqu'à ce que le générateur photovoltaïque soit chargé à son MPP. De nombreuses méthodes ont été développées pour déterminer le point de puissance maximale (MPP) [14].

### IV.3. Perturbation et observation, P&O :

Son principe de fonctionnement consiste à effectuer une petite perturbation de la tension active dans une certaine tension de fonctionnement des cellules photovoltaïques et à observer le changement de direction de la puissance de sortie. Si la puissance de sortie augmente, la perturbation doit être maintenue dans la même direction, sinon une perturbation dans la direction d'origine doit être effectuée. Le diagramme de suivi de la perturbation de la méthode d'observation est indiqué sur la figure IV.2 [15] :

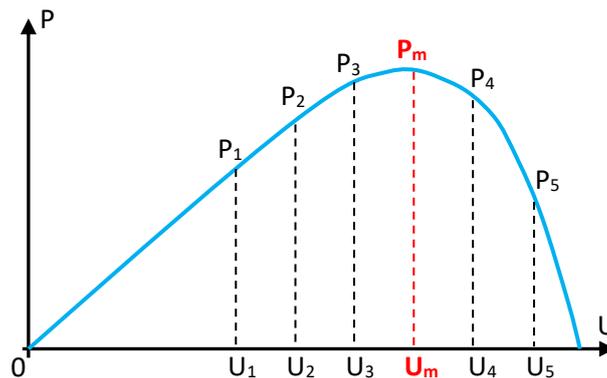


Figure IV.2 : Diagramme schématisé de suivi de puissance de la méthode perturbation et d'observation

L'observation des perturbations a été largement utilisée dans la poursuite du point de puissance maximale photovoltaïque en raison de sa structure de contrôle simple, de ses quelques paramètres et de sa mise en œuvre facile. Cependant, en raison de son pas fixe, le phénomène d'oscillation se produit près du point de puissance maximale, ce qui réduit l'efficacité de la production d'énergie [15].

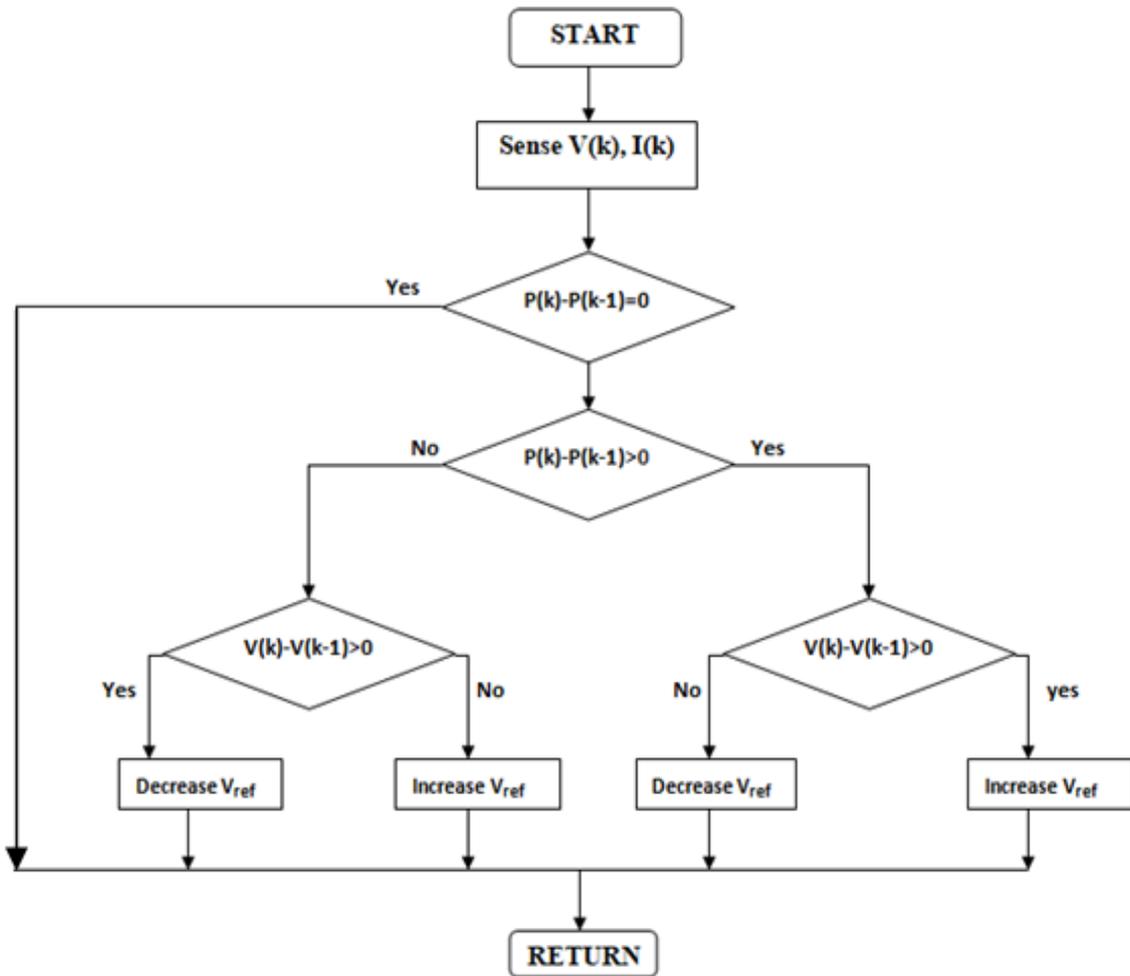


Figure IV.3 : Organigramme de la méthode Perturb et Observe

#### IV.4. Convertisseur DC-DC élévateur (Boost) :

Afin de toujours garantir le point de fonctionnement sur le point de puissance maximale, ou à proximité, un circuit spécifique, appelé Maximum Power Point Tracker (MPPT), est utilisé. Habituellement, le MPPT est obtenu en interposant un convertisseur de puissance (convertisseur DC-DC) entre le générateur PV et la charge, ainsi, en agissant sur le rapport cyclique du convertisseur ( $D$ ), il est possible de garantir le point de fonctionnement comme étant le MPP. La figure IV.4 montre le circuit du convertisseur élévateur, dont la tension de sortie ( $V_{ch}$ ) est supérieure à la tension d'entrée  $V_{pv}$  (tension du générateur PV) [7].

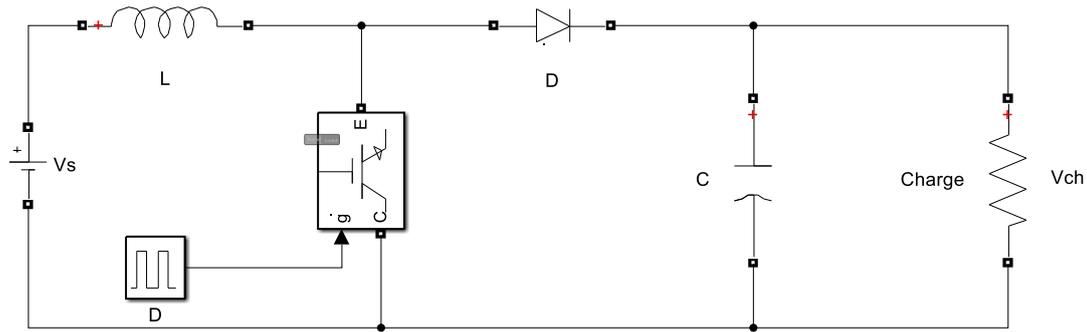


Figure IV.4 : circuit de base d'un hacheur Boost

En effet, les hacheurs sont des convertisseurs statiques DC-DC permettant de générer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension fixe. Le convertisseur DC-DC se compose de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Tous ces appareils dans le cas idéal ne consomment pas d'énergie ; c'est la raison pour laquelle les hacheurs ont de bons rendements voire unitaire. Le commutateur est typiquement un transistor (MOSFET ou IGBT) qui est un dispositif semi-conducteur en mode (fermé-saturé).

Pour un convertisseur élévateur DC-DC, en utilisant le concept de valeur moyenne, la relation de tension d'entrée-sortie pour le mode de conduction continue est donnée par [16] :

$$\frac{V_{ch}}{V_{pv}} = \frac{1}{1 - D} \quad (IV.1)$$

Où,

**D** : est le rapport cyclique est compris entre 0 et 1.

### IV.5 Analyse par simulation du comportement du système PV :

Dans cette section nous réalisons des scénarios de simulations, et ce dans le but d'évaluer les performances du système PV (avec et sans commande MPPT) et d'analyser son comportement pour les trois types de modèles étudiés dans le chapitre précédent ; à savoir : modèle à une diode, à deux diodes et à trois diodes). Notons que, comme algorithme MPPT nous utilisons la méthode P&O.

### IV.5.1. simulation du comportement du générateur PV avec charge résistive :

Le schéma du générateur PV alimentant une charge résistive sous Matlab/Simulink est représenté sur la figure ci-dessous :

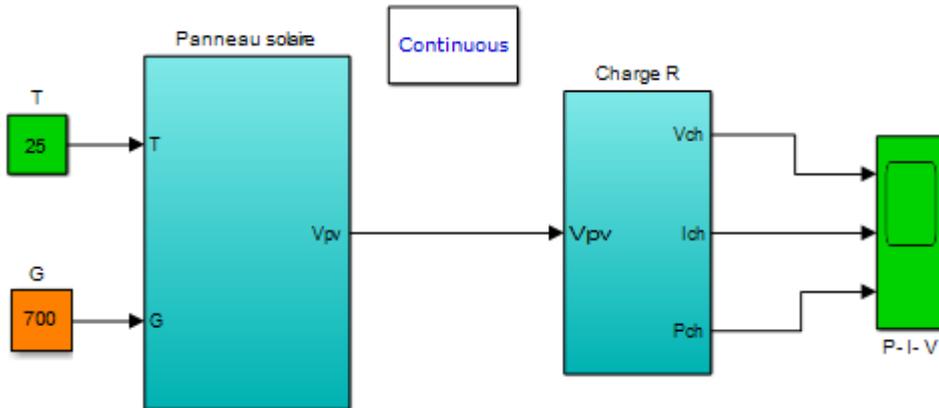


Figure IV.5 : Schéma d'un générateur PV avec sa charge

Les résultats de simulation du système PV sans commande MPPT sont représentés sur les figures (IV.6) à (IV.8). Qui montrent respectivement l'évolution du courant, tension et puissance débités par le GPV à la charge résistive pour les trois modèles étudiées.

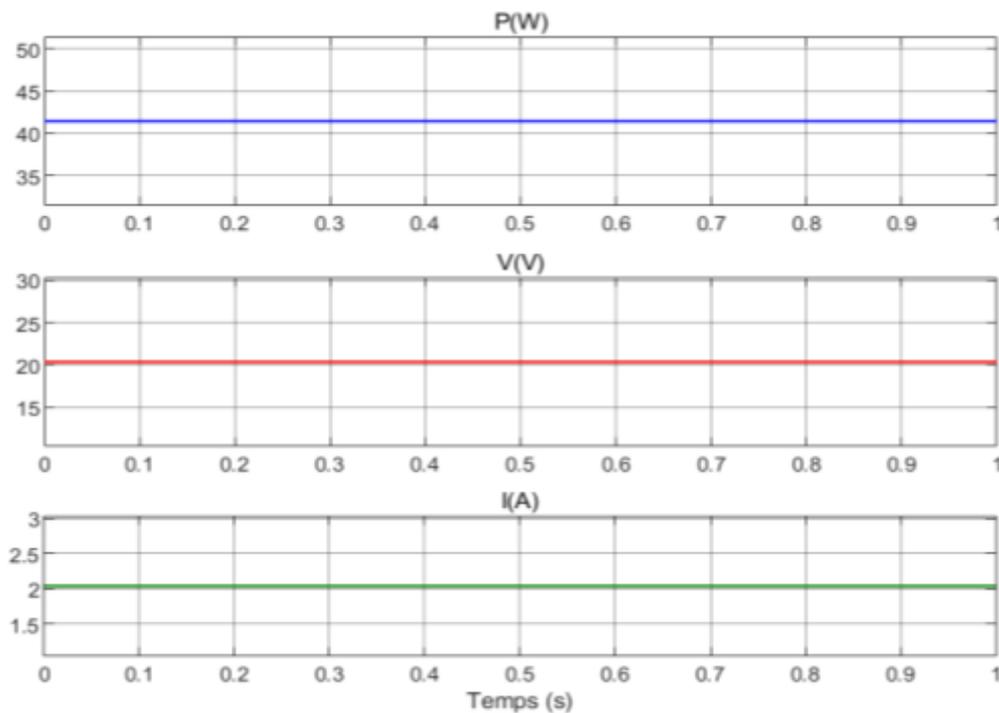


Figure IV.6 : Résultats de simulation du GPV à la charge résistive pour le modèle à une seule diode

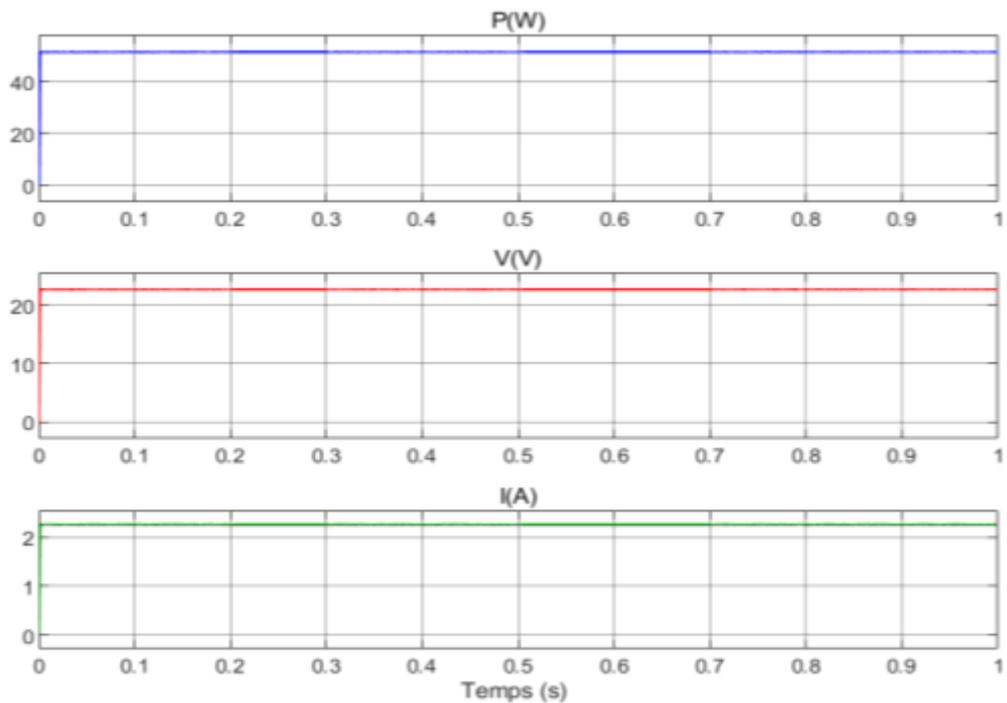


Figure IV.7 : Résultats de simulation du GPV à la charge résistive pour le modèle à deux diodes

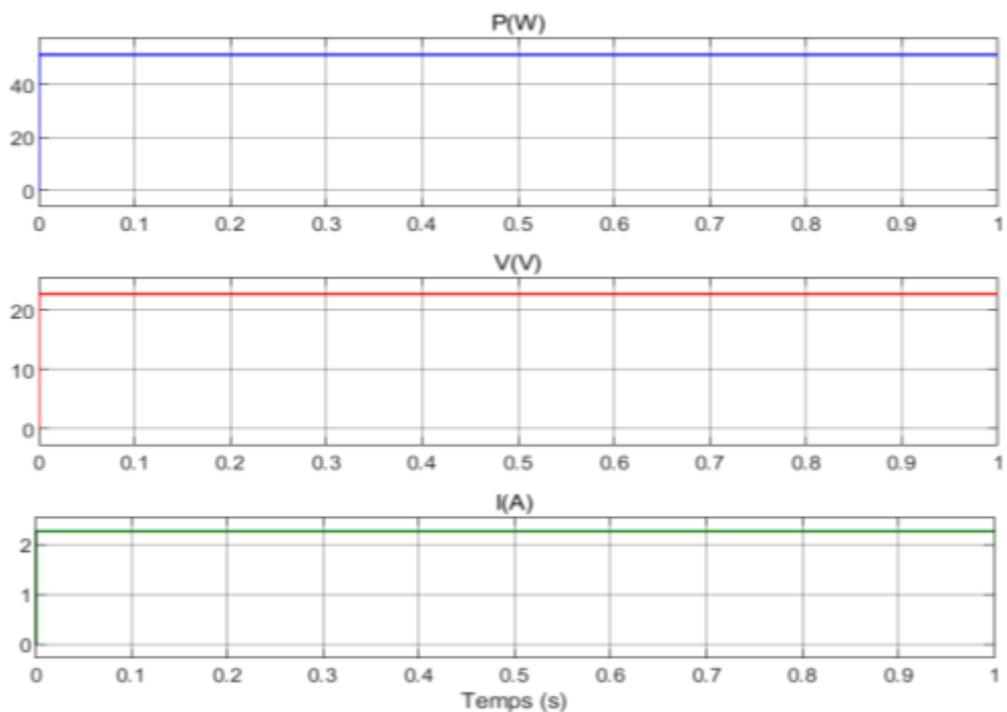


Figure IV.8 : Résultats de simulation du GPV à la charge résistive pour le modèle à trois diodes

### IV.5.2. simulation du comportement du système PV avec le contrôleur MPPT :

La Figure IV.9 représente le modèle global de simulation du système PV avec sa charge. La méthode de Perturbation et d'Observation est l'approche adoptée. Les éléments ; tels que : le panneau photovoltaïque, le hacheur Boost, le contrôleur MPPT et la charge résistive constituent les différents éléments du système PV étudié.

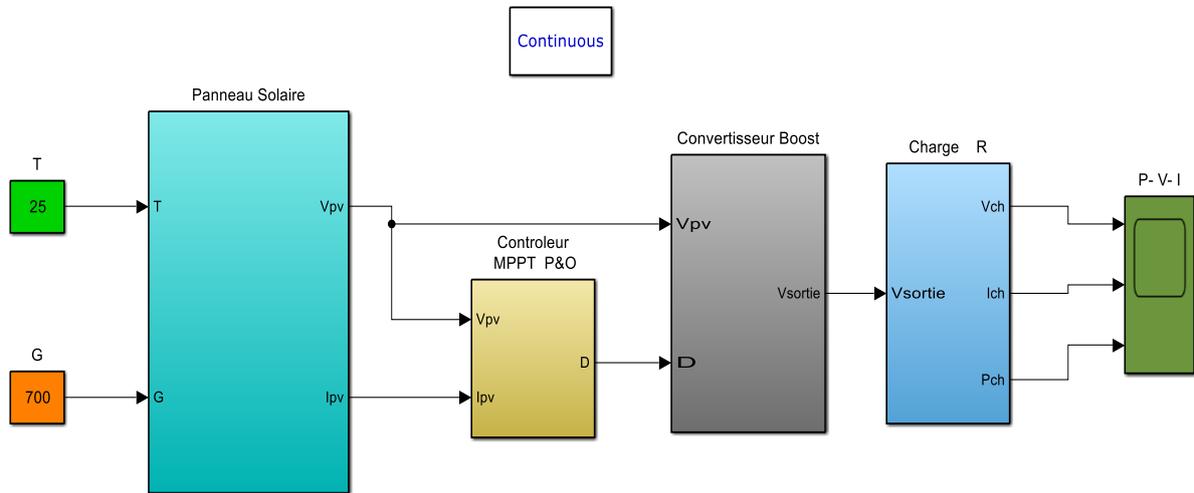


Figure IV.9 : Schéma d'un système PV avec la commande MPPT

Les résultats de simulation du système PV sans commande MPPT sont représentés sur les figures (IV.10) à (IV.12). Qui montrent respectivement l'évolution du courant, tension et puissance débités par le GPV à la charge résistive pour les trois modèles étudiées, pour les conditions climatiques :  $G=700 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ .

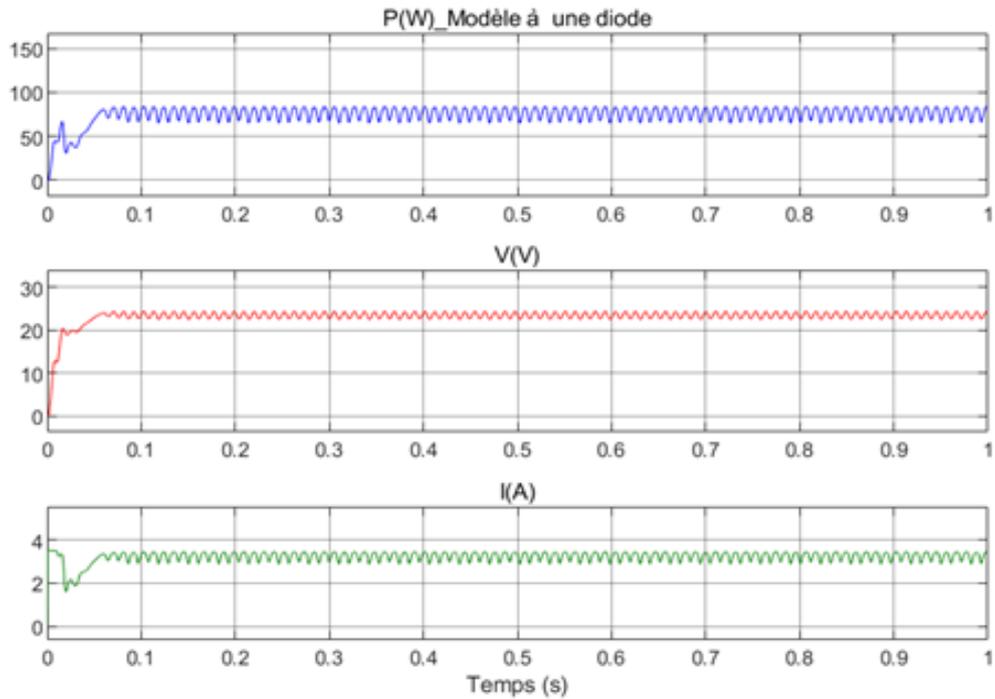


Figure IV.10 : Résultats de simulation du GPV avec commande MPPT pour le modèle à une seule diode

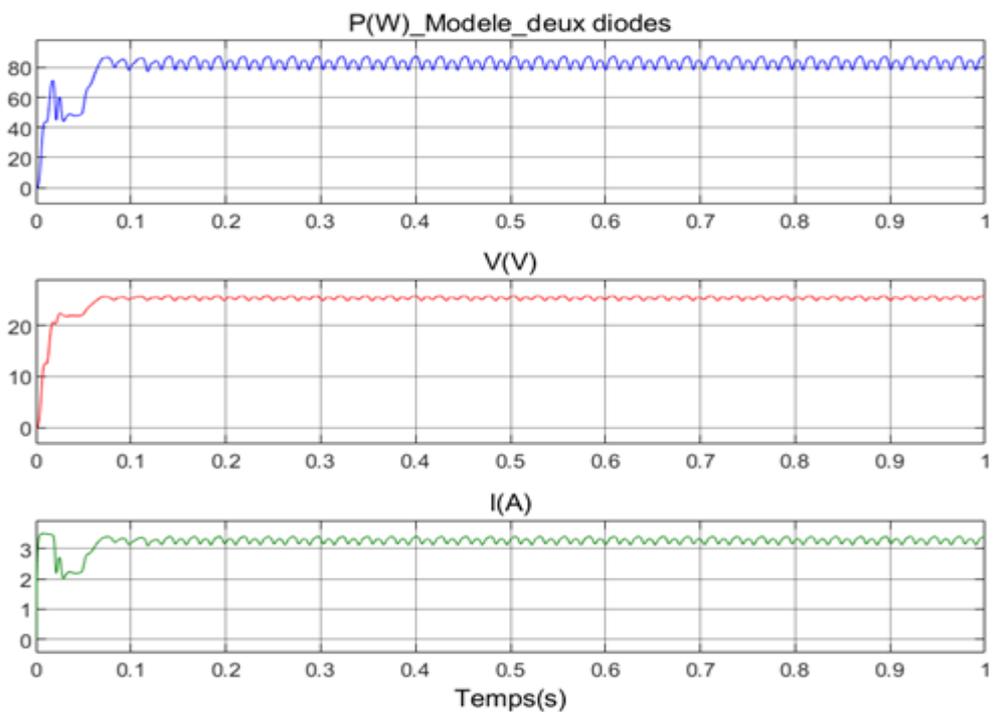


Figure IV.11 : Résultats de simulation du GPV avec commande MPPT pour le modèle à deux diodes

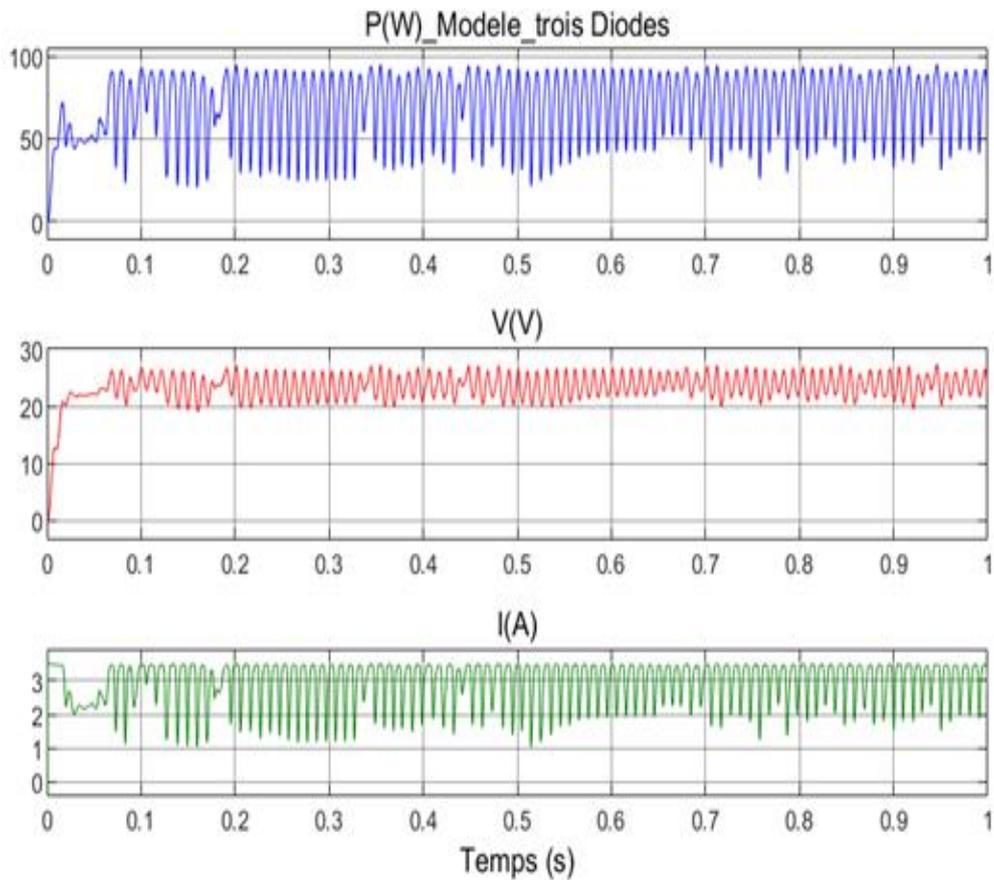


Figure IV.12 : Résultats de simulation du GPV avec commande MPPT pour le modèle à trois diodes

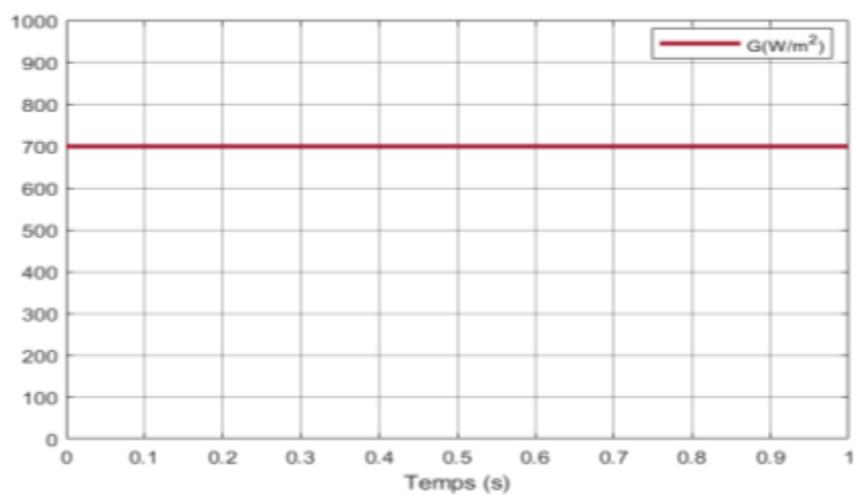


Figure IV.13 : Eclairage solaire en  $W/m^2$

**IV.5.3. Comparaison entre les trois modèles de cellules PV :**

À partir de résultats de simulations des figures : figure IV.10, figure IV.11 et figure IV.12, on présente une figure qui englobe les trois puissances délivrées par le système PV (voir figure IV.14).

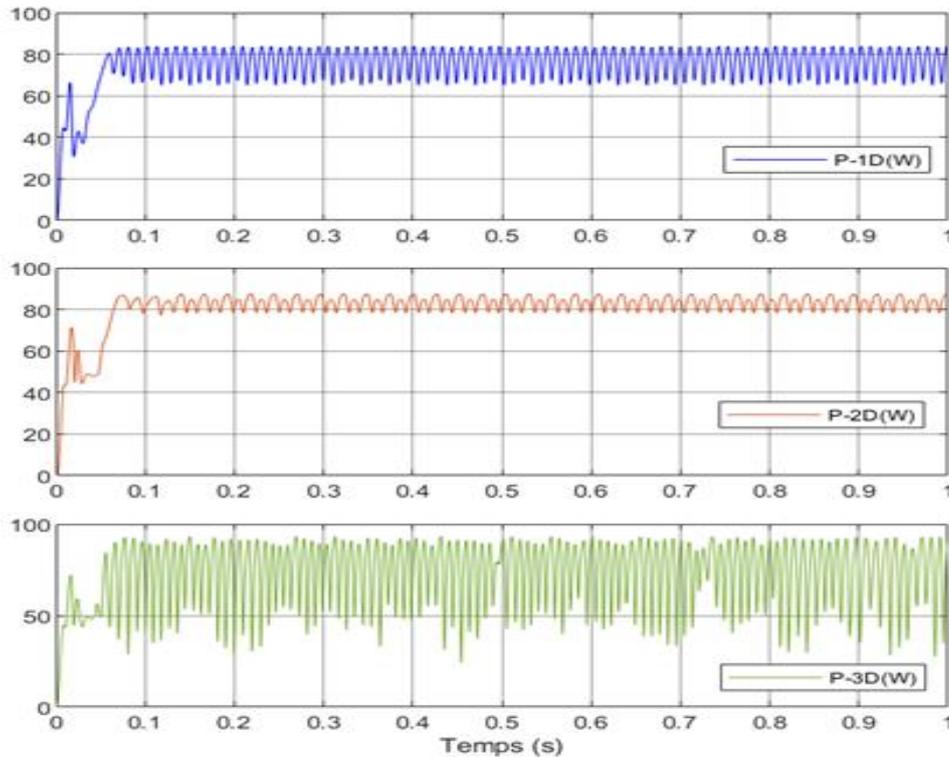


Figure IV.14 : Résultats de simulation de la puissance délivrée par le système PV basée sur les trois modèles

Cette dernière nous permet d'évaluer les performances de chacun des trois modèles proposés dans ce travail. En effet, l'examen des courbes de puissance illustrées dans la figure IV.14 montre :

- Un phénomène d'oscillation qui se produit près du point de puissance maximale.
- Des oscillations qui sont plus prononcées pour le GPV utilisant un modèle avec trois diodes.
- Le convertisseur DC-DC (hacheur survolteur) fournit une tension de sortie supérieure à celle donnée par le GPV.
- Le convertisseur DC-DC et sa commande MPPT effectuent correctement leurs rôles.
- La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge, ce qui signifie un transit maximal de la puissance délivrée par le générateur PV.

### IV.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, l'étude par la modélisation et simulation (Matlab/Simulink) de la chaîne de production PV constituée par : générateur photovoltaïque, hacheur survolteur et le contrôleur MPPT P&O est présentée. En effet, à travers les résultats obtenus par les tests de simulations, on conclut :

- La commande MPPT assure un transfert maximal de puissance.
- Les trois modèles proposés à l'étude ont des performances très proches. Toutefois, les oscillations de puissance sont très prononcées dans le système PV basée sur le modèle à trois diodes.
- Le convertisseur DC-DC constitue un élément essentiel dans les chaînes de production d'énergies renouvelables.

## **Conclusion Générale**

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

Le thème que nous avons présenté dans ce mémoire concerne l'impact des différents types de modèle de la cellule solaire sur ses caractéristiques de fonctionnement.

Le premier chapitre, a été consacré aux généralités de l'énergie photovoltaïque, où nous avons présenté un bref rappel sur le principe de fonctionnement ainsi que les paramètres qui influent sur les caractéristiques d'une cellule solaire.

Ensuite, dans le deuxième chapitre nous avons traité les modèles mathématiques les plus utilisés par les chercheurs ; à savoir : modèle à diode unique, le modèle à deux diodes et le modèle à trois diodes, ce qui nous a aidé à spécifier les paramètres qui influent le plus sur les caractéristiques de fonctionnement des générateur PV.

Dans le troisième chapitre, nous avons réalisé des tests de simulation numérique sous l'environnement Matlab/Simulink sous des conditions météorologiques variables des modèles mathématiques susnommés. En effet, les résultats obtenus nous ont permis de classier les trois modèles représentatifs de la cellule PV. Où nous avons constaté que, la cellule PV réalisé à base du modèle à une diode délivre une puissance nettement supérieure à celles des deux autres modèles. Pour les éclairements élevés et températures élevées le modèle à deux diodes et celui à trois diodes délivrent presque des puissances en sortie similaires. Pour les valeurs basses de l'éclairement et des températures élevées le modèle à trois diodes fournies une puissance supérieure à celle du modèle à deux diodes. Tandis que, pour les faibles valeurs d'éclairement et de températures, le modèle à deux diodes délivre une puissance supérieure comparativement à celui à trois diodes.

En fin, dans le dernier chapitre, nous avons présenté la modélisation et la simulation de la chaîne de production PV constituée par : générateur photovoltaïque, hacheur survolteur et le contrôleur MPPT. Où, à travers les résultats obtenus par les tests de simulations nous avons montré l'efficacité de la méthode Perturbation et Observation (P&O) dans l'extraction de la puissance maximale du GPV. Nous avons constaté que les trois modèles proposés à l'étude ont des performances très proches. Toutefois, les oscillations de puissance sont très prononcées dans le système PV basée sur le modèle à trois diodes.

## **Bibliographie**

---

## Bibliographie

---

### Bibliographie

- [1] 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.
- [2] DEBILI N. « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2015.
- [3] Touil N., Ghenbazi S., « Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque », Mémoire de Master, Université d'El-Oued, 2015.
- [4] BOUZEGANE M., GAOUAOUI F., « Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque », Mémoire de Master, Université De Tizi-Ouzou, 2018.
- [5] Saad Saoud M. « Optimisation de la gestion de l'énergie photovoltaïque utilisée dans une zone agricole », Thèse de Doctorat, Université de Annaba, 2017.
- [6] HELALI K. « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative », Mémoire de Magister, Université de Tizi-Ouzou, 2012.
- [7] Benaissa M. « Contribution a l'étude du transfert d'énergie dans les système photovoltaïque », These de Doctorat , Université de Sidi-Bel-Abbes, 2018.
- [8] Messas R., Ourchane M., « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique », Mémoire de Master, Université de Khemis Miliana, 2016.
- [9] Belbachir S. « Modélisation et simulation de l'influence de la résistance shunt sur les caractéristiques I (V) et P (V) d'une cellule photovoltaïque », Mémoire de Master , Université de Tlemcen, 2017.
- [10] Bendjellouli Z. « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire », Mémoire de Magister , Université de Bechar, 2009.
- [11] Femia N., Petrone G., Spagnuolo G., and Vitelli M., «Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method», IEEE Transactions On Power Electronics, Vol.20, No. 4, pp. 16-19, Mar. 2004.

## Bibliographie

---

[12] Khazaei J., Miao Z., Piyasinghe L., & Fan L., (2015). « Real-time digital simulation-based modeling of a single-phase single-stage PV system», *Electric Power Systems Research*, 123, 85–91.

[13] Sivakumar P., Kader A. A., Kaliavaradhan Y., & Arutchelvi M. (2015). «Analysis and enhancement of PV efficiency with incremental conductance mppt technique under non-linear loading conditions», *Renewable Energy*, 81, 543–550.

[14] Chekired F. « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2008.

[15] ESRAM T., CHAPMAN P.L., «Comparison of photovoltaic array maximum power Point tracking techniques», *IEEE Trans Energy Convers* 2007; 22(2):439–49.

[16] BENSEDDIK O., DJALOUF F., «Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque», Mémoire de Master, Université de Ouargla, 2012.

**Titre : Effet des Différents Types de Modèle sur les Caractéristiques  
de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque**

**Résumé :** Dans ce travail trois types de modèles de cellule PV sont traité ; à savoir : modèle à diode unique, le modèle à deux diodes et le modèle à trois diodes, et ce dans le but d'étudier l'impact de différents paramètres du modèle sur le comportement des cellules solaires. Après un bref rappel sur la production d'énergie photovoltaïque, on présente les modèles mathématiques susnommés les plus utilisés par les chercheurs. Ensuite, afin d'évaluer leurs performances en fonction de la variation des conditions météorologiques, on réalise des tests de simulation numérique sous l'environnement Matlab/ Simulink, ce qui nous permet de classer les trois modèles représentatifs de la cellule PV. En fin, une étude par simulation de l'extraction du maximum de puissance du système PV s'avère indispensable quant à la bonne maîtrise de ce type de chaîne de production d'énergies renouvelables.

**Mots-clés :** énergie renouvelable, cellule solaire, convertisseur DC-DC, MPP, hacheur.

**العنوان: تأثير أنواع مختلفة من النماذج على سلوك الخلايا الشمسية.**

**الملخص:**

في هذا العمل ، تم اقتراح ثلاثة أنواع من نماذج الخلايا الكهروضوئية للدراسة ؛ وهي نموذج الصمام الثنائي المفرد ، ونموذج الصمام الثنائي ، ونموذج الصمام الثلاثي ، وذلك لدراسة تأثير العوامل المختلفة للنموذج على سلوك الخلايا الشمسية. بعد تذكر موجز حول إنتاج الطاقة الكهروضوئية ، نقدم النماذج الرياضية المذكورة أعلاه الأكثر استخدامًا من قبل الباحثين. بعد ذلك ، من أجل تقييم أدائهم وفقًا للاختلاف في الظروف الجوية ، نجري اختبارات المحاكاة العددية في بيئة Matlab / Simulink ، والتي تسمح لنا بتصنيف النماذج الثلاثة التمثيلية للخلية الكهروضوئية. أخيرًا ، تعد دراسة المحاكاة لاستخراج الطاقة القصوى من النظام الكهروضوئي أمرًا ضروريًا للتحكم المناسب في هذا النوع من سلسلة إنتاج الطاقة المتجددة.

**الكلمات المفتاحية:** الطاقة المتجددة ، الخلايا الشمسية ، محول DC-DC ، MPPT ، المروحية.