

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année : 2021

Faculté: Sciences de l'Ingéniorat
Département: Electronique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER

Modélisation d'un panneau solaire photovoltaïque

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Automatique

Spécialité: Automatique et informatique industriel

Présenté par : ACHOURI Mohamed cherif

Devant le JURY

Président : *H. Kherfane*

MCA UBM Annaba

Directeur de mémoire: *B. Bensaker*

Prof. UBM Annaba

Examineur : *F. Lakel*

Prof. UBM Annaba

ملخص

الطاقة الشمسية هي مصدر طاقة يعتمد على الشمس. تتيح هذه الطاقة إمكانية تصنيع الكهرباء من الألواح الكهروضوئية أو محطات الطاقة الشمسية الحرارية ، وذلك بفضل ضوء الشمس الذي تلتقطه الألواح الشمسية.

تتعلق دراستنا بنمذجة النماذج الرياضية المختلفة المستخدمة لتمثيل الهياكل الخلية المختلفة للوحة الشمسية الكهروضوئية. في المحاكاة ، سنكون مهتمين بتأثير درجة الحرارة والإضاءة على خصائص الجهد والجهد الحالي لخلية كهروضوئية ثم لوحة كهروضوئية من نوع KC200GT.

Abstract: Solar energy is a clean and renewable energy that depends on the sunlight. The concept of this energy consists of producing electricity from the conversion of the sunlight via photovoltaic panels or thermal solar power plants, thanks to the sunlight captured by solar panels. In the first section we recall the basic concepts of the energy conversion. Different mathematical models used in the literature to represent the different cell structures of a photovoltaic solar panel are also revisited to point out the main characteristics photovoltaic cells; this was the goal of the second section.

In the simulation and the third section we will be interested in the effect of temperature and illumination on the current-voltage and power-voltage of photovoltaic cell characteristics and then of a photovoltaic panel of type KC200GT.

Keywords: Photovoltaic cell, Photovoltaic generator, Modeling, Simulation, Temperature, Irradiance.

Résumé : L'énergie solaire est une énergie propre et renouvelable qui dépend de l'éclairement solaire. Le concept de base de production de cette énergie consiste en la conversion de l'intensité de l'éclairement solaire en énergie électrique par l'intermédiaire de panneaux solaires photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques.

Notre étude concerne la modélisation de différentes structures représentant les cellules photovoltaïques et les différentes configurations d'un panneau solaire photovoltaïque.

Pour valider notre étude de modélisation nous expérimentons en quelques structures de cellules et panneaux solaires et nous présentons l'effet de la température et de l'éclairement sur leurs caractéristiques courant-tension et puissance-tension. Le panneau photovoltaïque sous simulation est de type KC200GT.

Mots-clés : Cellule photovoltaïque, Générateur photovoltaïque, Modélisation, Simulation, Température, Eclairement.

Dédicaces

Je dédie ce travail aux deux plus chères personnes au monde, qui sont mes parents, pour tout leur amour, encouragement, conseil, sacrifices, patience et confiance. Que Dieu me les garde.

A Mon cher frère, à Ma sœur, et à tous mes amis.

Remerciements

*Avant tout, je remercie **ALLAH**,
Le tout Puissant, de m'avoir donné le courage et la
volonté pour accomplir ce travail.*

*En second lieu, Je remercie vivement Monsieur le Professeur
Bensaker Bachir, pour l'honneur qu'il me fait en encadrement, et
son entière disponibilité durant toutes les étapes de mon projet.*

*Permettez-moi de vous remercier Monsieur le président **Kherfane
Hamid**, Maitre de Conférences et Monsieur le Professeur **Lakel
Fateh**, examinateur de ce projet, pour ce grand honneur qu'il me
fait, en acceptant de juger ce modeste travail.*

*En fin je remercie tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à
réaliser ce travail.*

Liste des Tableaux

Tableau 3.1. Caractéristiques électriques de la cellule dans les conditions standards.....	36
Tableau 3.2. Caractéristiques électriques du module KC200GT.....	42
Tableau 3.3. Paramètres expérimentaux v.s paramètres de référence (réels) du module solaire KC200GT pour (T = 25°C, et G = 1000w /m ²).....	45

Liste des Symboles

I_{cc} : Courant de court-circuit.

V_{co} : Tension de circuit ouvert.

E : L'énergie d'un photon.

λ : Longueur d'onde du rayonnement solaire.

h : Constante de Planck.

c : Vitesse de la lumière.

N_p : Nombre des cellules en parallèle.

N_s : Nombre des cellules en série.

V_{coN_s} : La somme des tensions en circuit ouvert de (N_s) cellules en série.

V_{coN_p} : La tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.

I_{ccN_s} : Le courant de court-circuit de (N_s) cellules en série.

I_{ccN_p} : La somme des courants de court-circuit de (N_p) cellule en parallèle.

I_D : Le courant traversant la diode.

I_p : Courant de résistance de shunt.

I : Le courant fournit.

q : La charge électrique élémentaire (charge d'électron).

K : La constante de Boltzmann.

V : La tension aux bornes de la cellule.

n : Facteur d'idéalité ($1 < n < 2$).

I_{pv} : Photo-courant [A].

I_{pv_ref} : Le courant photonique sous condition de référence.

I_{si} : Courant de saturation de la diode numéro i .

I_s : Courant de saturation de la diode [A].

V_t : Potentiel thermodynamique.

R_s : Résistance série [Ω].

R_p : Résistance shunt (ou parallèle R_{sh}) [Ω].

Liste des Symboles

n_i : Facteur d'idéalité de la diode numéro i .

E_g : Énergie de la bande interdite.

T : La température.

G : Éclairement solaire.

G_{ref} : Éclairement solaire de référence.

T_n : La température de référence.

P_{max} : Puissance maximale.

V_{mp} : Tension correspond a P_{max} .

I_{mp} : Courant correspond a P_{max} .

K_i : Coefficient de courant/température.

μ_{cc} : Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température [A/K]

Liste des Figures

Chapitre 1 : Généralités et Définitions

Figure 1.1. Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu (moyenne Annuelle).....	5
Figure 1.2. Le soleil source de l'énergie solaire.....	6
Figure 1.3. Types de rayonnements solaires reçus au sol.....	7
Figure 1.4. Spectre de rayonnement solaire.....	8
Figure 1.5. Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.....	9
Figure 1.6. Schéma d'une cellule photovoltaïque.....	10
Figure 1.7. Silicium.....	11
Figure 1.8. Cellule monocristalline.....	12
Figure 1.9. Cellule multicristalline.....	13
Figure 1.10. Cellule au silicium amorphe.....	13
Figure 1.11. Génération de la paire électron-trou.....	14
Figure 1.12. La jonction P.....	15
Figure 1.13. Système PV autonome ou isolé.....	16
Figure 1.14. Système PV hybride.....	17
Figure 1.15. Système PV raccordé au réseau.....	18
Figure 1.16. Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série.....	19
Figure 1.17. Branchement en série des panneaux PV.....	19
Figure 1.18. Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.....	20
Figure 1.19. Branchement parallèle des panneaux PV.....	21
Figure 1.20. Caractéristiques d'un générateur à $N_s N_p$ cellules identiques.....	22
Figure 1.21. Branchement série parallèle des panneaux PV.....	22

Chapitre 2 : Les modèles électriques et mathématiques des cellules solaires

Figure 2.1. Schéma équivalent du modèle à une diode	27
Figure 2.2. Schéma équivalent du Modèle à deux diodes.....	29
Figure 2.3. Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque à trois diodes	31
Figure 2.4. Exemple de configuration de plusieurs panneaux.....	32

Chapitre 3 : Simulation d'un système photovoltaïque

Figure 3.1. Schéma bloc d'une cellule sous Matlab-Simulink.....	36
Figure 3.2 Caractéristique I(V) d'une cellule (T=25°C, G=1000W/m²).....	37
Figure 3.3. Caractéristique P(V) d'une cellule (T=25°C, G=1000W/m²).....	37
Figure 3.4. Caractéristique I(V) pour différentes températures (G=1000W/m ²).....	38
Figure 3.5. Caractéristique P(V) pour différentes températures (G=1000W/m ²).....	39
Figure 3.6. Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).....	40
Figure 3.7. Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).....	40
Figure 3.8. Schéma bloc du générateur photovoltaïque sous Simulink.....	42
Figure 3.9. Modèle d'un panneau PV type KC200GT sous Matlab/Simulink.....	42
Figure 3.10. Caractéristique I(V) d'une générateur PV (T = 25°C, G = 1000W/m ²).....	43
Figure 3.11. Caractéristique P(V) d'une générateur PV (T = 25°C, G = 1000W/m ²).....	44
Figure 3.12. Caractéristique I(V) d'un générateur pour différentes températures.....	45
Figure 3.13. Caractéristique P(V) d'un générateur pour différentes températures.....	46
Figure 3.14. Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement et (T = 25°C)....	46
Figure 3.16. Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement et (T = 25°C)....	47
Figure 3.15. Influence de nombre de module série sur caractéristique I-V	48
Figure 3.17. Influence de nombre de module série sur caractéristique P-V.....	48
Figure 3.18. Influence du nombre de module parallèle sur la caractéristique I-V.....	49
Figure 3.19. Influence de nombre de module parallèle caractéristique P –V.....	49
Figure 3.20. Caractéristique I(V) pour différentes nombre de cellules en Série / parallèle...50	
Figure 3.21. Caractéristique P(V) pour différentes nombre de cellules en Série / parallèle..50	

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralités et Définitions.....	4
1.1. Introduction.....	4
1.2. Les énergies renouvelables	4
1.2.1. L'énergie solaire	5
1.2.2. Rayonnement solaire	7
1.2.3. Spectre de rayonnement	7
1.3. Les Panneaux solaires.....	8
1.4. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	10
1.5. Les différentes technologies photovoltaïques	11
1.5.1. Cellules monocristallines.....	11
1.5.2. Cellules multi-cristallines (Polycristallin).....	12
1.5.3. Cellules au silicium amorphe.....	13
1.6. Rappel sur la jonction PN.....	14
1.7. Les différents types du système PV.....	15
1.7.1. Systèmes isolé autonomes.....	15
1.7.2. Système PV hybride.....	17
1.7.3. Système PV raccordé au réseau	17
1.8. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV).....	18
1.8.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Série.....	18
1.8.2. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle :	20
1.8.3. Association hybride (en série et en parallèle).....	21
1.9. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire.....	23
1.10. Conclusion.....	24
Chapitre 2 : Les modèles électriques et mathématiques des cellules solaires	26
2.1. Introduction.....	26
2.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque	26
2.2.1. Modèle à une seule diode.....	26

Table des matières

2.2.2. Modèle à deux diodes.....	29
2.2.3. Modèle à trois diodes	31
2.3. Choix d'une configuration d'un panneau solaire	32
2.4. Conclusion.....	32
Chapitre 3 : Simulation d'un système photovoltaïque.....	35
3.1. Introduction	35
3.2. Simulation d'une cellule photovoltaïque	35
3.2.1. Influence de la température sur les caractéristiques de la cellule.....	38
3.2.2. Influence de l'éclairement sur les caractéristiques sur la cellule.....	39
3.3. Simulation d'un module photovoltaïque.....	41
3.3.1. Influence de la température sur le générateur PV	45
3.3.2. Influence de l'éclairement sur les caractéristiques du générateur PV.....	46
3.3.4. Influence de l'association des cellules sur le générateur (GPV).....	47
3.4. Conclusion.....	51
Conclusion générale.....	56

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie solaire est considérée comme la plus importante source d'énergie renouvelable et non polluante. Le soleil envoie son énergie sur la terre sous forme de rayonnement comprenant l'ultra-violet (3%) de longueur d'ondes $0.02 \mu m \leq \lambda_{uv} \leq 0.40 \mu m$, le visible (42%) de longueur d'ondes $0.40 \mu m \leq \lambda_v \leq 0.76 \mu m$, et l'infra-rouge (55%) de longueur d'ondes $0.76 \mu m \leq \lambda_{ir} \leq 400 \mu m$. Le pouvoir absorbant des corps réels n'est pas identique sur tout le spectre de rayonnement [1]. Le maximum de l'intensité d'émission solaire correspond à une longueur d'onde $\lambda_{max} = 0.5 \mu m$. La température solaire est $T_s \approx 5800 \text{ }^\circ K$. C'est le soleil qui maintient la surface terrestre à une température nécessaire à la vie [1].

L'Algérie reçoit en moyenne plus de 2200 KW/An/m² d'énergie solaire sur son sol, ce qui la classe parmi les pays les plus ensoleillés au monde [1]. Une surface plane au sol de 1 m² reçoit une énergie variant de 0 à 1,100 Watts [1]. La durée moyenne d'ensoleillement pour la région de Annaba est de 3200 heures par an [1].

La mesure du rayonnement solaire consiste à mesurer la quantité de chaleur reçue. L'instrument de mesure s'appelle un actinomètre. Les systèmes solaires photovoltaïques convertissent directement l'énergie solaire en énergie électrique (courant continu par l'intermédiaire d'un semi-conducteur), cette énergie peut être stockée dans des batteries ou exploitée directement pour diverses applications domestiques et industrielles [2].

Dans tous les cas une installation adéquate et appropriée est nécessaire. Cette installation doit comprendre plusieurs cellules photovoltaïques disposées selon la structure série-parallèle (panneau), un ou plusieurs accumulateurs (Batteries) pour conserver l'énergie, un régulateur de courant et la charge (récepteur) qui est l'installation qui utilise l'énergie ainsi obtenue [2].

L'objectif de ce travail est de présenter une revue des différents modèles mathématiques utilisés pour représenter les différentes structures de cellules d'un panneau solaire photovoltaïque et d'effectuer une étude comparative afin de mettre en évidence les avantages et les inconvénients de chaque structure du point de vue puissance fournie. Une simulation de chaque structure doit être effectuée pour comparer les résultats obtenus en

termes de puissance délivrée. Le choix de ce sujet se trouve ainsi justifié par la forte demande en énergie et les contraintes environnementales et climatiques en ce qui concerne la dégradation de l'environnement et ses conséquences par rapport aux autres sources d'énergie fossiles et non fossiles.

Pour atteindre notre objectif nous allons organiser notre travail comme suit.

Dans le premier chapitre de ce modeste mémoire nous allons présenter les généralités et les définitions qui concernent l'énergie solaire et les cellules photovoltaïques.

Dans un deuxième chapitre nous allons présenter les différents modèles électriques et mathématiques des cellules photovoltaïques qui composent un panneau photovoltaïque.

Dans un troisième et final chapitre nous allons présenter la simulation d'une cellule photovoltaïque à une seule diode et ensuite la simulation d'un module (panneau) photovoltaïque, nous intéresser à l'effet de la température et de l'éclairement sur l'énergie fournie par la cellule. Dans la deuxième simulation nous nous intéressons à l'étude de l'effet de regroupement des cellules.

Chapitre 1

Chapitre 1 : Généralités et Définitions

1.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé « Effet photovoltaïque ». Ce chapitre présente un état de l'art recensant les travaux liés aux panneaux solaires sur lesquels nous nous sommes appuyés. On débute ce chapitre par les connaissances de base de tout ce qui concerne les systèmes photovoltaïques. Nous présenterons ensuite le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque en tant que élément d'un panneau solaire pour la production de l'énergie électrique nécessaire à une utilisation considérée.

1.2. Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont toutes les énergies que la nature offre ou reconstitue plus rapidement que l'Homme ne les utilise. Elles peuvent ainsi être considérées comme inépuisables par conséquent renouvelable et propre par rapport à l'environnement et à l'échelle du temps humain. Comme exemples nous citons l'énergie éolienne (vent), l'énergie thermique, photovoltaïque, thermodynamique (soleil), l'énergie géothermique (Chaleur terrestre), l'énergie hydroélectrique, marémotrice (eau), l'énergie verte (biomasse, biocarburant). Dans tout ce qui suit nous nous intéressons uniquement à l'énergie solaire.

L'étude du gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire. Le gisement solaire est un ensemble de donnée décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu donné et au cours d'une période donnée. Son évaluation peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. Elle est utilisée pour simuler le fonctionnement probable d'un système énergétique solaire et donc d'effectuer son dimensionnement le plus exacte possible compte tenu des demandes en énergie à satisfaire. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde.

La durée d'insolation moyenne nationale dépasse les 2000 heures annuellement.

Cette valeur peut atteindre facilement les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. Ainsi, l'énergie moyenne reçue quotidiennement sur une surface inclinée à la latitude est d'environ 7kWh/m²/jour [3]. Elle est répartie comme suit :

- Au Nord : 5,6 kWh/m²/jour
- Au Sud : 7,2 kWh/m²/jour

La figure 1.1 montre l'irradiation globale moyenne annuelle reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu.

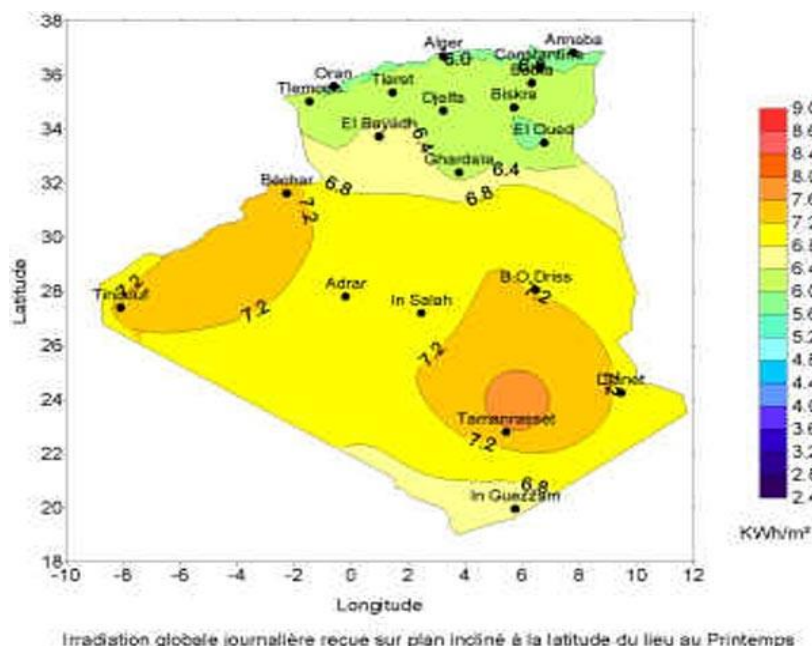


Figure 1.1. Irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu.

1.2.1. L'énergie solaire

L'énergie solaire vient de la fusion nucléaire qui se produit au centre du soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'univers essentiellement sous forme d'un rayonnement électromagnétique de photons et de rayonnement infrarouge, figure 1.2. L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de :

- La latitude, la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du soleil et donc sur l'énergie reçue au sol par unité de surface, ainsi que sur la nébulosité en fonction du climat local.

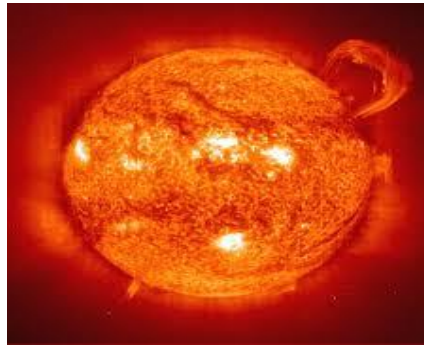


Figure 1.2. Le soleil source de l'énergie solaire.

La distance du soleil à la terre est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h [4]. Les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360 W/m^2 . Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à 1000 W/m^2 à cause de l'absorption dans l'atmosphère.

Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons [4]. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation [5]:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Où λ est la longueur d'onde du rayonnement solaire, h est la constante de Planck ($h = 6.62607004 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s}$), et c est la vitesse de la lumière ($c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$).

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Une façon plus commode d'exprimer cette énergie est donnée par:

$$E = \frac{1.26}{\lambda} \quad (1.2)$$

1.2.2. Rayonnement solaire

Notre soleil est une étoile naine qui se compose de 74% d'hydrogène, 25% d'hélium et d'une fraction d'éléments plus lourds, sa température à la surface est d'environ 5530°C [6].

Le rayonnement direct est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus, figure 1.3.

Le rayonnement diffus 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.

Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol c'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnement direct, diffus et reflété par le sol. Dans la figure 1.3 ci-dessous est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçus sur une surface terrestre [7].

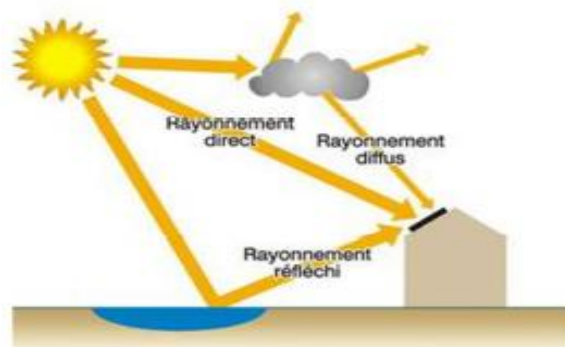


Figure 1.3. Types de rayonnements solaires reçus au sol.

1.2.3. Spectre de rayonnement

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique, figure 1.4, compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns mètre (μm). L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit [4] :

- 9% dans la bande des ultraviolets ($< 0,4 \mu m$),
- 47% dans la bande visible ($0,4 \text{ à } 0,8 \mu m$),
- 44% dans la bande des infrarouges ($> 0,8 \mu m$).

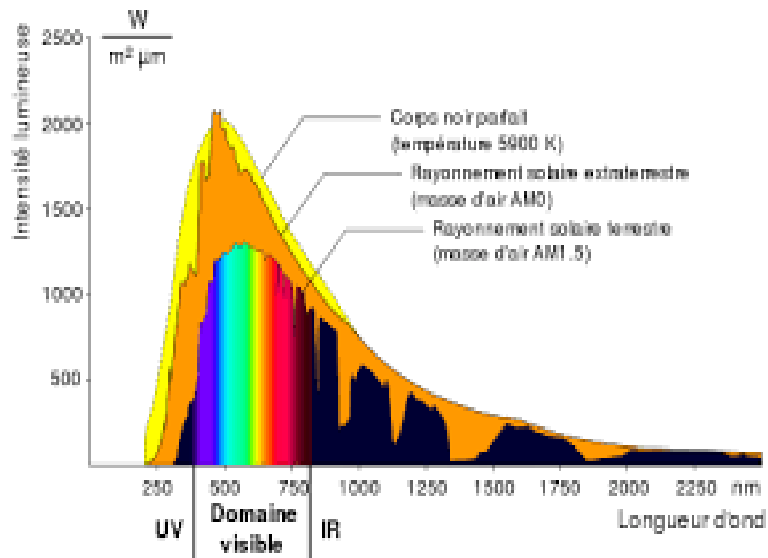


Figure 1.4. Spectre de rayonnement solaire.

1.3. Les Panneaux solaires

La cellule photovoltaïque (PV) ou encore photopile est l'élément constitutif des modules photovoltaïques. Un panneau solaire photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules en série-parallèle ou en parallèle-série afin d'obtenir la tension électrique souhaitée pour une utilisation ou une application domestique ou industrielle considérée.

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et elle transforme directement l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique. La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu'à une centaine de centimètre carrés (100 cm^2). La forme des cellules d'un panneau solaire peut être circulaire, carrée ou dérivée de ces deux géométries.

Les cellules dans un panneau solaire sont reliées entre-elles selon la structure série-parallèle ou selon la structure parallèle-série. Dans le cas où les cellules sont connectées en série, ce qui permet aux électrons générés par une cellule d'être repris par la suivante, le but ici est d'avoir une différence de potentiel variant normalement entre 6 et 24 V et un courant constant. Dans les cas où les cellules sont connectées en parallèle, la tension électrique est constante tandis que le courant est proportionnel au nombre de cellules. La figure 1.5 donne le schéma électrique de principe d'une cellule photovoltaïque à une seule diode [8].

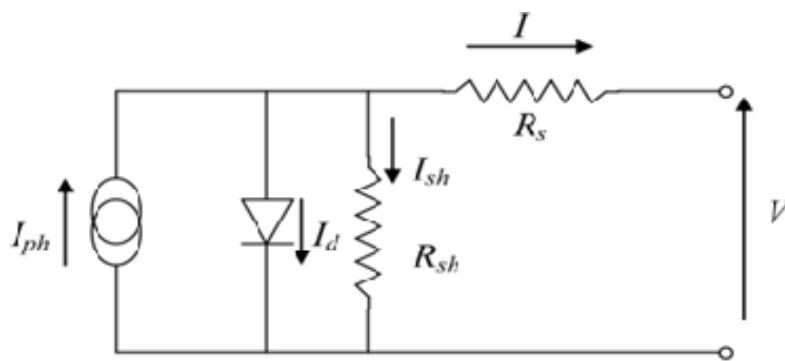


Figure 1.5. Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

Ce modèle de schéma électrique d'une cellule photovoltaïque à une seule diode fait intervenir un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident (I_{ph}), une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (une en série (R_s) où circule le courant (I) et une en parallèle (shunt) (R_{sh}) où circule le courant (I_{sh}) pour modéliser les pertes d'énergie dans la cellule [6].

L'étude physique d'une photopile (cellule) nous permet d'obtenir l'équation du courant fourni par la cellule photovoltaïque comme suit :

$$I_{cell} = I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{1.3}$$

Dans le cas où la résistance (R_{sh}) est plus élevée que la résistance (R_s) on peut négliger le courant (I_{sh}) donc l'équation (1.3) s'écrit :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d \tag{1.4}$$

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier de 0.3 V à 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [9]. La figure 1.6 illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée. Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, de 11 à 12% avec du silicium poly cristallin et enfin de 7 à 8 % pour le silicium amorphe en films minces [10]. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque [11].

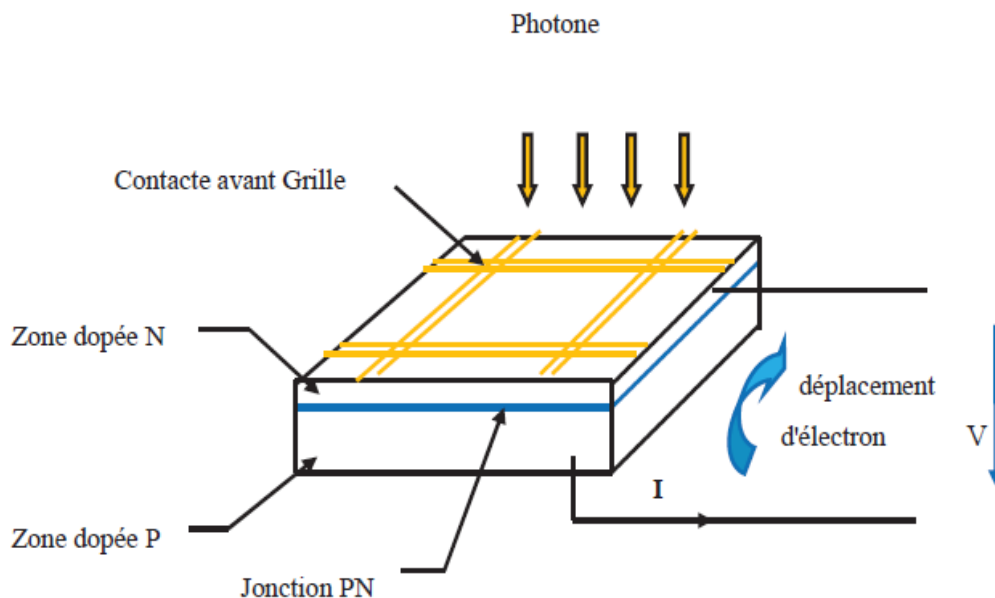


Figure 1.6. Schéma d'une cellule photovoltaïque.

1.4. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base de silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte

que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [12].

1.5. Les différentes technologies photovoltaïques

La filière la plus avancée sur le plan technologique et industrielle est la réalisation de cellules à base de silicium. Ce dernier est l'élément semi-conducteur le plus utilisé car il est peu coûteux et il se trouve en très grande quantité sur terre : il constitue 28% de l'écorce terrestre, sous forme de silice, parfaitement stable et non toxique [13]. La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. Le silicium est fabriqué à partir de sable quartzueux (dioxyde de silicium), figure 1.7 [14].



Figure 1.7. *Silicium.*

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle [7].

1.5.1. Cellules monocristallines

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Voir figure 1.8. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie ; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly-cristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau.

Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un mono- cristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche anti-reflet, pose des collecteurs), le wafer devient cellule.

Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 18% pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multicristallin [15].



Figure 1.8. *Cellule monocristalline.*

1.5.2. Cellules multi-cristallines (Polycristallin)

Les cellules multi-cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Le silicium multi-cristallin (Polycristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée, figure 1.9, à elle seule elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène. Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin, il est compris entre 10 et 15% selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles [15].

Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure Poly-cristalline. Sa durée de vie est estimée à 30 ans.



Figure 1.9. *Cellule multicristalline.*

1.5.3. Cellules au silicium amorphe

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs (de l'ordre du micron). Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière, figure 1.10 [3].



Figure 1.10. *Cellule au silicium amorphe.*

On utilise de plus en plus de matériaux organiques dans le domaine de l'optoélectronique, avec des perspectives d'électronique organique voire moléculaire, pour l'éclairage à l'aide de diodes électroluminescentes organiques (OLED : Organic Light- Emitting Diode). Bien que les optimisations des matériaux à mettre en œuvre ne soient pas les mêmes, le domaine du photovoltaïque bénéficie depuis quelques années des avancées technologiques de l'optoélectronique. Ainsi, bien que cette filière soit vraiment récente, les progrès annuels

sont spectaculaires. Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre [16].

1.6. Rappel sur la jonction PN

Le silicium, comme tous les semi-conducteurs, a une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Mais grâce à un apport énergétique suffisant, il est possible de faire passer des électrons de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), d'où la génération d'électrons libres, figure 1.11.

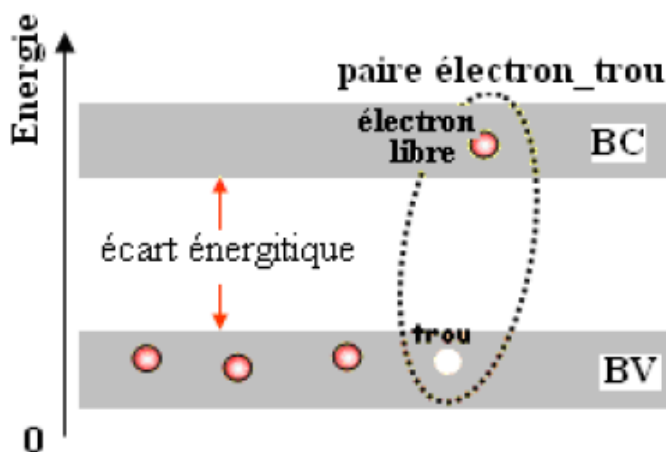


Figure 1.11. Génération de la paire électron-trou.

La présence d'électrons libres dans la bande de conduction d'un matériau n'est pas suffisante pour générer un courant : il est nécessaire de créer une différence de potentiel aux bornes du photo-générateur afin d'entraîner les charges positives d'un côté et les charges négatives de l'autre. Cette opération est possible par dopage du Silicium. Une jonction PN est créée par l'assemblage de deux barreaux de Silicium de type N et P. Le composant ainsi créé est appelé diode.

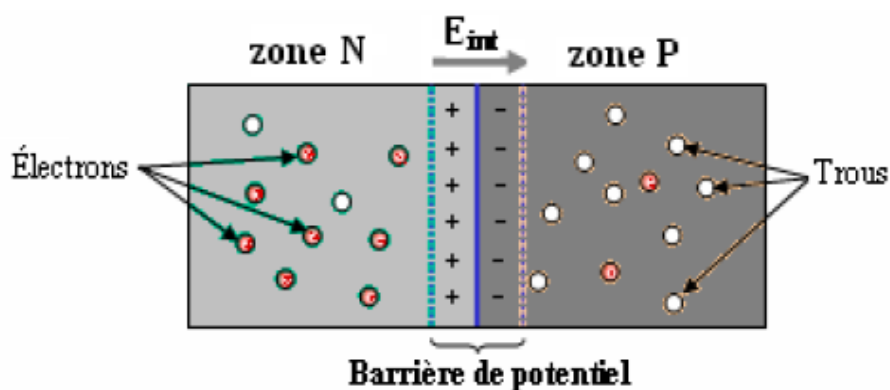


Figure 1.12. La jonction P.

1.7. Les différents types du système PV

Les systèmes PV sont utilisés selon les exigences et l'application considérée en quatre types : autonome, raccordée au réseau, hybride et couplé directement.

1.7.1. Système isolé autonome

Un système photovoltaïque isolé alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. C'est bien souvent le seul moyen de s'électrifier lorsque le courant du réseau n'est pas disponible : les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne...

Ce type de système nécessite l'utilisation de batteries pour le stockage de l'électricité et d'un contrôleur de charge pour assurer la durabilité des batteries, figure 1.13, [17].

L'énergie produite en par le courant continu (DC) sera utilisée directement en présence de l'éclairage solaire et simultanément stockée dans les batteries en cas d'excès d'énergie. Promptement, ces batteries assurent la génération d'énergie en cas du manque ou d'absence de l'éclairage solaire. Un système PV autonome typique, présenté en figure 1.13. Il est constitué d'un GPV, d'une partie d'accumulation et d'une unité de conditionnement qui contient ; un régulateur de charge, un dispositif MPPT (traqueur de point de puissance maximale) et parfois un onduleur pour convertir la puissance DC générée en puissance alternative(AC) requise par les charges AC [18].

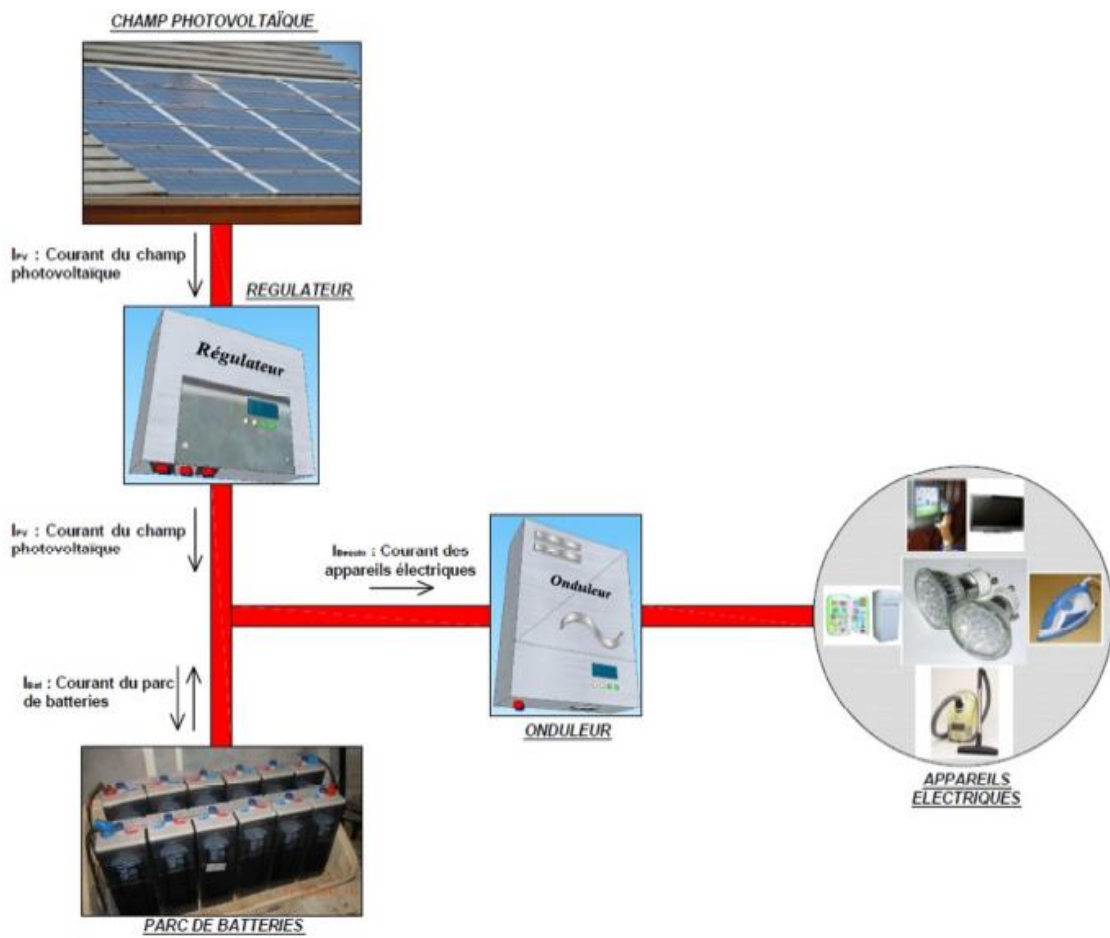


Figure 1.13. Système PV autonome ou isolé.

1.7.2. Système PV hybride

Les systèmes photovoltaïques hybrides intègrent un GPV et un autre générateur : éolienne, groupe électrogène... et même parfois le réseau public d'électricité, comme il est présenté par la figure 1.14. Le générateur associé peut être renouvelable tels qu'une turbine éolienne, turbine conventionnel, générateur diesel alimenté par des biocarburants, ou non renouvelable comme un moteur diesel ou le réseau de distribution électrique [18].

La difficulté de ce type de système est d'équilibrer les différentes sources d'énergie de façon à les optimiser toutes, étant entendu que les sources thermiques (gazoil, gaz...) et le réseau public, sont toujours les appoints de dernier recours [19].

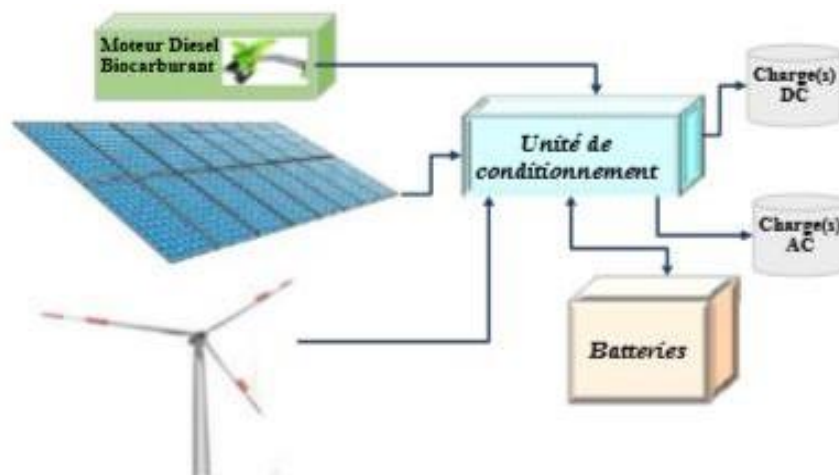


Figure 1.14. Système PV hybride.

1.7.3. Système PV raccordé au réseau

Par système photovoltaïque connecté au réseau, on entend un système couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un onduleur pour assurer la conversion de puissance DC/AC injectée au réseau et un dispositif MPPT associé à un convertisseur DC/DC déterminé selon le besoin énergétique comme il est montré par la figure 1.15. Ce type de système offre beaucoup de facilité pour le producteur/consommateur puisque c'est le réseau qui est chargé de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité.

Dans le cas des systèmes connectés au réseau, il est impératif de convertir le courant continu produit par le système photovoltaïque en un courant alternatif synchronisé avec le

réseau. Pour effectuer cette conversion, on utilise un onduleur. Le rendement typique d'un onduleur est d'environ 95%. Il en existe de différentes puissances et les onduleurs sont conçus spécifiquement pour les applications photovoltaïques. L'onduleur possède également une fonction de découplage du réseau qui empêche d'injecter du courant sur le réseau lorsque celui-ci n'est pas en fonctionnement et une fonction de protection contre les surtensions. On peut distinguer des systèmes PV raccordés aux réseaux avec et sans batteries de stockage [17].

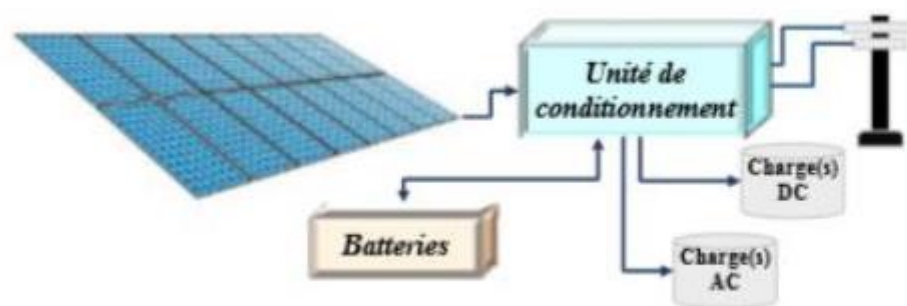


Figure 1.15. Système PV raccordé au réseau.

1.8. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est le courant qui augmentera comme représenté sur les figures suivantes.

1.8.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Série

Une association de (N_s) cellule en série, figure 1.16, permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de (N_s) cellules [16].

$$V_{coN_s} = N_s \times V_{co} \tag{1.5}$$

$$I_{cc} = I_{ccN_s} \tag{1.6}$$

Où V_{coN_s} est la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série et I_{ccN_s} est le courant de court-circuit de N_s cellules en série.

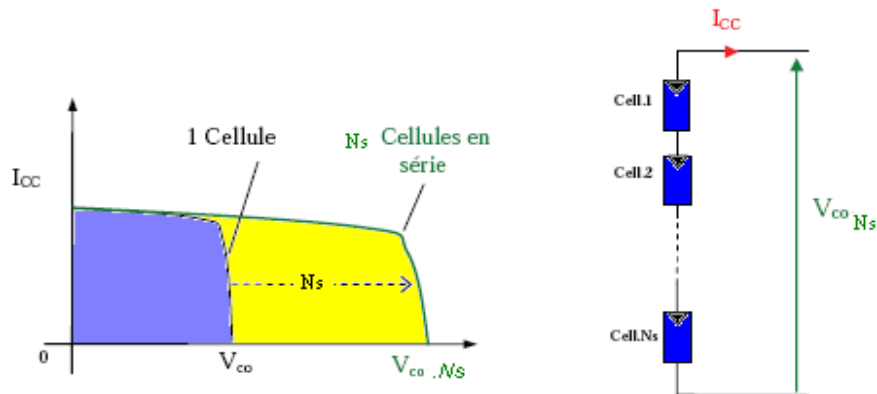


Figure 1.16. Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série.

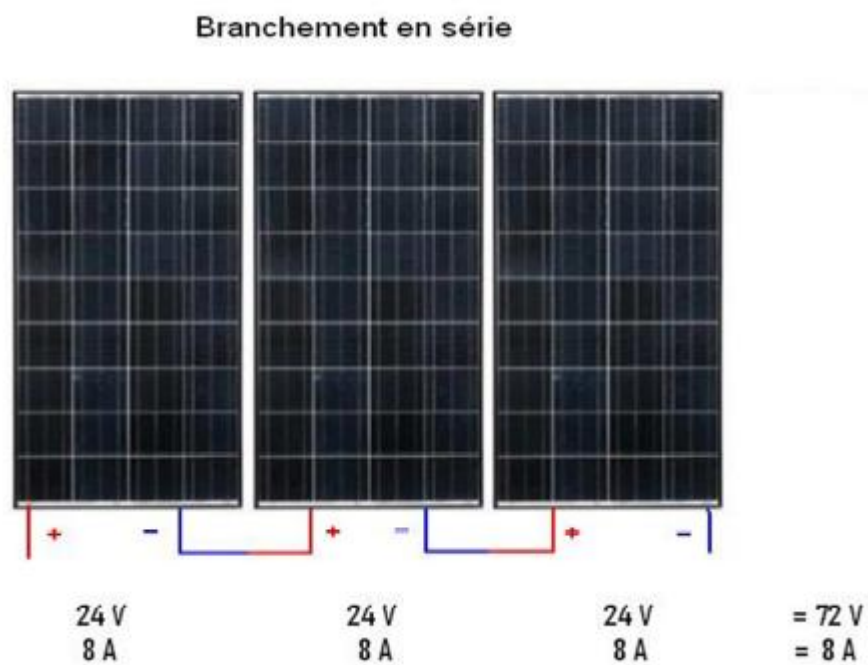


Figure 1.17. Branchement en série des panneaux PV.

1.8.2. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle :

Une association parallèle de (N_p) cellules, figure 1.18, est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [20].

$$I_{ccN_p} = N_p \times I_{cc} \tag{1.7}$$

$$V_{co} = V_{coN_p} \tag{1.8}$$

Où I_{ccN_p} est la somme des courants de court-circuit de (N_p) cellule en parallèle et V_{coN_p} est la tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.

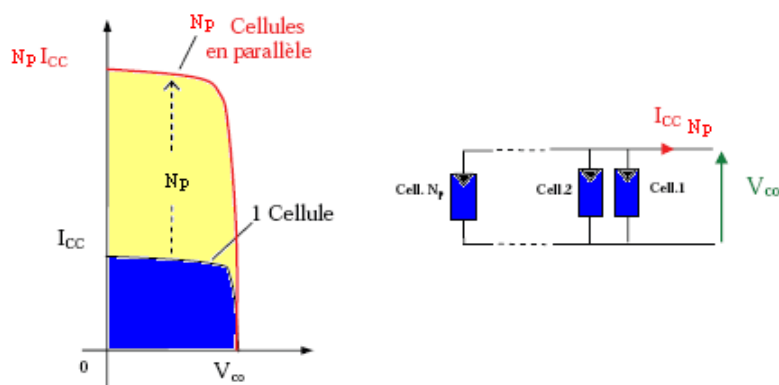


Figure 1.18. Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.

La figure 1.19 montre un exemple de branchement des panneaux solaires en parallèle.

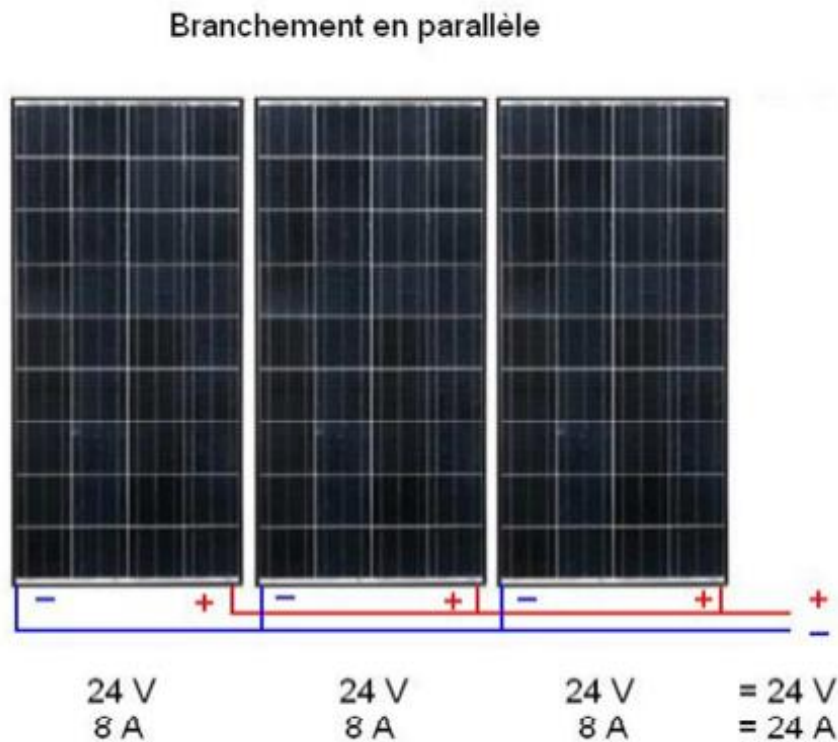


Figure 1.19. Branchement parallèle des panneaux PV.

1.8.3. Association hybride (en série et en parallèle)

La caractéristique globale courant/tension d'un générateur photovoltaïque se déduit théoriquement de la combinaison série-parallèle ou parallèle-série des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par le rapport N_s parallèlement à l'axe des tensions et du rapport N_p parallèlement à l'axe des courants. Ainsi que l'illustre la figure 1.20, N_s et N_p étant respectivement le nombre de cellules en série et en parallèle [21].

Les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations :

$$I_{cc}^t = N_p \times I_{cc} \quad (1.9)$$

$$V_{co}^t = N_s \times V_{co} \quad (1.10)$$

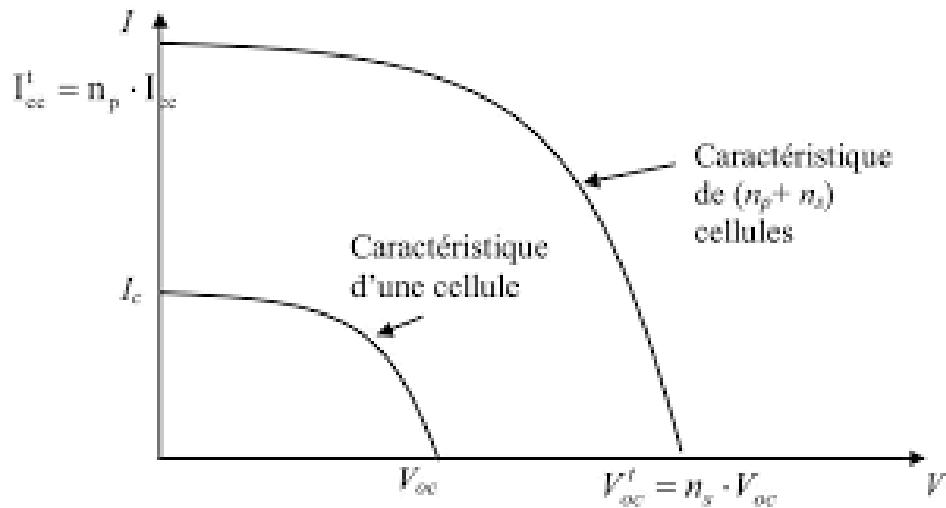


Figure 1.20. Caractéristiques d'un générateur à $N_s N_p$ cellules identiques.

La figure 1.21 montre un exemple de branchement des panneaux solaires en parallèle.

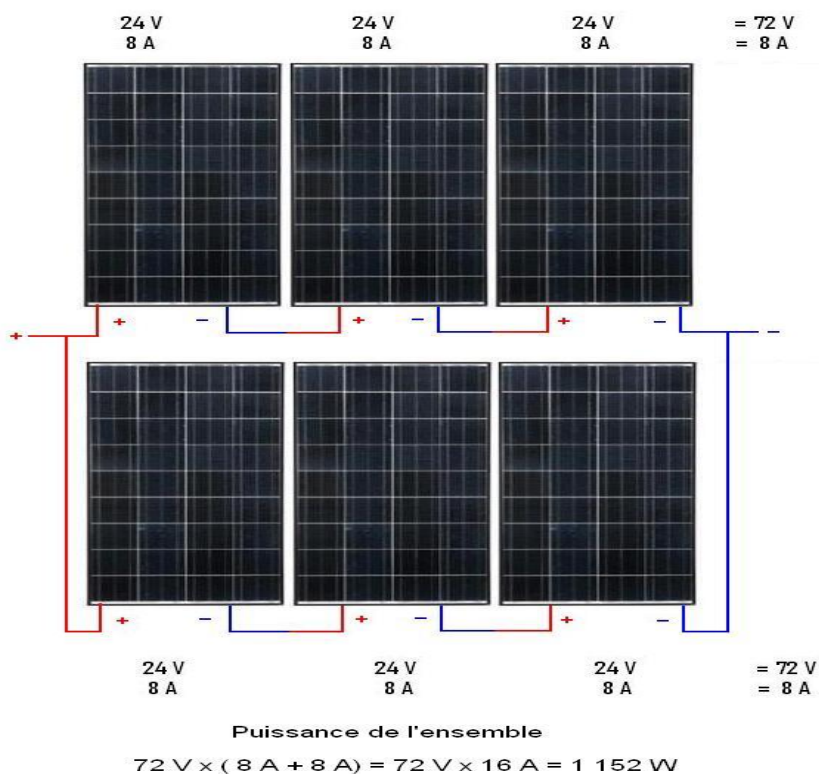


Figure 1.21. Branchement série parallèle des panneaux PV.

1.9. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire

Parmi les avantages de l'énergie solaire nous citons :

- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- Consommation gratuite des installations du système.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.

En ce qui concerne les inconvénients nous citons :

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.
- Rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%.
- Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'atténuer, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication [22].

1.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents éléments qui entrent dans la constitution d'un système photovoltaïque tels que la cellule et module PV et leurs différents branchement, les différents types de systèmes PV comme le système autonome, le système raccordé au réseau et le système hybride. Nous nous sommes intéressés, par la suite, aux différentes technologies des éléments constitutifs d'un système panneau solaire photovoltaïque, et finalement nous avons cité les avantages et les inconvénients des systèmes PV en général.

Chapitre 2

Chapitre 2 : Les modèles électriques et mathématiques des cellules solaires

2.1. Introduction

Dans ce chapitre sont présentés les différents modèles électriques et mathématiques des cellules photovoltaïques qui composent un panneau photovoltaïque. Nous présentons en premier lieu le modèle électrique et mathématique de la cellule utilisant une seule diode, ensuite le modèle à double diodes et enfin le modèle à trois diodes. Les différentes configurations de cellules utilisées dans un panneau sont présentées en second lieu.

2.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est obtenue par la conversion directe de la lumière du soleil (énergie solaire) en électricité (énergie électrique) grâce à des cellules solaires. Un système photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules photovoltaïques (panneau photovoltaïque) et d'un ensemble de composants électriques (convertisseur statique, batterie de stockage avec son régulateur de charge, câblage et protection) qui permettent d'adapter la puissance électrique produite aux spécifications des récepteurs.

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques ont été développés dans la littérature pour représenter un comportement de la cellule, fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leur réalisation. Trois types de modèles existent dans la littérature [23].

2.2.1. Modèle à une seule diode

Le modèle électrique d'une cellule photovoltaïque à une seule diode est présenté en figure (2.1). Ce modèle comprend une source de courant I_{PV} , une diode dans laquelle circule un

courant I_{D1} , une résistance en parallèle avec la diode dans laquelle circule un courant I_P et enfin une résistance en série avec l'ensemble dans laquelle circule le courant de sortie I qui représente le courant fourni par la cellule sous la tension V . Physiquement, la résistance en parallèle sert à la modélisation des pertes autour de la jonction dues aux impuretés et les pertes sur les bords et coins de la cellule [24], [25].

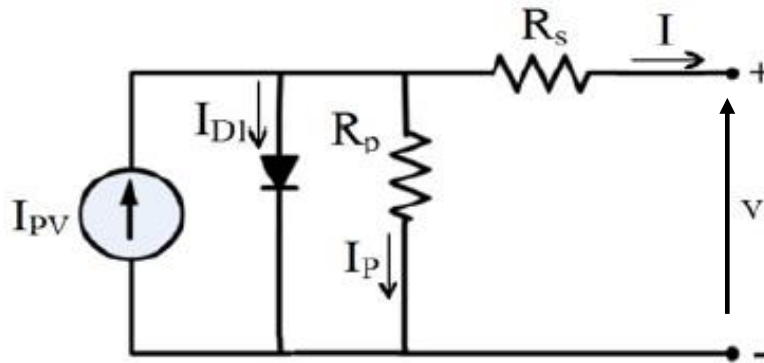


Figure 2.1. Schéma équivalent du modèle à une diode [26].

Ce modèle électrique est le plus utilisé dans de nombreuses recherches grâce à son comportement qui est le plus proche du comportement de la cellule PV réelle, et sa simplicité. En général, le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante (Loi des nœuds de Kirchhoff) [24], [25] :

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_P \tag{2.1}$$

Avec $I_{ph} = I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right) + I_s \left(\exp \frac{I_{sc} R_s}{n \cdot V_t} - 1 \right)$,

$$I_{D1} = I_s \left[\exp \left(\frac{V + I R_s}{n \cdot V_t} \right) - 1 \right], \text{ et } I_P = \frac{V + I R_s}{R_p} .$$

Où I_s est le courant de saturation de la diode (courant d'obscurité), I_{sc} est le courant de court-circuit, $V_t = \frac{K \cdot T}{q}$ est le potentiel thermodynamique, n représente le facteur d'idéalité de la diode (coefficient dépendant du matériau de la cellule PV), en général $1 < n < 2$, q est la charge de l'électron ($q = 1.602 \cdot 10^{-19} C$), K est la constante de Boltzmann

($K = 1.381 \cdot 10^{-23} J/K$) et T représente la température de la jonction des cellules PV donnée en degré Kelvin.

En remplaçant les différents courants par leur valeur dans la relation (2.1) on obtient l'expression du courant fourni par la cellule photovoltaïque représentée par le schéma de la figure (2.1) qui est la suivante :

$$I = I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right) + I_s \left(\exp \frac{I_{sc} R_s}{n \cdot V_t} - 1 \right) - I_s \left[\exp \left(\frac{V + R_s \cdot I}{n \cdot V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (2.2)$$

Avec $I_s = I_{sc} \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 \exp \left[\frac{E_g}{nK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right]$ comme courant de saturation de la diode.

Où n est le facteur d'idéalité de la jonction PN, E_g est l'énergie du gap [EV] de la jonction, et T_n est la température de référence des cellules PV [°K].

L'expression de la tension fourni par la cellule photovoltaïque, représentée par le schéma de la figure 2.1, est la suivante (loi des mailles) :

$$V + R_s \cdot I - R_p \cdot I_p = 0$$

Donc
$$V = R_p I_p - R_s \cdot I \quad (2.3)$$

La force photo-électromotrice (f.p.e.m) E est déterminée pour la condition $E = V$ pour $I = 0$, donc en utilisant la relation (2.2) pour $I = 0$ on peut déterminer l'expression de la tension fourni par la cellule en résolvant la relation suivante:

$$V + R_p I_s \left[\exp \left(\frac{V}{n \cdot V_t} \right) - 1 \right] = R_p I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right) + R_p I_s \left(\exp \frac{I_{sc} R_s}{n \cdot V_t} - 1 \right) \quad (2.4)$$

En général, un générateur photovoltaïque est composé de plusieurs cellules PV connectées en série et en parallèle. De plus, l'équation caractéristique « courant-tension » du circuit équivalent pour un panneau photovoltaïque, disposant d'un nombre de cellules en parallèles N_p et d'un nombre de cellules en séries N_s , peut être définie à l'aide des deux équations suivantes :

$$I^p = N_p \cdot I \quad \text{et} \quad V^s = N_s \cdot V \quad (2.5)$$

Donc l'expression du courant d'un panneau solaire comportant N_p cellules en parallèle et N_s cellules en série est alors:

$$I^p = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_s \left[\exp\left(\frac{V + R_s \cdot I^p}{\frac{N_s + N_p}{n \cdot V_t}}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I^p}{R_p} \quad (2.6)$$

L'expression de la tension fournie par le panneau solaire correspondant est obtenue par la condition $I^p = 0$ dans la relation (2.6)

2.2.2. Modèle à deux diodes

Actuellement le modèle à deux diodes est le plus proche du comportement réel de la cellule solaire, du fait qu'il tient compte du mécanisme de transport des charges électriques à l'intérieur de la cellule (deux diodes) [27], [28]. Ce modèle est composé de deux exponentielles. La première tient compte du phénomène de diffusion, tandis que la deuxième correspond au phénomène de recombinaison, dans la région de déplétion des diodes. Dans ces conditions, le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent à deux diodes figure 2.2 ci-dessous.

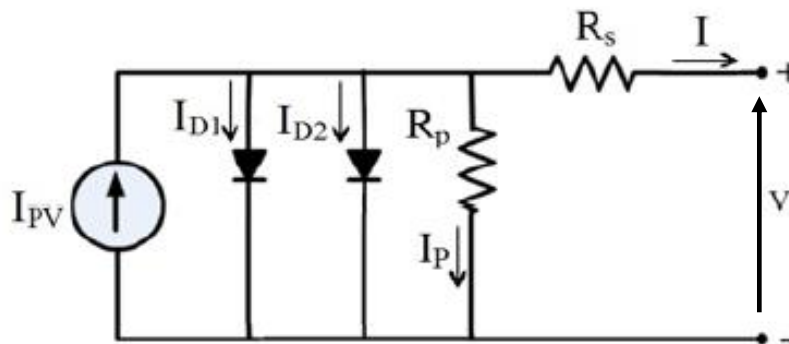


Figure 2.2. Schéma équivalent du Modèle à deux diodes [26].

Comme on peut le voir sur cette figure 2.2, le schéma équivalent est composé d'un circuit électrique comprenant deux diodes en parallèle dans lesquelles circulent des courants I_{D1} et I_{D2} , de facteurs d'idéalités respectivement $n1$ et $n2$, une source de courant produisant un photo-courant I_{PV} qui dépend de l'éclairement solaire [29]. La résistance série R_s prend compte de la résistivité du matériau semi-conducteur de fabrication des diodes. La

résistance parallèle (shunt) ou de court-circuit R_p traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé éventuellement par un défaut.

Les résistances R_s et R_p tiennent compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule photovoltaïque. Plus la valeur de R_p est grande, moins il y a de courants de fuite. En revanche, plus la valeur de R_s est petite, moins il y a de pertes résistives à l'interface entre le métal et le semi-conducteur [30].

A partir de la figure 2.2, il est clair d'observer que le courant de sortie de la cellule solaire est décrit par l'équation ci-dessous :

$$I = I_{PV} - I_{D1} - I_{D2} - I_p \quad (2.6)$$

Où I_{D1} et I_{D2} sont les courants qui traversent la première et de la deuxième diode respectivement et dont les expressions sont les suivantes [31] :

$$I_{D1} = I_{s1} \left[\exp \left(\frac{V+I.R_s}{n_1.V_t} \right) - 1 \right] \quad \text{et} \quad I_{D2} = I_{s2} \left[\exp \left(\frac{V+I.R_s}{n_2.V_t} \right) - 1 \right] \quad (2.7)$$

Où I_{s1} et I_{s2} représentent, respectivement, les courants de saturation de la première et de la deuxième diode.

Le courant prédit par le circuit présenté par la figure 2.2 peut être exprimé comme suit :

$$I = I_{PV} - I_{s1} \left[\exp \left(\frac{V+I.R_s}{n_1.V_t} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(\frac{V+I.R_s}{n_2.V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V+I.R_s}{R_p} \quad (2.8)$$

Ou en remplaçant V_t par sa valeur :

$$I = I_{PV} - I_{s1} \left[\exp \left(\frac{q(V+I.R_s)}{n_1.K.T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(\frac{q(V+I.R_s)}{n_2.K.T} \right) - 1 \right] - \frac{V+I.R_s}{R_p} \quad (2.9)$$

Le courant photonique lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de référence est donné par [32], [33], [34]:

$$I_{PV} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{PV_{ref}} - \mu_{cc}(T - T_n)) \quad (2.10)$$

Où I_{PV_ref} est le courant photonique sous condition de référence [A], μ_{cc} est le coefficient de sensibilité de l'intensité à la température [A/K], G est l'éclairement absorbé par la cellule, et G_{ref} est l'éclairement de référence [W/m^2].

Bien que le modèle à double diode présente une plus grande précision que le modèle à une seule diode, il nécessite malheureusement des efforts de calcul mathématique considérables.

De la même manière l'expression de la tension V délivrée par la cellule à deux diodes est obtenue par la condition $I = 0$ de la relation (2.9).

2.2.3. Modèle à trois diodes

De la même manière que pour le modèle à deux diodes, le modèle électrique de la cellule photovoltaïque à trois diodes est donné en figure 2.3. Ce modèle électrique a été accepté pour analyser avec précision les performances des cellules photovoltaïques [26], [34].

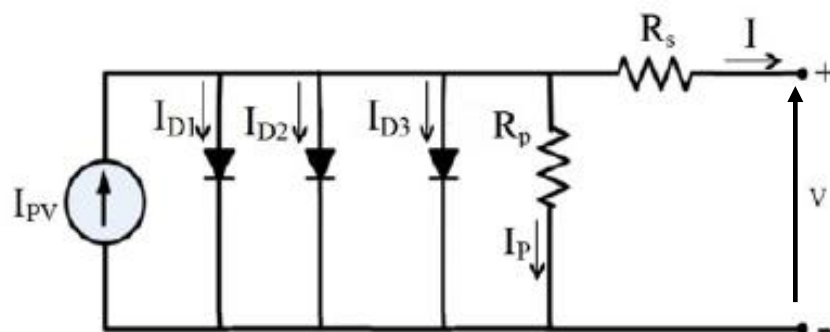


Figure 2.3. Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque à trois diodes [26].

De la même manière que précédemment, à partir de la figure (2.3), le courant de sortie de la cellule photovoltaïque à trois diodes se met sous la forme mathématique suivante (Loi des nœuds) :

$$I = I_{PV} - I_{D1} - I_{D2} - I_{D3} - I_P \tag{2.11}$$

$$\text{Avec } I_{Di} = I_{si} \left[\exp\left(\frac{V + I.R_s}{n_i.V_t}\right) - 1 \right], \quad i = 1, 2, 3 \tag{2.12}$$

Où I_{si} représente le courant de saturation de la diode numéro i .

Le courant délivré par la cellule à trois diodes peut être exprimé comme suit :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{n_1 \cdot V_t} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{n_2 \cdot V_t} \right) - 1 \right] +$$

$$- I_{s3} \left[\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{n_3 \cdot V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (2.13)$$

2.3. Choix d'une configuration d'un panneau solaire

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules PV élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des performances électriques désirées, tels que la puissance, le courant de court-circuit (I_{cc}) et la tension en circuit ouvert (V_{oc}).

Pour obtenir des puissances supérieures, il est donc nécessaire d'associer en série et/ou en parallèle, plusieurs modules pour former un panneau photovoltaïque et aussi l'association de plusieurs panneaux en série et/ou en parallèle forme un champ PV ou un générateur PV. La figure 2.4 suivante donne un exemple.

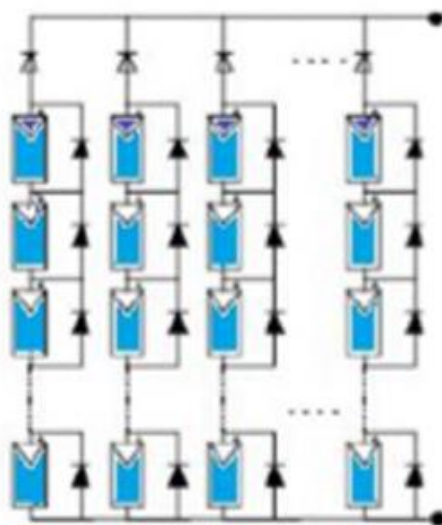


Figure 2.4. Exemple de configuration de plusieurs panneaux.

2.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques électriques fondamentales de quelques cellules photovoltaïques ainsi que les circuits électriques équivalents. Les modèles mathématiques de ces différentes cellules ont été présentés et discutés pour mettre en évidence les critères pour choisir le modèle qui convient à une utilisation donnée.

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet a été élaborée à partir de modèles de la littérature est une étape essentielle qui permet d'introduire un certain nombre de modèles. Les résultats de cette modélisation seront appliqués dans le chapitre suivant pour étudier, en simulation, le comportement d'une cellule photovoltaïque et aussi l'influence de la température et de l'éclairement sur l'énergie produite par la cellule PV.

Chapitre 3

Chapitre 3 : Simulation d'un système photovoltaïque

3.1. Introduction

Dans cette partie de notre mémoire de Master nous allons effectuer des expérimentations en simulation pour montrer la validité des modèles électriques et mathématiques de quelques cellules photovoltaïques et éventuellement d'un panneau photovoltaïque.

Nous allons tout d'abord présenter la simulation d'une cellule photovoltaïque à une seule diode et ensuite la simulation d'un module (panneau) photovoltaïque composé de 54 cellules connectées en série de type KC200GT dans les conditions standard. Dans la première simulation, nous allons nous intéresser à l'effet de la température et de l'éclairement sur l'énergie fournie par la cellule. Dans la deuxième simulation nous nous intéressons à l'étude de l'effet de regroupement des cellules (série-parallèle, parallèle-série) sur l'énergie produite par le panneau considéré. L'outil informatique Matlab-Simulink est utilisé pour l'implémentation des différentes simulations indispensables à l'étude du comportement de la cellule et du générateur PV.

3.2. Simulation d'une cellule photovoltaïque

Nous considérons ici une cellule photovoltaïque à une seule diode. Les caractéristiques électriques de cette cellule, dans les conditions standards sont données dans le tableau 3.1.

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est d'une intensité rayonnante de 1000 w/m^2 et une température de 25°C .

La figure 3.1, représente le schéma bloc de simulation de la cellule sous l'environnement Matlab-Simulink.

Eclairement standard	$G = 1000 \text{ W/m}^2$
Température standard	$T = 25^\circ\text{C}$
Facteur d'idéalité n	$n = 1.5$
Energie de la bande interdite	$E_g \approx 1.1\text{eV}$
Courant de court-circuit I_{cc}	7.34 A
Tension à circuit ouvert V_{oc}	0.6V

Tableau 3.1. Caractéristique électrique de la cellule dans les conditions standards.

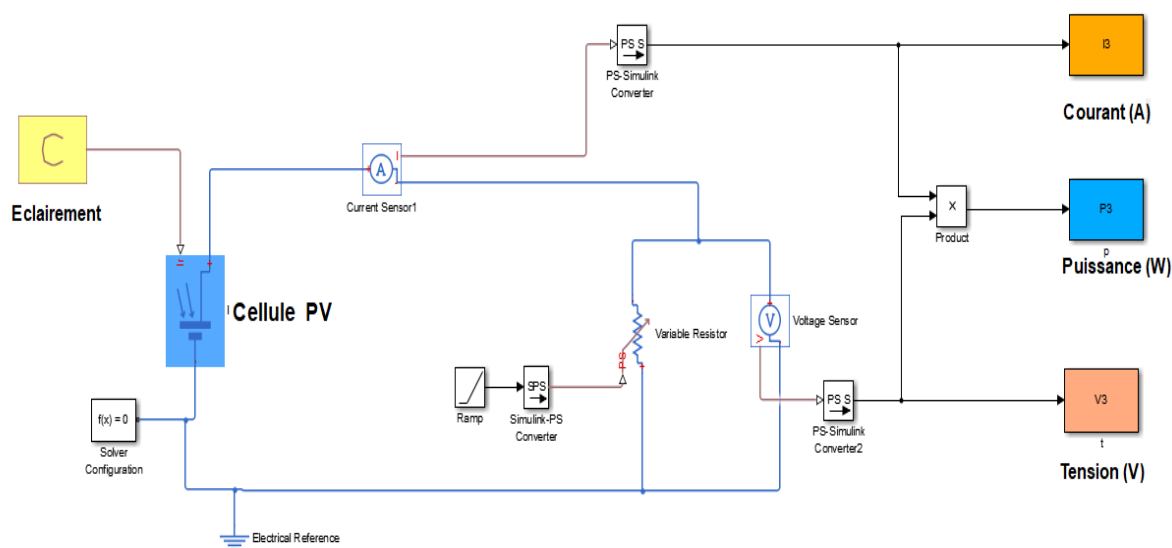


Figure 3.1. Schéma bloc d'une cellule sous Matlab-Simulink

La figure 3.2 et la figure 3.3 présentent respectivement les caractéristiques courant-tension et puissance-tension de la cellule considérée dans les conditions standards qui correspondent à une température de $T=25^\circ\text{C}$. et un éclairement de $G=1000\text{W/m}^2$.

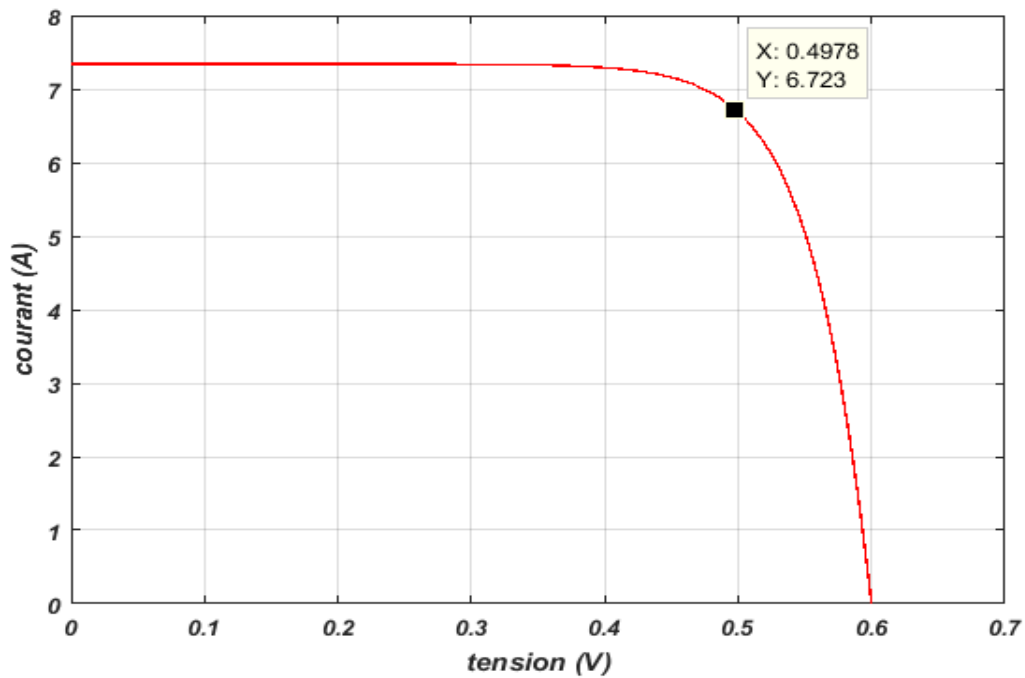


Figure 3.2 Caractéristique $I(V)$ d'une cellule ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

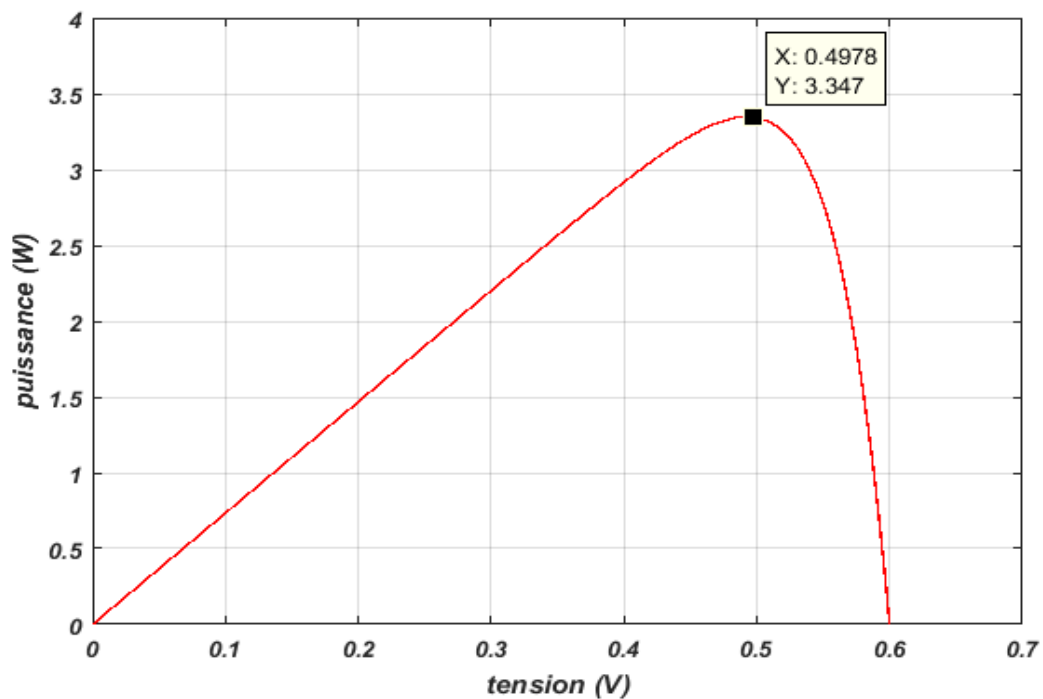


Figure 3.3. Caractéristique $P(V)$ d'une cellule ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

On peut voir sur la figure 3.3 que la puissance augmente avec l'augmentation de la tension jusqu'à atteindre la valeur maximale $P_{max} = 3.347\text{W}$ pour une tension de 0.5 V, en suite elle décroît. Le maximum de puissance correspond alors à un courant de 0.623 A, figure 3.2.

Cette même figure montre que le courant de court-circuit est égale 7.34A et la tension de circuit ouvert est de 0.6 V.

On observe que la caractéristique courant-tension $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement.

3.2.1. Influence de la température sur les caractéristiques de la cellule

Les figures 3.4 et 3.5 représentent la caractéristique courant-tension ($I-V$) et puissance-tension ($P-V$) d'une cellule PV pour différent température pour un éclairement constant ($G=1000W/m^2$).

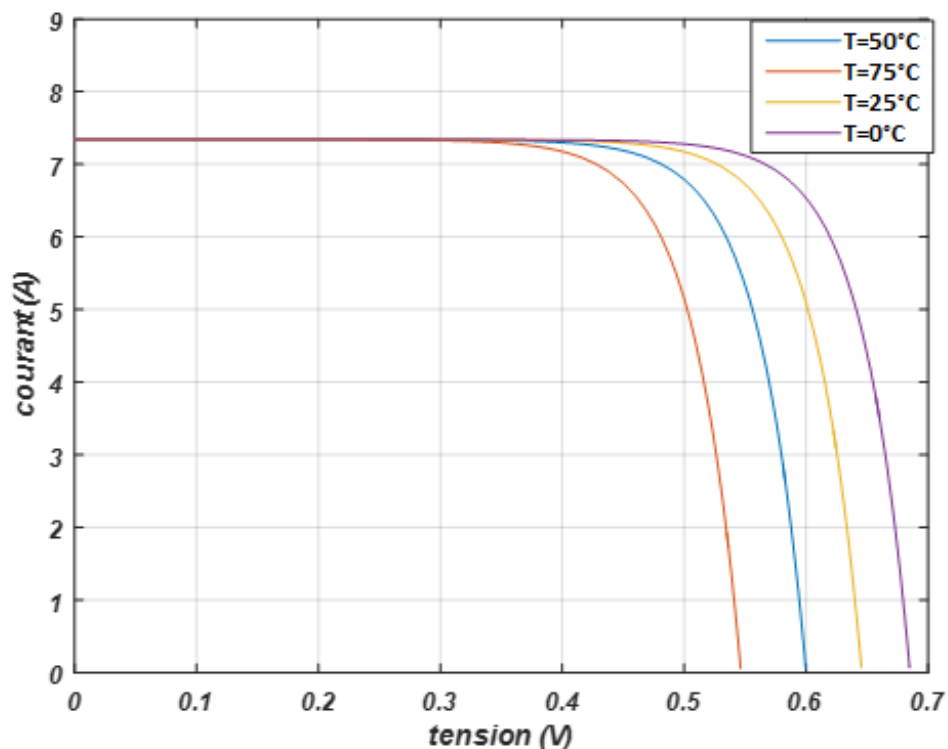


Figure 3.4. Caractéristique $I(V)$ pour différentes températures ($G=1000W/m^2$).

La tension de circuit ouvert diminuée avec l'augmentation de la température, par contre le courant de court-circuit augmente légèrement avec l'augmentation de la température et la puissance maximale diminue. On constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert.

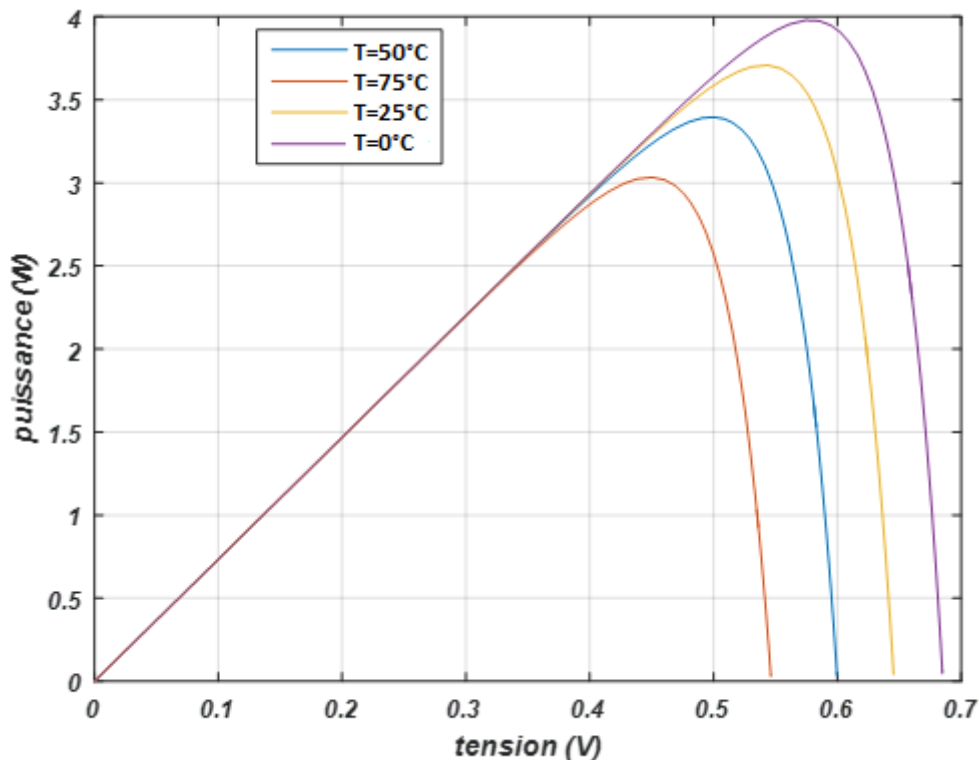


Figure 3.5. Caractéristique $P(V)$ pour différentes températures ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

3.2.2. Influence de l'éclairement sur les caractéristiques sur la cellule

Les figures 3.6 et 3.7 représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'une cellule en fonction de la variation de l'éclairement ($G=400$; 600 ; 800 ; $1000\text{ W}/\text{m}^2$) à une température constante ($T=25^\circ\text{C}$).

Le courant de court-circuit est directement proportionnel au rayonnement incident. Par contre, la tension de circuit ouvert augmente rapidement pour de faibles niveaux d'éclairement, puis lentement pour des niveaux plus élevés, figure 3.6.

La figure 3.7 illustre la variation de la puissance délivrée par la cellule en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique puissance-tension $P(V)$. On voit aussi que la puissance maximale est obtenue pour un éclairement maximum correspondant à $G=1000\text{ W}/\text{m}^2$.

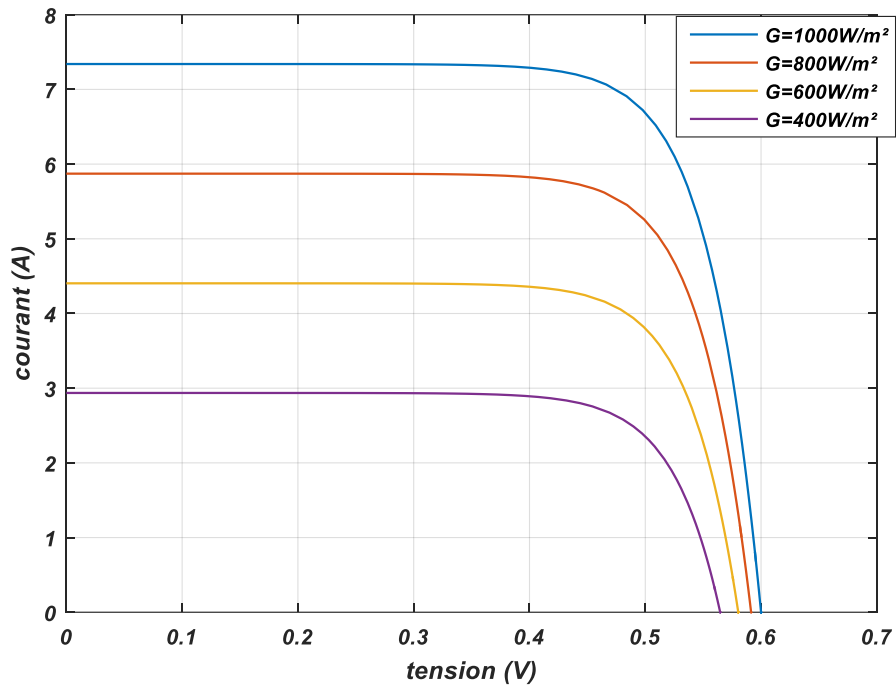


Figure 3.6. Caractéristique $I(V)$ pour différents niveaux d'éclairement ($T=25^{\circ}\text{C}$).

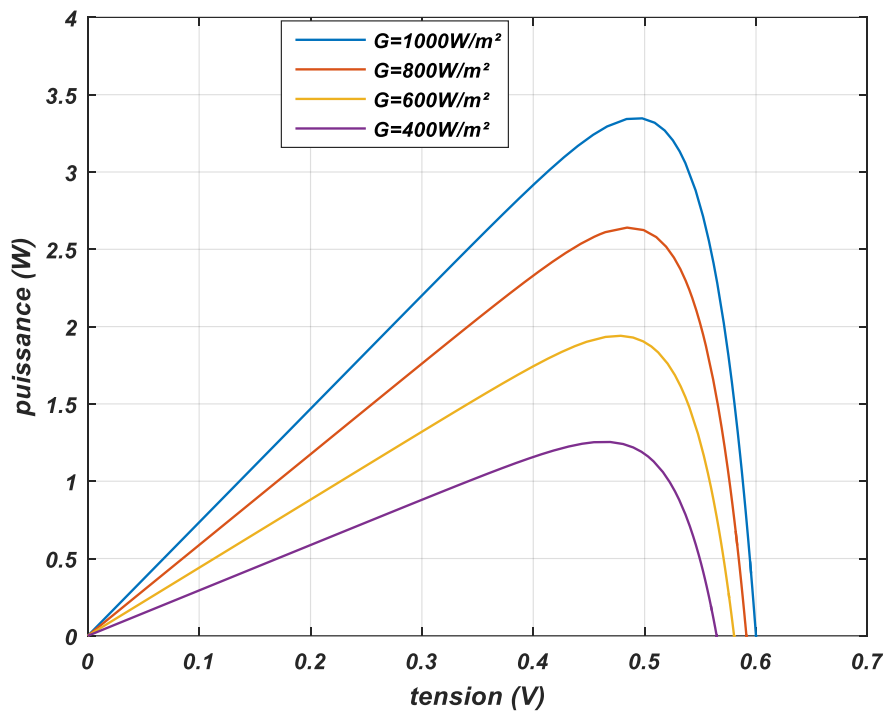


Figure 3.7. Caractéristique $P(V)$ pour différents niveaux d'éclairement ($T=25^{\circ}\text{C}$).

3.3. Simulation d'un module photovoltaïque

Dans cette partie de la simulation nous considérons un générateur photovoltaïque de type KC200GT, composé de 54 cellules connectées en série dans les conditions standards de température $T = 25^{\circ}\text{C}$ et d'éclairement, $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$. Les caractéristiques techniques du générateur KC200GT sont données dans le tableau 3.2. La figure 3.8 représente le schéma bloc du générateur photovoltaïque sous Simulink. Quatre paramètres sont à considérer. Deux variables d'entrées qui sont, l'éclairement dans le plan des panneaux G (W/m^2), la température de jonction des cellules T ($^{\circ}\text{C}$) et deux variables de sortie, qui sont le courant et la tension.

Les paramètres	Les valeurs
Type	KC200GT
Tension a circuit ouvert V_{oc}	32.9V
Courant de court-circuit I_{cc}	8.21A
Tension de puissance maximale V_{mp}	26.4V
Courant de puissance maximale I_{mp}	7.58A
Puissance maximale P_{max}	200W
Nombre de cellule en série N_s	54
Nombre de cellule en parallèle N_p	1
Energie de la bande interdite E_g	1.1eV
Coefficient de courant/température K_i	0.0032mA/ $^{\circ}\text{C}$

Tableau 3.2. Caractéristiques électriques du module KC200GT [35].

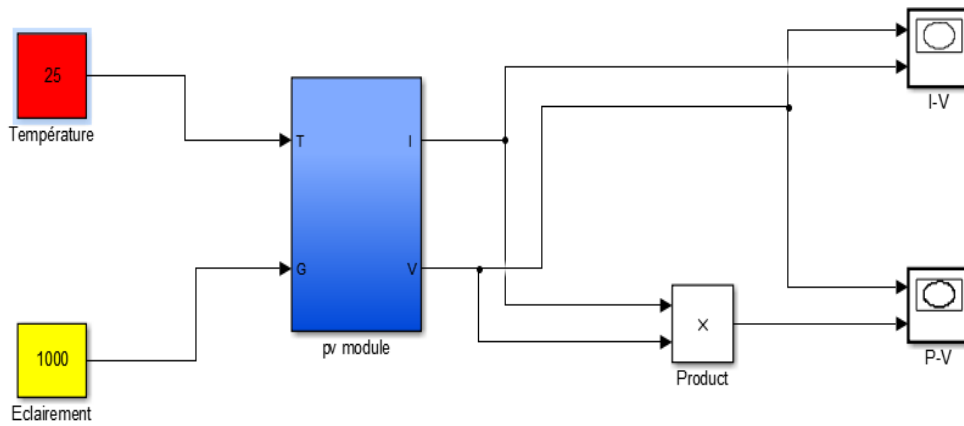


Figure 3.8. Schéma bloc du générateur photovoltaïque sous Simulink.

La figure 3.9 montre le modèle d'un panneau PV type KC200GT sous Matlab/Simulink utilisé pour simuler les variations des grandeurs électriques d'un module PV en fonction des variations climatiques.

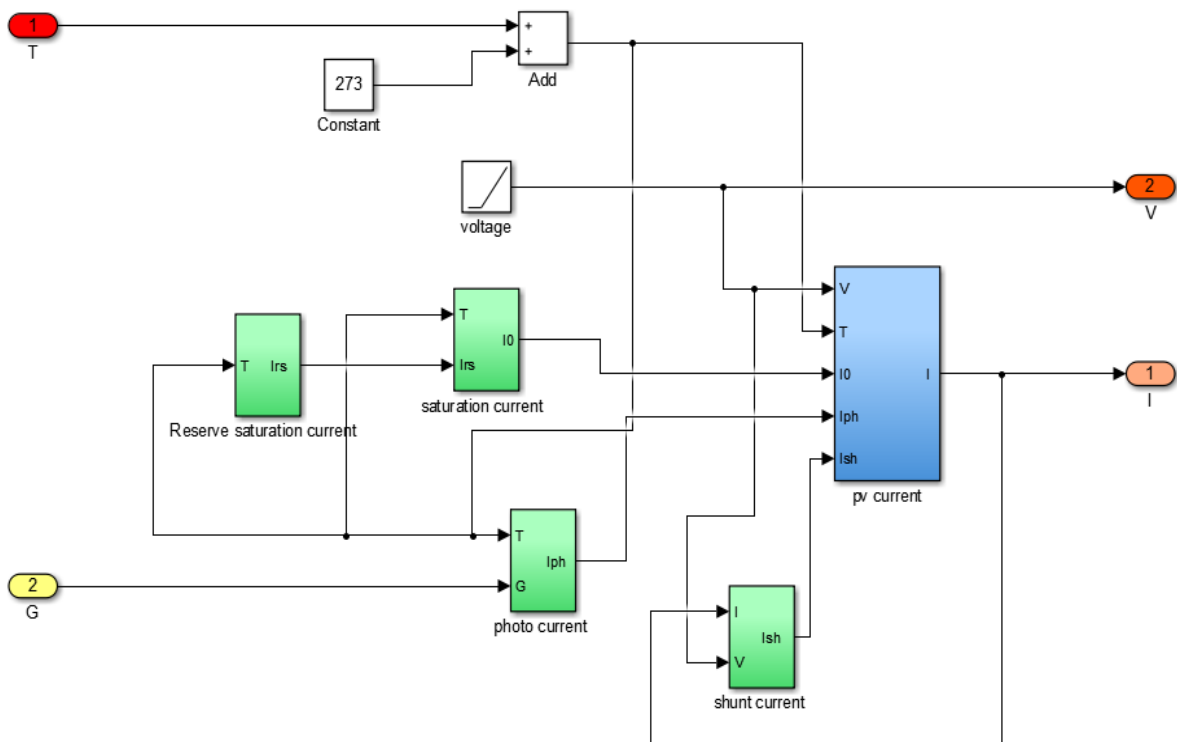


Figure 3.9. Modèle d'un panneau PV type KC200GT sous Matlab/Simulink.

La stratégie de modélisation d'un module PV n'est en aucun cas différente de celle d'une cellule PV. Les paramètres sont les mêmes, mais seulement la tension qui va changer (la tension du circuit ouvert) est différente et doit être par le nombre de cellules.

La figure 3.10 et la figure 3.11 présentent respectivement la caractéristique courant –tension (I-V) et la caractéristique puissance-tension (P-V). Le courant de court-circuit est $I_{cc} = 8.21A$, la tension de circuit ouvert est $V_{oc} = 32.9V$ (figure 3.10). Ce résultat peut être expliqué par le fait que le générateur est composé de 54 cellules connectées en série ce qui donne : $V_{ocNs} = 54 * 0.6 = 32.9V$ avec $V_{oc} = 0.6V$, la tension fournie par une seule cellule.

La puissance débitée par le générateur photovoltaïque dépend du point de fonctionnement du générateur comme il a montré par la figure 3.11. Le point max représente la puissance maximale débitée par le générateur. En ce point la puissance maximale, $P_{max} = 200.1W$, correspond à la situation de " plein soleil ". Ce qui est vérifiée par : $P_{max} = 26.34 * 7.6 = 200.1W$. On remarque trois points très importants qui donnent les grandeurs électriques de système en court-circuit ($I=8.21A$, $V=0$), en circuit ouvert ($I=0A$, $V=32.9 V$) et le point de puissance maximale ($P_{max}=200 w$) qui correspondent à ($I_{mp}=7.57A$, $V_{mp}=26.4 V$).

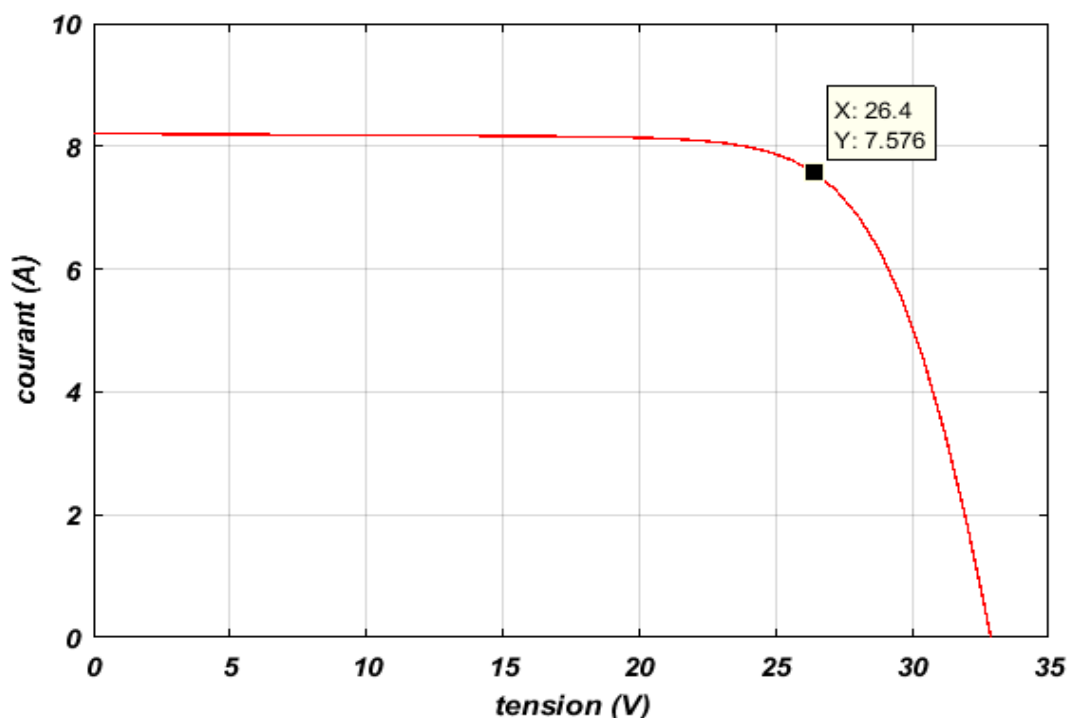


Figure 3.10. Caractéristique $I(V)$ d'une générateur PV ($T = 25^{\circ}C$, $G = 1000W/m^2$).

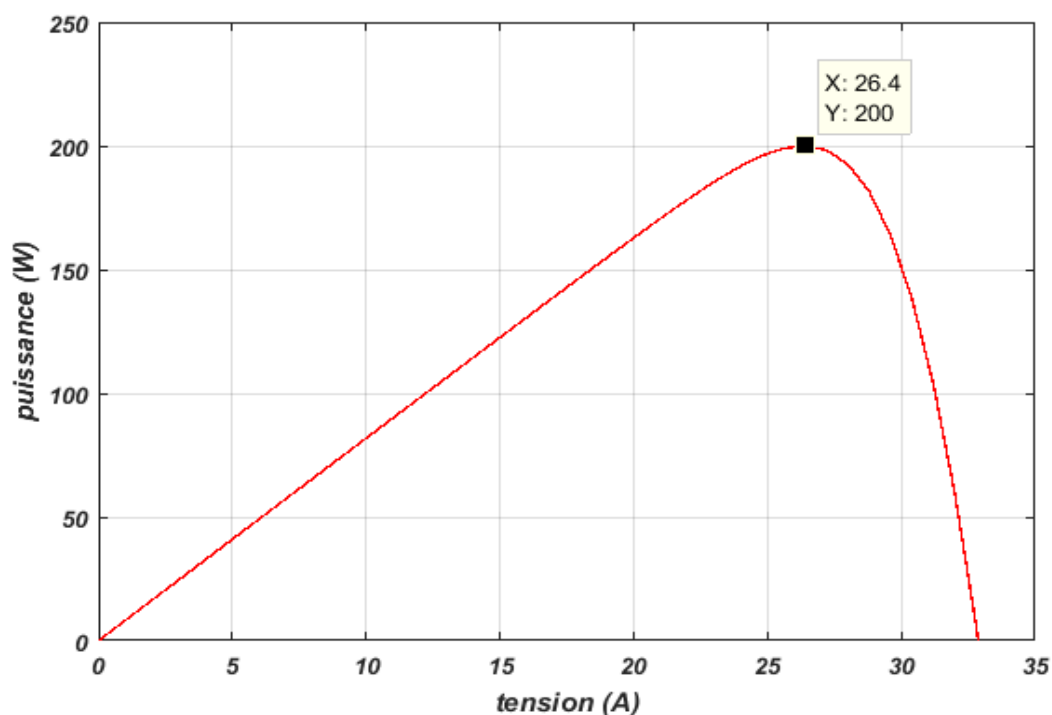


Figure 3.11. Caractéristique $P(V)$ d'un générateur PV ($T = 25^{\circ}\text{C}$, $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$).

Les résultats obtenus avec les grandeurs expérimentales du module photovoltaïque KC200GT sont comparés aux valeurs de référence et présentés dans le Tableau 3.3.

Les paramètres	KC200GT	Simulation
Puissance maximale P_{max}	200W	200W
Tension de puissance maximale V_{mp}	26.4V	26.4V
Courant de puissance maximale I_{mp}	7.6A	7.576A
Tension a circuit ouvert V_{oc}	32.9V	32.9V
Courant de court-circuit I_{cc}	8.21A	8.21A

Tableau 3.3. Paramètres expérimentaux v.s paramètres de référence (réels) du module solaire KC200GT pour ($T = 25^{\circ}\text{C}$, et $G = 1000\text{w}/\text{m}^2$).

3.3.1. Influence de la température sur le générateur PV

Les figures 3.12, 3.13, 3.14 et 3.15 représentent la caractéristique courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'un générateur photovoltaïque pour différentes températures et différents éclairagements.

A partir de la figure 3.12 on peut voir que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par contre, figure 3.13, la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente.

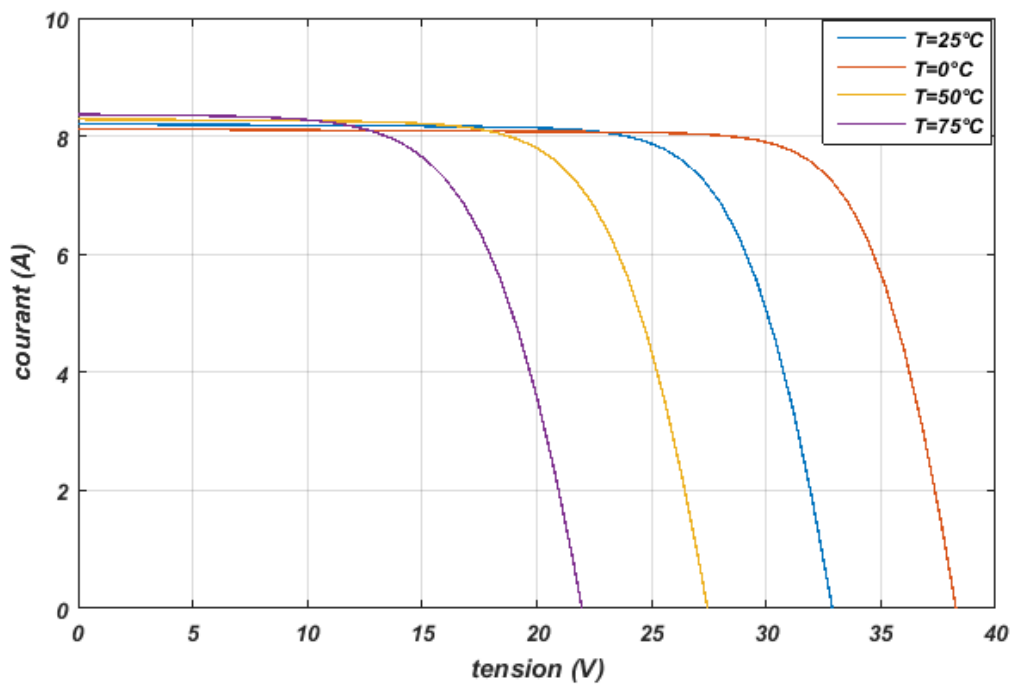


Figure 3.12. Caractéristique $I(V)$ d'un générateur pour différentes températures.

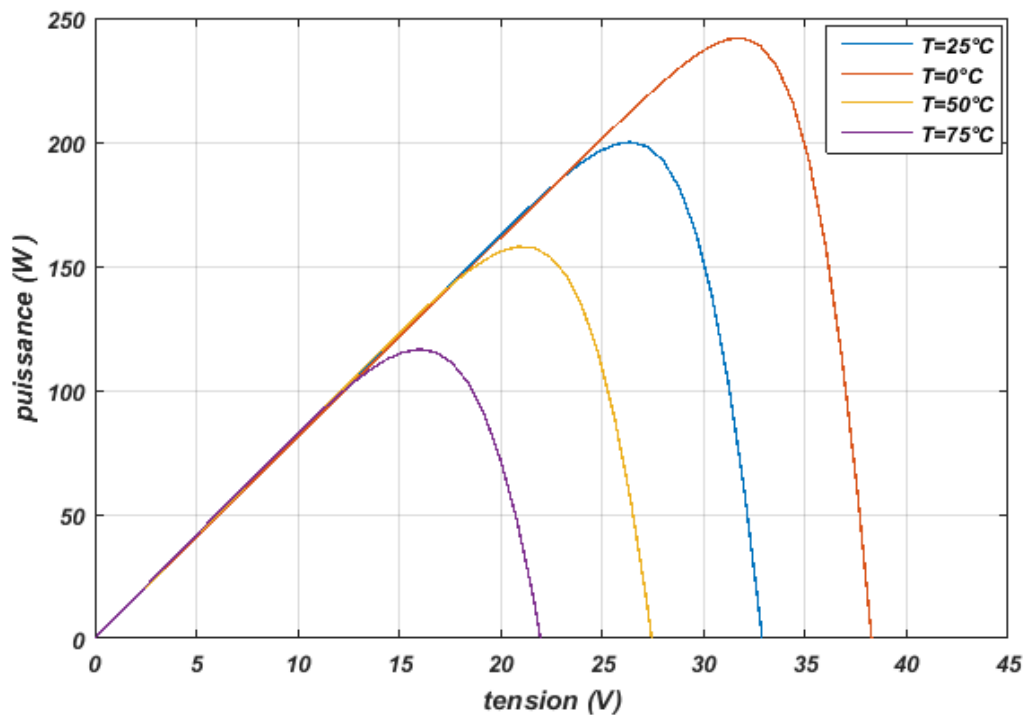


Figure 3.13. Caractéristique $P(V)$ d'un générateur pour différentes températures.

3.3.2. Influence de l'éclairement sur les caractéristiques du générateur PV

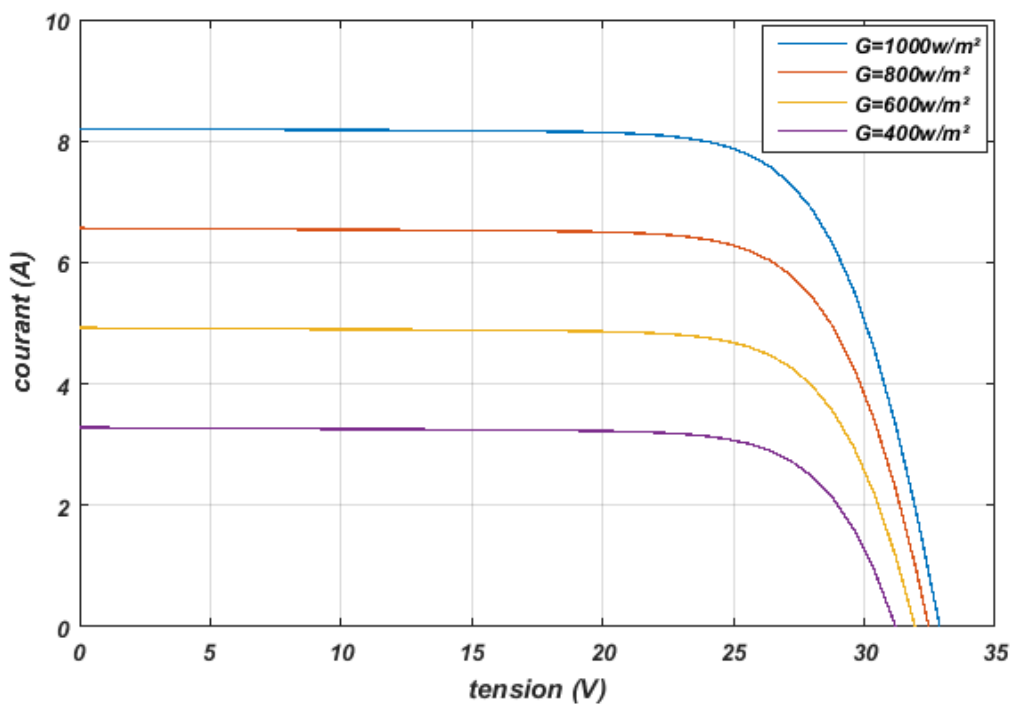


Figure 3.14. Caractéristique $I(V)$ pour différents niveaux d'éclairement et ($T = 25^{\circ}\text{C}$)

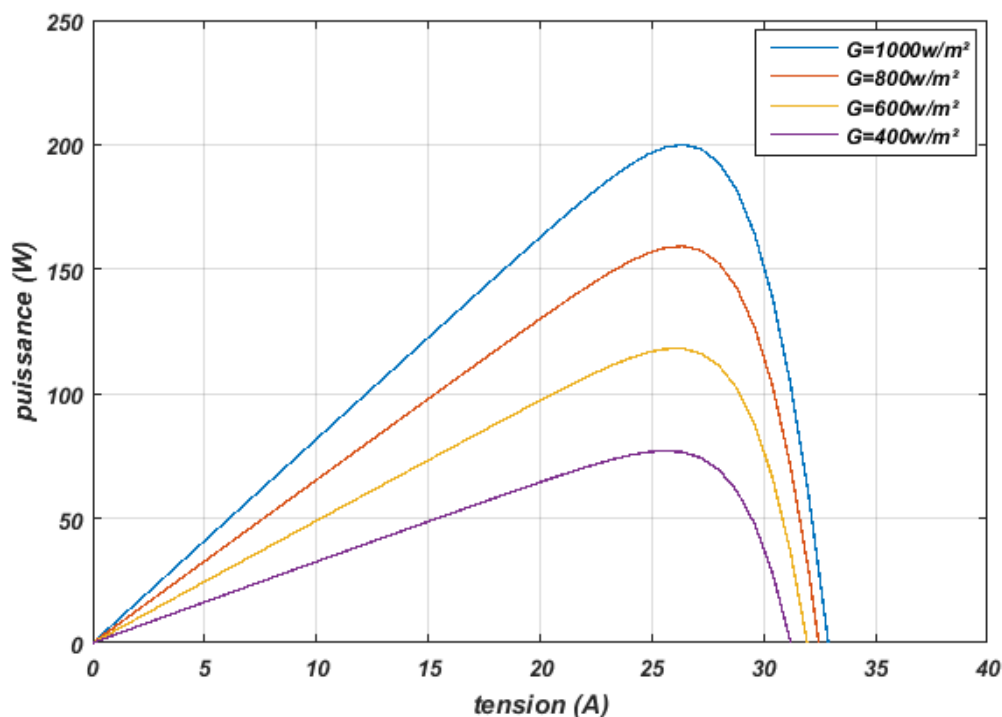


Figure 3.15. Caractéristique $P(V)$ pour différents niveaux d'éclairement et ($T = 25^{\circ}C$)

Le même travail comme précédemment, nous avons fixé la température ($T = 25^{\circ}C$) pour différents éclaircissements figure 3.14 et 3.15. Pour la figure 3.14 on remarque que pour l'éclairement $G = 1000 \text{ w/m}^2$ le courant $I_{sc} = 8.21A$ et pour $G = 800 \text{ w/m}^2$ le courant $I_{sc} = 6.5A$, la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement, on peut voir que le courant subit une variation importante, quand l'éclairement augmente, le courant de court-circuit augmente aussi, mais par contre la tension varie légèrement. Ce qui se traduit par une augmentation de la puissance, lorsque l'éclairement augmente, figure 3.15.

3.3.4. Influence de l'association des cellules sur le générateur (GPV)

Une cellule toute seule ne produit qu'une très faible puissance avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance les cellules sont assemblées d'une manière bien étudiée pour former un générateur capable de répondre à des exigences données.

Dans cette partie on va étudier l'influence de l'association série et /ou parallèle des cellules.

Les figures 3.16 et 3.17) représentent la caractéristique courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'une association des cellules en série. La tension de circuit ouvert augmente

quand le nombre de cellule en série et la valeur de courant de court-circuit ne présente aucune influence lorsque le nombre de cellules augmente. Par contre la puissance augmente avec le nombre de cellules.

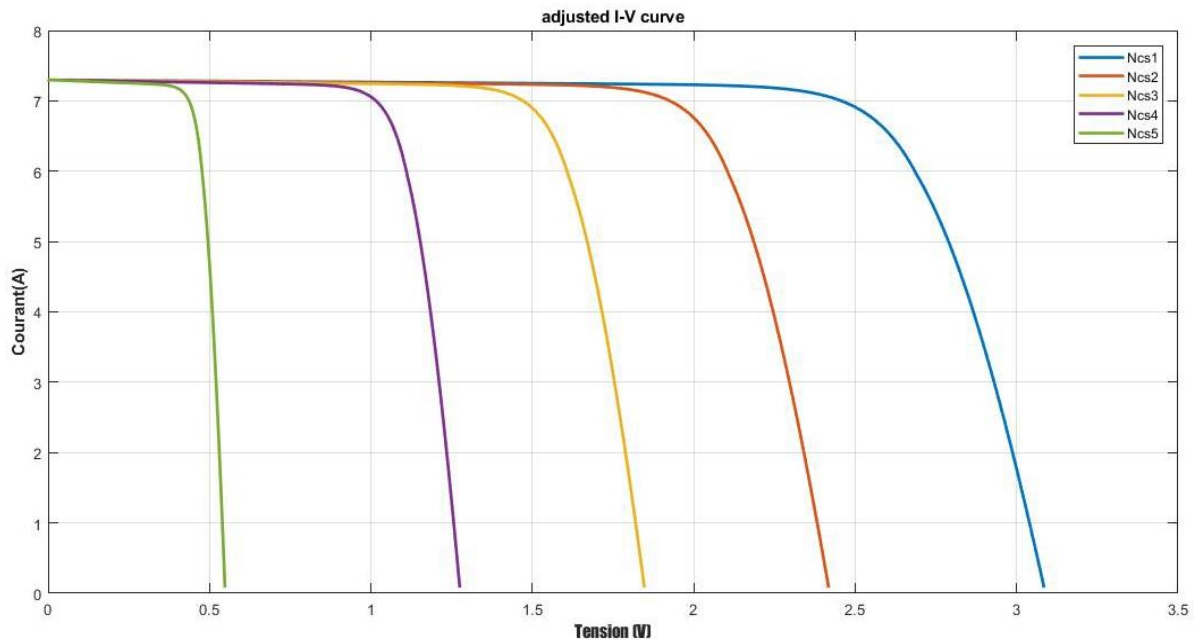


Figure 3.16. Influence de nombre de module série sur caractéristique I-V.

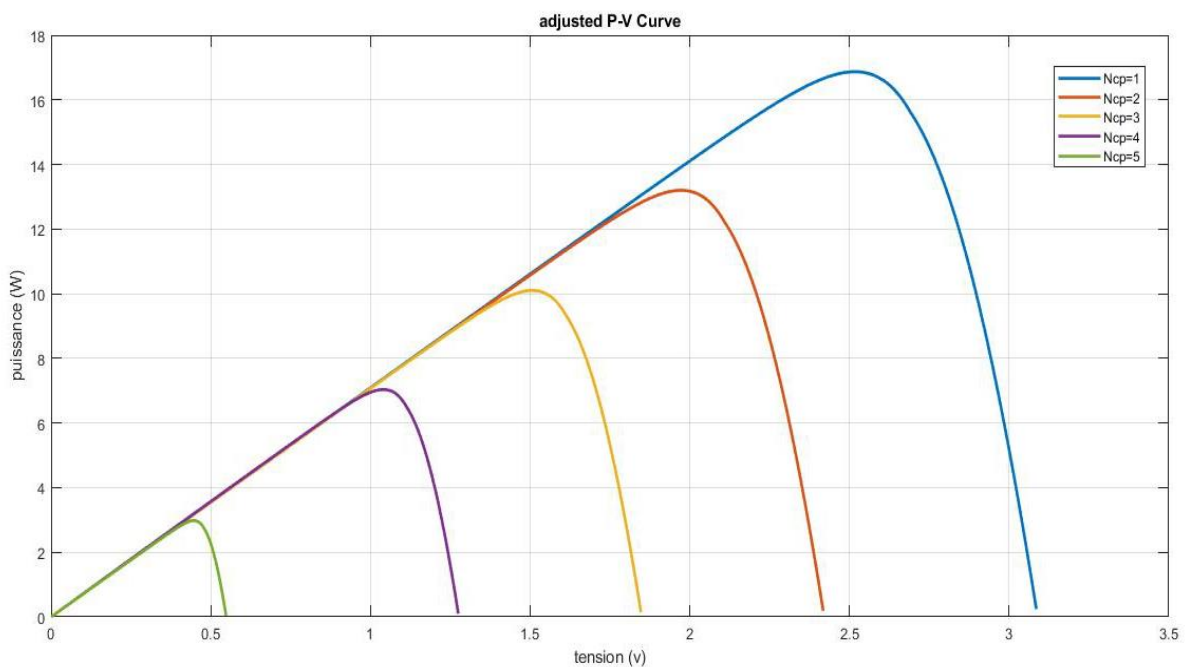


Figure 3.17. Influence de nombre de module série sur caractéristique P-V.

Les figures 3.18 et 3.19 représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'une association des cellules en parallèle. Le courant de court-circuit augmente quand le nombre de cellule en parallèle augmente, la valeur de la tension de circuit ouvert ne présente pas d'influence en fonction de l'augmentation du nombre de cellule en parallèle alors que la puissance augmente en conséquence.

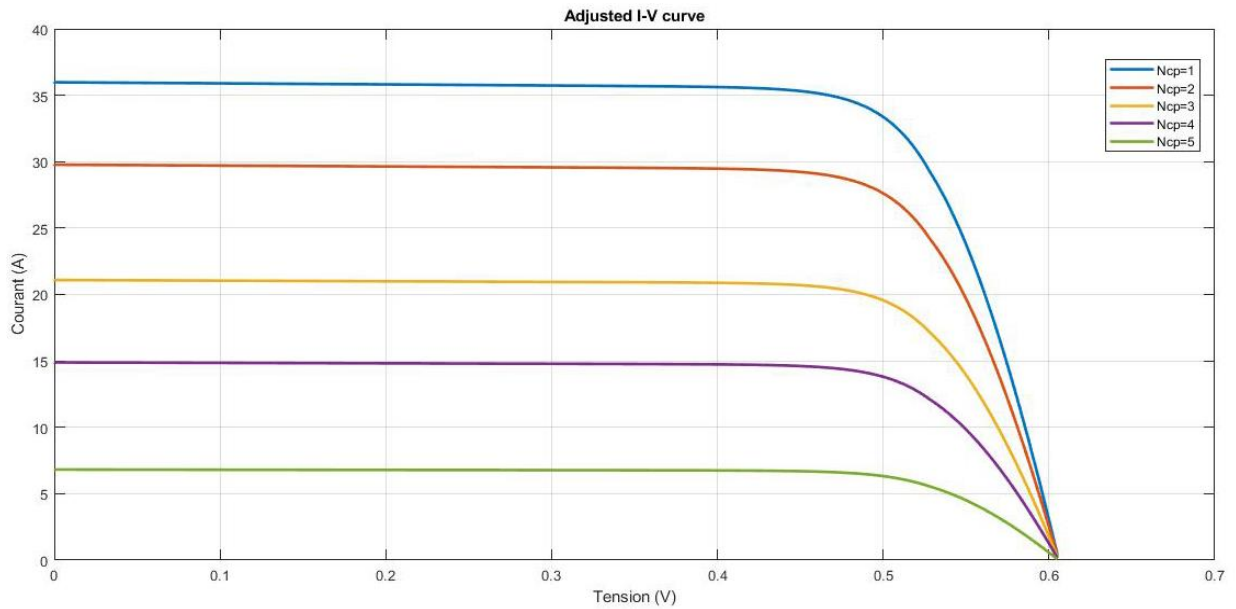


Figure 3.18. Influence du nombre de module parallèle sur la caractéristique I-V.

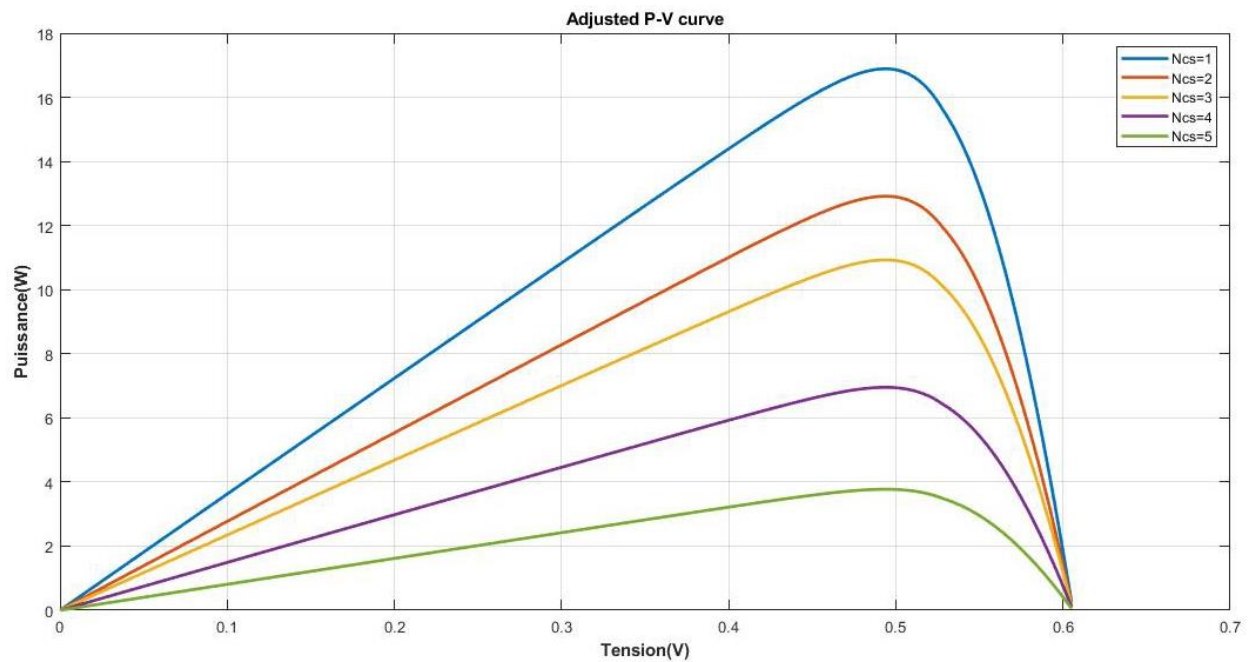


Figure 3.19. Influence de nombre de module parallèle caractéristique P-V

Les figures 3.20 et 3.21 représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'une association de cellules en série/parallèle. Le courant de court-circuit et La tension de circuit ouvert augmente relativement quand le nombre de cellule en série/parallèle augmente, alors la puissance augmente aussi.

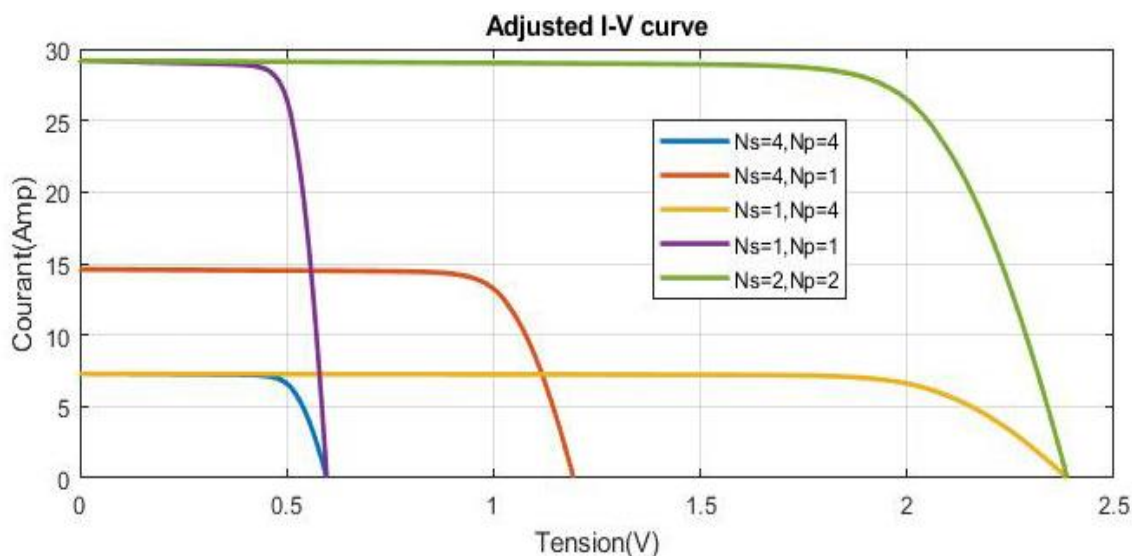


Figure 3.20. Caractéristique I(V) pour différentes nombre de cellules en Série / parallèle.

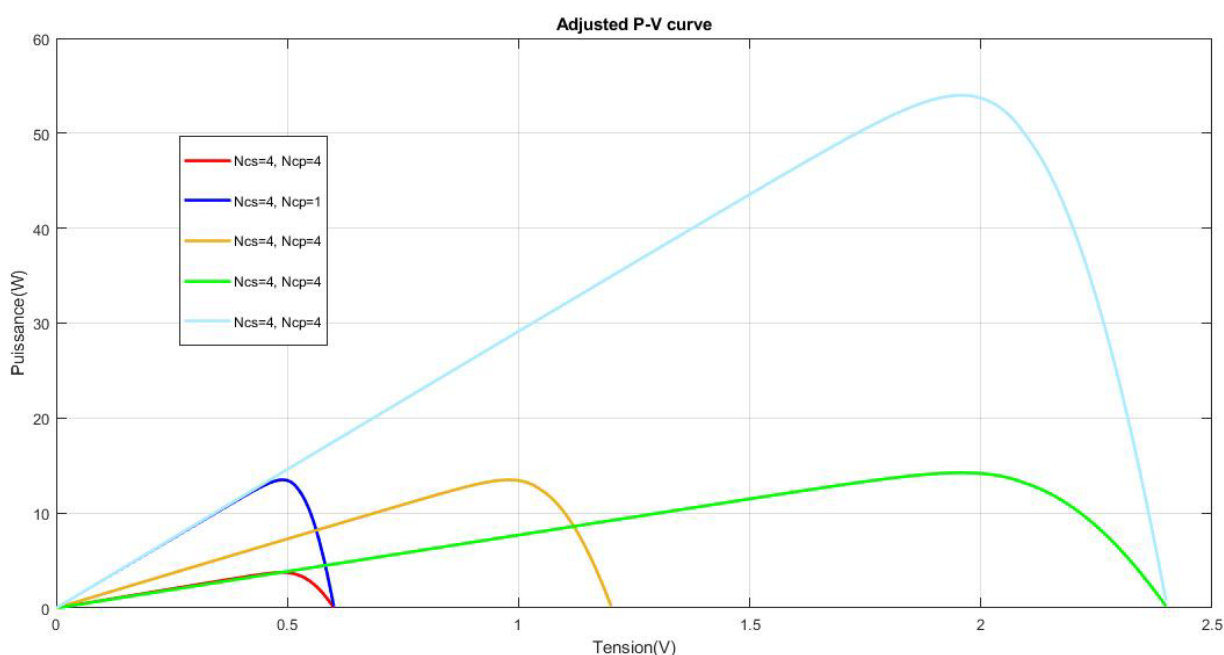


Figure 3.21. Caractéristique P(V) pour différentes nombre de cellules en Série / parallèle.

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule. Les contacts semi-conducteur – électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion.

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

L'existence des fissures et des défauts des structures complexes le siège de phénomène physique devient assimilable aussi à une résistance parallèle (R_p).

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre de simulation nous avons expérimenté le cas d'une cellule photovoltaïque en étudiant l'effet de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension ensuite nous avons étendu cette étude au cas d'un panneau solaire comportant 54 cellules reliées en série. Les résultats obtenus sont très encourageant ce qui nous permettra à l'avenir d'aborder la réalisation de n'importe quel projet.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans notre projet l'étude est basée sur l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV). Nous avons procédé à ce projet de mémoire, en trois étapes : Généralités et définitions sur l'énergie solaire, les différents modèles électriques et mathématiques, en fin la Simulation d'une cellule photovoltaïque et ensuite la simulation d'un module type KC200GT.

La cellule solaire se comporte comme un générateur dont la tension à ses bornes et le courant qu'il débite représentent la caractéristique $I(V)$. Cette caractéristique est influencée par plusieurs facteurs tels que : la température, l'éclairement la résistance shunt et la résistance série. Dans l'association des cellules qui compose le générateur (GPV) la configuration des cellules en série fournit un courant constant et une tension qui augmente avec le nombre de cellules ; par contre dans l'association des cellules en parallèle nous avons pour une tension constante et le courant augmente avec le nombre de cellules.

En simulation nous avons expérimenté le cas d'une cellule photovoltaïque à une seule diode et ensuite la simulation d'un module (panneau) photovoltaïque composé de 54 cellules connectées en série de type KC200GT dans les conditions standard. Dans la première simulation, nous allons nous intéresser à l'effet de la température et de l'éclairement sur l'énergie fournie par la cellule. Dans la deuxième simulation nous nous intéressons à l'étude de l'effet de regroupement des cellules (série-parallèle, parallèle-série) sur l'énergie produite par le panneau considéré. L'outil informatique Matlab-Simulink est utilisé pour l'implémentation des différentes simulations indispensables à l'étude du comportement de la cellule et du générateur PV.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Rapport d'activités en énergie solaire. Université de Annaba. (1977-1978)
- [2] Rapport d'activités en énergie solaire. Université de Annaba. (1976-1977)
- [3] **S.Abada** « Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic » Mémoire Maître es Sciences , Université Laval, 2011.
- [4] **J. Royer, T. Djiako, E. Schiler, et B. Sadasy.** « Le pompage photovoltaïque », Université d'Ottawa, 1998.
- [5] **Othman Benseddik, Fathi Djaloud.** « Etude et optimisation d'un système PV » Mémoire de Master, Université de Ouargla 2012.
- [6] **Slama fateh.** « Modélisation d'un système multi générateurs PV interconnectes au réseau Electrique » Magister en Electrotechnique, Université de Setif, 2012
- [7] **Djarallah Mohamed.** « Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique » Thèse de Doctorat en Science. Université de Batna, 2008
- [8] **A. Bilbao** « Réalisation d'une commande MPPT numérique » Université de Rovira i virgili ,2006.
- [9] **A. Labouret et M. Villos** « Energie solaire Photovoltaïque », Livre 4 édition,2008.
- [10] **B. Flèche - D. Delagnes** « Energie solaire photovoltaïque.doc », juin 2007.
- [11] **M.belhad** « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome », Mémoire de Magister Université de Bachar ,2008
- [12] **S. Fateh,** « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau Electrique » Mémoire de Magister, Département d'électrotechnique. Université Ferhat Abbas de Sétif. 2010.
- [13] **F. Heroguel,** « Les cellules photovoltaïques » Ecole Normale Supérieure, Lyon Epreuve de projet, 2007.
- [14] **Loïc Bailly** « Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface ». Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2010.

- [15] **B.Dessus, F. Pharabod.** « L'Énergie solaire », P.U.F, Paris, 1996.
- [16] **S. Petibon** « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » Université de Toulouse, 2009.
- [17] **Thibaut Desrues** « Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences, appliquées de Lyon, 2009.
- [18] **Hachana Oussama.** « Etude d'un système photovoltaïque en vue de diagnostique » Thèse de Doctorat Université Ferhat Abbes – Setif1 2015/2014
- [19] **Helali Kamelia** « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative » Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. 2012.
- [20] **L. ABBASSEN.** « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale Photovoltaïque » Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, 2011.
- [21] **O. Gergoud.** « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur» Thèse de Doctorat de l'ENS de Cachan France, 2002.
- [22] **R. Khezzar et al.** « Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque »
- [23] **O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed** « Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Models » 7th International ELECTRIMACS Congress, Montréal, Août 2002.
- [24] **G. Notton et al** « Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin ». Revue des Energies Renouvelables. France, 2010, Vol 13, N°1, pp. 49 – 62,
- [25] **A. Woyte, J. Nijs, and R. Belmans** « Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature review and field test results » Sol. Energy, vol. 74, no. 3, pp. 217–233, 2003.
- [26] **Raphael Chenouarda, Ragab A. El-Sehiemy** « An interval branch and bound global optimization algorithm for parameter estimation of three photovoltaic models »

Electrical Engineering Department- Faculty of Engineering- Kafrelsheikh University- Egypt, September 2019.

- [27] **H. L. Tsai, C. S. Tu, and Y. J. Su** « Development of generalized photovoltaic model using Matlab/Simulink » Proceedings of the World congress on Engineering and Computer Science. San Francisco, USA, 2008, Vol 2, N°2, pp. 1–6.
- [28] **Akihkiro Oi** « Design and simulation of photovoltaic water pumping system » Master thesis of California University, September 2005.
- [29] **Bellala Djamel** « Contribution à l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie. Application aux systèmes photovoltaïques » Thèse Doctorat de l'Université de Batna, 2009.
- [30] **J.A. Gow, C.D. Manning** « Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power Electronics Simulation Studies » IEE Proceedings on Electric Power Applications, Vol. 146, N°2, pp. 193 - 200, 1999.
- [31] **Siti Nurashiken, Md Sabudin**, « A review of parameter estimation used in solar photovoltaic system for a single diode model » Journal of Physics: Conference Series 2017.
- [32] **M.S. Aït Cheikh et al** « Mise au point d'une régulation floue pour serre agricole à énergie solaire » Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°3, pp 421-443 ,2010.
- [33] **Nikhil J.Anthony** « Thermal analysis of a solar water distillation and electricity generation system ». A Thesis submitted to the Department of Mechanical Engineering in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science Degree Awarded: Fall September 2008.
- [34] **Siti Nurashiken Md Sabudin, Norazaliza Mohd Jamil** « Parameter Estimation in Mathematical Modelling for Photovoltaic Panel » Bahagian Tajaan Pendidikan, Kementerian Pendidikan Malaysia Aras 1, Blok 2251, Jalan Usahawan 1, 63000 Cyberjaya, Selangor Darul Ehsan, Faculty of Industrial Sciences & Technology, Universiti Malaysia Pahang, Lebuhraya Tun Razak, Pahang, 26300 Kuantan, 2019.

- [35] **E. Benkhelil et A. Gherbi** « Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque avec un étage d'adaptation DC/DC » *Revue des Energies Renouvelables ICESD'11 Adrar* 159–170 , année 2011.

Annexes

➤ Paramètres caractéristiques du générateur PV model KC200GT

$T = 25^\circ$	Température de la cellule à la condition standard.
$G = 1000 \text{ w/m}^2$	Eclairement à la condition standard.
$V_{0c} = 32.9 \text{ V}$	Tension de circuit ouvert.
$I_{sc} = 8.21 \text{ A}$	Courant de court-circuit.
$N_s = 54$	Nombre de cellule en série.
$n = 1.3$	Facteur d'idéalité.
$T_n = 298 \text{ K}^\circ$	La température de référence.
$K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ j/K}$	Coefficient de Boltzmann.
$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$	La charge électrique élémentaire (charge d'électron).
$K_i = 0.0032 \text{ mA/}^\circ\text{C}$	Coefficient de courant/température.
$E_{go} = 1.1 \text{ (eV)}$	Energie de la bande interdite
$R_s = 0.221 \text{ ohm}$	Résistance série.
$R_{sh} = 415.405 \text{ ohm}$	Résistances parallèle shunt.
$P_{max} = 200 \text{ w}$	Puissance maximale.