



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : Modélisation, Simulation et Applications de la Physique

Par :

Melle BELBACHIR Soumia

Sur le thème

Modélisation et simulation de l'influence de la résistance shunt sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque

Soutenue publiquement le 20/06/2017 devant le jury composé de :

| | | |
|-----------------------------|--------------------------------------|--------------|
| Mr Nasr-Eddine CHABANE SARI | Professeur à l'Université de Tlemcen | Président |
| Mr Abdelhak CHIKHAOUI | MCA à l'Université de Tlemcen | Encadreur |
| Mr Nabil BRAHMI | MCB à l'Université de Tlemcen | Co-Encadreur |
| Mr Tayeb BENOUAZ | Professeur à l'Université de Tlemcen | Examineur |
| Mr Smaine BEKHECHI | Professeur à l'Université de Tlemcen | Examineur |
| Mr Abdelkrim MERAD | Professeur à l'Université de Tlemcen | Examineur |

Remerciements

Au nom de DIEU le Clément et le Miséricordieux

Louange à ALLAH le Tout-puissant

Tout d'abord et avant tout, je remercie ALLAH le Tout-puissant, qui m'a guidé dans le bon sens durant ma vie, et qui m'a donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce modeste travail.

Je tiens à remercier très chaleureusement messieurs CHIKHAOUI Abdelhak et BRAHMI Badr-eddine Nabil pour l'encadrement qu'ils m'ont assuré, leurs soutiens permanents, leurs confiances témoignées, ses encouragements et pour leurs précieux et judicieux conseils qu'ils n'ont cessé de me prodiguer tout au long de ce mémoire. Ils trouveront ici ma profonde gratitude et mes sincères reconnaissances

Le Professeur CHABANE SARI Nasr-Eddine à l'université de Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen m'a fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.

Mes remerciements sont aussi adressés au Professeur BENOUAZ Tayeb de l'université de Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen et responsable du LAT, de son intérêt à mon travail et pour avoir accepté de le juger.

Mes sincères remerciements sont adressés à Messieurs BEKHECHI Smaine Professeur à l'université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen et MERAD Abdelkrim Professeur à l'université de Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen qui ont bien voulu faire partie du jury de ce mémoire. Je les remercie vivement pour l'honneur qu'ils me font.

Ce Travail à été réalisé au sein du Laboratoire Automatique Tlemcen (LAT) de L'université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen, Faculté de Sciences. Il n'aurait pas pu se faire sans la collaboration de l'ensemble de ses membres spécialement M^{elle} W.Boursali . J'ai beaucoup profité de l'expérience et de la disponibilité de tous ceux avec qui j'ai eu l'occasion de discuter.

Je tiens à remercier vivement Mr Sofiane Amara, directeur de l'unité de recherche matériaux et énergies renouvelables et responsable du laboratoire pédagogique des énergies renouvelables du département de physique, faculté des Sciences, université de Tlemcen, de m'avoir accueilli avec ma collègue Boursali Wassila au sein de son laboratoire et de nous avoir offert l'opportunité de réaliser les travaux expérimentales dans les meilleures conditions et pour la confiance qu'il nous a accordé tout au long de notre présence dans le laboratoire.

Je tiens à remercier également Mr BENYOUSEF Abdellah pour son aide.

Un grand remerciement à mes meilleures amies Boursali wassila et belkhouane nassira.

Je tiens à exprimer mes reconnaissances à tous mes amis, mes collègues et Melle Fouzia pour le soutien moral, et qui m'ont apporté aide et encouragements au cours de la préparation de ce mémoire.

Ces remerciements vont inévitablement aussi à tous mes enseignants.

Un spécial remerciement à mes parents et ma famille qui m'ont soutenue durant toute la période d'étude et qui m'ont tellement encouragée.

En fin j'adresse mes vifs remerciements et ma profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail, je tiens vivement à leur dire merci.

Belbachir Soumia

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à

Mon très cher père et ma très chère mère

Ma très chère sœur et son mari et leur fille Sanaa

Mon très cher frère et ma très chère sœur

Ma très chère grand-mère

Tous les membres de ma famille, petits et grands

Mes chers amis(es) et mes collègues

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du
primaire, du moyen, du secondaire ou de
l'enseignement supérieur*

*A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la
science et à tous ceux qui utilisant la science pour le
bien et la prospérité de l'humanité.*

Soumia

Table des matières

| | |
|---|----|
| Introduction Générale | 2 |
| 0.1.Note historique..... | 2 |
| 0.2.Contribution..... | 3 |
| Références..... | 4 |
| CHAPITRE I | |
| Généralités sur les systèmes photovoltaïques | 6 |
| I.1.Semi-conducteur..... | 7 |
| I.1.1.Le Dopage..... | 7 |
| I.1.1.1.Type N..... | 7 |
| I.1.1.2.Type P..... | 7 |
| I.1.2.Jonction P-N..... | 7 |
| I.2.Photovoltaïque..... | 8 |
| I.2.1.Effet photovoltaïque..... | 8 |
| I.2.2.Cellule photovoltaïque (PV)..... | 8 |
| a) Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque..... | 8 |
| b) Les caractéristiques courant-tension d'une cellule photovoltaïque..... | 9 |
| c) Les types des cellules photovoltaïques..... | 10 |
| I.2.3.Les systèmes photovoltaïques..... | 12 |
| I.2.4.Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques..... | 13 |
| I.3.Conclusion..... | 14 |
| Références..... | 15 |
| CHAPITRE II | |
| Modélisation d'une cellule photovoltaïque | 18 |
| II.1.Les paramètres électriques..... | 19 |
| II.1.1.Le courant de court-circuit (I_{cc})..... | 19 |
| II.1.2.La tension de circuit ouvert (V_{co})..... | 20 |
| II.1.3.La puissance (P)..... | 20 |
| II.1.4.Facteur de forme (FF)..... | 20 |
| II.1.5.Le rendement (η)..... | 20 |
| II.1.6.La résistance série (R_s)..... | 21 |
| II.1.7.La résistance shunt (R_{sh})..... | 21 |
| II.1.8.Facteur d'idéalité (n)..... | 21 |

| | |
|---|-----------|
| II.2.Circuits équivalent d'une cellule photovoltaïque..... | 22 |
| II.2.1.Modèles à une diode..... | 22 |
| II.2.1.1.Modèle à 3 paramètres (L3P)..... | 22 |
| II.2.1.2.Modèle à 4 paramètres (L4P)..... | 23 |
| II.2.1.3.Modèle à 5 paramètres (L5P)..... | 24 |
| II.2.2.Modèles à deux diodes..... | 24 |
| II.2.2.1.Modèle à cinq paramètres (2M5P)..... | 25 |
| II.2.2.2.Modèle à six paramètres (2M6P)..... | 26 |
| II.2.2.3.Modèle à sept paramètres (2M7P)..... | 26 |
| II.3.Conclusion..... | 29 |
| Références..... | 30 |
| CHAPITRE III | |
| Influence de la résistance shunt dans la performance d'une cellule PV..... | 32 |
| III.1.Etude sur les différents modèles de la cellule PV..... | 33 |
| III.1.1.Etude expérimentale..... | 33 |
| II.1.1.1.Analyse des résultats..... | 36 |
| III.1.2.Simulation des différents modèles de la cellule PV..... | 36 |
| III.1.2.1.Etude comparative des modèles PV..... | 37 |
| III.1.2.1.Analyse des résultats..... | 42 |
| III.1.3.Conclusion..... | 43 |
| III.2.Influence de la résistance shunt sur les caractéristiques d'une cellule PV..... | 44 |
| III.2.1.Etude expérimentale..... | 44 |
| III.2.2.Simulation numérique..... | 47 |
| III.2.3.Analyse des résultats..... | 53 |
| III.3.Conclusion..... | 54 |
| Conclusion Générale..... | 56 |
| Annexe..... | 58 |

Liste des Figures

| | |
|--|----|
| Figure (I.1) : <i>Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque</i> | 9 |
| Figure (I.2) : <i>Caractéristiques de courant-tension d'une cellule PV</i> | 10 |
| Figure (I.3) : <i>Caractéristique courant tension</i> | 11 |
| Figure (I.4) : <i>Cellule PV monocristalline</i> | 11 |
| Figure (I.5) : <i>Cellule PV poly-cristalline</i> | 12 |
| Figure (I.6) : <i>Cellule PV à couches minces</i> | 12 |
| Figure (I.7) : <i>Les systèmes photovoltaïques</i> | 12 |
| Figure(II.1) : <i>Les caractéristiques Courant-tension et Puissance-tension</i> | 19 |
| Figure(II.2) : <i>Schéma équivalent du modèle L3P</i> | 22 |
| Figure(II.3) : <i>Schéma équivalent du modèle L4P</i> | 23 |
| Figure(II.4) : <i>Schéma équivalent du modèle L5P</i> | 24 |
| Figure(II.5) : <i>Schéma équivalent du modèle 2M5P</i> | 25 |
| Figure(II.6) : <i>Schéma équivalent du modèle 2M6P</i> | 26 |
| Figure(II.7) : <i>Schéma équivalent du modèle 2M7P</i> | 27 |
| Figure (III.1) : <i>Le montage de l'expérience</i> | 33 |
| Figure (III.2) : <i>L'appareillage de l'expérience</i> | 33 |
| Figure (III.3) : <i>Caractéristique courant-tension de la cellule PV (résultats expérimentales)</i> | 35 |
| Figure (III.4) : <i>Caractéristique puissance-tension de la cellule PV (résultats expérimentales)</i> | 35 |
| Figure (III.5) : <i>Comparaison $I(V)$ entre les modèles à une diode et les mesures expérimentales</i> | 38 |
| Figure (III.6) : <i>Comparaison $P(V)$ entre les modèles à une diode et les mesures expérimentales</i> | 38 |
| Figure (III.7) : <i>Comparaison $I(V)$ entre les modèles à deux diodes et les mesures expérimentales</i> | 39 |
| Figure (III.8) : <i>Comparaison $P(V)$ entre les modèles à deux diodes et les mesures expérimentales</i> | 39 |
| Figure (III.9) : <i>Comparaison $I(V)$ entre les modèles 2M7P et L5P avec l'expérience et le modèle idéal</i> | 40 |
| Figure (III.10) : <i>Comparaison $P(V)$ entre les modèles 2M7P et L5P avec l'expérience et le modèle idéal</i> | 40 |

| | |
|---|----|
| Figure (III.11) : <i>La puissance maximale en fonction des modèles</i> | 41 |
| Figure (III.12) : <i>Le facteur de forme en fonction des modèles</i> | 41 |
| Figure (III.13) : <i>Le rendement en fonction des modèles</i> | 42 |
| Figure (III.14) : <i>Montage de l'expérience de l'influence de Résistance R_{sh}</i> | 44 |
| Figure(III.15) : <i>Appareillage de l'expérience de l'influence de Résistance R_{sh}</i> | 45 |
| Figure (III.16) : <i>Caractéristique expérimentale de $I(V)$ pour différents valeurs de R_{sh}</i> | 48 |
| Figure (III.17) : <i>Caractéristique expérimentale de $P(V)$ pour différents valeurs de R_{sh}</i> | 49 |
| Figure (III.18) : <i>Caractéristique de $I(V)$ pour différents valeurs de R_{sh} (Simulation)</i> | 48 |
| Figure (III.19) : <i>Caractéristique de $P(V)$ pour différents valeurs de R_{sh} (Simulation)</i> | 49 |
| Figure (III.20) : <i>La tension de circuit ouvert en fonction de résistance shunt</i> | 50 |
| Figure (III.21) : <i>Le courant de court-circuit en fonction de résistance shunt</i> | 50 |
| Figure (III.22) : <i>Le courant maximal en fonction de résistance shunt</i> | 51 |
| Figure (III.23) : <i>La tension maximale en fonction de résistance shunt</i> | 51 |
| Figure (III.24) : <i>La puissance maximale en fonction de résistance shunt</i> | 51 |
| Figure (III.25) : <i>Le facteur de forme en fonction de résistance shunt</i> | 52 |
| Figure (III.26) : <i>Le rendement en fonction de résistance shunt</i> | 52 |

Liste des Tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau(II.1) : <i>Tableau récapitulatif des différents modèles de cellule photovoltaïque</i> | 28 |
| Tableau (III.1) : <i>Les valeurs expérimentales mesurées de tension et de courant fournis par le module PV</i> | 34 |
| Tableau (III.2) : <i>Les différents paramètres de la cellule PV obtenus par la simulation</i> | 37 |
| Tableau (III.3) : <i>Les mesures expérimentales de courant et de tension du module PV pour les différentes valeurs de résistance R_{sh}</i> | 46 |
| Tableau (III.4) : <i>Paramètres d'une cellule PV (simulation, expérimentales, idéal)</i> | 47 |

Notations et Symboles

| Symbole | Description | Unité |
|-----------|---|----------|
| d_1 | Diode 1 | |
| d_2 | Diode 2 | |
| E | Eclairement ou flux incident | W/m^2 |
| FF | Facteur de forme | % |
| I | Courant fournit par la cellule photovoltaïque | A |
| I_{cc} | Courant de court-circuit | A |
| I_d | Courant inverse de diode | |
| I_{d1} | Courant inverse de diode 1 | A |
| I_{d2} | Courant inverse de diode 2 | A |
| I_{max} | Courant maximal | A |
| I_{ph} | Photo-courant | A |
| I_{sh} | Courant qui circule dans la résistance shunt | A |
| I_s | Courant inverse de saturation ou de fuite de la diode | |
| I_{s1} | Courant inverse de saturation ou de fuite de la diode 1 | A |
| I_{s2} | Courant inverse de saturation ou de fuite de la diode 2 | A |
| k | Constante de Boltzmann | J/K |
| n | Facteur d'idéalité de la diode | |
| n_1 | Facteur d'idéalité de la diode 1 | |
| n_2 | Facteur d'idéalité de la diode 2 | |
| P | Puissance fournit par la cellule | W |
| P_{inc} | Puissance lumineuse incidente | W |
| P_{max} | Puissance maximale | W |
| PV | Photovoltaïque | |
| q | Charge de l'électron | C |
| R_{ch} | Résistance de charge variable | Ω |
| R_s | Résistance série | Ω |
| R_{sh} | Résistance shunt (parallèle) | Ω |
| S | Surface de la cellule photovoltaïque | m^2 |
| T | Température absolue | K |
| V | Tension aux bornes de la cellule | V |
| V_{co} | Tension de circuit ouvert | V |
| V_{max} | Tension maximale | V |
| V_t | Potentielle thermodynamique | |
| η | Rendement | % |

Introduction Générale

Introduction Générale

L'énergie solaire est une importante source d'énergie renouvelable qui pourrait être une alternative aux énergies conventionnelles (non renouvelable) qui dépendent des combustibles fossiles, tel que le pétrole, le charbon et le gaz naturel, afin de satisfaire les larges besoins d'énergie dans le futur. Le soleil fournit une énergie colossale à la terre (10.000 fois l'énergie nécessaire) sous forme lumineuse, voilà pourquoi les scientifiques ont constatés que la meilleure solution est de trouver la technologie permettant d'exploiter cette énergie et la transformer en électricité. Cette technologie est le photovoltaïque qui convertit directement l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique à travers des modules photovoltaïques composés de cellules solaires à partir de semi-conducteurs.

0.1.Note historique

Le mot « *photovoltaïque* » vient du mot grec « *photos* » signifiant lumière et du mot « *Volta* » qui est le nom de famille du physicien italien « *Alessandra Volta* » qui a découvert la pile électrique en 1800. C'est « *Alexandre Edmond Becquerel* » qui découvrit le principe de la conversion de la lumière en électricité en 1839. Il avait observé que certains matériaux faisaient des étincelles lorsqu'ils étaient exposés à la lumière. De là, il démontra qu'il s'agissait d'une conversion directe de la lumière en électricité [2].

Par la suite en 1905, *Albert Einstein* à découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. Ce n'est qu'en 1954 que les premières piles solaires produisant de l'électricité firent leurs apparitions, grâce aux travaux de Bell (Laboratoire aux États-Unis). De l'effet photoélectrique à la conception de la cellule photovoltaïque, il a donc fallu attendre un siècle. L'énergie photovoltaïque eu un regain d'intérêt dans les années 1960 lors des premiers lancements spatiaux de satellites puis lors des missions lunaires. Les crises

économiques des années 1970, puis les accidents des centrales nucléaires renforcèrent l'intérêt du grand public envers les énergies renouvelables, et en particulier l'énergie photovoltaïque qui s'impose comme une des sources d'énergies renouvelables les plus prometteuses [1].

0.2.Contribution

Habituellement, l'étude et l'évaluation des cellules photovoltaïques en mesurant ses caractéristiques *courant-tension* et *puissance-tension* dans des conditions normales d'éclairage et extrait des différents paramètres à partir des données de fabrication. Généralement, les différents paramètres utiles pour savoir l'efficacité et la performance de la cellule photovoltaïque sont le courant, la tension, le facteur d'idéalité, pour lesquels la plus part des études donnent importance contrairement aux autres paramètres qui sont les résistances série et shunt.

C'est pour cette raison que dans le présent travail nous nous sommes fixés l'objectif principal suivant : *modélisation et simulation de l'influence de la résistance shunt sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension de la cellule photovoltaïque.*

Le présent travail est organisé comme suit :

Après une introduction générale dans le premier chapitre nous rappelons des notions générales sur le système photovoltaïque, nous expliquons le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque puis nous citons les différents types de cette dernière.

Dans le deuxième chapitre nous indiquons les principaux paramètres de la cellule photovoltaïque, puis nous avons fait une modélisation de la cellule photovoltaïque où nous présentons les différents modèles qu'on peut trouver dans la littérature (modèles d'une diode et modèles de deux diodes).

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude comparative entre les résultats expérimentaux et les résultats de simulation. La première partie est consacrée à une étude comparative entre les résultats expérimentaux sous un éclairage constant faite au niveau du laboratoire pédagogique des énergies renouvelables du département de physique, faculté des Sciences, université de Tlemcen et les résultats de simulation des caractéristiques *courant-tension* et *puissance-tension* des différents modèles de la cellule photovoltaïque, en utilisant le code *python*. Les résultats obtenus sont comparés et discutés.

Dans la deuxième partie, nous avons présenté l'influence de la résistance shunt sur les caractéristiques de la cellule photovoltaïque et les différents paramètres de cette cellule.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Références

- [1] **AOUFI Saliha.** « *Modélisation et commande d 'un système de pompage photovoltaïque* ». Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas-Sétif-1. (2014)
- [2] **BELARBI MUSTAPHA.** « *Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome* ». Thèse de Doctorat. Université Mohamed Boudiaf-Oran. (2015)

CHAPITRE I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

CHAPITRE I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Tous les jours, le soleil fournit de l'énergie à la terre, on peut utiliser cette énergie gratuite grâce à une technologie appelée photovoltaïque, qui est une technologie qui convertit directement la lumière du soleil en électricité à travers des modules photovoltaïques composés de cellules solaires à partir de semi-conducteurs.

Dans ce premier chapitre, nous allons donner quelques rappels de notions sur les semi-conducteurs et une généralité sur les photovoltaïques, nous allons ensuite expliquer le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales.

I.1.Semi-conducteur

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants, cette conductivité des semi-conducteurs, dépend fortement de leur pureté, des irrégularités de leur structure, de la température et d'autres quantités physiques et chimiques. Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques très diversifiées[8].

La conductivité d'un semi-conducteur peut être augmentée par l'addition des impuretés dans sa structure cristalline appelée dopage.

I.1.1.Le Dopage

Suivant le dopage on peut construire deux types des semi-conducteurs : type N et type P .

I.1.1.1.Type N

Considérons par exemple les semi-conducteurs tétravalents tels que *Silicium* ou *Germanium*. Ils cristallisent dans une structure où chaque atome est relié à quatre atomes voisins par des liaisons covalentes, introduisons un atome ayant cinq électrons de valence (phosphore). Il prend la place d'un atome du cristal. Parmi les électrons de l'impureté, seulement quatre électrons sont nécessaires pour adapter l'atome dans la structure de cristal de silicium et le cinquième restera libre et mobile; donc, dans cette région du cristal il y a beaucoup de charges négatives libres. Dans ce cas, le semi-conducteur est appelé type N [10-18].

I.1.1.2.Type P

Si on introduit un atome d'impureté ayant trois électrons de valence (bore aluminium ou galium). Celui-ci ne peut saturer que trois liaisons. Ainsi une liaison par atome d'impureté manque c'est à dire il manque un électron dans la structure cristalline. Cet électron manquant pourrait également être considéré comme un «trou» avec une charge positive qui est mobile. Il y a beaucoup plus de trous libres que les électrons libres dans la région P , donc les électrons sont appelés les porteurs de charge minoritaires. Le semi-conducteur est dit de type P [10-18].

I.1.2.Jonction P-N

Lorsqu'on met en contact un semi-conducteur de type N avec un semi-conducteur de type P , les porteurs majoritaires négatifs du côté N diffusent dans la région P , dans le même temps, les porteurs majoritaires positifs du côté P passent en régions N , donc, les porteurs se recombinent. Il existera ainsi, une charge *positive* dans la région N au bord de la jonction et

une charge *négative* dans la région *P* au bord de la jonction; donc un champ électrique dans la jonction neutre électriquement vient à l'existence, cette jonction est appelée « jonction *P-N* ». La jonction *P-N* est à la base du composant électronique nommé diode, qui ne permet le passage du courant électrique que dans un seul sens [6-12].

I.2. Photovoltaïque

Le « photovoltaïque solaire » signifie « produire de l'électricité à partir de la lumière du soleil ». Tout élément photovoltaïque est un convertisseur d'énergie qui transforme la lumière en courant électrique[1].

I.2.1. Effet photovoltaïque

La conversion photovoltaïque aujourd'hui largement utilisée peut être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. C'est un phénomène physique qui appelé « l'effet photovoltaïque ».

Cet effet repose principalement sur les trois mécanismes suivants :

- ❖ Absorption des photons incidents par le matériau constituant le dispositif.
- ❖ La conversion de l'énergie absorbée (du photon) en charges électriques libres (énergie électrique).
- ❖ Collecte des particules dans un circuit électrique extérieur[9-13].

I.2.2. Cellule photovoltaïque (PV)

La cellule photovoltaïque est un dispositif optoélectronique capable de capter et convertir directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque »[3-9].

a) Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque est illustré dans la figure (I.1). La structure la plus simple d'une cellule PV se compose de deux couches minces de semi-conducteur dopés différemment, l'une est constitué d'un semi-conducteur de type *N* et l'autre de type *P* et inversement, c'est à la jonction de ces deux couches que la cellule produit de l'électricité. Cette jonction est la jonction *P-N* qui représente le cœur de la cellule photovoltaïque[3-9].

La cellule photovoltaïque lorsqu'elle est exposée au rayonnement solaire, un photon incident dans la jonction $P-N$ arrache un électron et crée ainsi un couple libre d'électron-trou. Sous l'effet du champ électrique, les électrons s'accroissent dans la couche dopée N , alors que les trous s'accroissent dans la couche dopée P . Cette réaction entraîne alors une différence de répartition de charges créant ainsi une différence de potentiel électrique entre les deux couches de la cellule, c'est l'effet photovoltaïque[12]. En conséquence, un courant électrique peut circuler en connectant les bornes de la jonction à un circuit extérieur[3].

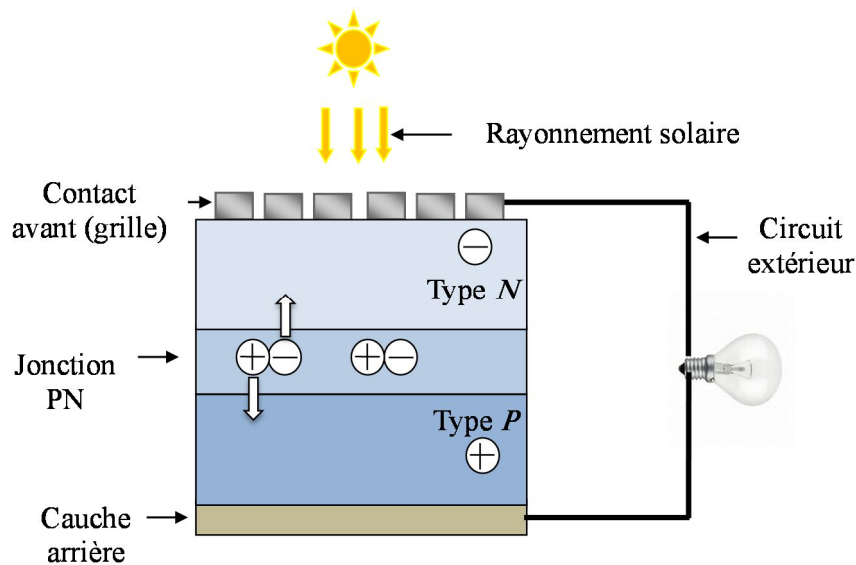


Figure (I.1) :
Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

b) Les caractéristiques courant-tension d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque possède deux caractéristiques *courant-tension* non linéaire représenté sur la figure (I.2), une caractéristique dans l'obscurité qui correspond à un comportement de diode comme le montre la courbe (a), lorsque la cellule photovoltaïque est illuminée, cette caractéristique de lumière se déplace par une quantité de *photo-courant* I_{ph} qui est le courant généré par la quantité de lumière incidente (courbe (b))[1-18].

Les comportements de cellules photovoltaïques dans les deux caractéristiques peuvent être représentés par des équations mathématiques comme suit :

❖ **Pour une cellule photovoltaïque sans illumination on a**

$$I = I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (I.1)$$

Où I est le courant mesuré donné à un potentiel électrique externe (V) appliqué, appelé polarisation directe.

Avec :

I_s : Le courant inverse de saturation ou de fuite de la diode (A)

n : Facteur d'idéalité de la diode

k (constante de Boltzmann) = $1.381 \times 10^{-23} J/K$.

q (charge de l'électron) = $1.602 \times 10^{-19} C$.

T : Température absolue (K).

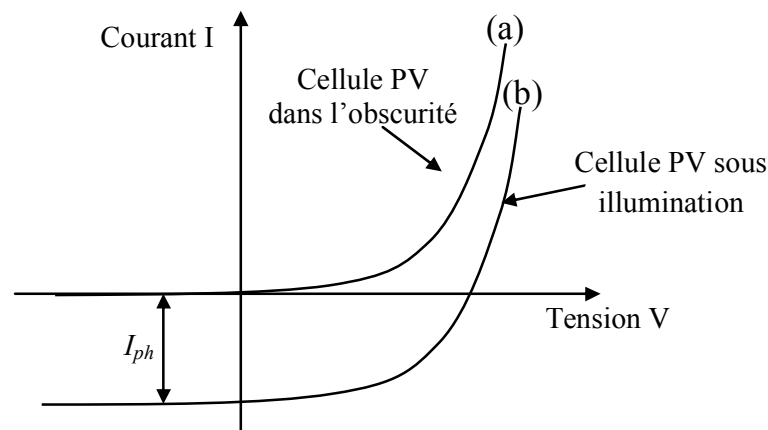


Figure. (I.2) :
Caractéristiques de courant-tension d'une cellule PV
(a) dans l'obscurité (b) sous illumination.

❖ Pour une cellule photovoltaïque sous illumination

On ajoute un courant supplémentaire inverse, c'est le photo-courant (I_{ph}) qui est directement proportionnel à l'irradiation du soleil.

$$I = I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) - I_{ph} \quad (I.2)$$

Dans notre travail on s'intéresse à étudier la caractéristique *courant-tension* qui génère de l'énergie en présence de la lumière solaire, pour tracer cette caractéristique on change les axes de la figure (I.2) du négatif au positif (figure (I.3)), et l'équation (I.2) devient:

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (I.3)$$

c) Les types des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques peuvent être constituées avec des différents semi-conducteurs. Actuellement, le matériau semi-conducteur le plus utilisé dans les cellules photovoltaïques est

le silicium, ce dernier représente l'essentiel de la production mondiale des cellules PV, il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique[14].

Selon la nature, on peut distinguer trois types de cellules photovoltaïques:

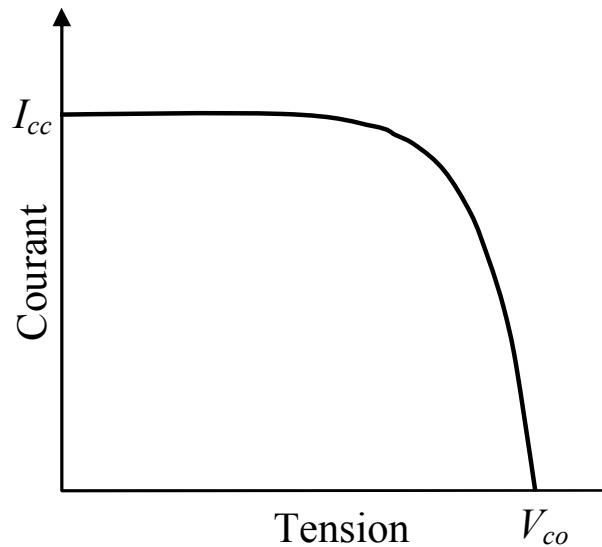


Figure (I.3)
Caractéristique courant tension

❖ Cellules monocristallines

La cellule monocristalline est celle qui s'approche le plus du modèle théorique, cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22%[4].



Figure (I.4)
Cellule PV monocristalline

❖ Cellules poly-cristallines

La cellule poly-cristalline (ou multi-cristalline) est constituée de plusieurs cristaux de 1mm à environ 2cm assemblés, appelés « grains ». Ces cellules ont un rendement de conversion légèrement inférieur par rapport aux cellules monocristallines (Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en laboratoire)[2-4].

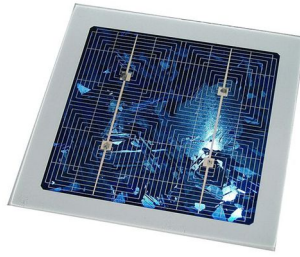


Figure (I.5)
Cellule PV poly-cristalline

❖ Cellules à couches minces

La cellule à couche mince et aussi dite amorphe a une structure atomique désordonnée, non cristallisée, leur rendement est plus bas que celui des cellules cristallines[4-16].



Figure (I.6)
Cellule PV à couches minces

I.2.3. Les systèmes photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont les éléments de base d'un système photovoltaïque. Ces cellules ont des puissances unitaires assez faibles pour faire un travail précieux. Pour augmenter la puissance, plusieurs cellules PV individuelles sont interconnectées en ensemble dans des modules ou des panneaux comme le montre sur la figure (I.7)[15].

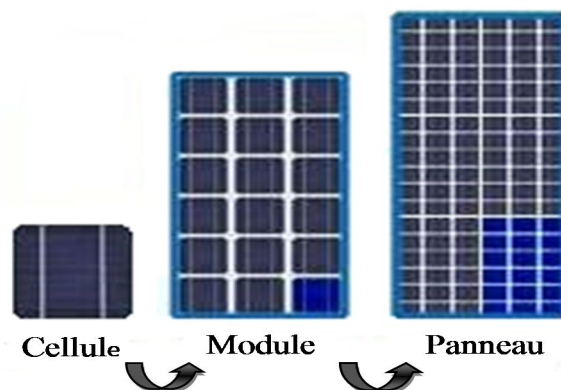


Figure (I.7)
Les systèmes photovoltaïques

a) Module photovoltaïque

Par définition, c'est un groupement de cellules photovoltaïques qui sont associées en série (pour augmenter la tension) et en parallèle (pour augmenter le courant) pour obtenir une puissance élevée suffisante lorsqu'il est exposé à la lumière [5-16].

b) Panneau photovoltaïque

Un panneau est constitué d'un ou plusieurs modules regroupés sur une structure de support commune. Pour augmenter la tension du panneau, les modules sont connectés en série, connus sous le nom de chaîne série, et pour augmenter la capacité de production sans changer la tension du réseau, des chaînes de modules sont connectées en parallèle.

D'autre part, lorsque les modules sont associés en série-parallèle on obtient des puissances importantes[11-17].

I.2.4. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

a) Les avantages[7]

Les systèmes solaires électriques offrent de nombreux avantages, dont les suivants :

- Ils sont de fonctionnement sûr, non polluants et silencieux;
- Ils sont très fiables;
- Ils n'exigent presque aucun entretien;
- Ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales;
- Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre aux besoins en matière d'électricité;
- Ils ont une longue durée de vie importante.

b) Les inconvénients

L'inconvénient majeur d'énergie d'origine photovoltaïque est le cas d'absence de l'ensoleillement, ciel couvert ou pendant la nuit, ce qui exige un stockage d'énergie produite par le système durant les jours ensoleillés sous forme chimique dans des accumulateurs, qui sont souvent des batteries à plomb, sachant que ces batteries impose la contrainte de décharge pas plus de 60% ou 70% au maximum de leur capacité maximal, l'énergie stockée n'est pas intégralement restituée, le coût additionnelle de système de stockage est capital en outre ses système ont une durée de vie limitée de 3 à 5 ans, qui alourdit l'investissement[7].

I.3.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions générales sur les systèmes photovoltaïques, le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ainsi que les différents types de cellule photovoltaïque. Cette dernière peut présenter par des différents modèles de circuits électriques qu'on va étudier sur le chapitre suivant.

Références

- [1] **Anne Labouret, Michel Viloz.** « *Energie solaire photovoltaïque* ». 3eme édition DUNOD, Paris (2006)
- [2] **ANNE LABOURET, PASCAL CUMUNEL, JEAN-PAUL BRAUN, BENJAMIN FARAGGI.** « *Cellules Solaires : Les bases de l'énergie photovoltaïque* ». 5eme édition ETSF, (2010)
- [3] **AOUFI Saliha.** « *Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque* ». Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas-Sétif-1. (2014)
- [4] **AOUN Nouar.** « *Etude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales* ». Mémoire de Magister. Université Mentouri Constantine Algérie. (2010)
- [5] **BELARBI MUSTAPHA.** « *Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome* ». Thèse de Doctorat. Université Mohamed Boudiaf-Oran. (2015)
- [6] **BELKACEM Mourad,** « *Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT)* ». Mémoire de Master. Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen. (2015)
- [7] **BENCHERIF Mohammed.** « *Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens, intégration dans un système hybride basse tension* ». Thèse de Doctorat. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen. (2013)
- [8] **BENDJELLOULI Zakaria.** « *Contribution a la modélisation d'une cellule solaire* ». Mémoire de Magistère. Université de Bechar. (2009)
- [9] **BENSALEM Salaheddine.** « *Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires* ». Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas-Sétif. (2011)
- [10] **BRAHMI Badr-Eddine Nabil.** « *Etude ab-initio des propriétés structurales et électroniques des alliages ternaires des semi-conducteurs II-VI à base de zinc* ». Thèse de Doctorat. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen. (2013)
- [11] **Djamila Rekioua - Ernest Matagne.** « *Optimization of Photovoltaic Power Systems: Modelization, Simulation and Control* ». Springer-Verlag London Limited (2012)
- [12] **ELSY Mansour.** « *Modélisation des panneaux photovoltaïques sur compact rio* ». Projet de Fin d'Etudes. Université Libanaise. (2012)
- [13] **FEROUANI Abdelmadjid.** « *Etude par Simulation et Modélisation Electriques des Cellules Photovoltaïques en Couche Mince à base de Cu (In,Ga)Se₂(CIGS)* ». Thèse de Doctorat. Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen. (2016)

- [14] **HELALI Kamélia.** « *Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative* ». Mémoire de Magister. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. (2012)
- [15] **Md. Rabiul Islam –YouguangGuo - Jianguo Zhu.** « *Power Converters for Medium Voltage Networks* ».Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2014)
- [16] **MERAHI Reda.** « *Modélisation D'un Dispositif Mppt Pour L'étude De L'augmentation De La Puissance Produite Par Les Générateurs Photovoltaïques* ».Mémoire de Magister. Université Badji Mokhtar Annaba. (2010)
- [17] **Parimita Mohanty - Tariq Muneer-Mohan Kolhe.** « *Solar Photovoltaic System Applications: A Guidebook for Off-Grid Electrification* ».Springer International PublishingSwitzerland (2016)
- [18] **Stefan C.W. Krauter.** « *Solar Electric Power Generation – Photovoltaic Energy Systems* ».Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2006)

CHAPITRE II

Modélisation d'une cellule photovoltaïque

CHAPITRE II

Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Il existe des nombreux modèles de circuits électriques simplifiés de cellules photovoltaïques qui ont été largement décrits dans la littérature. Généralement, une cellule photovoltaïque est représentée par une source de courant (I_{ph}), connecté en parallèle avec une ou deux diodes (d_1 et d_2), une résistance série (R_s) ou une résistance parallèle (R_{sh}) ou les deux connectées. Habituellement, les modèles sont connus par le nombre inconnu de valeurs des paramètres qui ne peuvent pas être déduits directement des valeurs de feuille de données[9].

Dans le domaine de photovoltaïque on peut rencontrer plusieurs modèles des cellules photovoltaïques d'où dans notre travail on présentera deux modèles : les modèles à deux diodes et les modèles à une diode.

II.1. Les paramètres électriques

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont caractérisées par des nombreux paramètres électriques qui sont illustrés dans la figure (II.1), ou elle représente les deux caractéristiques *courant-tension* et *puissance-tension* qui permettent de déterminer les principaux paramètres du fonctionnement de cellule PV.

II.1.1. Le courant de court-circuit (I_{cc})

Le courant de court-circuit (I_{cc}) est l'un des caractéristiques les plus essentielles d'une cellule photovoltaïque.

Graphiquement, l'intersection avec l'axe de courant correspond au courant de court-circuit (I_{cc}), c'est la valeur du courant lorsque la tension $V=0$ [8].

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (\text{II-1})$$

Avec :

R_s et R_{sh} représentent les résistances série et shunt respectivement (Ω).

I_{ph} : Le photo-courant (A).

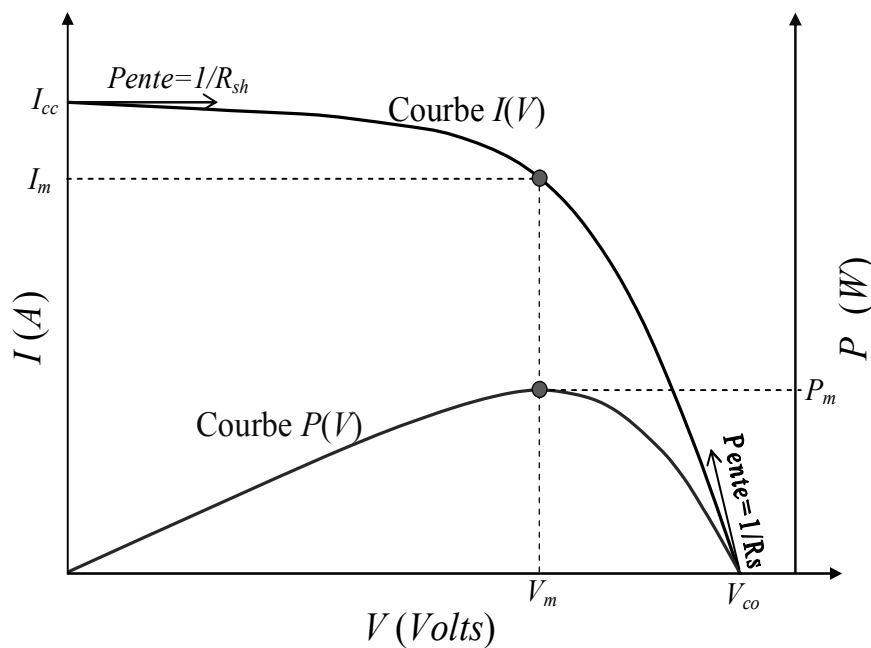


Figure (II.1)

Les caractéristiques Courant-tension et Puissance-tension

II.1.2. La tension de circuit ouvert (V_{co})

La tension de circuit ouvert (V_{co}) c'est la tension mesurée en absence de courant dans la cellule photovoltaïque, graphiquement c'est le point d'intersection avec l'axe de tension lorsque $I=0$ [8].

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln\left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s}\right) \quad (\text{II-2})$$

Où I_s représente le courant de saturation de diode qui est donner par :

$$I_s = \frac{I_{cc}}{\exp\left(\frac{V_{co}}{n.V_t}\right)} \quad (\text{II.3})$$

D'où

n : Facteur d'idéalité de diode

V_t : La potentielle thermodynamique qui est donner par :

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

k (constante de Boltzmann) = $1.381 \times 10^{-23} J/K$.

q (charge de l'électron) = $1.602 \times 10^{-19} C$.

T : Température absolue (K).

II.1.3. La puissance (P)

La puissance fournie par une cellule solaire est le produit du courant et de la tension.

$$P = V.I \quad (\text{II-5})$$

II.1.4. Facteur de forme (FF)

Le facteur de forme (FF) définit l'efficacité de la cellule solaire, c'est le rapport entre la puissance maximale (P_{max}) et le produit de tension V_{co} et le courant I_{cc} [8].

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co}.I_{cc}} \quad (\text{II-6})$$

II.1.5. Le rendement (η)

Le rendement (η) des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance, c'est le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule (P_{max}), et la puissance lumineuse incidente (P_{inc}) :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{FF.V_{co}.I_{cc}}{E.S} \quad (\text{II-7})$$

Avec :

E : Eclairement ou flux incident (W/m^2)

S : Surface de la cellule photovoltaïque (m^2)

Ce rendement peut être optimisé en augmentant le facteur de forme (FF), le courant I_{cc} et la tension V_{co} . C'est un paramètre essentiel car la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule[3].

II.1.6.La résistance série (R_s)

La résistance série (R_s) est l'un des facteurs les plus importants qui influencent la performance de la cellule PV, elle est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière[2]. La résistance R_s est l'inverse de la pente de la courbe courant-tension au point où ($V > V_{co}$), et ($I=0$) comme il est illustrer sur la figure (II.1). La résistance R_s est donnée par l'équation suivante :

$$R_s = \frac{V_{co}-V}{I} \quad (II.8)$$

Où :

I : Le courant fournit par la cellule photovoltaïque (A)

V : La tension appliquée sur les bornes de la cellule photovoltaïque (V)

II.1.7.La résistance shunt (R_{sh})

La résistance shunt (R_{sh}) joue un rôle important dans l'influence de la performance d'une cellule PV. Pour mieux connaitre ces influences, nous présentons dans le chapitre suivant une étude sur la résistance shunt.

La résistance R_{sh} est l'inverse de la pente de la courbe courant-tension au point ($0, I_{cc}$) (voir figure II-1), elle est donnée par :

$$R_{sh} = \frac{V}{I_{cc}-I} \quad (II.9)$$

II.1.8.Le facteur d'idéalité (n)

Le facteur d'idéalité de la diode a été introduit par les chercheurs pour une cellule photovoltaïque à jonction $P-N$ pour qualifier les mécanismes de conduction:

- ❖ $n < 1$: est associée à une recombinaison de type *Auger* (détermine le courant de saturation) dans une jonction sous des conditions de forte injection.
- ❖ $n = 1$: correspond à la jonction idéale qui est de suffisamment bonne qualité pour que les mécanismes de recombinaison dans la zone de charge d'espace aient des effets négligeables devant ceux de la diffusion.

- ❖ $1 < n < 2$: le niveau des pièges est décentré et n est alors dépendant de la polarisation.
- ❖ $n = 2$: la valeur particulière correspond au modèle de *Sah, Noyce et Shockley*... caractérise un niveau de centres recombinants central au gap et de distribution uniforme dans la zone de charge d'espace.
- ❖ $n > 2$: peut indiquer que la recombinaison s'effectue par des courants de fuite à la surface de la zone de charge d'espace (les effets de résistance aux shunts), et peut correspondre aussi à une distribution de pièges non uniforme avec une densité plus faible au milieu de la zone de charge d'espace[5].

II.2.Circuits équivalent d'une cellule photovoltaïque

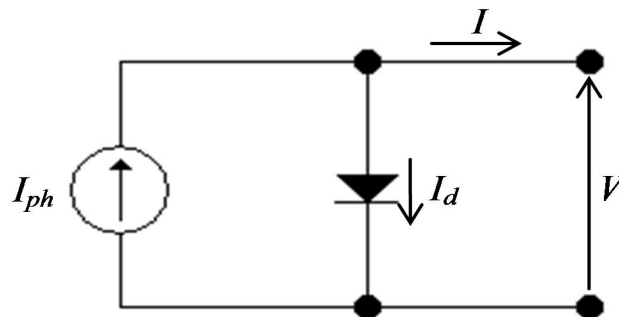
De nombreux modèles de circuits équivalents ont été développés pour représenter la cellule photovoltaïque, à partir de ces modèles on peut trouver la description mathématique des caractéristiques *courant-tension* de chaque modèle.

II.2.1.Modèles à une diode

Ce modèle est basé sur un seul modèle exponentiel de cellule photovoltaïque. La source de courant I_{ph} modélise les paires de trous d'électrons générés par des photons en raison de l'influence du champ intégré, une diode en parallèle avec la source de courant qui montre la diffusion des porteurs minoritaires dans la région de déplétion[7].

II.2.1.1.Modèle à 3 paramètres (L3P)

Le modèle à trois paramètres est connu par *L3P* (Lumped, 1 Mechanism, 3 Parameter), c'est le modèle idéal d'une cellule photovoltaïque. La cellule PV est électriquement équivalente à une source de courant en parallèle avec une diode comme il est illustré sur la figure (II.2) où I_{ph} est le courant généré par la lumière, également connu sous le nom de photo-courant, I_d est le courant inverse de diode[9]. Les trois paramètres de ce modèle sont : Le courant de saturation (I_s), le facteur d'idéalité (n) et le photo-courant (I_{ph}).



Figure(II.2)

Schéma équivalent du modèle L3P

Le courant I fourni par la cellule photovoltaïque est défini à partir des lois de Kirchhoff par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.10})$$

Où le courant I_d est donné par :

$$I_d = I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{V}{n \cdot V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.11})$$

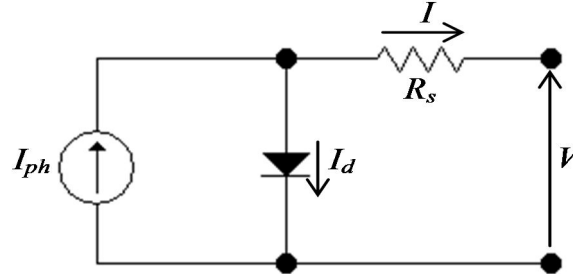
En remplaçant l'équation (II.11) dans l'équation (II.10), on obtient

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{V}{n \cdot V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.12})$$

II.2.1.2. Modèle à 4 paramètres (L4P)

Pour obtenir une meilleure représentation du comportement électrique de la cellule du modèle idéal $L3P$, le second modèle caractérise la résistivité du matériau et des pertes ohmiques dues aux niveaux de contact. Ces pertes sont représentées par une résistance R_s dans le circuit équivalent (figure II.3)[6] d'où le modèle de quatre paramètres connue par $L4P$ (Lumped, 1 Mechanism, 4 Parameter).

Ce modèle est modélisé par une source de courant dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance R_s .



Figure(II.3)

Schéma équivalent du modèle L4P

On applique les lois de Kirchhoff, on trouve :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.13})$$

$$V_d = V + I \cdot R_s \quad (\text{II.14})$$

Où V_d est la tension de diode

Puisque la résistance R_s est considérable le courant de diode devient :

$$I_d = I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{V+I \cdot R_s}{n \cdot V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.15})$$

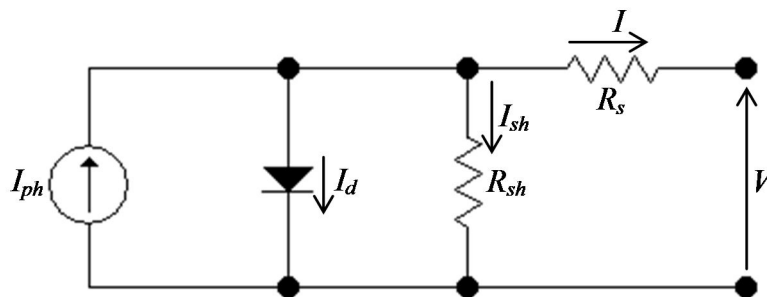
On remplace cette expression dans l'équation (II.13), la relation *courant-tension* pour ce circuit aura donc la forme suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{V+I \cdot R_s}{n \cdot V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.16})$$

II.2.1.3. Modèle à 5 paramètres (L5P) :

Comme les cellules solaires sont constituées d'un matériau à couche mince de grande surface, un certain nombre de pertes des résistances en shunt se produisent à la couche N de la cellule PV de jonction $P-N$. Un court-circuit localisé ou un court-circuit de la bordure de la cellule est la forme la plus courante de perte de shunt (Castaner et Silvestre 2002). Ceci est représenté généralement par une résistance agglomérée, R_{sh} , en parallèle avec le modèle $L4P$ [9]. Ce modèle est également appelé $L5P$ (Lumped, 1 Mechanism, 5 Parameter).

La figure (II.4) représente le circuit équivalent qui correspond à la source de courant monté en parallèle avec une diode, avec les deux résistances R_s et R_{sh} .



Figure(II.4)
Schéma équivalent du modèle $L5P$

On applique les lois de Kirchhoff, on trouve:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.17})$$

$$I_{sh}R_{sh} = IR_s + V \quad (\text{II.18})$$

Donc le courant qui circule dans la résistance shunt est défini par :

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.19})$$

Avec le courant I_d prend la même expression de l'équation ci-dessus (équations II.15)

Lorsqu'on remplace les équations (II.15 et II.19) dans l'équation (II.17), la caractéristique *Courant-tension* de ce modèle s'écrit ainsi:

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{V + IR_s}{n \cdot V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.20})$$

II.2.2. Modèles à deux diodes

Le modèle à deux diodes son circuit équivalent tient en compte le mécanisme de transport électrique des charges à l'intérieur de la cellule. Dans ce modèle, les deux diodes représentent les phénomènes de polarisation de la jonction $P-N$. (La diode d_1 représente un court-circuit en polarisation directe et la diode d_2 représente un circuit ouvert en polarisation inverse). Ces

diodes représentent la recombinaison des porteurs minoritaires, qui sont situés à la fois à la surface du matériau et dans le volume du matériau [6].

II.2.2.1. Modèle à cinq paramètres (2M5P)

Le circuit équivalent de ce modèle à cinq paramètres est obtenu en ajoutant une diode au circuit du modèle à une diode. Ce modèle se traduit lorsqu'on suppose que la résistance R_{sh} est infinie, et que la résistance R_s est nulle[4]. Ce modèle est donc appelé 2M5P (Lumped, 2 Mechanism, 5 Parameter), où les cinq paramètres de ce circuit sont: photo-courant (I_{ph}), courant de saturation de diode 1 (I_{s1}), courant de saturation de diode 2 (I_{s2}), le facteur d'idéalité de diode 1 (n_1) et le facteur d'idéalité de diode 2 (n_2). Le circuit équivalent est illustré sur la figure (II.5).

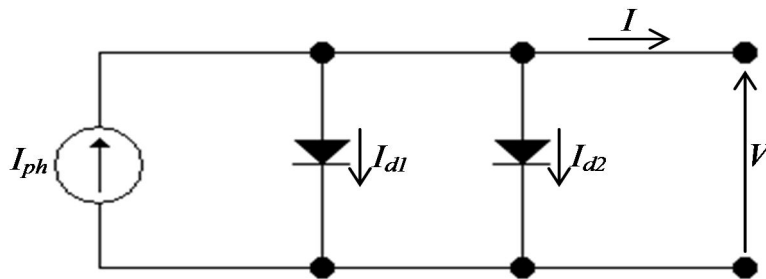


Figure (II.5)

Schéma équivalent du modèle 2M5P

Lorsqu'on applique les lois de Kirchhoff dans ce circuit on trouve:

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \quad (II.21)$$

Les courants inverses de chaque diode sont donnés par les relations suivantes :

$$I_{d1} = I_{s1} \cdot \left(\exp\left(\frac{V}{n_1 \cdot V_t}\right) - 1 \right) \quad (II.22)$$

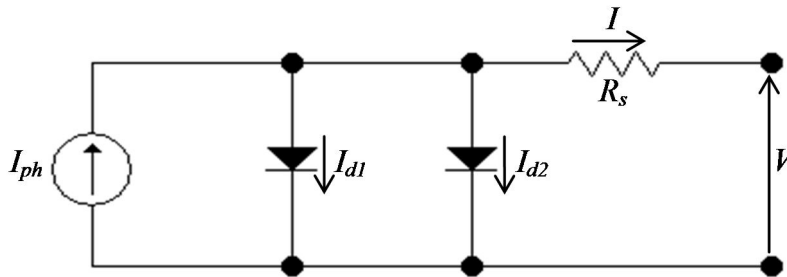
$$I_{d2} = I_{s2} \cdot \left(\exp\left(\frac{V}{n_2 \cdot V_t}\right) - 1 \right) \quad (II.23)$$

On remplace les équations (II.22) et (II.23) dans l'équation (II.21), la caractéristique *courant-tension* associée au modèle représenté sur la figure (II.5) pour la cellule PV s'écrit:

$$I = I_{ph} - I_{s1} \cdot \left(\exp\left(\frac{V}{n_1 \cdot V_t}\right) - 1 \right) - I_{s2} \cdot \left(\exp\left(\frac{V}{n_2 \cdot V_t}\right) - 1 \right) \quad (II.24)$$

II.2.2.2. Modèle à six paramètres (2M6P)

Dans ce modèle l'effet de la résistance R_s est considérée, ainsi que la résistance R_{sh} est d'habitude beaucoup plus grande que la résistance R_s , donc le courant qui la traverse est négligeable[4]. Il correspond à une source de courant monté en parallèle avec deux diodes connectées en parallèle et le deuxième diode connecté en série avec la résistance R_s . La figure (II.6) illustre le circuit de ce modèle qui est connu par 2M6P (Lumped, 2 Mechanism, 6 Parameter) où les six paramètres sont les mêmes que le modèle 2M5P: I_{ph} , I_{s1} , I_{s2} , n_1 , n_2 en plus de la résistance R_s .



Figure(II.6)

Schéma équivalent du modèle 2M6P

L'équation suivante du schéma déduite directement à partir des lois de Kirchoff :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \quad (\text{II.25})$$

Les nouvelles expressions des I_{d1} et I_{d2} s'écrivent:

$$I_{d1} = I_{s1} \cdot \left(\exp\left(\frac{V+I.R_s}{n_1.V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.26})$$

$$I_{d2} = I_{s2} \cdot \left(\exp\left(\frac{V+I.R_s}{n_2.V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.27})$$

On obtient donc à partir des équations (II.25), (II.26) et (II.27) la description mathématique de ce circuit:

$$I = I_{ph} - I_{s1} \cdot \left(\exp\left(\frac{V+I.R_s}{n_1.V_t}\right) - 1 \right) - I_{s2} \cdot \left(\exp\left(\frac{V+I.R_s}{n_2.V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.28})$$

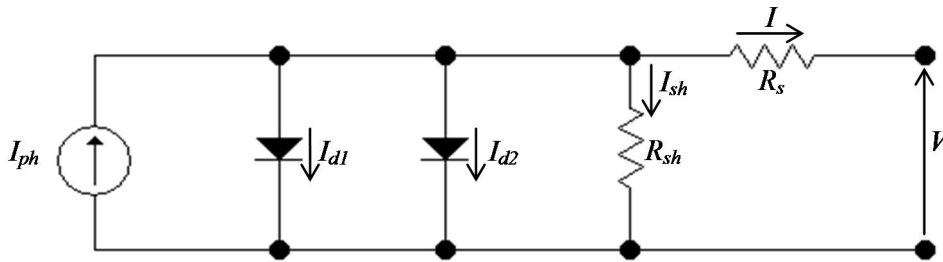
II.2.2.3. Modèle à sept paramètres (2M7P)

Le fonctionnement d'une cellule solaire de Modèle à sept paramètres 2M7P (Lumped, 2 Mechanism, 7Parameter) peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent illustré sur la figure (II.7). Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes (de courants de saturation I_{s1} et I_{s2} et de facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant le courant de court-circuit de la cellule qui dépend de l'éclairement solaire[1]).

La résistance R_s caractérise la résistivité du matériau, de celle des électrodes et du contact semi-conducteur/métal. Elle doit idéalement être la plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule, ceci peut être réalisé en optimisant le contact semi-conducteur/métal, et en diminuant la résistivité du matériau utilisé.

La résistance R_{sh} traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite, causé par un défaut. Cette valeur devra être la plus élevée possible[4].

Donc le nombre de paramètres est augmenté à sept paramètres lorsqu'on prend la résistance R_{sh} considérable.



Figure(II.7)

Schéma équivalent du modèle 2M7P

Lorsqu'on applique les lois de Kirchhoff, le courant sera obtenu par l'équation :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (\text{II.29})$$

Les courants I_{d1} et I_{d2} de deux diodes sont donnés par les équations (II.30) et (II.31) respectivement :

$$I_{d1} = I_{s1} \cdot \left(\exp\left(\frac{V+I.R_s}{n_1.V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.30})$$

$$I_{d2} = I_{s2} \cdot \left(\exp\left(\frac{V+I.R_s}{n_2.V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.31})$$

Et aussi le courant I_{sh} prend l'expression précédente (II.19) :

On remplace les courants I_{d1} et I_{d2} par ces expressions dans l'équation (II.29), la caractéristique $I(V)$ est décrite ainsi par :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \cdot \left(\exp\left(\frac{V+I.R_s}{n_1.V_t}\right) - 1 \right) - I_{s2} \cdot \left(\exp\left(\frac{V+I.R_s}{n_2.V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V+I.R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.32})$$

Tous les modèles décrits dans ce chapitre sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau(II.1) : Tableau récapitulatif des différents modèles de cellule photovoltaïque

| Modèle | Nom | Nombre de paramètres | Paramètres | Définition des paramètres |
|--------|------------------------------------|----------------------|---|---|
| L3P | Lumped, 1 Mechanism, 3Parameter | 3 | I_{ph}, I_s n | I_{ph} : Photo-courant I_s : Courant de saturation de diode |
| L4P | Lumped, 1 Mechanism, 4Parameter | 4 | I_{ph}, I_s n R_s | n : Facteur d'idéalité de diode I_{s1} : Courant de saturation de diode1 |
| L5P | Lumped, 1 Mechanism, 5Parameter | 5 | I_{ph}, I_s n R_s, R_{sh} | I_{s2} : Courant de saturation de diode2 n_1 : facteur d'idéalité de diode 1 |
| 2M5P | Lumped, 2 Mechanism, 5Parameter | 5 | I_{ph}, I_{s1}, I_{s2} n_1, n_2 | n_2 : facteur d'idéalité de diode 2 |
| 2M6P | Lumped, 2 Mechanism, 6Parameter | 6 | I_{ph}, I_{s1}, I_{s2} n_1, n_2 R_s | R_s : Résistance série R_{sh} : Résistance shunt |
| 2M7P | Lumped, 2 Mechanism, 7Parameter | 7 | I_{ph}, I_{s1}, I_{s2} n_1, n_2 R_s, R_{sh} | |

II.3. Conclusion

Les caractéristiques électriques fondamentales de performances d'une cellule photovoltaïque ont été décrites dans ce chapitre, ainsi que leurs circuits équivalents. Nous avons fait la modélisation pour les différents modèles mathématiques qui sont représentés par la caractéristique *courant-tension* d'une cellule PV.

Dans notre étude, il est important d'utiliser un modèle précis pour le fonctionnement de cellule PV, pour cela dans le chapitre suivant on va faire une étude comparative entre les différents modèle afin de choisir celui qui s'approché le plus des résultats expérimentaux faite au niveau du laboratoire pédagogique des énergies renouvelables du département de physique, faculté des sciences université de Tlemcen.

Références

- [1] **ABOUDA Salim.** « *Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques : Application aux systèmes de pompage* ». Thèse de Doctorat. Université de Reims Champagne-Ardenne. (2015)
- [2] **A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud et I. Youm.** « *Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque* ». Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 473-483
- [3] **BELARBI Moussaab.** « *Modélisation des paramètres électriques d'une cellule solaire sensibilisée par colorant* ». Mémoire de Master. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen. (2013)
- [4] **BELARBI Mustapha.** « *Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome* ». Thèse de Doctorat. Université Mohamed Boudiaf d'Oran. (2015)
- [5] **CHARLES Jean-Pierre, HADDI Ahmed, MAOUAD Alain, et al.** « *La Jonction, du Solaire à la Microélectronique* ». Revue des Energies Renouvelables, 2000, vol. 3, p. 1-16.
- [6] **Djamila Rekioua, Ernest Matagne.** « *Optimization of Photovoltaic Power Systems: Modelization, Simulation and Control* ». Springer-Verlag London Limited (2012)
- [7] **HEJRI Mohammad et MOKHTARI Hossein.** « *On the Comprehensive Parametrization of the Photovoltaic (PV) Cells and Modules* ». IEEE Journal of Photovoltaics. (2016), vol. 7, no 1, p. 250-258.
- [8] **PAULESCU Marius, PAULESCU Eugenia, GRAVILA Paul, et al.** « *Weather modeling and forecasting of PV systems operation* ». Springer-Verlag London (2013)
- [9] **SARKAR, Md Nazmul Islam.** « *Effect of various model parameters on solar photovoltaic cell simulation: a SPICE analysis* ». Renewables: Wind, Water, and Solar. (2016), vol. 3, no 1, p. 13.

CHAPITRE III

Influence de la résistance shunt dans la performance d'une cellule PV

Chapitre III

Influence de la résistance shunt dans la performance d'une cellule PV

Pour un système photovoltaïque l'objectif est toujours l'optimisation et la performance de ce système. La résistance shunt joue un rôle important dans la performance de la cellule PV, elle caractérise les pertes de recombinaisons dues aux épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge d'espace, son influence est très importante pour les faibles niveaux de polarisation au voisinage de courant I_{cc} , donc elle est liée au processus de fabrication et l'existence de défauts de structure. Dans ce chapitre on va voir comment la résistance R_{sh} affecter les caractéristiques *courant-tension* et *puissance tension*, pour cela le choix du modèle du circuit équivalent pour une cellule ayant les meilleures performances est important.

Dans cette étude la simulation et la validation expérimentale d'une cellule photovoltaïque est présente pour un choix correcte et précis qui se fera selon notre étude.

Pour les calculs numériques on utilise le code *python*. Pour la représentation graphique des données nous avons utilisé le logiciel *Origin 6.0*.

III.1. Etude sur les différents modèles de la cellule PV

Dans cette partie on va déterminer les caractéristiques *courant-tension* et *puissance-tension* d'une cellule PV expérimentalement, et les comparer avec la simulation des différents modèles qui peuvent modéliser cette cellule.

III.1.1. Etude expérimentale

L'effet photovoltaïque dans les cellules PV convertit l'énergie solaire directement en électricité avec les deux caractéristiques de sortie $I(V)$ et $P(V)$, pour étudier ces caractéristiques, on a fait une simple expérience au niveau du laboratoire pédagogique d'énergie renouvelable du département physique, faculté des sciences, université Tlemcen.

Dans cette expérience nous avons choisi un module photovoltaïque constitué de quatre cellules placés en série de section $S=5.024\text{cm}^2$. (Figure III.1):

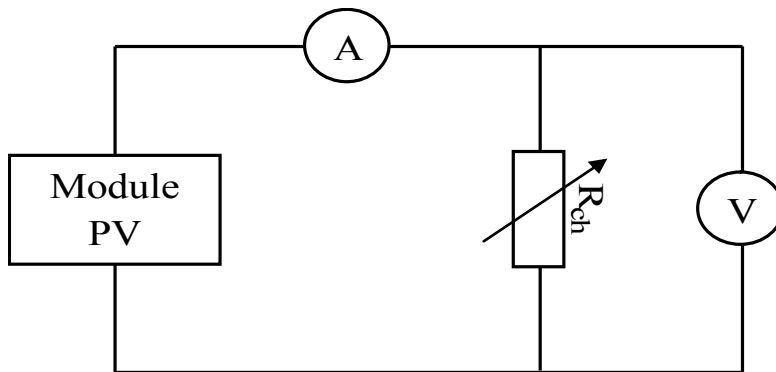


Figure (III.1)

Le montage de l'expérience

Dans ce montage, le module PV est connecté avec une résistance de charge variable (R_{ch}). Lorsqu'on éclaire ce dernier par une lampe, on procède à la variation de la résistance du circuit extérieur R_{ch} , afin de mesurer le courant et la tension, les valeurs obtenues sont données dans le tableau (III.1).

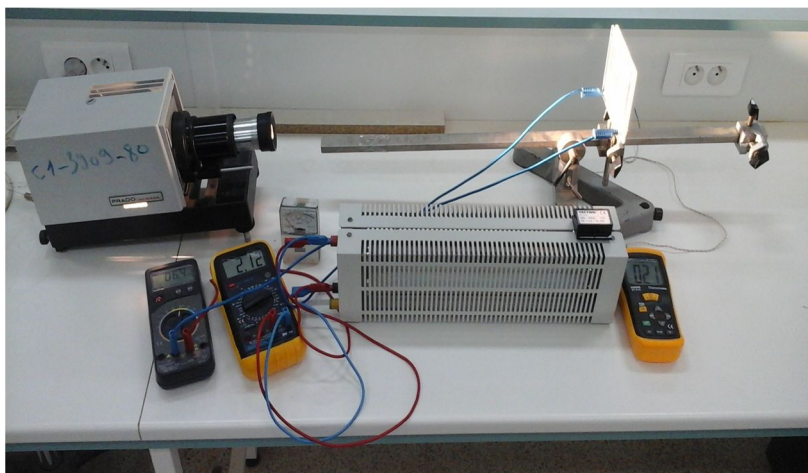


Figure (III.2)

L'appareillage de l'expérience

D'autres appareils de mesures sont utilisés (figure III.2) tels que l'ampèremètre, un voltmètre, un solaire mètre pour mesurer le flux incident et un thermomètre pour mesurer la température.

Tableau (III.1) : Les valeurs expérimentales mesurées de tension et de courant fournit par le module PV

| Eclaircement= $250W/m^2$, Température= $20^{\circ}C$ | | |
|---|---------|---------|
| R_{ch} (Ω) | V (v) | I (A) |
| 0.0000 | 0.0000 | 0.1101 |
| 2.2769 | 0.25 | 0.1098 |
| 3.4735 | 0.38 | 0.1094 |
| 5.7798 | 0.63 | 0.109 |
| 8.3948 | 0.9100 | 0.1084 |
| 10.9462 | 1.18 | 0.1078 |
| 11.7318 | 1.2600 | 0.1074 |
| 12.7940 | 1.3600 | 0.1063 |
| 15.2174 | 1.5400 | 0.1012 |
| 16.4959 | 1.6100 | 0.0976 |
| 18.6947 | 1.69 | 0.0904 |
| 21.2121 | 1.7500 | 0.0825 |
| 22.5888 | 1.7800 | 0.0788 |
| 23.8095 | 1.8000 | 0.0756 |
| 27.2460 | 1.85 | 0.0679 |
| 33.3333 | 1.91 | 0.0573 |
| 38.4921 | 1.9400 | 0.0504 |
| 53.1915 | 2.0000 | 0.0376 |
| 110.1064 | 2.07 | 0.0188 |
| 336.5079 | 2.1200 | 0.0063 |

A partir de ces résultats on a pu tracer la caractéristique *courant-tension* de la cellule PV (voir Annexe 1) à différentes charges et la caractéristique *puissance-tension* qui sont illustrées sur la figure (III.3) et figure (III.4) respectivement.

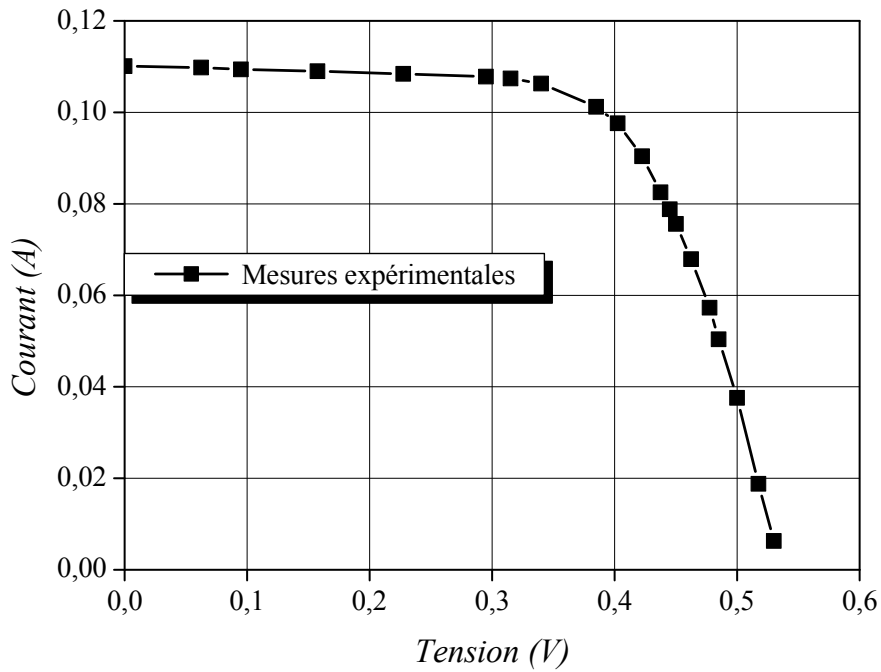


Figure (III.3)
 Caractéristique courant-tension de la cellule PV (résultats expérimentales)

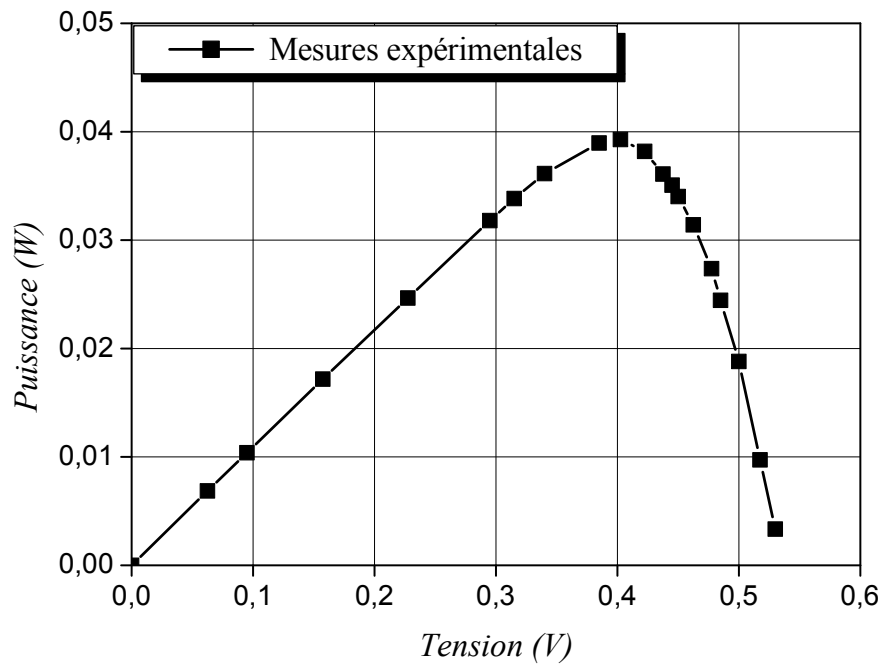


Figure (III.4)
 Caractéristique puissance-tension de la cellule PV (résultats expérimentales)

II.1.1.1. Analyse des résultats

Lorsque la valeur de résistance R_{ch} de circuit extérieur est nulle, la tension V est nulle et le courant prend la valeur maximale qui est le courant de court-circuit I_{cc} (qui égale à $0,1101A$), d'autre part, lorsque la valeur de résistance R_{ch} de circuit extérieur est grande, la tension V est maximale (c'est la tension de circuit ouvert V_{co} qui égale à $0.53V$) et le courant s'annule.

Les figures (III.3) et (III.4) montrant l'apparition de trois régions pour le fonctionnement de la cellule :

1^{er} région : Dans cette région la cellule PV délivre le même courant qui approche la valeur de courant de court-circuit I_{cc} quelque soit la valeur de la tension, cela signifie que la cellule fonctionne comme un générateur de courant.

2^{ème} région : Dans cette région la cellule PV génère la puissance la plus élevée possible où l'efficacité du générateur est la plus grande possible.

3^{ème} région : Le courant commence à diminuer avec une variation exponentielle et la tension reste presque constante, donc la cellule PV fonctionne comme un générateur de tension.

III.1.2. Simulation des différents modèles de la cellule PV

Dans cette étude on va déterminer les caractéristiques de la cellule PV à partir des différents modèles qui ont des paramètres électriques différents, ensuite, on va faire une comparaison entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux. Les modèles qu'on va utiliser sont modéliser par les équations suivantes (Pour plus de détails voir le chapitre 2 section (II.2)) :

Modèle à une diode, 3 paramètres

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{V}{n \cdot V_t}\right) - 1 \right) \quad (III.1)$$

Modèle à une diode, 4 paramètres

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot V_t}\right) - 1 \right) \quad (III.2)$$

Modèle à une diode, 5 paramètres

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (III.3)$$

Modèle à deux diodes, 5 paramètres

$$I = I_{ph} - I_{s1} \cdot \left(\exp\left(\frac{V}{n_1 \cdot V_t}\right) - 1 \right) - I_{s2} \cdot \left(\exp\left(\frac{V}{n_2 \cdot V_t}\right) - 1 \right) \quad (III.4)$$

Modèle à deux diodes, 6 paramètres

$$I = I_{ph} - I_{s1} \cdot \left(\exp \left(\frac{V+I.R_s}{n_1.V_t} \right) - 1 \right) - I_{s2} \cdot \left(\exp \left(\frac{V+I.R_s}{n_2.V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{III.5})$$

Modèle à deux diodes, 7 paramètres

$$I = I_{ph} - I_{s1} \cdot \left(\exp \left(\frac{V+I.R_s}{n_1.V_t} \right) - 1 \right) - I_{s2} \cdot \left(\exp \left(\frac{V+I.R_s}{n_2.V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V+I.R_s}{R_{sh}} \quad (\text{III.6})$$

III.1.2.1. Etude comparative des modèles PV

Le calcul numérique de courant est obtenu à partir de la variation de tension par les équations implicites et non linéaire de chaque modèle de la cellule photovoltaïque ce qui va nous permettre de tracer les graphes ci-dessous. Pour faire ce travail on a utilisé le code *Python* qui est efficace pour le calcul scientifique facile à utiliser et puissant.

Pour faire une comparaison correcte entre les six modèles et les valeurs expérimentales nous avons utilisé les mêmes conditions initiales pour l'éclairement ($E=250W/m^2$) et la température ($T=20^\circ C$), en plus, le courant de court-circuit ($I_{cc}=0,1101A$) et la tension de circuit ouvert ($V_{co}=0.53V$) comme des paramètres d'entrée, La sortie peut être de courant, tension, puissance et autres. Pour faciliter les calculs on prendre les cas où $n_1=1$ (cas idéal, pas de recombinaison) et $n_2=2$ (la valeur particulière).

Tableau (III.2) : Les différents paramètres de la cellule PV obtenus par la simulation.

| Modèle | $V_m(V)$ | $I_m(A)$ | $P_m(W)$ | FF (%) | η (%) |
|------------|----------|----------|----------|----------|------------|
| Expérience | 0.40250 | 0.09760 | 0.03928 | 67.32130 | 3.12771 |
| L3P | 0.46000 | 0.10545 | 0.04851 | 83.12683 | 3.86202 |
| L4P | 0.46000 | 0.10360 | 0.04766 | 81.66847 | 3.79427 |
| L5P | 0.44000 | 0.10267 | 0.04518 | 77.41641 | 3.59672 |
| 2M5P | 0.42000 | 0.09889 | 0.04153 | 71.17680 | 3.30683 |
| 2M6P | 0.41000 | 0.09933 | 0.04073 | 69.79127 | 3.24246 |
| 2M7P | 0.41000 | 0.09744 | 0.03995 | 68.46332 | 3.18076 |

Pour calculer le facteur de forme FF et le rendement de ces modèles on utilise les équations de chapitre II (équations II.6 et II.7).

a) Les modèles d'une seule diode avec les résultats expérimentaux

❖ **Caractéristique courant-tension**

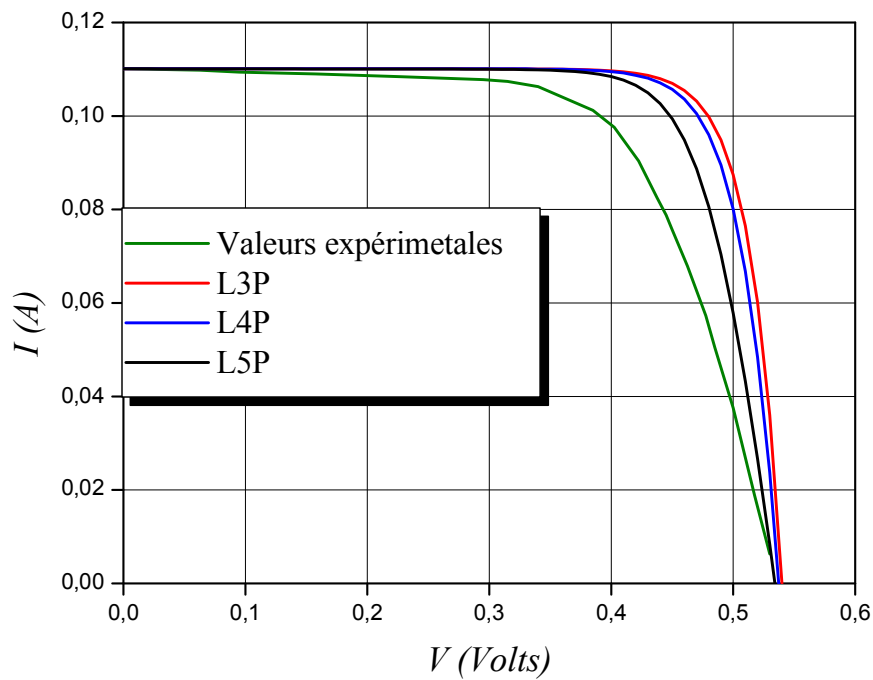


Figure (III.5)

Comparaison $I(V)$ entre les modèles à une diode et les mesures expérimentales

❖ **Caractéristique puissance-tension**

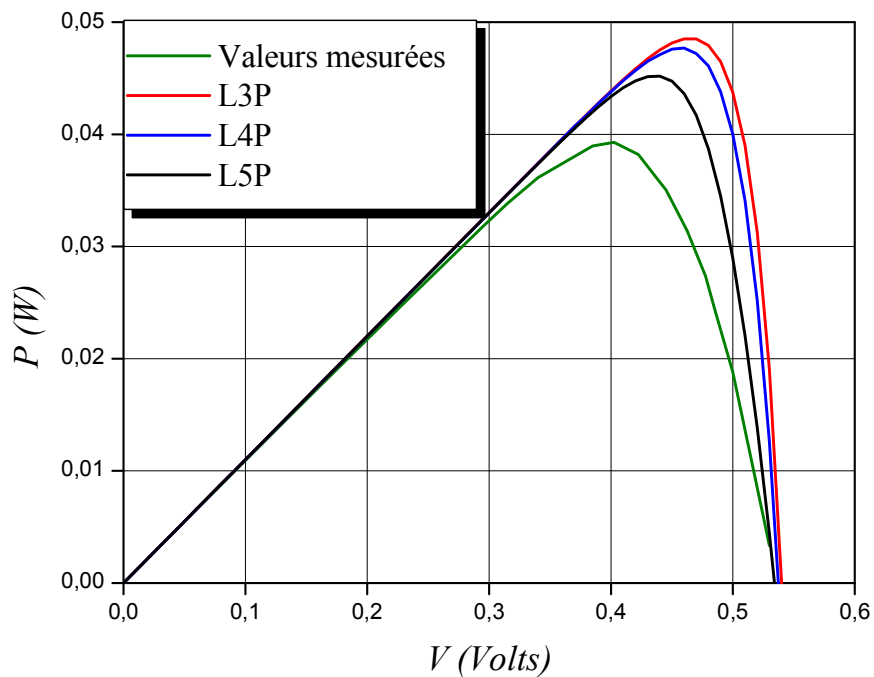


Figure (III.6)

Comparaison $P(V)$ entre les modèles à une diode et les mesures expérimentales.

b) Les modèles de deux diodes avec les résultats expérimentaux

❖ **Caractéristique courant-tension**

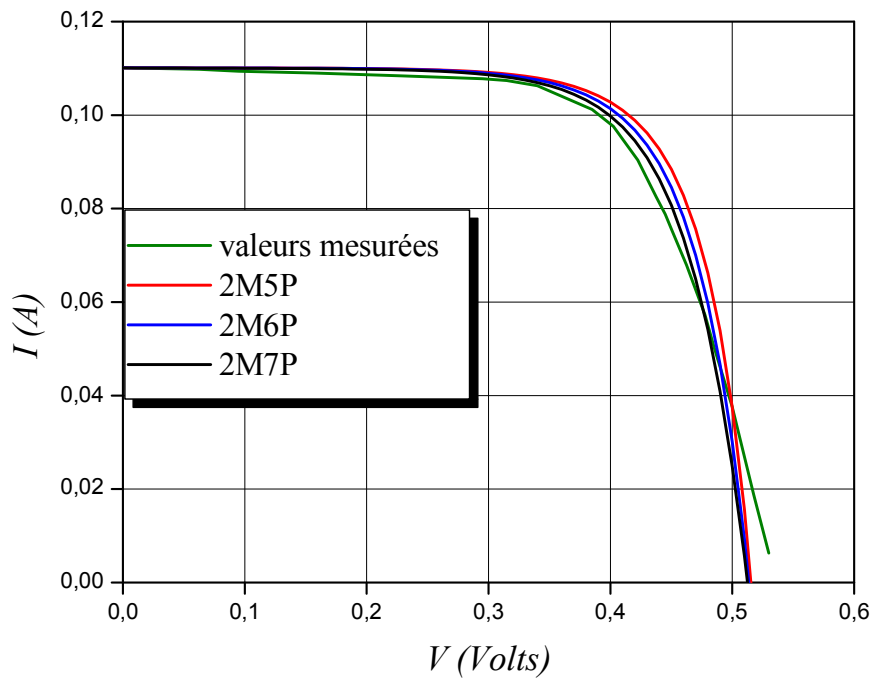


Figure (III.7)

Comparaison $I(V)$ entre les modèles à deux diodes et les mesures expérimentales.

❖ **Caractéristique puissance-tension**

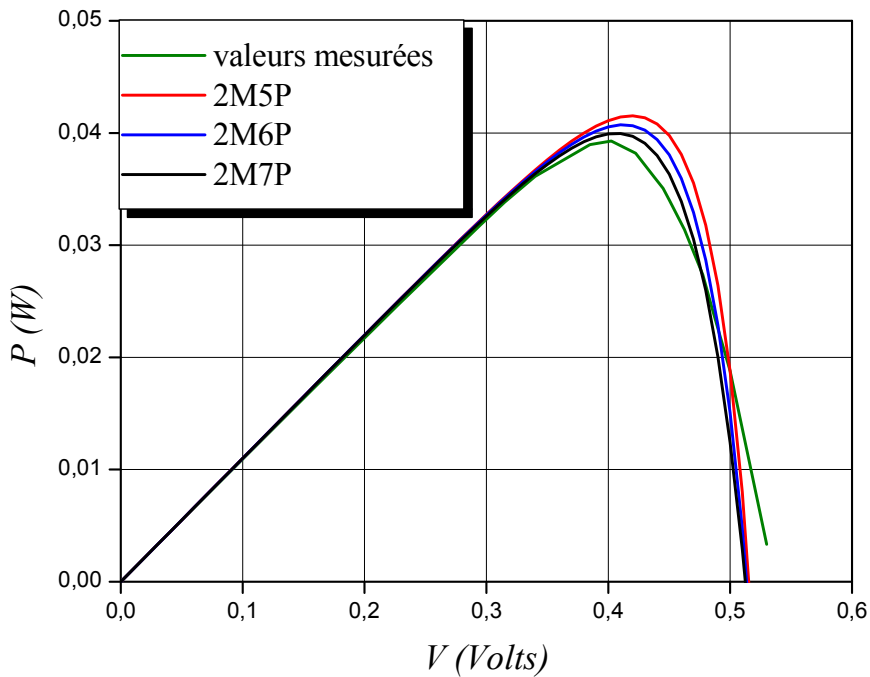


Figure (III.8)

Comparaison $P(V)$ entre les modèles à deux diodes et les mesures expérimentales

c) *Les modèles 2M7P et L5P avec l'expérience et le modèle idéal*

❖ **Caractéristique courant-tension**

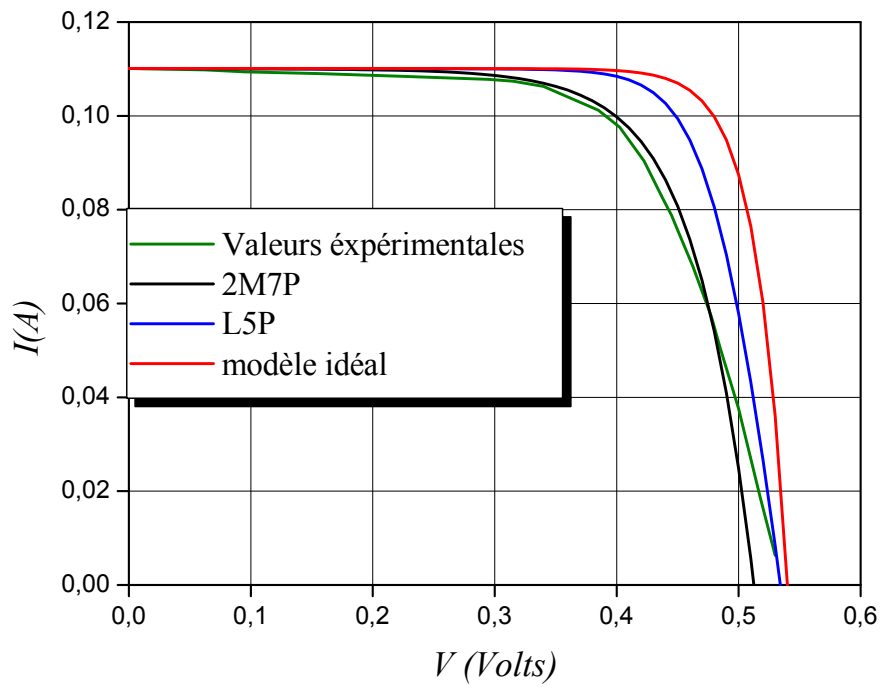


Figure (III.9)

Comparaison $I(V)$ entre les modèles 2M7P et L5P avec l'expérience et le modèle idéal

❖ **Caractéristique puissance-tension**

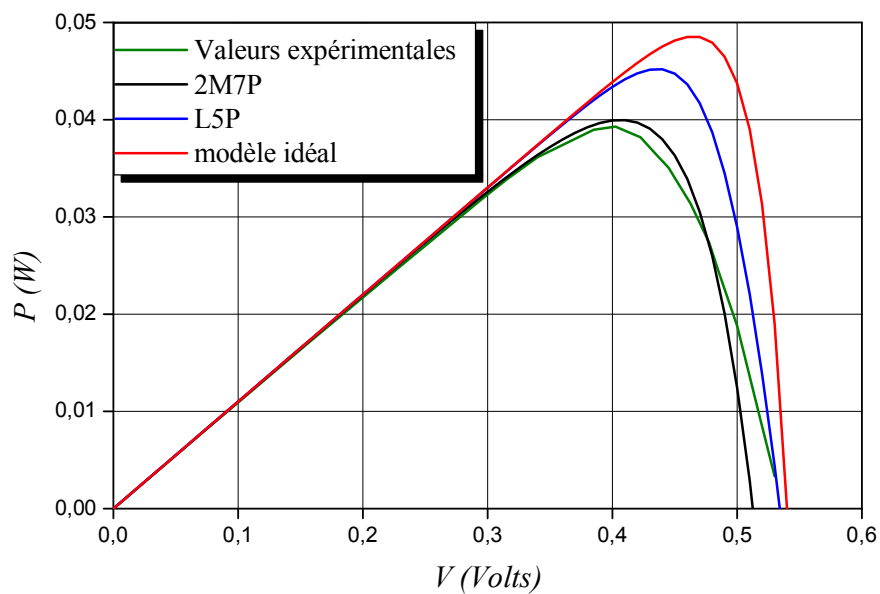


Figure (III.10)

Comparaison $P(V)$ entre les modèles 2M7P et L5P avec l'expérience et le modèle idéal

A partir de figures précédentes (de (III.5) à (III.8)), on peut résumer les principaux résultats de différents paramètres de la cellule PV dans le tableau (III.2) en les comparant avec les résultats expérimentaux.

Les graphes suivants sont tracés à partir de résultats de tableau (III.2)

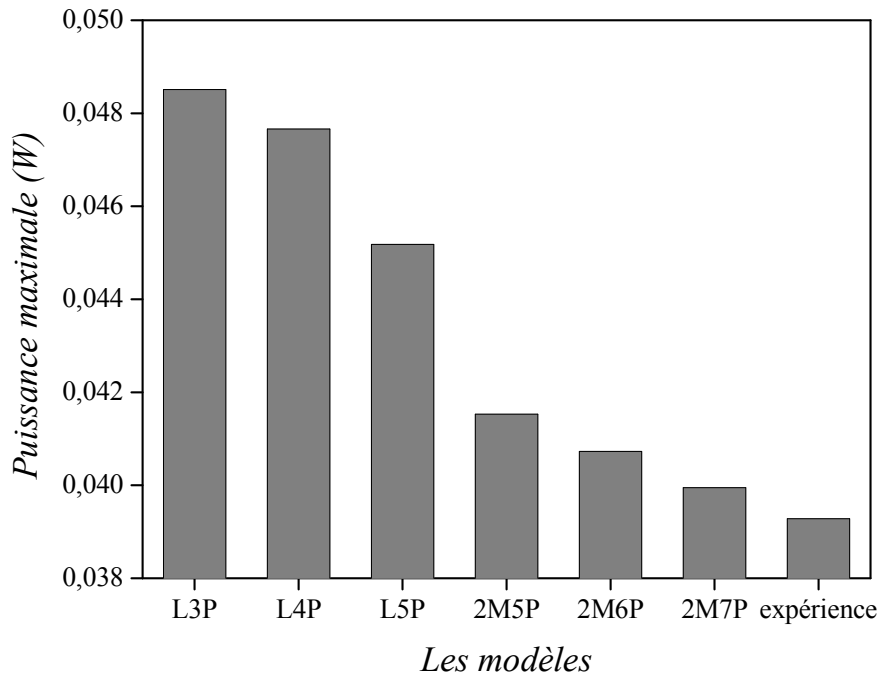


Figure (III.11)

La puissance maximale en fonction des modèles

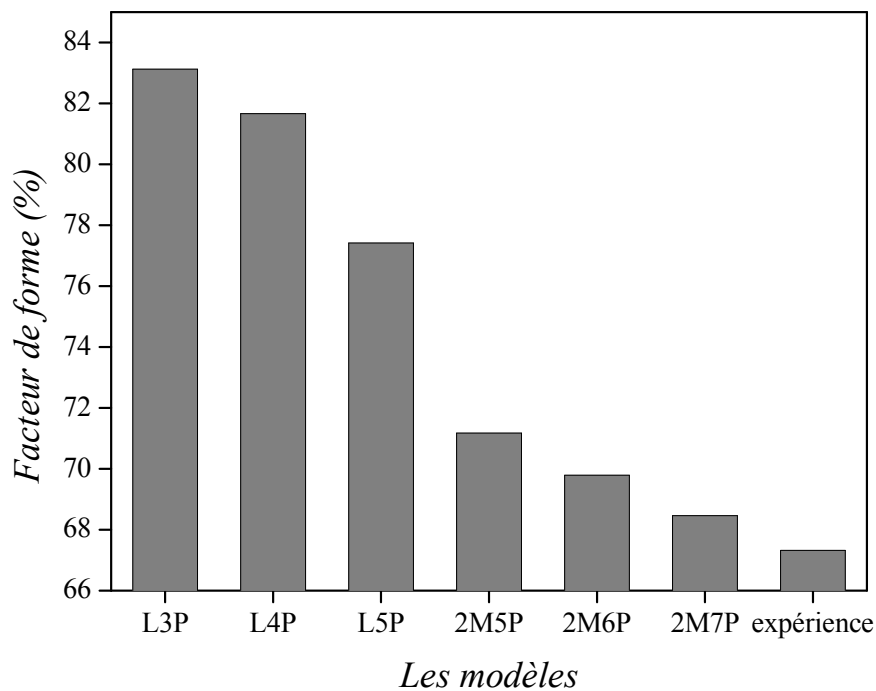
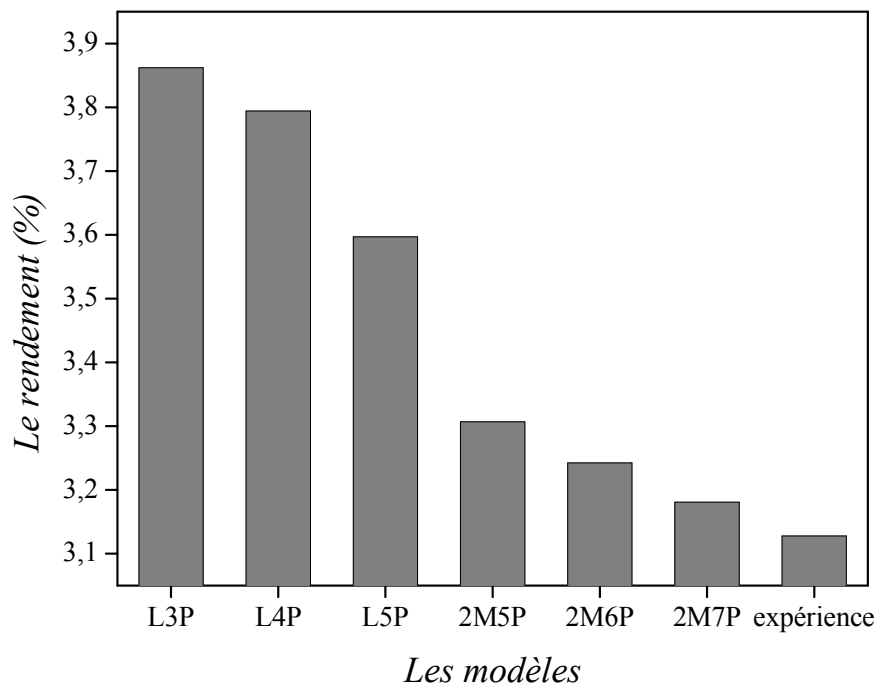


Figure (III.12)

Le facteur de forme en fonction des modèles

**Figure (III.13)**

Le rendement en fonction des modèles

III.1.2.1. Analyse des résultats

D'après les représentations graphiques des différents modèles on a pu déduire les analyses suivantes :

1. D'après les figures (III.5 et III.6) de modèle à une diode, on remarque qu'il y a une modification dans l'écart de courbe $I(V)$ et $P(V)$ due à la présence (ou l'absence) de la résistance R_s et (ou) la résistance R_{sh} , la même remarque pour les modèles à deux diodes (figure III.7 et figure III.8). De plus, les modèles à deux diodes sont plus proches que les modèles à une diode par rapport à la courbe de valeurs expérimentales due à la présence de 2ème diode, ainsi que la courbe qui représente le modèle à deux diode sept paramètres $2M7P$ (figure (III.7) et figure (III.8)) est presque identique avec la courbe de valeurs mesurés de même figures, d'autre part ce modèle fournit la puissance la plus faible par rapport aux autres modèles comme le modèle d'une seule diode 3 paramètres ($L3P$) qui génère la puissance la plus élevée. Ces variations impliquent que l'addition de résistances R_s et R_{sh} faire un changement sur les caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ de la cellule photovoltaïque grâce aux ses effet ohmiques, et aussi l'addition de deuxième diode.
2. On peut remarquer dans le tableau (III.2) que chaque modèle a une puissance maximale qui donne une tension maximale et un courant maximal, et quand la

puissance maximale change, le facteur de forme change également, et aussi le rendement de la cellule PV change, ce dernier a des valeurs très petits (environ 3% et 4%). A cause de ces changements nous avons tracé les différentes courbes de figures (III.9) à (III.11) qui montrent les variations de ces paramètres de la cellule PV en fonction des modèles.

3. Les figures (III.9) et (III.10) représentent la comparaison entre les deux modèles qui contiennent la résistance shunt, le modèle idéal et aussi la courbe de valeurs expérimentales. A partir de ces courbes on constate que la courbe de modèle *2M7P* est la plus proche aux valeurs réelles mais loin de modèle idéal, il génère une faible puissance ($0.03995W$) qui donne une efficacité faible ($FF=68.46332\%$), au contraire, le modèle *L5P* est loin de courbe de l'expérience mais approche au modèle idéal, il fournit une puissance de $0.04518W$ et leur FF égale à 77.41641% .
4. Nous savons que les modèles sont définis essentiellement par le nombre de paramètres, avec cette raison on peut discuter les différentes figures comme suit : Lorsque le nombre de paramètre de la cellule PV augmente, la puissance maximale diminue (de $0.04851W$ à $0.03995W$) et devient plus proche à la valeur réelle ($0.03928W$) comme le montre sur la figure (III.11), et le facteur de forme diminue également (de 83% à 68%) comme le représenté sur la figure (III.12). La même chose pour le rendement (figure III.13), tant que le nombre de paramètres de la cellule PV augmente, leur rendement diminue pour approcher au rendement expérimental (environ 3.1%).

III.1.3.Conclusion

Une étude comparative des caractéristiques d'une cellule PV sous éclairement de $250W/m^2$ à la température $20^\circ C$ a été étudiée dans cette partie afin de bien choisir un modèle pour l'étude de l'influence de la résistance shunt sur les caractéristiques $I(V)$, $P(V)$.

Les résultats donnés par la simulation ont montré que le modèle à deux diodes sept paramètres est en meilleur accord avec l'expérience pour un éclairement de $250W/m^2$ mais donne une puissance plus faible par rapport au modèle idéal, contrairement le modèle à une diode cinq paramètres génère une puissance proche de celle du modèle idéal mais plus loin par rapport à l'expérience. Donc on peut conclure que le modèle *2M7P* est le modèle le plus approprié pour faire une simulation précise de la cellule photovoltaïque en réelle. Cette précision augmente avec l'augmentation de la valeur de la résistance shunt, d'autre part le modèle *L5P* est plus efficace que *2M7P*.

III.2. Influence de la résistance shunt sur les caractéristiques d'une cellule PV

Nous avons vu dans la partie précédente une comparaison entre les différents modèles pour une cellule photovoltaïque où on a conclu pour les deux modèles qui contiennent la résistance R_{sh} que le modèle $2M7P$ donne des meilleures approches avec les résultats expérimentaux, tandis que le modèle $L5P$ est plus proche au modèle idéal ($L3P$) qui génère la puissance la plus élevée.

Dans cette partie nous allons étudier l'influence de la résistance shunt qui peut être décrite et illustrer par le modèle de circuit équivalent à une diode pour une cellule PV à jonction $P-N$ en suite on va comparer la variation des caractéristiques *courant-tension* et *puissance-tension* de ce modèle avec des différentes valeurs de la résistance shunt expérimentalement et numériquement afin de les comparer. A partir de cette étude on peut conclure l'importance de l'effet de la résistance shunt sur la performance de la cellule PV.

III.2.1. Etude expérimentale

Puisque la résistance shunt est un paramètre technologique interne (R_{shi}) d'une cellule photovoltaïque, pour étudier expérimentalement leur influence sur la caractéristique on simule cette dernière par une résistance shunt externe (R_{sh}) comme le montre sur la figure (III.14).

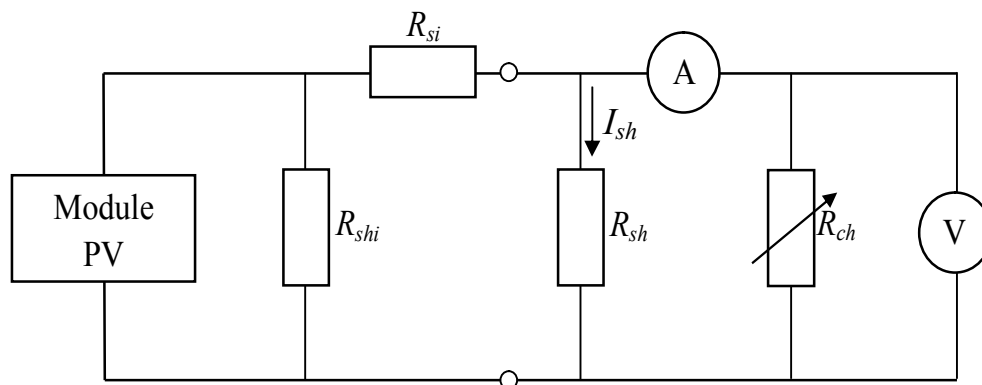


Figure (III.14)

Montage de l'expérience de l'influence de Résistance R_{sh}

Dans cette expérience en plus de montage de la première expérience on a ajouté la résistance shunt R_{sh} en parallèle avec le module PV, ensuite on a recalculé le courant et la tension de chaque résistance R_{ch} sous l'éclairement $E=250W/m^2$ et à la température $T=20^\circ C$. Pour étudier l'influence de la résistance R_{sh} on a varié cette dernière par des différentes valeurs qui sont 10Ω , 100Ω , $10^3\Omega$, $5K\Omega$ et $10^4\Omega$. Le tableau (III.3) donne les mesures expérimentales de caractéristique $I(V)$ de module PV pour chaque valeur de résistance R_{sh} , et aussi les figures

(III.15) et (III.16) représentent le traçage de caractéristiques expérimentales $I(V)$ et $P(V)$ respectivement d'une seule cellule de ce module PV.

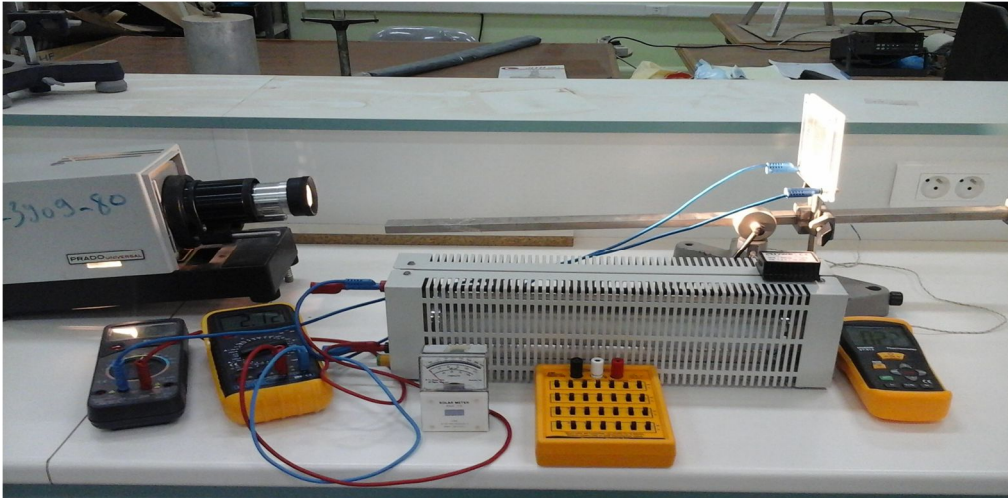


Figure (III.15)
Appareillage de l'expérience de l'influence de Résistance R_{sh}

Tableau (III.3) : Les mesures expérimentales de courant et de tension du module PV pour les différentes valeurs de résistance R_{sh}

| $R_{sh}=10\Omega$ | | | $R_{sh}=100\Omega$ | | | $R_{sh}=1000\Omega$ | | | $R_{sh}=5000\Omega$ | | | $R_{sh}=10000\Omega$ | | |
|-------------------|--------|--------|--------------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|
| $R_{ch}(\Omega)$ | $V(v)$ | $I(A)$ | $R_{ch}(\Omega)$ | $V(v)$ | $I(A)$ | $R_{ch}(\Omega)$ | $V(v)$ | $I(A)$ | $R_{ch}(\Omega)$ | $V(v)$ | $I(A)$ | $R_{ch}(\Omega)$ | $V(v)$ | $I(A)$ |
| 0.0000 | 0.00 | 0.0915 | 0.0000 | 0.00 | 0.1078 | 0.0000 | 0.00 | 0.1109 | 0.0000 | 0.00 | 0.1106 | 0.0000 | 0.00 | 0.111 |
| 0.1094 | 0.01 | 0.0914 | 0.0928 | 0.01 | 0.1078 | 0.0902 | 0.01 | 0.1109 | 0.0906 | 0.01 | 0.1104 | 1.5357 | 0.17 | 0.1107 |
| 1.3221 | 0.11 | 0.0832 | 1.4138 | 0.15 | 0.1061 | 2.2666 | 0.25 | 0.1103 | 1.5413 | 0.17 | 0.1103 | 4.1780 | 0.46 | 0.1101 |
| 1.7220 | 0.14 | 0.0813 | 2.2835 | 0.24 | 0.1051 | 3.1760 | 0.35 | 0.1102 | 4.0984 | 0.45 | 0.1098 | 7.8611 | 0.86 | 0.1094 |
| 2.4804 | 0.19 | 0.0766 | 3.9729 | 0.41 | 0.1032 | 4.0036 | 0.44 | 0.1099 | 6.2214 | 0.68 | 0.1093 | 9.1408 | 1.00 | 0.1094 |
| 3.1293 | 0.23 | 0.0735 | 7.4597 | 0.74 | 0.0992 | 5.8448 | 0.64 | 0.1095 | 7.5160 | 0.82 | 0.1091 | 10.0640 | 1.1 | 0.1093 |
| 4.0115 | 0.28 | 0.0698 | 10.0518 | 0.97 | 0.0965 | 6.7704 | 0.74 | 0.1093 | 8.7316 | 0.95 | 0.1088 | 12.6160 | 1.36 | 0.1078 |
| 4.8338 | 0.32 | 0.0662 | 13.5484 | 1.26 | 0.093 | 8.3794 | 0.91 | 0.1086 | 10.2399 | 1.11 | 0.1084 | 13.5338 | 1.44 | 0.1064 |
| 7.7876 | 0.44 | 0.0565 | 16.0714 | 1.44 | 0.0896 | 10.0746 | 1.08 | 0.1072 | 11.6992 | 1.26 | 0.1077 | 15.1663 | 1.55 | 0.1022 |
| 9.2803 | 0.49 | 0.0528 | 18.7204 | 1.58 | 0.0844 | 12.5590 | 1.33 | 0.1059 | 12.6168 | 1.35 | 0.107 | 16.0643 | 1.6 | 0.0996 |
| 12.7193 | 0.58 | 0.0456 | 20.4489 | 1.64 | 0.0802 | 14.4101 | 1.49 | 0.1034 | 13.5161 | 1.43 | 0.1058 | 17.8610 | 1.67 | 0.0935 |
| 16.2907 | 0.65 | 0.0399 | 25.5814 | 1.76 | 0.0688 | 15.9960 | 1.59 | 0.0994 | 14.4231 | 1.5 | 0.104 | 19.5233 | 1.72 | 0.0881 |
| 21.2389 | 0.72 | 0.0339 | 33.2734 | 1.85 | 0.0556 | 18.7019 | 1.7 | 0.0909 | 16.1290 | 1.6 | 0.0992 | 24.7619 | 1.82 | 0.0735 |
| 25.8389 | 0.77 | 0.0298 | 39.2116 | 1.89 | 0.0482 | 23.9474 | 1.82 | 0.076 | 19.6796 | 1.72 | 0.0874 | 29.8887 | 1.88 | 0.0629 |
| 41.5094 | 0.88 | 0.0212 | 47.7723 | 1.93 | 0.0404 | 30.1917 | 1.89 | 0.0626 | 24.9315 | 1.82 | 0.073 | 35.1648 | 1.92 | 0.0546 |
| 63.3333 | 0.95 | 0.015 | 56.4842 | 1.96 | 0.0347 | 41.5254 | 1.96 | 0.0472 | 35.0365 | 1.92 | 0.0548 | 41.0526 | 1.95 | 0.0475 |
| 90.9091 | 1.00 | 0.011 | 78.1250 | 2.00 | 0.0256 | 66.9967 | 2.03 | 0.0303 | 42.2414 | 1.96 | 0.0464 | 47.2554 | 1.98 | 0.0419 |
| 131.6456 | 1.04 | 0.0079 | 136.6667 | 2.05 | 0.015 | 94.4954 | 2.06 | 0.0218 | 65.1613 | 2.02 | 0.031 | 123.8095 | 2.08 | 0.0168 |
| 245.4546 | 1.08 | 0.0044 | 213.4021 | 2.07 | 0.0097 | 120.2312 | 2.08 | 0.0173 | 158.3333 | 2.09 | 0.0132 | 245.3488 | 2.11 | 0.0086 |
| 333.3333 | 1.1 | 0.0033 | 335.4839 | 2.08 | 0.0062 | 331.2500 | 2.12 | 0.0064 | 334.9206 | 2.11 | 0.0063 | 336.5079 | 2.12 | 0.0063 |

III.2.2.Simulation numérique

Pour étudier numériquement l'influence de la résistance R_{sh} on a fait un programme avec le code Python où on peut calculer les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ pour les différents valeurs de R_{sh} (5Ω , 10Ω , 100Ω , $10^3\Omega$, $5*10^3\Omega$, $10^4\Omega$ et l'infini).

Pour une simulation correcte on prendre les mêmes paramètres de cellule PV pour toutes les résistances shunts, $E=250W/m^2$, $T=20^\circ C$, $I_{cc}=0.1101A$, $V_{co}=0.53V$, $n_1=1$, $n_2=2$, $R_s=0.04\Omega$

Les équations (III.7) et (III.8) représentent la relation entre résistance shunt et : le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert respectivement pour le modèle $L5P$.

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (II-7)$$

$$V_{co} = n \frac{kT}{q} \ln\left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s} - \frac{V_{co}}{I_s R_{sh}}\right) \quad (II-8)$$

Les paramètres qu'on peut déduire à partir des caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau (III.4) : Paramètres d'une cellule PV (simulation, expérimentales, idéal)

| $R_{sh}(\Omega)$ | | $V_{co}(v)$ | $I_{cc}(A)$ | $V_m(v)$ | $I_m(A)$ | $P_{max}(\Omega)$ | $FF(\%)$ | $\eta(\%)$ |
|------------------|-------------------|-------------|-------------|----------|----------|-------------------|----------|------------|
| 2.5 | Idéal | 0.53000 | 0.11010 | 0.46000 | 0.10545 | 0.04851 | 83.12683 | 3.86202 |
| | Expérience | 0.27500 | 0.09150 | 0.14500 | 0.04560 | 0.00661 | 1.38966 | 0.52643 |
| | Simulation | - | - | - | - | - | - | - |
| 5 | Expérience | - | - | - | - | - | - | - |
| | Simulation | 0.44739 | 0.11010 | 0.28000 | 0.05649 | 0.01582 | 32.11127 | 1.25933 |
| 10 | Expérience | - | - | - | - | - | - | - |
| | Simulation | 0.47582 | 0.11010 | 0.40000 | 0.0689 | 0.02756 | 52.60751 | 2.19427 |
| 25 | Expérience | 0.52000 | 0.10780 | 0.39500 | 0.08440 | 0.03334 | 59.47267 | 2.65430 |
| | Simulation | 0.48527 | 0.11010 | 0.42000 | 0.0884 | 0.03713 | 69.49110 | 2.95605 |
| 100 | Expérience | - | - | - | - | - | - | - |
| | Simulation | 0.48903 | 0.11010 | 0.42000 | 0.10058 | 0.04224 | 78.45860 | 3.36334 |
| 250 | Expérience | 0.53000 | 0.11110 | 0.39750 | 0.09940 | 0.03951 | 67.10171 | 3.14582 |
| | Simulation | 0.48972 | 0.11010 | 0.42000 | 0.10301 | 0.04327 | 80.24014 | 3.44460 |
| 1250 | Expérience | 0.52750 | 0.11060 | 0.40000 | 0.09920 | 0.03968 | 67.38787 | 3.15924 |
| | Simulation | 0.49009 | 0.11010 | 0.42000 | 0.10432 | 0.04381 | 81.20029 | 3.48841 |
| 2500 | Expérience | 0.53000 | 0.11070 | 0.40000 | 0.09960 | 0.03984 | 67.90408 | 3.17197 |
| | Simulation | 0.49013 | 0.11010 | 0.42000 | 0.10448 | 0.04388 | 81.31735 | 3.49376 |
| Infini | Expérience | - | - | - | - | - | - | - |
| | Simulation | 0.49018 | 0.11010 | 0.42000 | 0.10464 | 0.04395 | 81.43439 | 3.49911 |

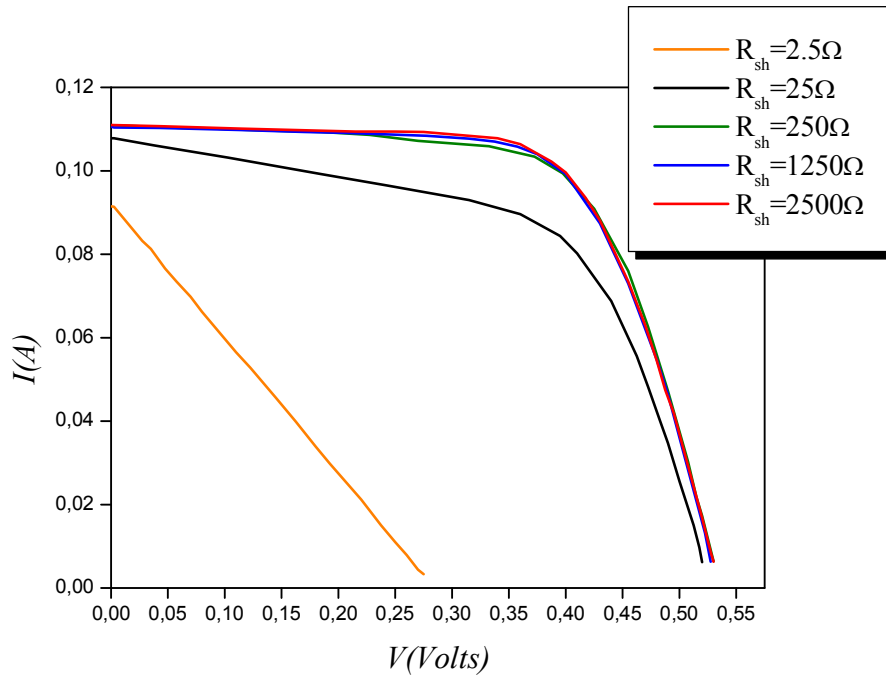


Figure (III.16)

Caractéristique expérimentale de $I(V)$ pour différents valeurs de R_{sh}

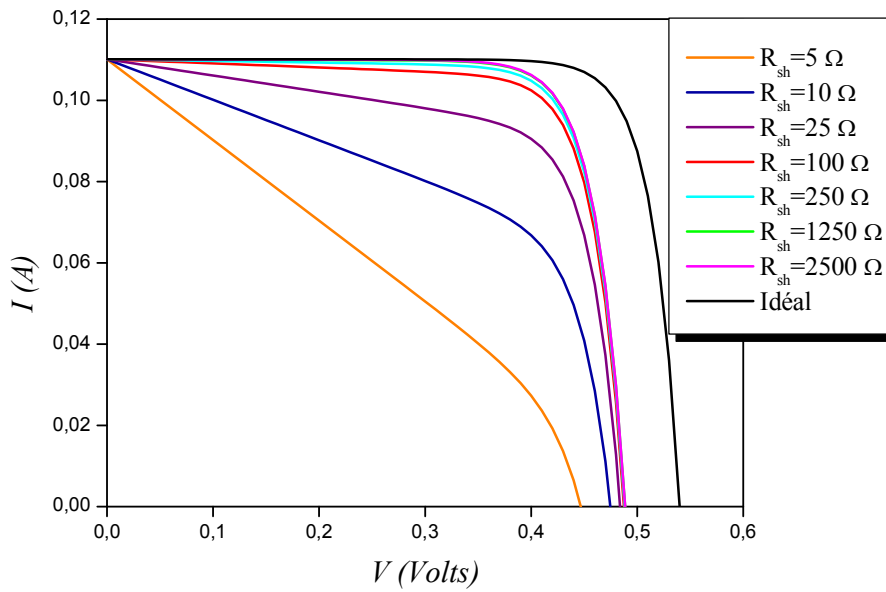


Figure (III.18)

Caractéristique de $I(V)$ pour différents valeurs de R_{sh} (Simulation)

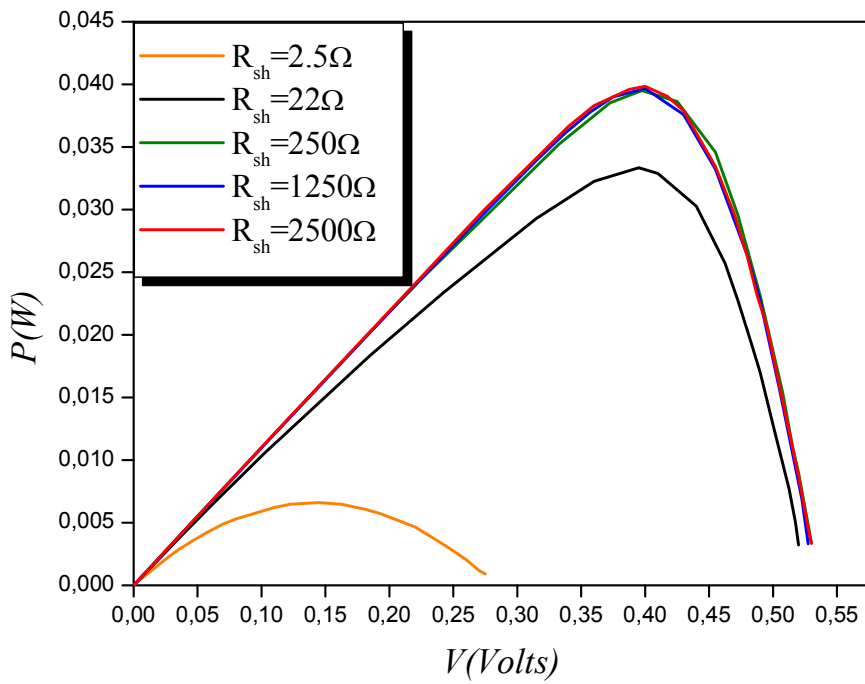


Figure (III.17)
 Caractéristique expérimentale de $P(V)$ pour différents valeurs de R_{sh}

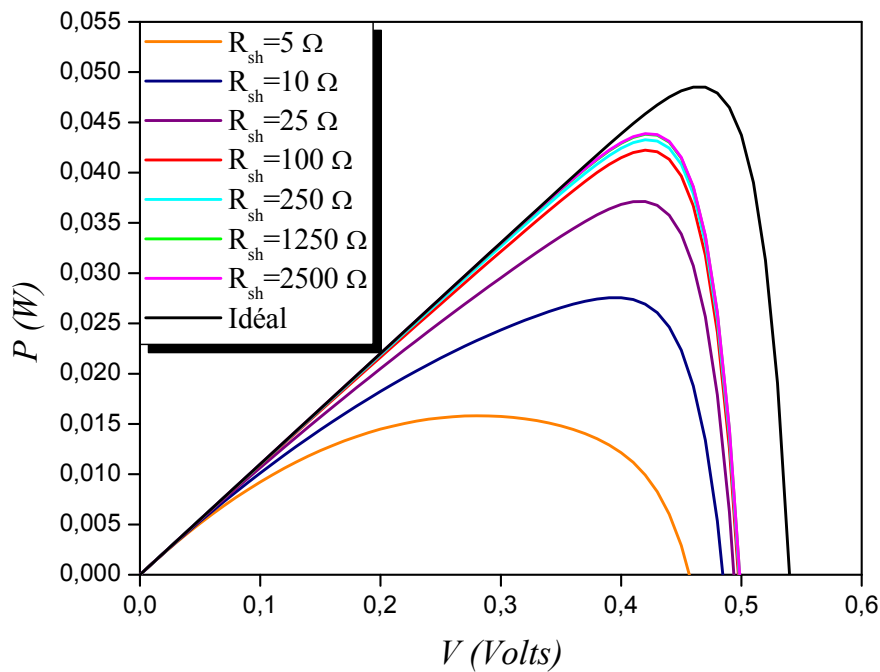


Figure (III.19)
 Caractéristique de $P(V)$ pour différents valeurs de R_{sh} (Simulation)

D'après le tableau (III.4) on peut tracer les figures suivantes pour voir la variation des différents paramètres en fonction de la variation de la résistance shunt

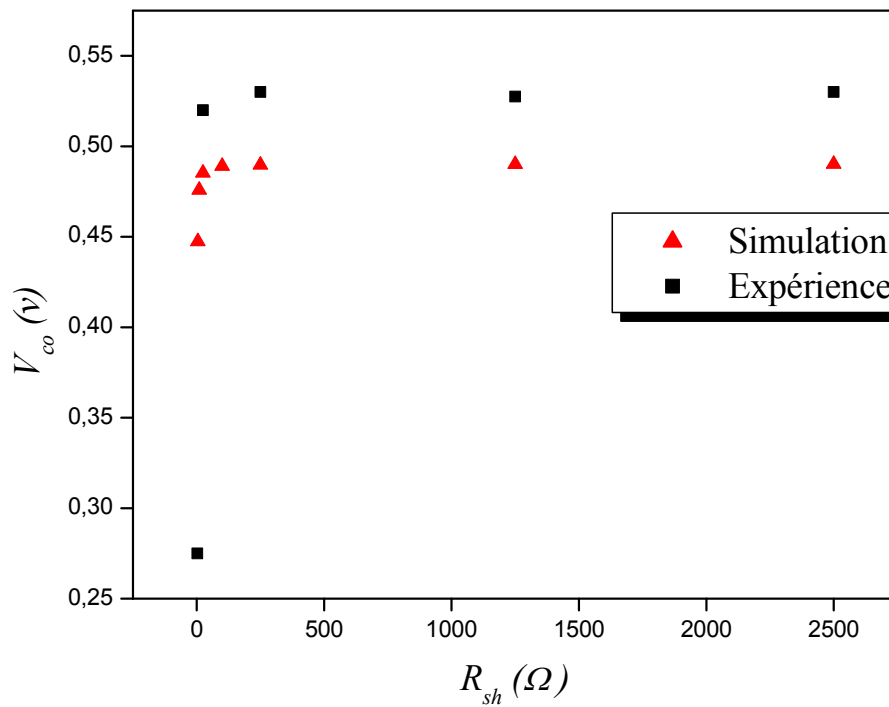


Figure (III.20)

La tension de circuit ouvert en fonction de résistance shunt

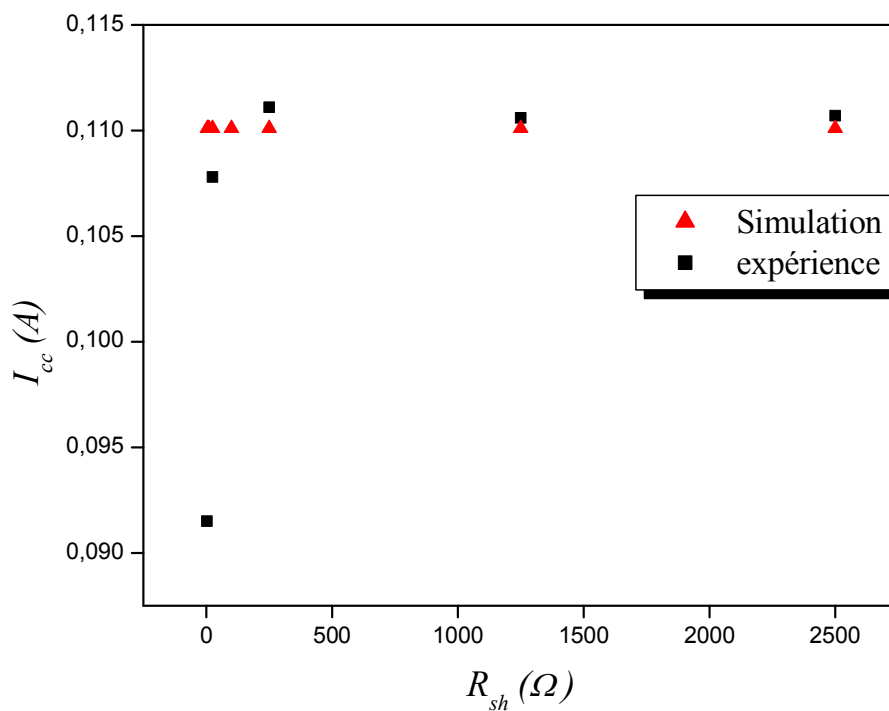


Figure (III.21)

Le courant de court-circuit en fonction de résistance shunt

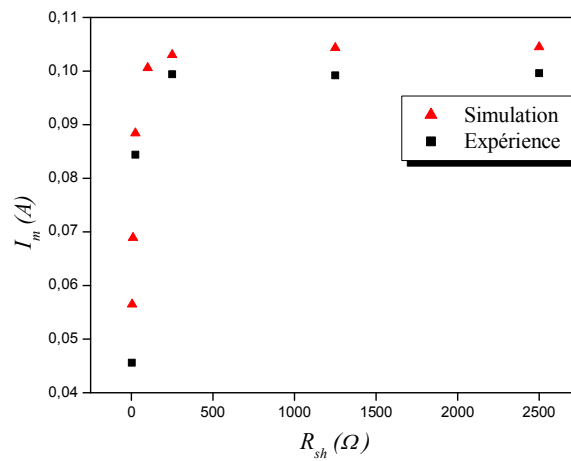


Figure (III.22)

Le courant maximal en fonction de résistance shunt

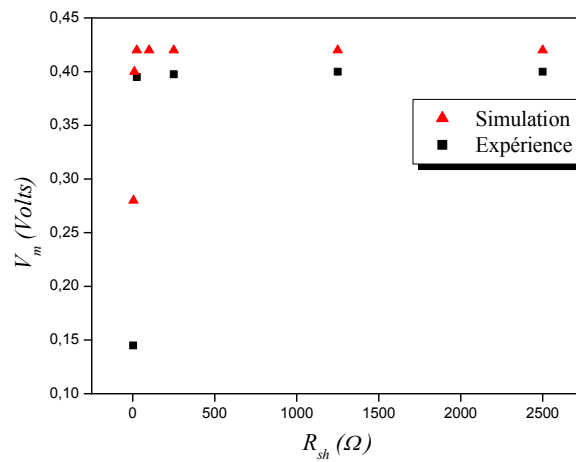


Figure (III.23)

La tension maximale en fonction de résistance shunt

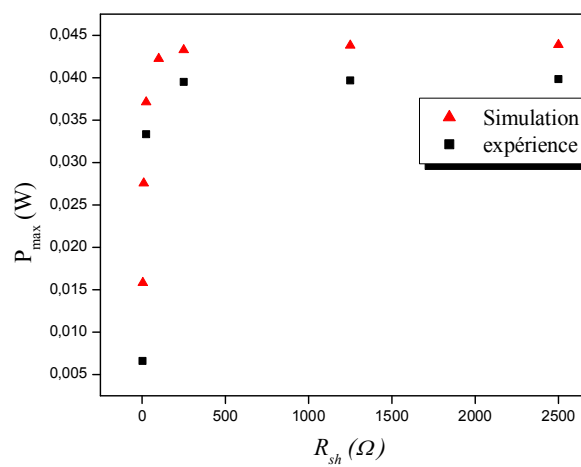


Figure (III.24)

La puissance maximale en fonction de résistance shunt

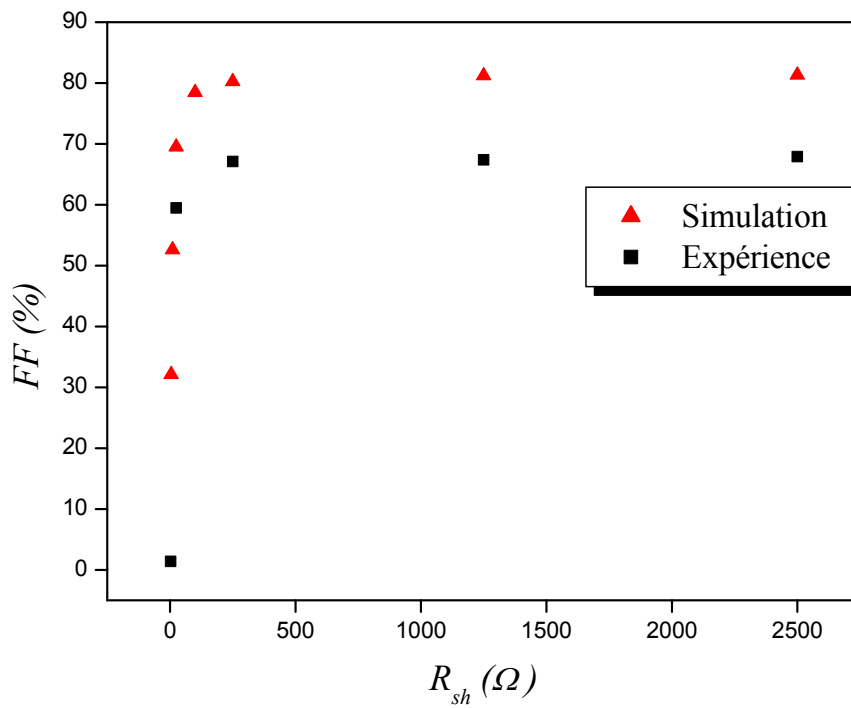


Figure (III.25)
Le facteur de forme en fonction de résistance shunt

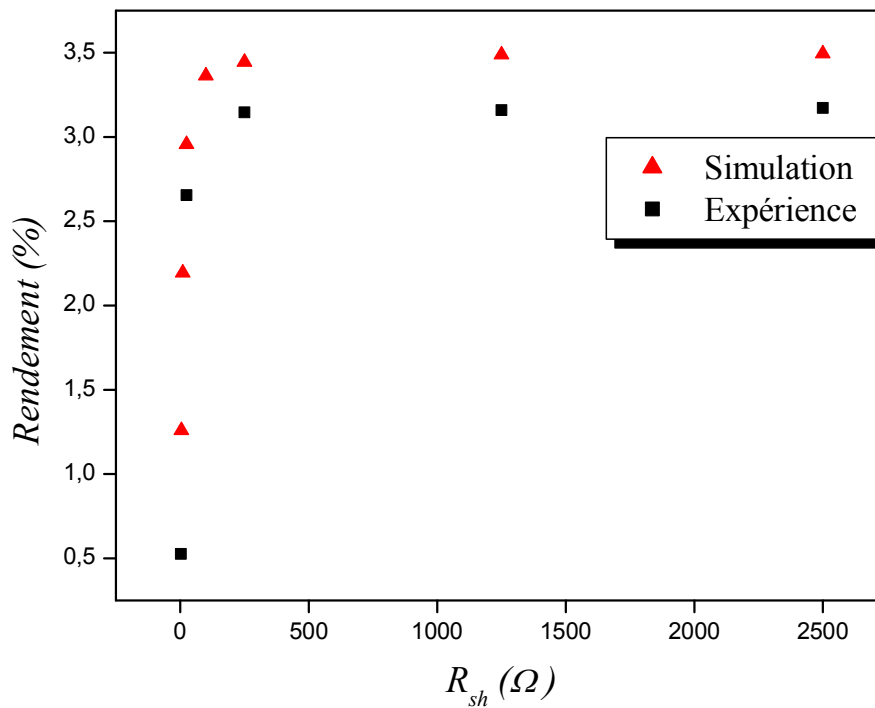


Figure (III.26)
Le rendement en fonction de résistance shunt

III.2.3. Analyse des résultats

1. D'après le montage de l'expérience (figure III.14) on peut dire que quand la résistance R_{sh} augmente, la partie du courant qui passe par cette dernière (I_{sh}) diminue et donc le courant de sortie de la cellule PV augmente. La résistance du courant de fuite absorbe plus de courant, du fait que le courant circule à travers le circuit de charge est considérablement réduit.

2. Les figures de (III.16) à (III.19) montrent les caractéristiques *courant-tension* et *puissance-tension* de la cellule PV résultants par l'expérience et la simulation avec le modèle idéal, ces figures confirment le résultat précédent où on peut observer les différents effets de la résistance R_{sh} . La réduction de la résistance R_{sh} diminue le courant de sortie et la puissance de sortie. Pour une faible valeur de R_{sh} (2.5Ω), le courant diminue rapidement et varie linéairement avec la tension de sortie avec une très faible conversion de puissance (perte de puissance élevé) ces effets due à la fuite de courant qui circule dans la résistance shunt.

3. La figure (III.21) montre la variation de courant de court-circuit en fonction de la résistance shunt d'une cellule PV. Dans le cas de l'expérience, la résistance shunt est à faible valeur de 2.5Ω , le courant de court-circuit correspondant étant également très faible ($0.09150A$). Le courant de court-circuit varie légèrement avec la résistance shunt, car l'effet du courant de court-circuit dépend d'un écart de bande d'un type particulier de matériau. De même, la résistance shunt à la valeur maximale (2500Ω) correspondant au courant de court-circuit est également une valeur plus élevée ($0.1107A$). Contrairement aux résultats numériques on ne peut pas constater cette variation où on peut voir dans la figure (II.21) que le courant I_{cc} reste constant quel que soit la valeur de la résistance R_{sh} .

4. La figure (III.20) montre la variation de la tension de circuit ouvert en fonction de la résistance shunt. On peut constater que lorsque la résistance R_{sh} augmente la tension de circuit ouvert augmente également.

5. Dans les figures (III.22) à (III.26) où on a la variation des différents paramètres de la cellule PV en fonction de la résistance R_{sh} on constate que lorsque la résistance shunt augmente de 2.5Ω à 2500Ω , la tension V_m augmente rapidement et aussi le courant I_m , grâce à ce raison la puissance P_{max} change également sa valeur en fonction des changements de la tension et du courant de la cellule photovoltaïque. Le FF est augmenter de 1.39% à 81% qui est une valeur élevé et approche à la valeur de modèle idéal, donc le FF est fortement influencé par la résistance shunt. La même remarque pour le rendement, lorsque la résistance R_{sh} augmente le rendement de la cellule PV augmente.

6. Aux grandes valeurs de R_{sh} (à partir de 250Ω), tous les paramètres de la cellule PV sont presque constants avec R_{sh} croissante.

III.3. Conclusion

Pour un éclairement de $250W/m^2$ à une température de $20^\circ C$, la simulation montre que la résistance shunt influe sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ de la cellule PV et ces paramètres. On a vu que la réduction de la résistance R_{sh} diminue le courant et la puissance de sortie et donc l'efficacité des cellules PV diminue lorsque la résistance R_{sh} diminue.

La résistance R_{sh} nuit à la performance de la cellule PV car elle réduit les caractéristiques de sortie de la cellule comme la puissance et le courant, de plus elle induit un éloignement du fonctionnement réel de la cellule. Pour des cellules de meilleure qualité il faut qu'on ait une grande valeur de FF , donc une grande résistance R_{sh} est nécessaire.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'énergie renouvelable joue un rôle important dans l'approvisionnement futur du monde, parmi ses sources l'énergie solaire qui est sûr et non polluante. Grâce à cette source on peut produire l'électricité par la conversion photovoltaïque directe de la lumière du soleil, augmenter l'efficacité des cellules photovoltaïques est le processus des défis les plus importants aux quels fait face l'industrie de l'énergie renouvelable.

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur la modélisation et la simulation de l'influence de la résistance shunt sur les caractéristiques *courant-tension* et *puissance-tension* de la cellule photovoltaïque. Dans un premier temps nous avons décrit les notions de base d'un système photovoltaïque où nous avons abordé le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque, puis nous avons indiqué les principaux paramètres électriques de cette dernière. Ensuite, nous avons fait la modélisation de la cellule photovoltaïque où on a présenté des différents modèles de la cellule.

Dans un deuxième temps nous avons présenté les résultats des expériences et des simulations qui montrent la performance de la cellule photovoltaïque sous un éclairement de $250W/m^2$ à la température $20^{\circ}C$, une étude comparative a été également présentée.

Dans la première partie nous avons étudié les caractéristiques *courant-tension* et *puissance-tension* des différents modèles de la cellule photovoltaïque où nous avons procédé une étude comparative entre les caractéristiques expérimentales et les simulations de ces modèles, cette étude nous a permis d'établir les points suivants :

- ✓ Le modèle d'une diode trois paramètres fournit la puissance la plus élevée, et donc la grande efficacité, c'est le modèle idéal.

- ✓ Le modèle à deux diodes sept paramètres donne des valeurs plus proches à l'expérience, mais une puissance plus faible par rapport au modèle idéal.
- ✓ Le modèle d'une diode cinq paramètres fournit une puissance assez bonne et meilleure que le modèle de deux diodes sept paramètres.

Dans la deuxième partie nous avons travaillé sur l'influence de la résistance shunt sur les caractéristiques de la cellule et par la suite sur ses paramètres pour le modèle d'une diode cinq paramètres. L'analyse a été basée à la fois sur des simulations et des tests expérimentaux pour des différentes valeurs de la résistance shunt, nous avons conclu les résultats suivants:

- ✓ La résistance shunt des cellules photovoltaïques peut affecter la puissance de sortie de la cellule en fonction de courant et tension de sortie.
- ✓ La réduction de la résistance shunt a un effet global dans la réduction de la puissance maximale : lorsque la résistance shunt diminue la tension maximale et le courant maximal diminuent, donc la puissance maximale diminue. A cette raison le facteur de forme et le rendement diminuent également.
- ✓ Dans une cellule photovoltaïque, une faible résistance shunt nuise la performance et la qualité d'un panneau solaire car elle réduit l'efficacité de la cellule, de plus elle induit un éloignement du fonctionnement réel de la cellule.
- ✓ Pour des cellules photovoltaïques de meilleure qualité, la résistance shunt devrait être plus élevée donc un courant de fuite plus faible et une puissance de sortie plus élevée.

Enfin le travail entrepris dans le cadre de cette thèse ouvre une direction de recherche qui mérite à notre avis, d'être approfondi, en particulier :

- ✓ La variation de la température ou de l'éclairement présente une étude importante afin de bien comprendre l'influence de la résistance shunt sur la performance de la cellule photovoltaïque.
- ✓ De plus, il y a d'autres problèmes qu'on peut trouver, comme le cas où les cellules photovoltaïques dans un module sont partiellement ou totalement ombrées.

Annexe

Dans l'expérience que nous avons faite, on a utilisé un module photovoltaïque de caractéristiques inconnus sous l'éclairement $250W/m^2$ à la température $20^\circ C$.



Figure 1
Le module de l'expérience

Le tableau suivant donne les grandeurs de ce module qu'on a obtenues à partir de l'expérience.

| Grandeurs | valeur |
|---|---------------|
| Puissance maximale ($P_{\max(\text{module})}$) | 0.03928W |
| Tension maximale ($V_{m(\text{module})}$) | 1.61v |
| Courant maximal ($I_{m(\text{module})}$) | 0.0976A |
| Courant de court-circuit ($I_{cc(\text{module})}$) | 0.1101A |
| Tension de circuit ouvert ($V_{co(\text{module})}$) | 2.12v |
| Facteur de forme ($FF_{(\text{module})}$) | 0.16830 |
| Rendement ($\eta_{(\text{module})}$) | 12.51083 |
| Nombre de cellules en série(N_s) | 4 |
| Nombre de cellules en parallèle(N_p) | 1 |

Pour trouver les caractéristiques d'une seule cellule photovoltaïque on utilise les formules comme suit :

Le courant de court-circuit de chaque cellule :

$$I_{cc(cellule)} = \frac{I_{cc(module)}}{N_p} \quad (1)$$

La tension de circuit ouvert de chaque cellule :

$$V_{co(cellule)} = \frac{V_{co(module)}}{N_s} \quad (2)$$

Le courant maximal de chaque cellule:

$$I_{m(cellule)} = \frac{I_{m(module)}}{N_p} \quad (3)$$

La tension maximale de chaque cellule :

$$V_{m(cellule)} = \frac{V_{m(module)}}{N_s} \quad (4)$$

La puissance maximale de chaque cellule :

$$P_{max(cellule)} = \frac{P_{max(module)}}{N_p \cdot N_s} = I_{m(cellule)} \cdot V_{m(cellule)} \quad (5)$$

La résistance série de chaque cellule :

$$R_{s(cellule)} = \frac{N_p}{N_s} R_{s(module)} \quad (6)$$

La résistance shunt de chaque cellule :

$$R_{sh(cellule)} = \frac{N_p}{N_s} R_{sh(module)} \quad (7)$$

Résumé

A mesure que les besoins mondiaux en électricité augmentent, l'intérêt pour l'énergie solaire qui est une énergie renouvelable est devenu très important dont la technologie photovoltaïque basée sur les cellules photovoltaïques qui converti l'énergie solaire en électricité devient extrêmement prometteuse. Notre travail présente une étude de l'influence de la résistance shunt sur les caractéristiques de la cellule photovoltaïque, en étudiant leur effet sur ses différents paramètres comme la puissance, le courant, le facteur de forme et le rendement.

La résistance shunt influe sur la pente de la caractéristique dans la zone où la cellule photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant, lorsque la résistance diminue, la valeur de tension de circuit ouvert diminue. Elle influe aussi sur la puissance maximale fournit par la cellule, cette puissance est alors optimale pour les valeurs les plus élevées de la résistance shunt. Les résultats obtenus montrent qu'une diminution de la valeur de la résistance shunt induit un éloignement du fonctionnement réel de la cellule photovoltaïque donc, elle nuise la performance de cette dernière et réduit leur efficacité.

Mots clés : Modélisation et simulation, Cellule photovoltaïque, Résistance shunt, Caractéristiques courant-tension et puissance-tension

Abstract

As global power needs increase, interest in solar energy as a renewable energy has become very important and photovoltaic technology based on photovoltaic cells, that converts solar energy into electricity is becoming very promising. Our work presents a study of the influence of the shunt resistance on the characteristics of the photovoltaic cell, by studying their effects on its various parameters such as power, current, form factor and efficiency.

The shunt resistor influences the slope of the characteristic in the area where the photovoltaic cell functions as a current generator, as the resistance decreases, the open circuit voltage value decreases. It also affects the maximum power supplied by the cell, which is then optimal for the highest values of the shunt resistance. The obtained show that a reduction in the value of the shunt resistance induces a remoteness from the actual operation of the photovoltaic cell, hence, it damages the performance of the photovoltaic cell and reduces their efficiency.

Keywords : Modeling and simulation, Photovoltaic cell, Shunt resistor, Current-voltage and power-voltage characteristics

ملخص

إن احتياجات العالم للطاقة التي أصبحت في تزايد مستمر, جعل الاهتمام بالطاقة الشمسية كطاقة متجددة مجالاً مهماً, والتكنولوجيا الفولتاضوية التي تعتمد أساساً على ما يعرف بالخلايا الفولتاضوية والتي تحول الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية أصبحت جد واعدة. عملنا هذا يعرض دراسة لتأثير المقاومة المتوازية على خصائص الخلية الفولتاضوية, انطلاقاً من دراسة آثارها على مختلف العوامل مثل الاستطاعة, التيار, عامل التعبئة والمردود.

تأثر المقاومة المتوازية على الميل في المنطقة التي تعمل فيها الخلية الفولتاضوية كمولد للتيار, عندما تنخفض قيمة المقاومة المتوازية فإنها تقلل من قيمة توتر الدارة المفتوحة. كما أنها تؤثر أيضاً على الاستطاعة القصوى التي تقدمها الخلية الفولتاضوية, هذه الاستطاعة تأخذ قيمتها المثلى عند القيم الأكبر للمقاومة المتوازية. النتائج التي حصلنا عليها تبين أن انخفاض قيمة المقاومة المتوازية يحدث بعداً عن العمل الحقيقي للخلية الفولتاضوية, إذاً هي تضر أداء هذه الأخيرة وتقلل من فعاليتها.

النمذجة والمحاكاة, خلية فولتاضوية, المقاومة المتوازية, الخصائص تيار - توتر واستطاعة. توتر: **الكلمات المفتاحية**