

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Larbi Tébessi-Tébessa

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Département: Sciences de la matière



MEMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences de la Matière

Filière : Physique

Option : Physique des matériaux et ses applications

Thème:

**Etude de performance des modèles des circuits
équivalentes de la cellule photovoltaïque**

Présenté par:

Leila AISSI

Lotfi BELGHIT



Devant le jury :

Chemam Fayçal	Prof	Université de Tébessa	Président
Saouane Izzeddine	M .A .A	Université de Tébessa	Rapporteur
Kaibi Amel	M .A .A	Université de Tébessa	Examineur

Note :

17,00

Mention :

Très Bien

Date de soutenance : 23/05/2017

Déclaration sur l'honneur de non-plagiat
(à joindre obligatoirement au mémoire, remplie et signée)



Je soussigné(e),

Nom, Prénom : Leila Aissi et LaTfi Belghit

Régulièrement inscrit(e) en **Master** au département : Sciences de la matière

N° de carte d'étudiant : 4021184 / 12 4014362 / 12

Année universitaire : 2016 / 2017

Domaine : Sciences de la matière

Filière : physique

Spécialité : physique des matériaux et ses applications

Intitulé du mémoire : Etude de performance des modèles des circuits équivalents de la cellule photovoltaïque

Atteste que mon mémoire est un travail original et que toutes les sources utilisées ont été indiquées dans leur totalité. Je certifie également que je n'ai ni recopié ni utilisé des idées ou des formulations tirées d'un ouvrage, article ou mémoire, en version imprimée ou électronique, sans mentionner précisément leur origine et que les citations intégrales sont signalées entre guillemets.

Sanctions en cas de plagiat prouvé :

L'étudiant sera convoqué devant le conseil de discipline, les sanctions prévues selon la gravité du plagiat sont :

- L'annulation du mémoire avec possibilité de le refaire sur un sujet différent ;
- L'exclusion d'une année du master ;
- L'exclusion définitive.

Fait à Tébessa, le : 07 / 06 / 2017

Signature de l'étudiant(e) :



DÉDICACE

À mes chers parents, Rachid et Fouzia Aissi

À mes frères Oussama et Rostoum et sœurs

Bassma et Ibtissèm

À mon fiancé Goudjil Abdelhak

À tout ma famille

*Et à tous ceux qui m'ont aimé, je dédie ce présent
travail.*

Leila

DÉDICACE

*À mes chers parents, Mohamed Lamine et Zahiya
Belghit*

*À mes frères Saïf et sœurs Marwa et Salma et
Ferial*

À tout ma famille

*Et à tous ceux qui m'ont aimé, je dédie ce présent
travail.*

Lotfi

Remerciement

- ❖ En premier lieu, nous remercions Allah le Tout-Puissant pour nous avoir donné le potentiel d'apprendre les lois de notre univers et de les exploiter pour notre bien-être.
- ❖ Je remercie énormément **Saouane Izzeddine** MAA au département des sciences de la matière à l'université Larbi Tébessi de Tébessa de nous avoir guidé et soutenu le long de ce travail avec beaucoup de patience et d'indulgence, et nous espérons pouvoir un jour devenir aussi de formidables et s maitres à nos futurs élèves.
- ❖ Nous remercions **Chemam Fayçal** *Professeur* au département des sciences de la matière à l'université Larbi Tébessi de Tébessa de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de notre soutenance et également **Kaibi Amel** MAA au département des sciences de la matière à l'université Larbi Tébessi de Tébessa d'avoir accepté d'examiner notre travail.
- ❖ Un grand merci à toutes les personnes que nous avons consultées pour la compréhension et l'assimilation de ce travail.
- ❖ Merci à mes amies et collègue pour leurs encouragements.
- ❖ Et enfin merci et pardon à tous ceux que nous ne pouvons citer qui nous ont aidés de près ou de loin.

(Table des matières

Dédicace

Remerciements

Liste des figures.....	I
Liste des symboles.....	III
Introduction Générale.....	01

Chapitre I

Etat de l'art du générateur photovoltaïque

I .1.	Introduction	04
I .2.	Générateur photovoltaïque PV	04
I .3.	Historique du photovoltaïque	04
I .4.	Le semi-conducteur	05
I .5.	Les Cellules photovoltaïques	06
I .6.	Principe de fonctionnement	06
I .7.	Les différents types des cellules solaires	07
I .7.1.	Les cellules mono-cristallines.....	07
I .7.2.	Les cellules poly-cristallines	08
I .7.3.	Les cellules amorphes	09
I .8.	Modèle mathématique et formulation	09
I .8.1.	Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque.....	09
I .8.2.	Modèle réel d'une cellule photovoltaïque	11
I .9.	Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	12
I .9.1.	Caractéristiques courant-tension	12
I .9.2.	Caractéristiques puissance - tension	13
I .9.3.	Facteur de forme FF.....	13
I .9.4.	Le rendement η	14
I .10.	Association des Cellules / modules Photovoltaïques	14
I .10.1.	Association série	14
I .10.2.	Association parallèle	15
I .10.3.	Association mixte	15
I .11.	Les modules photovoltaïques	16
I .12.	Les panneaux photovoltaïques.....	16

I .13.	Les composants du système photovoltaïques.....	17
I .14.	Avantages et Inconvénients de la conversion photovoltaïque	17
I .15.	Conclusion	18

Chapitre II

Modélisation des cellules photovoltaïque

II .1.	Introduction.....	20
II .2.	Modélisation des cellules photovoltaïque.....	20
II .2.1.	Modèle d'une cellule solaire idéale.....	22
II .2.2.	Modèle d'une cellule solaire réelle	22
II .2.2.1.	Modèle à deux diodes.....	23
II .2.2.1.1.	Modèle à sept paramètres (7p).....	23
II .2.2.1.2.	Modèle à six paramètres (6P).....	24
II .2.2.1.3.	Modèle à cinq paramètres (5P).....	25
II .2.2.2.	Modèle à une diode.....	26
II .2.2.2.1.	Modèle à quatre paramètres (4P).....	26
II .2.2.2.2.	Modèle à trois paramètres (3P).....	26
II .3.	Le modèle à cinq paramètres proposé.....	27
II .4.	Effet des conditions réelles sur les paramètres électrique	30

Chapitre III

Résultats et discussions

III .1.	Introduction.....	32
III .2.	L'influence des différents paramètres de la cellule solaire sur ca fonctionnement.....	32
III .2.1.	L'influence de l'éclairement.....	32
III .2.2.	L'influence de la température.....	33
III .2.3.	Influence simultanée du rayonnement et de température.....	34
III .2.4.	L'influence de la résistance série.....	34
III .2.5.	L'influence de la résistance Shunt.....	35
III .2.6.	L'influence du facteur d'idéalité.....	35
III .3.	Association des générateurs photovoltaïque.....	35
III .3.1.	Association en parallèle.....	36
III .3.2.	Association en série.....	36
III .3.3.	Association mixte.....	37
III .4.	Comparaison entre les modèles.....	38

Table des matières

III .5.	Vérification du modèle proposé à STC.....	39
III.6.	Comparaison des modèles photovoltaïques avec le modèle proposé	40
	Conclusion générale	43
	Référence	44
	Résumé	

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Etat de l'art du générateur photovoltaïque.

Figure I.1	: Schéma explicatif du phénomène	05
Figure I.2	: Longueur d'onde absorbée par différents types de semi-conducteurs.	05
Figure I.3	: Cellule photovoltaïque.....	06
Figure I.4	: Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	07
Figure I.5	: Silicium monocristallin.....	08
Figure I.6	: Silicium poly-cristallin.....	08
Figure I.7	: Silicium amorphe.....	09
Figure I.8	: Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque.....	09
Figure I.9	: La caractéristique I (V) d'une cellule photovoltaïque.....	10
Figure I.10	: Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque.....	11
Figure I.11	: Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire.....	12
Figure I.12	: Caractéristique $P_{pv} - V_{pv}$ d'un panneau solaire.....	13
Figure I.13	: Caractéristique courant tension de Ns cellule en série.....	14
Figure I.14	: Caractéristique courant tension de Np cellule en parallèle.....	15
Figure I.15	: Caractéristiques résultantes d'un groupement mixte.....	15
Figure I.16	: Les modules photovoltaïques.....	16
Figure I.17	: Les panneaux photovoltaïques.....	16
Figure I.18	: Synoptique d'un système photovoltaïque.....	17

Chapitre II : Modélisation des cellules photovoltaïque.

Figure II.1	: Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque	20
Figure II.2	: Schéma idéale d'une cellule photovoltaïque	22
Figure II.3	: Modèle à 7 paramètres	23
Figure II.4	: Modèle a six paramètres	24
Figure II.5	: Modèle à 5 paramètres	25
Figure II.6	: Modèle à 4 paramètres	26
Figure II.7	: Modèle à 3 paramètres	26
Figure II.8	: Circuit équivalent du modèle à cinq paramètres	27

Chapitre III : Résultats et discussions.

Liste des figures

Figure III.1	: Influence de l'éclairement sur I-V et P-V.....	33
Figure III.2	: Influence de la température sur I-V et P-V	33
Figure III.3	: Influence simultanée de l'éclairement et de la température sur I-V et P-V.	34
Figure III.4	: Influence de la résistance série sur I-V et P-V.	34
Figure III.5	: Influence de la résistance shunt sur I-V et P-V	35
Figure III.6	: Influence de facteur de qualité sur I-V et P-V	36
Figure III.7	: Caractéristique I-V en association en série (a) et en parallèle (b).....	37
Figure III.8	: Caractéristique I-V en association mixte	37
Figure III.9	: Caractéristique I-V pour les modèles L4P, L5P	38
Figure III.10	: Caractéristique I-V pour les modèles 2M7P,2M6P.....	39
Figure III.11	: Courbe I-V et P-V pour le module SP-70 en silicium monocristallin à STC	39
Figure III.12	: Courbes I-V et P-V pour le module MSX-60 en silicium poly-cristallin à STC	40
Figure III.13	: Caractéristiques I-V du module CO 60C monocristallin pour différents éclairagements et températures.....	41
Figure III.14	: Caractéristiques I-V du module CO 60C poly cristallin pour différents éclairagements et températures	42

Liste des symboles

E _{ph}	Quantité d'énergie (Joule)
h	Constante de Planck (Joule.M ³ /sec)
c	Vitesse de la lumière 3.10 ⁸ (m/sec)
λ	Longueur d'onde (m)
E _g	Bande interdite (eV)
q	Charge de l'électron (1.9.10 ⁻¹⁹ coul)
I ₀₁	Courant de saturation par diffusion (A)
I ₀₂	Courant de saturation par recombinaison (A)
k	Constante de Boltzmann (J/K)
U _T	Tension thermique
I _s	Courant de saturation
V	Tension à la borne de la diode
T	Température absolue (en kelvin)
I _{ph}	Le photo-courant
I _d	La caractéristique de la diode I
T _c	Température de la cellule (°C)
W _s	Vitesse de vent (m/s)
γ ₁	Facteur d'idéalité dans la diode (1)
γ ₂	Facteur d'idéalité dans la diode (2)
R _{sh}	Resistance shunt (Ω)
R _s	Resistance serie (Ω)
I _{cc}	Courant de court-circuit (A)
V _{oc}	Tension de circuit ouvert (V)
P _p	Puissance maximale (W)
P _{max}	Puissance maximale aux conditions de test standard (STC)
I _p	Courant maximal (A)
V _p	Tension maximale (V)
G	Rayonnement solaire (W/m ²)
FF	Facteur de forme
η	Rendement
E	Energie (Wh)
A	Facteur de qualité
IL	courant photonique.
NCS	Nombre des cellules en série

Introduction

Générale

Introduction générale:

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des énergies fossiles, la consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures, et aussi face aux multiples crises économiques et pétrolières la science s'est intéressée aux ressources dites renouvelables qui constituent un secteur stratégique et occupent une place privilégiée dans les domaines de recherche et développement.

L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie intéressante. Elle est renouvelable, inépuisable et non polluante. Pour qu'elle soit utilisée sur une large plage d'applications et pour satisfaire les contraintes du coût. Le courant électrique produit d'un panneau photovoltaïque dépend du rayonnement solaire incident, la température de cellules, l'angle solaire d'incidence et la résistance de charge.

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de comprendre la configuration physique de chaque élément de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter la cellule photovoltaïque.

Pour cela, le présent travail, sera structuré comme suit :

Le premier chapitre comprend une recherche bibliographique sur le principe de fonctionnement de la cellule et du module photovoltaïque et les différents paramètres pouvant influencer sur son fonctionnement.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des cellules photovoltaïques qui passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. De nombreux modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié le modèle à deux diodes avec cinq paramètres inconnues, en utilisant seulement les données du fabricant.

Finalement une conclusion générale résumera tous les résultats obtenus dans ce présent mémoire.

Chapitre I :

Etat de l'art du générateur photovoltaïque.

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la performance des systèmes photovoltaïques. Il est adéquat de décrire le principe de fonctionnement de la cellule et du module photovoltaïque ainsi que les différents paramètres pouvant influencer sur son fonctionnement.

I.2. Générateur photovoltaïque PV

Le générateur photovoltaïque permet de convertir l'énergie solaire en énergie électrique sous forme de tension et de courant continu, variable selon l'influence de l'éclairement sur les panneaux solaires. Le composant de base de cette conversion est la cellule photovoltaïque. [1]

Les cellules photovoltaïques sont composées de semi-conducteurs qui leur permettent de transformer directement une énergie électromagnétique sous forme de photon reçu par le soleil en énergie électrique sous forme d'un courant continu. Les énergies des photons absorbés par le matériau semi-conducteur créent des porteurs de charges appelés électrons et trous. [2]

I.3. Historique du photovoltaïque

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

- 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie. [3]

I.4. Le semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du "band gap", E_g , en électron volt (eV).

Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1,0 à 1,8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1,1 eV pour le silicium cristallin (c-Si), et 1,7 eV pour le silicium amorphe (a-Si). [4]

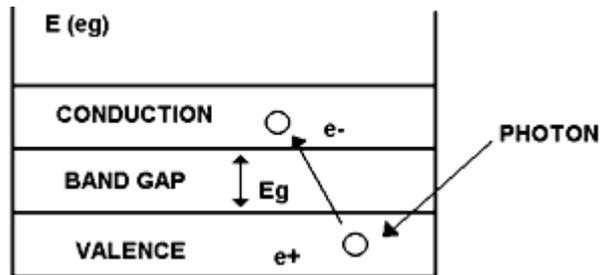


Fig. I.1. Schéma explicatif du phénomène

La figure I.2 présente une partie des différents semi-conducteurs selon la longueur d'onde et la bande de gap. [5]

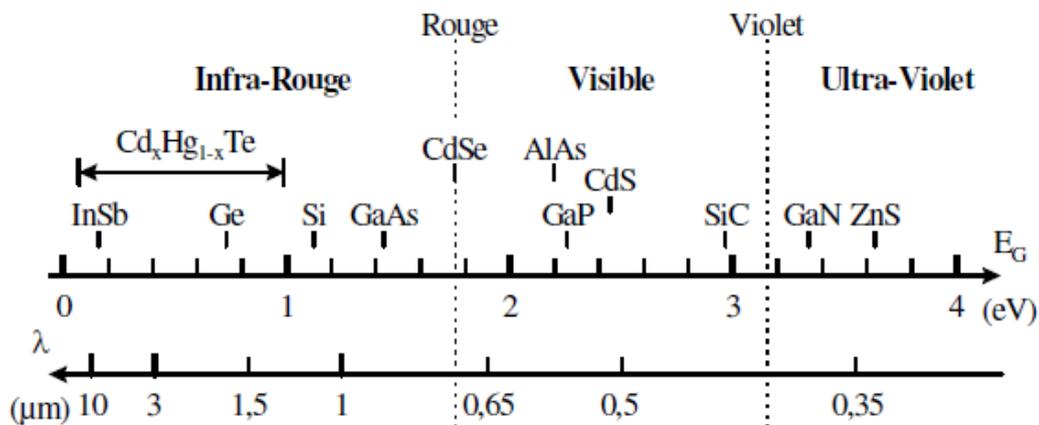


Fig.I.2. Longueur d'onde absorbée par différents types de semi-conducteurs [5].

I.5. Les Cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques ou photopiles sont des composants électroniques à semi-conducteur qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs utilisés en tranches fines ou en dépôts sur un substrat. Les matériaux les plus connus sont:

- le silicium (Si)
- le sulfure de cadmium (Cds)
- l'arséniure de gallium (As Ga)
- le tellure de cadmium (Cd Te)
- le germanium (Ge)
- le phosphore d'indium (InP)

Toutefois, le matériau le plus couramment utilisé est le silicium pur obtenu à partir de la silice (quartz ou sable) par transformations chimiques et métallurgiques. [6]

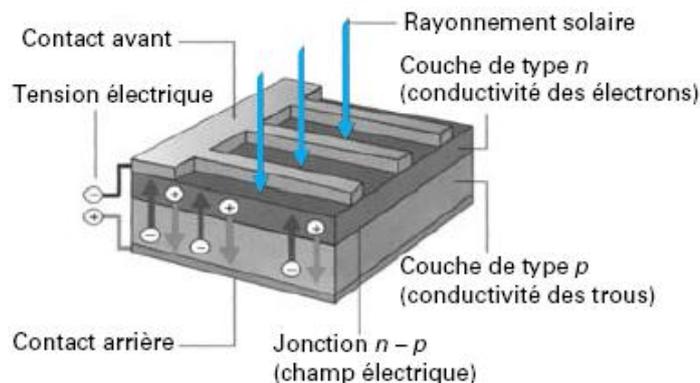


Fig. I.3. Cellule photovoltaïque [7].

I.6. Principe de fonctionnement :

La cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel.

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches.

Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule.

A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs.

La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{CO}).

Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{CC}) et dépend fortement du niveau d'éclairement. [8]

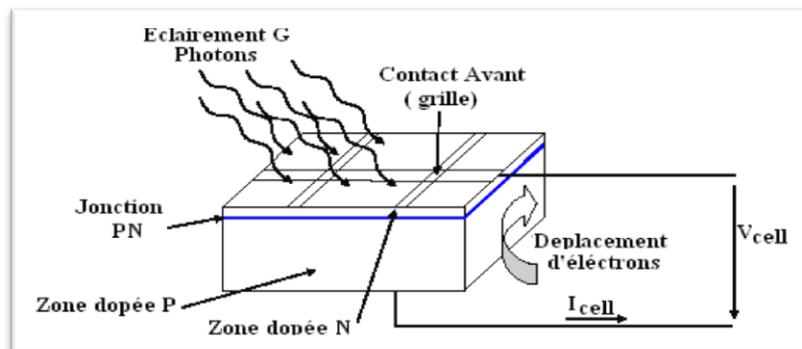


Fig. I.4. Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire. [8]

I.7. Les différents types des cellules solaires

Il existe différentes technologies constituant les cellules photovoltaïques:

I.7.1. Les cellules mono- cristallines

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique: cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. [9]

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients:

- Première génération de photopiles.
- Un taux de rendement excellent de 15 % et jusqu'à 24 % en labo.
- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur. [10]



Fig.I.5. Silicium Monocristallin

I.7.2. Les cellules poly-cristallines

Les cellules poly-cristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes.[11]

Les cellules poly- cristallines est caractérisées par :

- Coût de production moins élevé.
- Procédé moins gourmand en énergie.
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en labo.[12]



Fig.I.6. Silicium poly cristalline

I.7.3. Les cellules amorphes

Le silicium amorphe, apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin.

Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible).

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 6 % par module et de 14 % en labo.
- Fonctionne sous très faible éclaircissement.

Grâce à la technologie des nouveaux matériaux le tellure de cadmium (CdTe), l'arséniure de gallium (GaAs) ainsi que le di séléniure de cuivre et d'indium (CIS) ont permis d'obtenir des photopiles ayant des rendements 38 % au laboratoire .[13]



Fig. I.7. Silicium amorphe

I.8. Modèle mathématique et formulation

I.8.1. modèle idéal d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque peut être étudiée à partir circuit équivalent donné par la figure (I.8) composé d'un générateur à courant et d'une diode en parallèle. [14]

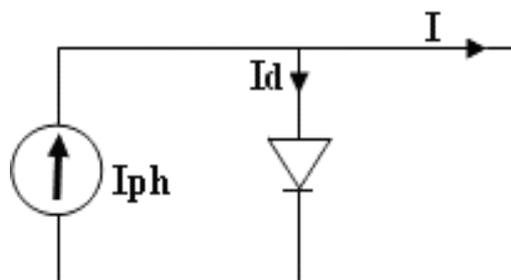


Fig.I.8. Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque

Donc le courant aux bornes de la cellule est :

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

I_{ph} : photo- courant.

I_d : Courant traversant la diode.

$$I_d = I_s \left[\exp \left(\frac{V}{U_T} \right) \right] \quad (I.2)$$

Avec
$$U_T = \frac{K \cdot T}{q} \quad (I.3)$$

q : charge de l'électron ($1.9 \cdot 10^{-19}$ coul).

K : la constante de Boltzmann.

U_T : Tension thermique.

I_s : Courant de saturation.

V : tension à la borne de la diode.

T : température absolue (en kelvin).

I_{ph} : Le photo-courant.

I_d : La caractéristique de la diode $I(V)$

$$I(V) = I_{ph} - I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{V}{U_T} \right) - 1 \right] \quad (I.4)$$

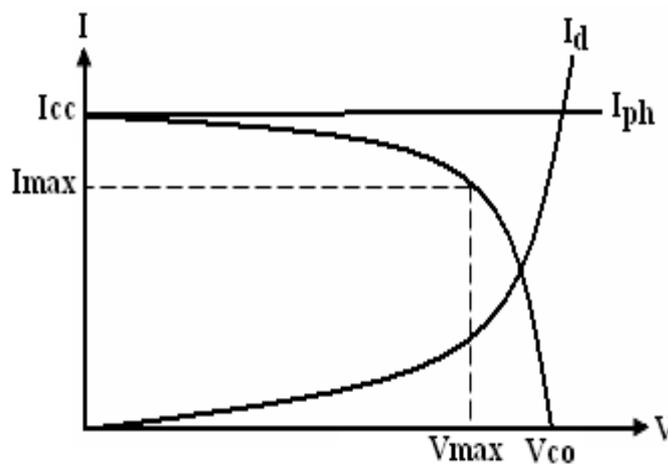


Fig.I.9. La caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque

I.8.2. Modèle réel d'une cellule photovoltaïque

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs, des recombinaisons, des fuites vers les bords, doivent être pris en considération.

Le modèle mathématique du générateur photovoltaïque est basé sur le circuit équivalent. Cette circuit est représenté sur la figure I.9 par un générateur de courant I_{cc} , une diode et deux résistances R_s et R_{sh} . [15]

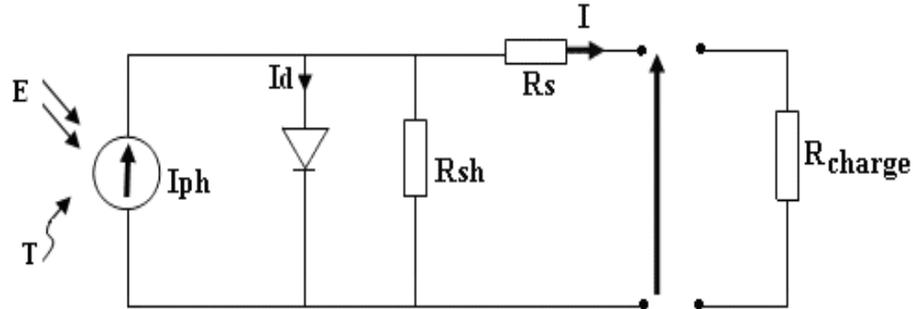


Fig.I.10. Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque

- R_s Est une résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux. La pente de la courbe courant-tension au point V_{oc} représente l'inverse de la résistance série ($1/R_s$).

- R_{sh} Est une résistance shunt liée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques. La pente de la courbe courant tension au point I_{cc} représente l'inverse de la résistance shunt ($1/R_{sh}$).

La photo courant I_{ph} crée dans la structure par une partie de rayonnement absorbé (ce courant est pratiquement le courant de court-circuit de la cellule).

- Le courant direct I_d d'obscurité de la jonction.
- Le courant I généré par la cellule et fourni à la charge.
- Le courant I_p correspond au courant des connexions parallèles.

Cet équilibre s'écrit. [16]

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (I.5)$$

Selon le schéma équivalent t d'une cellule solaire dans La figure (II.9), on a :

$$I = I_{ph} - I_d - \left(\frac{V + I R_s}{R_{sh}} \right) \quad (I.6)$$

$$\Rightarrow I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{(V + R_s I)}{A U_T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}}\right) \quad (I.7)$$

R_s : Résistance série

R_{sh} : Résistance shunt

A : Facteur de qualité

I.9. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Toute cellule photovoltaïque est caractérisée par deux courbes courant-tension (I-V) et puissance – tension (P-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule.

I.9.1. Caractéristiques courant - tension

La caractéristique courant-tension nous montre que le panneau photovoltaïque et une source de courant constant pour les faibles tensions avec un courant approximativement égale au courant de court-circuit. Avec l'augmentation de la tension, le courant commence à diminuer exponentiellement jusqu'à la valeur zéro ou la tension est égale la tension de court ouvert.

A température et éclairement fixés, la caractéristique courant / tension d'une cellule a l'allure suivante : [17]

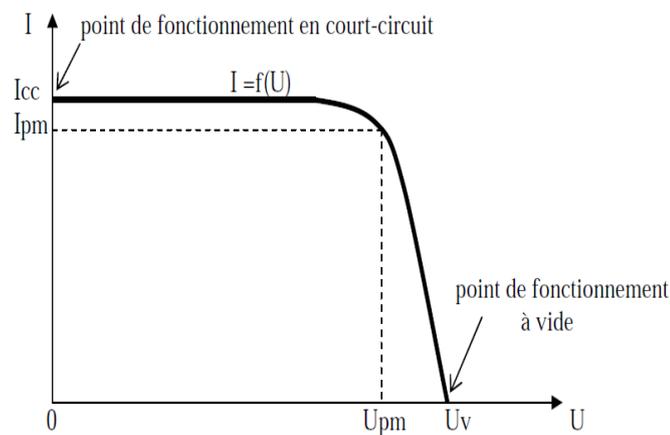


Fig. I.11. Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire. [17]

Le point de fonctionnement à vide : V_{co} pour $I = 0A$.

Le point de fonctionnement en court-circuit : I_{cc} pour $V = 0$ Volt.

I.9.2. Caractéristiques puissance – tension

La puissance délivrée par la cellule a pour expression $P=U.I$.

Pour chaque point de la courbe précédente, on peut calculer la puissance P et tracer la courbe

$P = f(V)$.

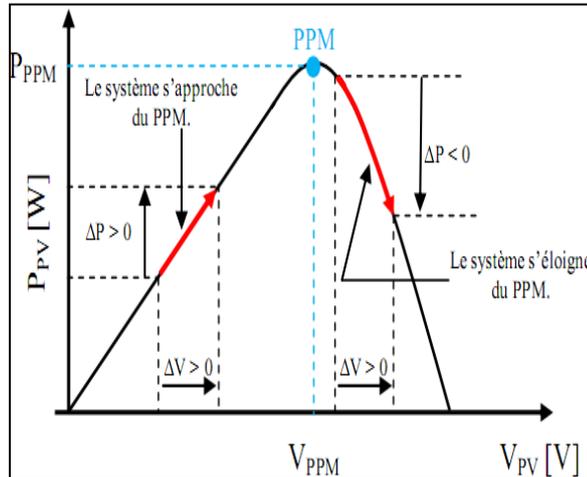


Fig. I .12. Caractéristique $P_{pv} -V_{pv}$ d'un panneau solaire. [18]

Cette caractéristique est également non linéaire et présente un point de puissance maximal PPM caractérisé par la tension V_{pm} et le courant I_{pm} que l'on peut aussi repérer sur la courbe $I = f(V)$. [18]

I.9.3. Facteur de forme FF

La puissance fournie au circuit extérieure par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale pour un point de fonctionnement P_{max} (V_{pm} et I_{pm}) de la courbe courant tension.

Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{V_{pm} I_{pm}}{V_{co} I_{cc}} \quad (I.8)$$

Dans le cas d'une cellule idéale le facteur de forme FF ne peut pas être supérieur à 0.89 du fait de la relation exponentielle liant courant et tension. [19]

I.9.4. Le rendement η

Le rendement, η des cellules photovoltaïques désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente.

$$\eta = \frac{V_p I_p}{P_{\text{incidente}}} \quad (\text{I.9})$$

Où bien, ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court circuit et la tension à circuit ouvert. [20]

I.10. Association des cellules/modules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque produit une tension d'environ 0.6 V, pour augmenter cette tension on connecte un certain nombre des cellules (36 ou 72 cellules) en série/parallèle pour aboutir à une tension désirée de l'ordre de 21V par exemple. Quand les cellules connectées en série/parallèle sont placées dans une encapsulation, l'ensemble constitue un module photovoltaïque. Un module de 36 cellules fournit une tension appropriée pour charger une batterie de 12 V. Les modules doivent être alors connectés en configurations soient en série, en parallèle ou en configuration mixte à produire suffisamment d'énergie pour les applications haute puissance. Dans ce sous-chapitre, nous avons choisi le module photovoltaïque du type Solarex MSX60 comme exemple. [21]

I.10.1. Association série

Les modules photovoltaïques peuvent se connecter en série. Comme illustré sur la figure I.12 ci-dessous, le même courant traverse chaque cellule tandis que la tension globale est la somme des tensions à travers toutes les cellules. [22]

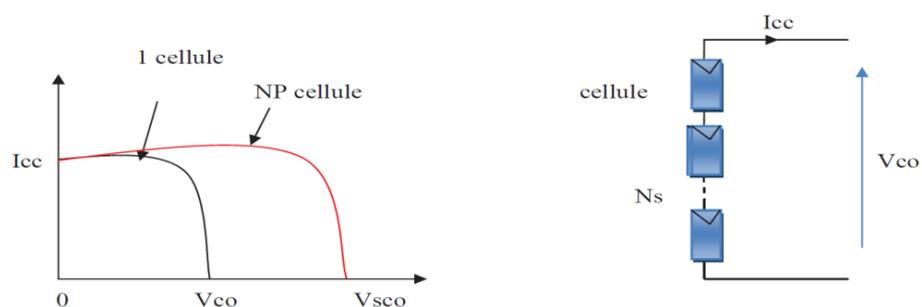


Fig. I.13. Caractéristique courant tension de N_s cellule en série. [22]

I.10.2. Association Parallèle

Lorsque les cellules sont connectées en parallèle, ce sont les courants qui s'ajoutent et la tension qui restera constante. Il faudra donc appairer les tensions et non les courants, lors de la mise en parallèle des modules photovoltaïques pour constituer un générateur plus puissant comme présenté dans la figure I.14.

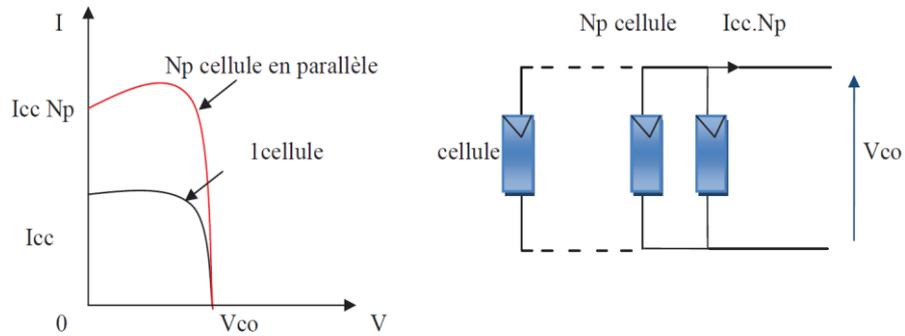


Fig. I .14. Caractéristique courant tension de (N_p) cellule en parallèle. [22]

I.10.3. Association mixte

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il faut associer les modules en série et en parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque. Figure I.15 représente un exemple de couplage mixte.

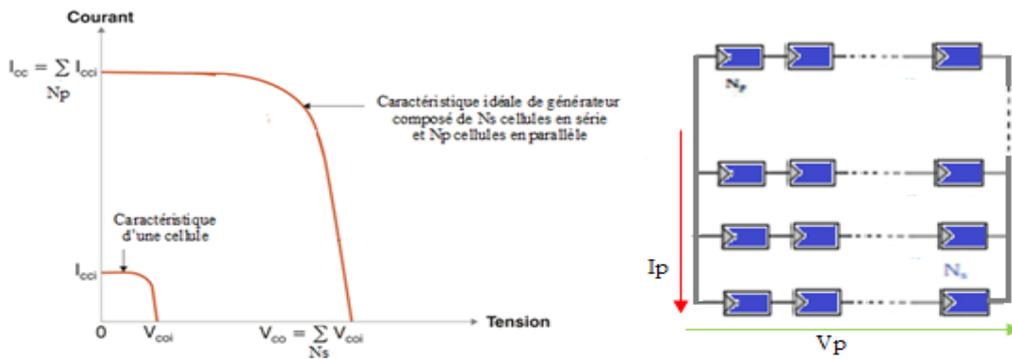


Fig. I .15. Caractéristiques résultantes d'un groupement mixte. [22]

I.11. Les modules photovoltaïques

Les modules photovoltaïques sont des convertisseurs d'énergie lumineuse en électricité, donc par définition le module photovoltaïque est un groupement de cellules connecté entre elles en série pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière.

Ce module est protégé en face avant par une plaque de verre et en face arrière par un autre matériau (verre ou résine) et installé sur un cadre en aluminium anodisé. [23]

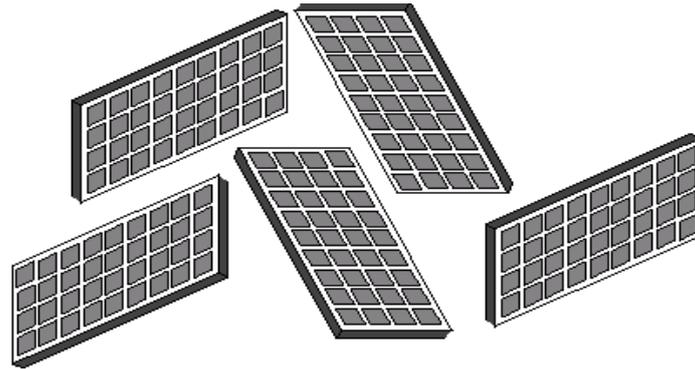


Fig.I.16. les modules photovoltaïques

I.12. Les panneaux photovoltaïques

Un panneau photovoltaïque se compose d'un certain nombre de modules qui sont constitués par l'association de cellules en série. La mise en série et en parallèle des panneaux permet d'obtenir la tension et le courant exigés dont les performances dépendent de l'association des cellules et de la matière qui les compose.

Le point de fonctionnement de cet ensemble de panneaux photovoltaïques est défini par l'intersection de sa caractéristique courant-tension avec la ligne de charge. [24]



Fig. I.17. Les panneaux photovoltaïques

I.13. Les composants du système photovoltaïque

Dans cette première, on présente les différents éléments électriques et électroniques d'un simple système photovoltaïque. Le montage électrique de la figure 4 ci-dessous présente les différents organes du système. Il est constitué d'un module photovoltaïque, d'un régulateur de charge, d'un convertisseur et de l'ensemble des charges (utilisations). [25]

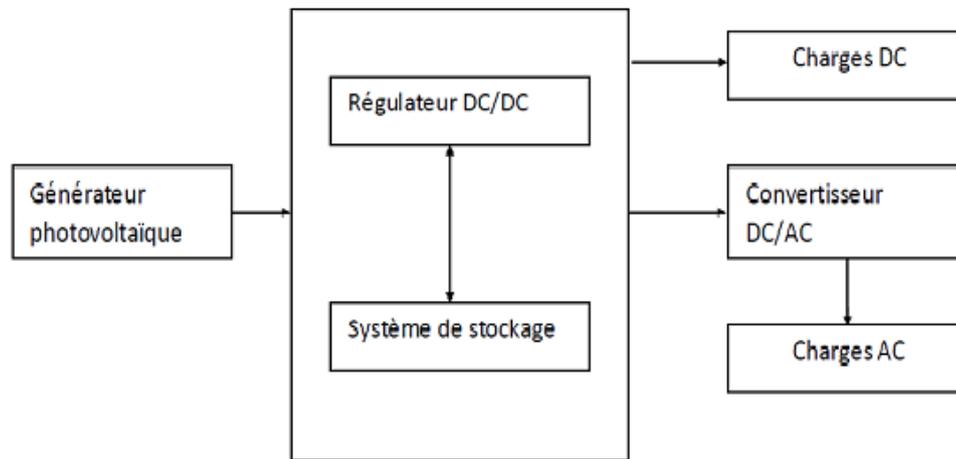


Fig.I.18.Synoptique d'un système photovoltaïque. [25]

I.14. Avantages et Inconvénients de la conversion photovoltaïque

Par effet photovoltaïque, l'énergie contenue dans le rayon solaire peut être directement transformée en énergie électrique. Cette méthode de conversion de l'énergie présente certains avantages comme :

- La simplicité ;
- L'inexistence de parties mécaniques mobiles ;
- Une large flexibilité dans le design et l'application offerte par sa caractéristique modulaire ;
- Une installation et un fonctionnement rapides ;
- Une grande fiabilité, et une maintenance très simple ;
- Une source d'énergie électrique silencieuse, saine, non polluante et renouvelable ;
- Un potentiel à fournir de l'électricité dans les zones non servies par le réseau conventionnel.
- Les systèmes photovoltaïques et les systèmes hybrides ont été pendant plusieurs décennies une source idéale d'énergie pour les régions éloignées.

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement considérés comme une source d'énergie compétitive dans plusieurs applications comme les systèmes de pompage de l'eau, l'irrigation, les équipements de communication, les signaux lumineux et d'autres applications de faible puissance.

Les principales restrictions à l'utilisation de l'énergie solaire sont :

- Le prix onéreux de l'installation initiale: Le générateur solaire représente la partie la plus chère de tout le système ;

Le faible rendement de la cellule photovoltaïque. [26]

II.15. Conclusion

Dans ce chapitre, On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, Nous avons présenté le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales. En suite on fait un rappel sur les systèmes PV et leurs performances. Avec une notion sur les avantages et les inconvénients de la conversion photovoltaïque.

Chapitre II :

Modélisation des cellules photovoltaïques.

II .1. Introduction

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter la cellule photovoltaïque.

II .2. Modélisation des cellules photovoltaïque

Pour tenir compte des différentes limitations de la cellule photovoltaïque, on introduit la figure (II.1) représentant ces différentes limitations. [27]

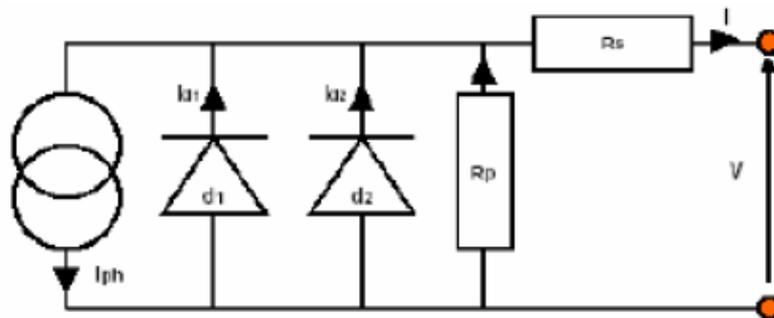


Fig.II.1. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque.

Les différents paramètres de ce modèle sont :

- Le générateur de courant : il délivre le courant I_{ph} correspondant à la courante photo générée.
- La résistance série : elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différents régions constitutives de la cellule, à savoir l'émetteur, la base et les contacts métalliques. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur recourant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant le contact métal-semi conducteur, et en diminuant la résistivité du matériau utilisé. Son effet devient très remarquable dans un module photovoltaïque composé de beaucoup de cellules connectées en série, et la valeur de la résistance est multipliée par le nombre de cellules.
- La résistance parallèle: également connue sous le nom de résistance shunt, elle traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible.

Son effet est beaucoup moins remarquable dans un module photovoltaïque par rapport à la résistance série, et il deviendra seulement apparent quand un certain nombre de modules photovoltaïques sont reliés en parallèle pour un plus grand système.

d) La diode (d1) : modélise la diffusion des porteurs dans la base et l'émetteur. Son influence sera d'autant plus grande que le matériau présentera une bonne longueur de diffusion.

e) La diode (d2) : modélise la génération/recombinaison dans la zone de charge d'espace. Récapitulant ces effets, le rapport courant-tension de la cellule photovoltaïque est donc donné par la relation :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[e^{q \left(\frac{v + IR_s}{KT} \right)} \right] - I_{02} \left[e^{q \left(\frac{v + IR_s}{\gamma KT} \right)} - 1 \right] - \left(\frac{v + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.1})$$

Le facteur de qualité, γ (constante empirique) permet de qualifier les mécanismes de conduction:

* une valeur inférieure à l'unité est associée à une recombinaison de type Auger dans des conditions de forte injection ($\gamma=2/3$). Pour une homo jonction dissymétrique ce mécanisme conduit à des durées de vie de porteurs minoritaires réduites et à un courant de recombinaison élevé.

* $\gamma=1$ correspond à la jonction idéale.

* pour γ compris entre 1 et 2, le niveau des pièges est décentré et γ est alors dépendant de la polarisation. Dans le cas où les pièges sont localisés à la surface de la zone de charge d'espace le facteur de qualité ne serait pas fonction de la polarisation.

* la valeur particulière $\gamma=2$ correspond au modèle de Schrockley.

* une valeur du facteur de qualité supérieure à 2 peut indiquer que la recombinaison s'effectue par des courants de fuite à la surface de la zone de charge d'espace, par des courants shunt indépendants de la température, 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. [28-30]

II.2.1. Modèle d'une cellule solaire idéale

La photopile est un composant semi-conducteur qui délivre un courant en excitant ce dernier par des photons, donc en première approximation on a une source de courant, qui est court-circuitée par une diode (car la photopile est une jonction p-n). [31]

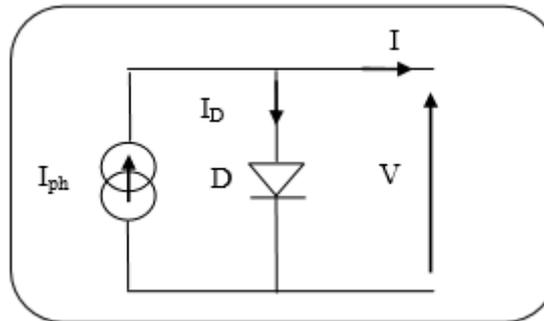


Fig.II.2. Schéma idéale d'une cellule photovoltaïque

II.2.2. Modèle d'une cellule solaire réelle

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles de la cellule photovoltaïque qui diffèrent entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et de l'intensité de courant de sortie. Reichenbach (1980) et Townsend (1981) ont prouvés que des cellules photovoltaïques peuvent être modélisées par un circuit électrique équivalent qui contient des paramètres ayant les significations liées aux phénomènes physiques de la cellule. Reichenbach (1980) et Green (1981) ont passé en revue plusieurs circuits équivalents et ils ont recommandé l'utilisation de circuit d'une seule diode à quatre paramètres. Roger (1984), Appel baume (1987), Epstein (1990), Ruffié et Beckmann (1991) et Alghuwainem (1992) ont employés le modèle à quatre paramètres. Dans ce qui suit on récapitule les différents modèles électriques des cellules photovoltaïques rencontrés dans la littérature. [32]

II.2.2.1. Modèle à deux diodes

II .2.2.1.1. Modèle à sept paramètres (7p)

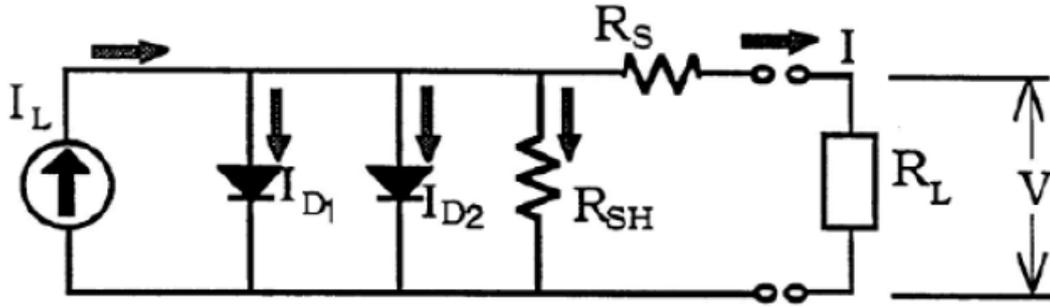


Fig.II.3. Modèle à 7 paramètres.

Les paramètres de ce circuit sont :

I_L = courant photonique.

I_{01} = courant inverse de saturation de la diode 1.

I_{02} = courant inverse de saturation de la diode 2.

$\gamma_1 = A_1 \times (N_{CS})$, le facteur de qualité de la diode 1.

$\gamma_2 = A_2 \times (N_{CS})$, le facteur de qualité de la diode 2.

A_1 et A_2 : sont les facteurs d'accomplissement des diodes 1 et 2.

N_{CS} = Nombre des cellules en série.

R_S = la résistance série.

R_{SH} = la résistance shunt.

L'équation $I(V)$ caractéristique de ce circuit est : [33]

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} - \frac{(v + IR_S)}{R_{SH}} \quad (\text{II.2})$$

$$I_{D1} = I_{01} \left(\exp \left(\frac{q}{\gamma_1 K T_c} * (V + IR_S) \right) - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

$$I_{D2} = I_{02} \left(\exp \left(\frac{q}{\gamma_2 K T_c} * (V + IR_S) \right) - 1 \right) \quad (\text{II.4})$$

$$I = \left(I_L - I_{01} \left(\exp \left(\frac{q(v + IR_S)}{\gamma_1 K T_c} \right) - 1 \right) \right) \quad (\text{II.5})$$

II .2.2.1.2. Modèle à six paramètres (6P)

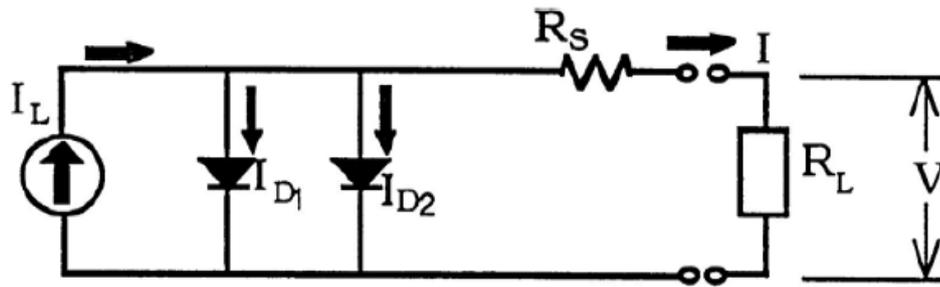


Fig.II.4. Modèle à six paramètres.

Les six paramètres de ce circuit sont :

I_L = courant photonique.

I_{01} = courant de saturation de la diode 1.

I_{02} = courant de saturation de la diode 2.

$\gamma_1 = A1 \times (N_{CS})$, le facteur de qualité de la diode 1.

$\gamma_2 = A2 \times (N_{CS})$, le facteur de qualité de la diode 2.

N_{CS} = Nombre des cellules en série.

R_s = la résistance série.

Les relations courant-tension pour ce circuit sont les suivant:

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} \quad (\text{II.6})$$

$$I_{D1} = I_{01} \left(\exp \left(\frac{q}{\gamma_1 k T_c} * (V + I R_s) \right) - 1 \right) \quad (\text{II.7})$$

$$I_{D2} = I_{02} \left(\exp \left(\frac{q}{\gamma_2 k T_c} * (V + I R_s) \right) - 1 \right) \quad (\text{II.8})$$

$$I = \left(I_L - I_{01} \left(\exp \left(\frac{q(v+I R_s)}{\gamma_1 k T_c} \right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp \left(\frac{q(v+I R_s)}{\gamma_2 k T_c} \right) - 1 \right) \right) \quad (\text{II.9})$$

II .2.2.1.3. Modèle à cinq paramètres (5P)

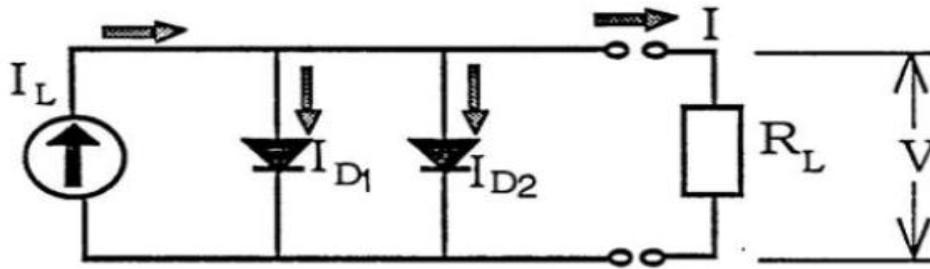


Fig.II.5. Modèle à 5 paramètres.

Les cinq paramètres de ce modèle sont :

I_L = courant photonique.

I_{01} = courant de saturation de la diode 1.

I_{02} = courant de saturation de la diode 2.

$\gamma_1 = A_1 \times (N_{CS})$, le facteur de qualité de la diode 1.

$\gamma_2 = A_2 \times (N_{CS})$, le facteur de qualité de la diode 2.

N_{CS} = Nombre des cellules en série.

L'équation générale de ce modèle est: [34]

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} \quad (\text{II.10})$$

$$I_{D1} = I_{01} \left(\exp\left(\frac{qv}{\gamma_1 k T_c}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.11})$$

$$I_{D2} = I_{02} \left(\exp\left(\frac{qv}{\gamma_2 k T_c}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.12})$$

$$I = \left(I_L - I_{01} \left(\exp\left(\frac{qv}{\gamma_1 k T_c}\right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp\left(\frac{qv}{\gamma_2 k T_c}\right) - 1 \right) \right) \quad (\text{II.13})$$

II.2.2.2.Modèle à une diode

II .2.2.2.1. Modèle à quatre paramètres (4P).

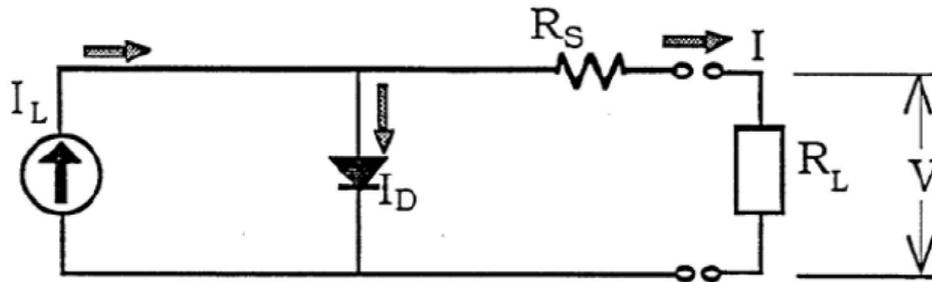


Fig.II.6. Modèle à 4 paramètres.

Les quatre paramètres de ce modèle sont :

I_L = le courant photonique

I_0 =courant de saturation inverse

γ = facteur de qualité

R_s =la résistance séries

Les différentes équations décrivant ce modèle seront détaillées par la suite.

II .2.2.2.2.Modèle à trois paramètres (3P).

Si on suppose que la résistance série est nulle (comme pour le circuit à cinq paramètres) le circuit à 4 paramètres se réduit à un circuit à trois paramètres représenté par la figure II.7 Ce circuit équivalent est considéré comme idéal.

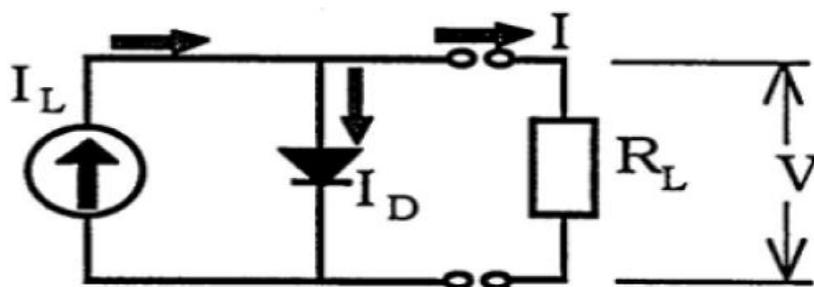


Fig.II.7. Modèle a 3 paramètres.

Les trois paramètres de ce circuit sont :

I_L = le courant photonique

I_0 =courant de saturation inverse

γ = facteur de qualité

Les relations courant-tension de ce circuit sont :

$$I = I_L - I_D \quad (\text{II.14})$$

$$I_D = I_0 \left(\exp\left(\frac{qv}{\gamma k T_c}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.15})$$

$$I = I_L - I_0 \left(\exp\left(\frac{qv}{\gamma k T_c}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.16})$$

II.3. Le modèle à cinq paramètres proposé

Le modèle photovoltaïque à cinq paramètres contient une source de courant I_{ph} qui représente l'ensoleillement reçu par le soleil et une diode pour la modélisation de la jonction p-n de la cellule, une résistance série R_s et une résistance shunt R_{sh} . La figure (II.8) présente le circuit équivalent correspondant à ce modèle. [36]

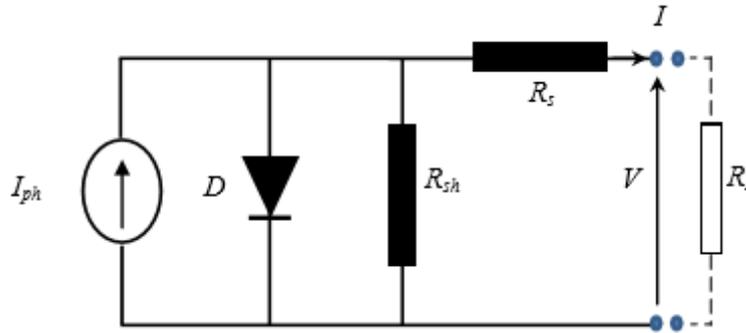


Fig.II.8. Circuit équivalent du modèle à cinq paramètres.

Comme il est montré dans la figure (II.8) le modèle à une seule diode avec une résistance parallèle R_{sh} décrit par l'équation non linéaire et implicite :

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(v+IR_s)}{\gamma k T_c}\right) - 1 \right] - \left(\frac{v+IR_s}{R_{sh}}\right) \quad (\text{II.17})$$

Où q la charge électronique, k la constante de Boltzmann, T_c la température de la cellule, γ le facteur d'idéalité, I_{ph} la source de courant, I_0 le courant inverse de saturation de la diode, R_s la résistance série et R_{sh} la résistance shunt.

Les cinq paramètres apparaissant dans l'équation (II.17) correspondant aux conditions de tests standards sont : γ , I_0 , I_{ph} , R_s , et R_{sh} . En général, ces cinq paramètres dépendent du rayonnement solaire et de la température ambiante.

Trois couple des points de la caractéristique courant- tension sont normalement fournis par le fabricant : le courant de court- circuit I_{cc} , la tension de circuit ouvert V_{oc} et le courant et la tension au point de puissance maximum (I_p , V_p , respectivement). Nous obtenons l'ensemble d'équations suivantes employées pour identifier les paramètres inconnus :

- Courant de court-circuit : $I=I_{cc}$, $V=0$

$$I_{cc} = I_l - I_0 \left[\exp\left(\frac{qR_s I_{cc}}{\gamma k T_c}\right) - 1 \right] - \left(\frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}}\right) \quad (\text{II.18})$$

- Tension de circuit ouvert : $I=0$, $V=V_{oc}$

$$0 = I_l - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{\gamma k T_c}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V_{oc}}{R_{sh}}\right) \quad (\text{II.19})$$

- Point de puissance maximum : $I=I_p$, $V=V_p$

$$I_p = I_l - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_p + R_s I_p)}{\gamma k T_c}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V_p + R_s I_p}{R_{sh}}\right) \quad (\text{II.20})$$

La méthode de Newton- Raphson a été choisie pour calculer la valeur de la résistance série et également son temps de convergence pour différentes valeurs initiales de la résistance série R_s . B. Mustapha [37] a utilisé les équations suivantes, afin de calculer les cinq paramètres inconnus I_l , I_0 , R_s et R_{sh} et la valeur du facteur d'idéalité γ est supposé constante :

$$I_l = \det^{-1} \cdot (V_{oc} I_{cc} A - V_{oc} I_p B - V_p I_{cc} C) \quad (\text{II.21})$$

$$I_0 = \det^{-1} \cdot (V_{oc} I_{cc} - V_{oc} I_p - V_p I_{cc}) \quad (\text{II.22})$$

$$R_{sh}^{-1} = \det^{-1} \cdot [I_{cc} A - I_p B - (I_{cc} - I_p) C] \quad (\text{II.23})$$

$$A = \exp\left(\frac{q(V_p + R_s I_p)}{\gamma k T}\right) - 1 \quad (\text{II.24})$$

$$B = \exp\left(\frac{qR_s I_{cc}}{\gamma k T}\right) - 1 \quad (\text{II.25})$$

$$C = \exp\left(\frac{qV_{oc}}{\gamma k T}\right) - 1 \quad (\text{II.26})$$

Avec

$$\det = (V_{oc} - R_s I_{cc}) \cdot A + (-V_{oc} + V_p + R_s I_p) \cdot B + (-V_p + R_s [I_{cc} - I_p]) \cdot C \quad (\text{II.27})$$

Il est évident que la dérivée de la puissance au point de puissance maximum est nulle :

$$\frac{d(IV)}{dV} \Big|_p = I_p - V_p \frac{dI}{dV} \Big|_p = 0 \quad (\text{II.28})$$

Avec $\frac{dI}{dV} \Big|_p$ est calculé par la relation suivante :

$$\frac{dI}{dV} \Big|_p = \left\{ \frac{-qI_0}{\gamma kT} \exp \frac{q(V_p + I_p R_s)}{\gamma kT} - \frac{1}{R_{sh}} + \frac{qI_0 R_s}{\gamma kT} \exp \frac{q(V_p + I_p R_s)}{\gamma kT} + \frac{R_s}{R_{sh}} \right\} \quad (\text{II.29})$$

La dérivée de l'équation (II.17) par rapport à la tension peut être exprimée par :

$$\frac{dI}{dV} = - \left\{ R_s + \left(\frac{qI_0}{\gamma kT} \exp \frac{q(V + R_s I)}{\gamma kT} + \frac{1}{R_{sh}} \right)^{-1} \right\}^{-1} \quad (\text{II.30})$$

$$f_{R_s} = I_p - (V_p - R_s I_p) \left(\frac{qI_0}{\gamma kT} \exp \frac{q(V_p + R_s I_p)}{\gamma kT} + \frac{1}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.31})$$

Dans ce travail, nous modifions cette méthode pour calculer les quatre paramètres inconnus I_1 , I_0 , R_s et R_{sh} à différentes valeurs de facteur d'idéalité γ . Dans la littérature et pour simplifier le calcul, plusieurs auteurs prennent une valeur fixe de facteur d'idéalité. Dans ce modèle, nous changeons pour chaque itération la valeur du facteur d'idéalité, pour choisir sa valeur qui donne une erreur relative minimale du point de puissance maximale.

Comme I_0 et R_{sh} dépendent de R_s , La fonction f_{R_s} l'est également. Pour calculer la résistance série R_s ; la résolution de l'équation non linéaire équation (II-31) est faite en utilisant la fonction *fsolve* contenue dans la boite à outils de Matlab. On suppose que la valeur initiale de la résistance série pour les module cristallins est donnée par la fonction d'approximation dans l'équation (II-31), et pour les autres type des modules, on suppose R_{s0} égale 0. [38]

$$R_{s0} = \frac{V_{oc,ref}}{I_{sc,ref}} \left(\alpha_1 \frac{I_{p,ref} V_{p,ref}}{I_{sc,ref} V_{oc,ref}} + \alpha_2 \frac{V_{p,ref}}{V_{oc,ref}} + \alpha_3 \frac{I_{p,ref}}{I_{sc,ref}} + \alpha_4 \right) \quad (\text{II.31})$$

Avec: α constant.

$$\alpha = \begin{Bmatrix} -5.411 \\ 6.45 \\ 3.417 \\ -4.422 \end{Bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

Nous notons que l'équation (II-32) est indépendante des propriétés des matériaux de la cellule solaire. [39]

II.4. Effet des conditions réelles sur les paramètres électrique

Les paramètres électriques inconnus ont été mesurés dans des conditions de test standard (1000W/m² et 25 °C) rarement trouvé dans l'environnement extérieur. De plus, la dépendance des paramètres avec les conditions réelles (température ambiante et éclairement) est décrite dans les équations (II-32) - (II-33).

$$I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^\gamma \exp \left[\frac{q}{\gamma k} \left(\frac{E_g}{T_{c,ref}} - \frac{E_g}{T_c} \right) \right] \quad (\text{II. 32})$$

$$I_l = \frac{G}{G_{ref}} [I_{ph,ref} + \mu_{Isc} (T_c - T_{c,ref})] \quad (\text{II. 33})$$

Chapitre III :

Résultats et discussions.

III.1. Introduction :

Après la citation et l'étude de modélisation des différents composants du système photovoltaïque, nous procédons à la simulation du composant principale de la cellule photovoltaïque. La simulation de la cellule solaire a l'objectif d'obtenir la caractéristique ($I-V$) et par conséquent la caractéristique ($P-V$) à une condition de fonctionnement donnée (éclairage, température).

La résolution du système d'équations établie après avoir écrit les organigrammes est abordée par des programmes **MATLAB** que nous avons élaboré et le logiciel **PV_{sys}**.

Les résultats obtenus sont présentés sous forme graphique et tableaux dans ce qui suit.

III.2. L'influence des différents paramètres de la cellule solaire sur ca fonctionnement:

Afin de constater l'influence des différents paramètres de la cellule solaire sur les caractéristiques ($I=f(v)$, $P=f(v)$), nous avons adopté la méthode suivante:

- Pour visualiser l'influence de l'éclaircement par rapport aux caractéristiques de la cellule, on fixe la température ($T_c=25^\circ C$) et on fait varier l'éclaircement dans une gamme suffisante;
- Pour un éclaircement constant ($G=1000 \text{ w/m}^2$), nous ferons varier la température afin d'avoir l'influence de celle – ci par rapport aux caractéristiques de la cellule PV;
- Autrement, sous les conditions standards ($G=1000 \text{ w/m}^2$, $T_c=25^\circ C$), on donne à la résistance (R_s) différents valeurs pou avoir l'influence de celle-ci sur les caractéristiques de la cellule PV;
- En fin, on varie le facteur d'idéalité de la diode pour obtenir son influence sur caractéristiques de la cellule PV.

III.2.1. L'influence de l'éclaircement:

Nous avons vu plus haut que le courant de court-circuit est pratiquement égale au photo courant, lui – même directement proportionnel à la surface éclairée et l'irradiance pour un spectre donnée. L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclaircement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure suivante (Figure III.1) représente la caractéristique courant- tension d'une cellule PV solaire en fonction de l'éclaircement, à une température constante.

On remarque que la tension (V_{MPP}) correspondant à la puissance maximale (P_{MPP}) ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant qui augmente fortement avec l'éclairement.

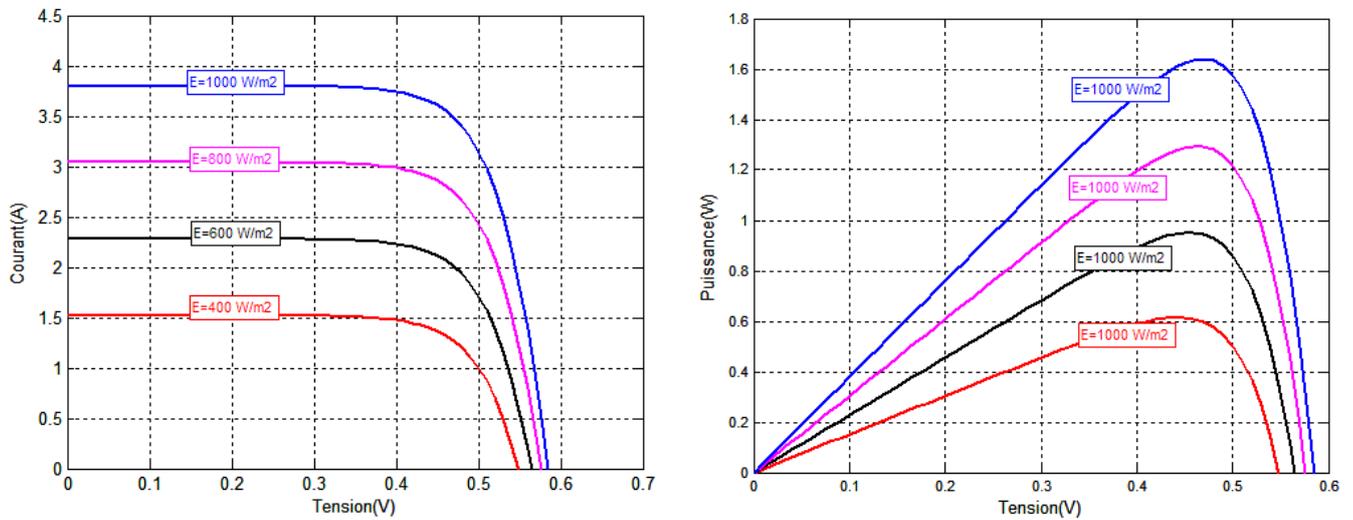


Fig. III.1. Influence de l'éclairement sur $I-V$ et $P-V$.

III.2.2. L'influence de la température:

La température est un paramètre très important dans le comportement des photopiles, ne serait-ce que parce qu'une cellule exposée à une irradiance de $1kW/m^2$ n'en transforme en électricité que 12% au plus, le reste étant réfléchi (6 à 8%) ou dissipé en chaleur (80 à 82%). Ainsi, si la photopile n'est pas correctement ventilée, elle peut monter très haut en température et ses performances électriques peuvent se dégrader. La figure III.2 montre l'influence de la température sur $I-V$ et $P-V$ d'une photopile.

L'augmentation de la température se traduit aussi par la diminution de la puissance maximale disponible (P_{MPP}).

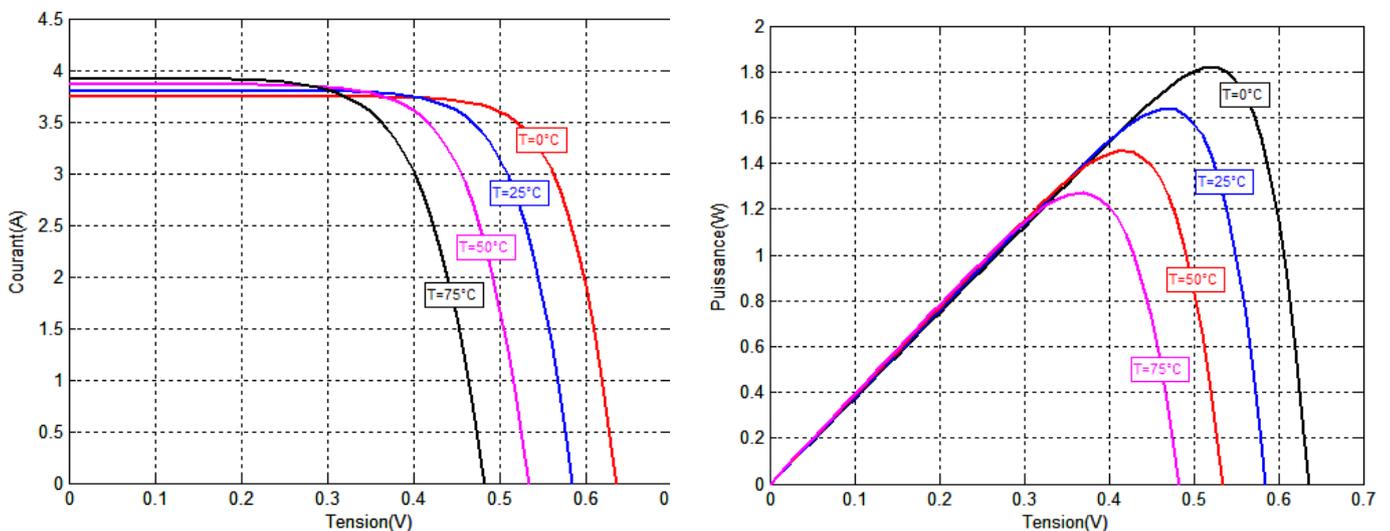


Fig. III.2. Influence de la température sur $I-V$ et $P-V$.

III.2.3. Influence simultanée du rayonnement et de température

L'augmentation du rayonnement et de la température entraîne une diminution de la tension et une augmentation du courant.(figure III.3).

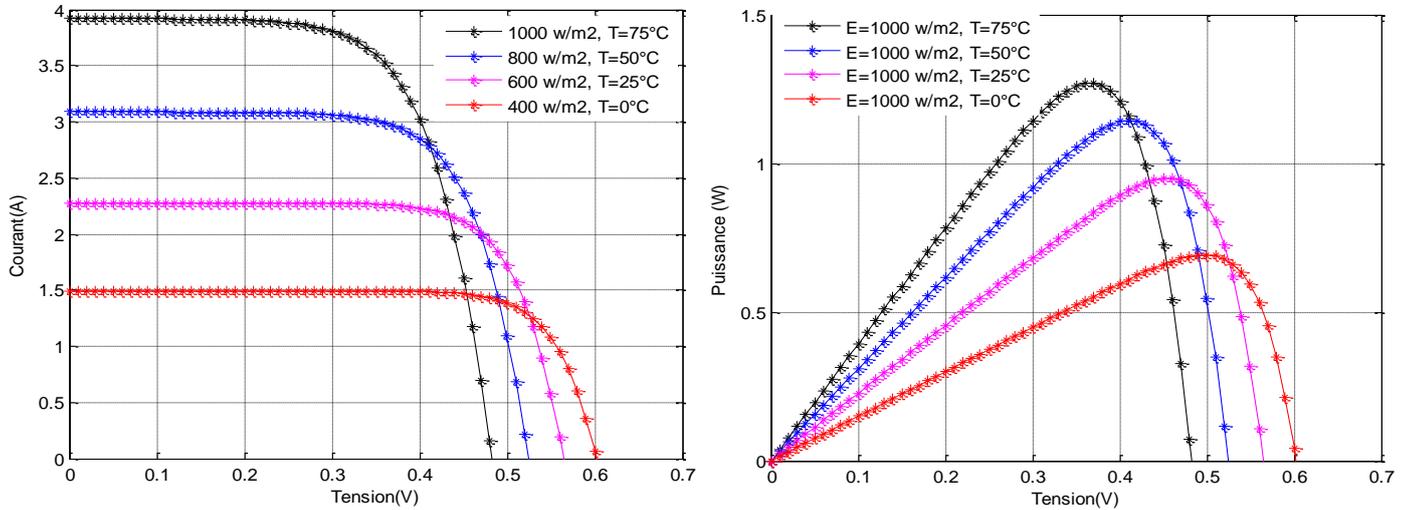


Fig.III.3. Influence simultanée de l'éclairement et de la température sur I-V et P-V.

III.2.4. L'influence de la résistance série:

La valeur de la résistance série est gouvernée par la résistivité du matériau, par les résistances de contact des électrodes et par la résistance de la grille collectrice.

La résistance série (R_s) de la cellule photovoltaïque a un grand impact sur la pente de la courbe $I=f(V)$ près de la tension circuit ouvert (V_{oc}), suivant les indications du schéma ci-dessous, par conséquent la valeur de (R_s) est calculée en évaluant la pente de la courbe $I=f(v)$ au point (V_{oc}).

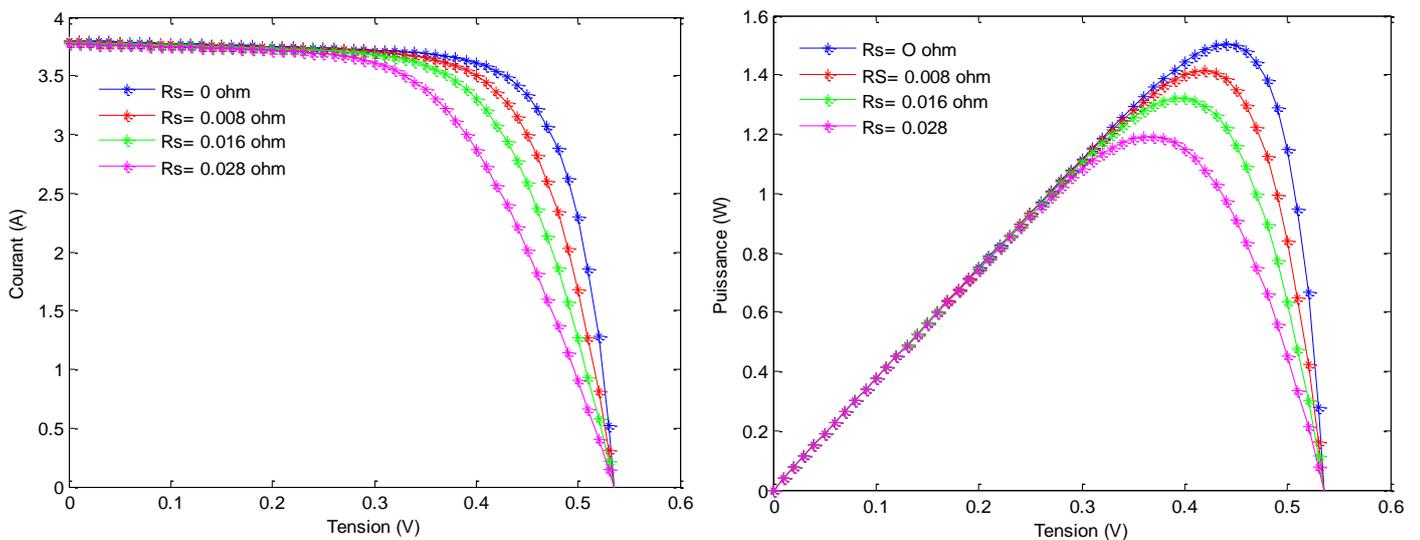


Fig. III.4. Influence de la résistance série sur I-V et P-V.

III.2.5. L'influence de la résistance Shunt:

Une résistance shunt trop faible aura un impact sur la tension de circuit ouvert de la photopile; en outre une photopile dont la résistance shunt est trop faible ne donnera plus de tension sous faible éclairement.

En générale, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération du courant.

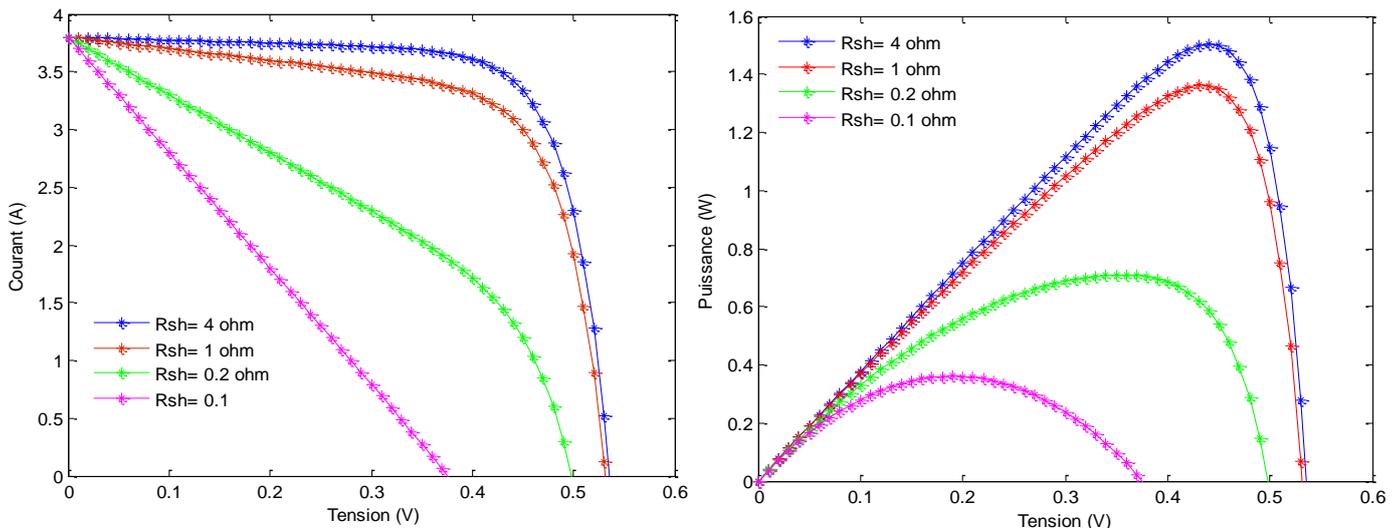


Fig. III.5. Influence de la résistance shunt sur I-V et P-V.

III.2.6. L'influence du facteur d'idéalité:

L'augmentation du facteur de qualité (A) de la diode influe inversement sur le point de puissance maximale (P_{MPP}) et cela traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement. (figure II.6)

III.3. Association des générateurs photovoltaïque

La puissance disponible aux bornes d'une cellule unitaire est très faible. il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle des générateurs photovoltaïque pour augmenter la puissance et de rendre la puissance compatible avec l'équipement électrique usuel. L'association de cellules PV est analogue à l'association de générateurs de courant. En série leurs tensions s'ajoutent, en parallèle leurs courants s'ajoutent.

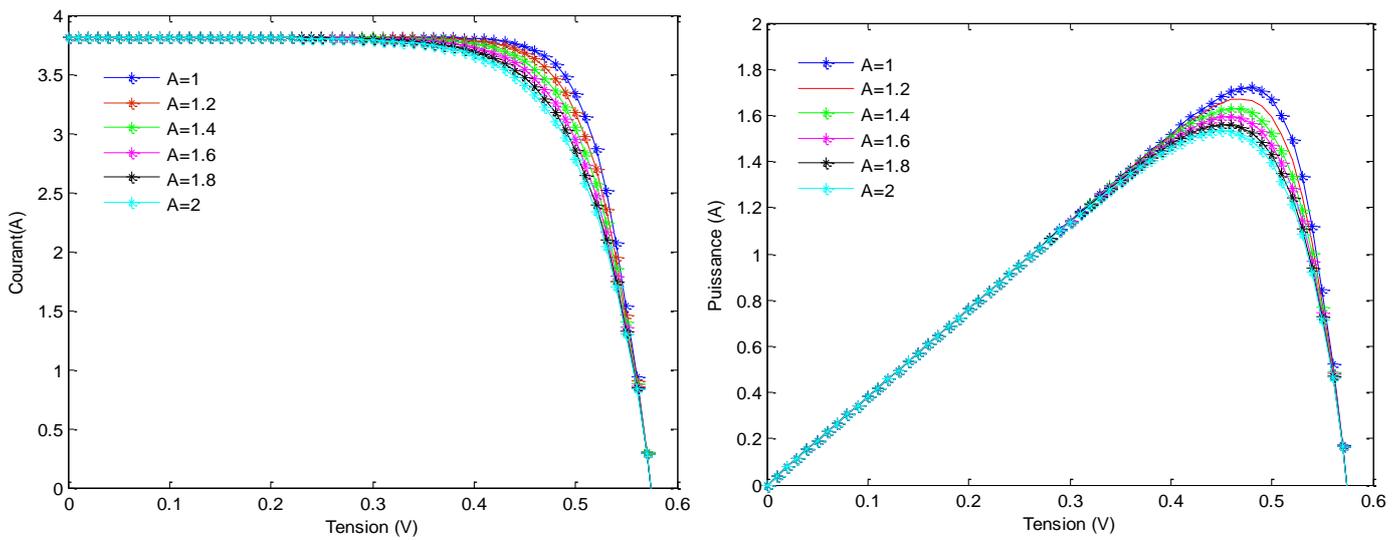


Fig. III.6. Influence de facteur de qualité sur I-V et P-V.

III.3.1. Association en parallèle:

Dans le cas d'une association en parallèle, les cellules délivrent la même tension mais elles peuvent fonctionner avec des courants différents (figure III.7.b). Si les modules en parallèles ne sont pas identiques ou si quelques cellules d'un module sont ombragées, le courant d'utilisation total des modules sera plus faible. Pour une impédance de charge élevée, les modules moins performants deviendront récepteurs si la tension d'utilisation est supérieure à la tension produite par ces modules. Une dissipation de puissance importante peut devenir dangereuse au niveau de la cellule la plus faible de ces modules.

III.3.2. Association en série:

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12V (figure III.7.a). Dans ce cas, le courant qui traverse les cellules est le même mais les cellules peuvent fonctionner à des tensions différentes. Si une cellule est occultée (si elle ne reçoit plus qu'une faible partie de l'énergie solaire reçue par les cellules voisines), elle ne peut délivrer qu'un courant limité. Elle fonctionne donc en inverse (comme un récepteur soumis à une tension inverse de celle produite en direct) par rapport aux autres cellules du module .

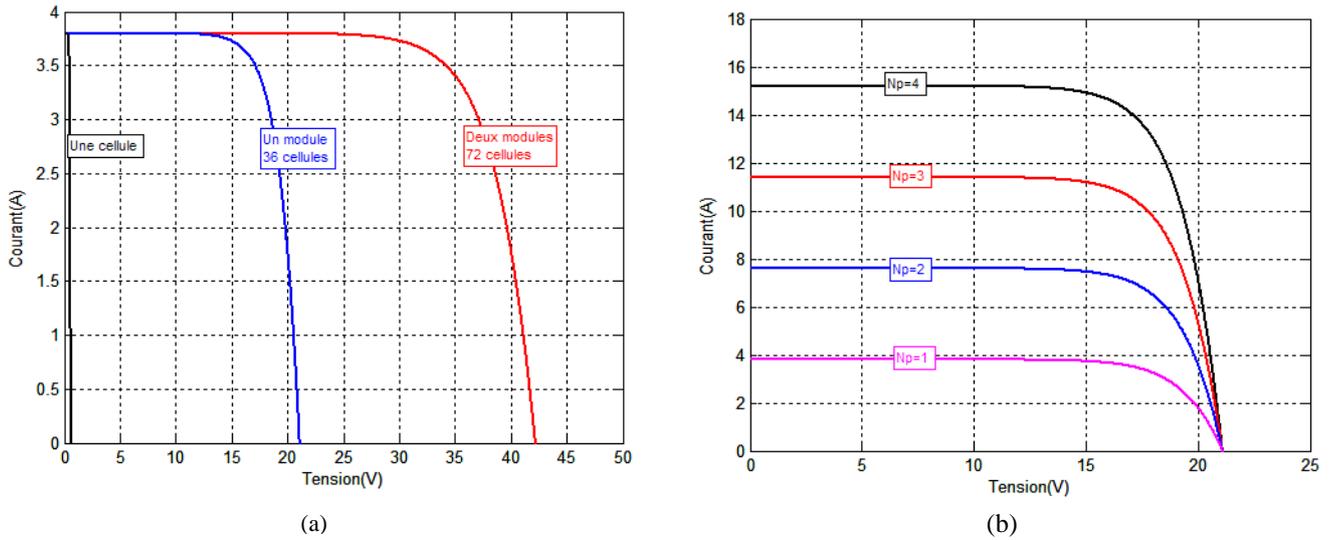


Fig. III.7. Caractéristique I-V en association en série (a) et en parallèle (b).

III.3.3. Association mixte:

Afin d'augmenter la puissance des générateurs photovoltaïque on est obligé à grouper les cellules photovoltaïque en série et en parallèle pour obtenir un générateur mixte équivalent. (figure III.8).

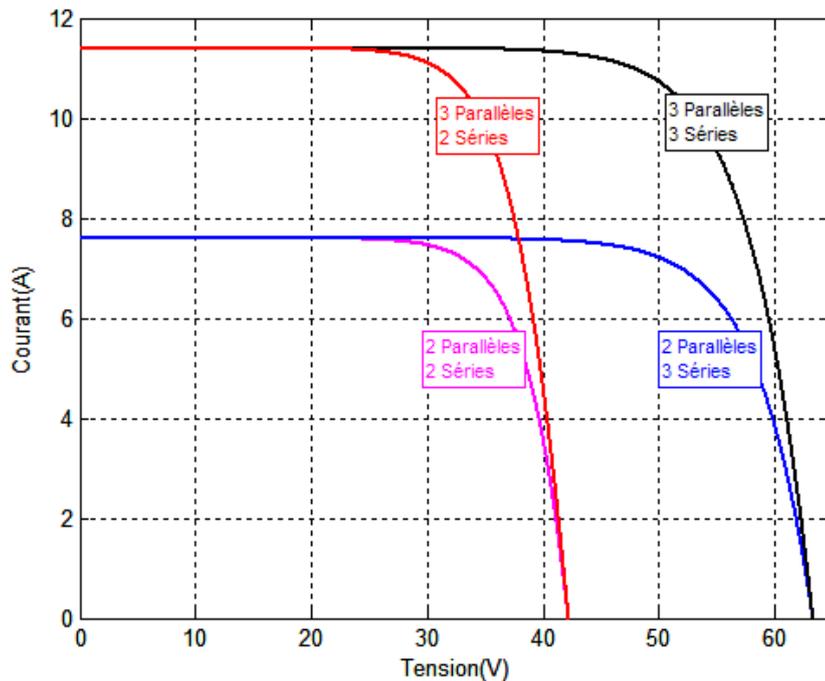


Fig. III.8. Caractéristique I-V en association mixte.

III.4. Comparaison entre les modèle :

Pour permettre un ensemble cohérent de comparaisons pour un modèle donné, la même condition de référence est choisie pour chaque modèle, (la performance de la cellule solaire est normalement évaluée dans les conditions d'essai normalisé (STE), ou un spectre solaire moyen de AM 1.5 est employé, l'éclairement est normalisé à 1000 W/m^2 , et la température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$).

la figures (III.9) comparent les différents modèles à une diode et la figure (III. 10) comparent entre les différents modèles à deux diodes pour une température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ et un éclairement de 1000 W/m^2 .

Les figures montrent que les résultats obtenus par les modèles à deux diode marquent un point important aux niveaux de la zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_s à R_{sh} (la zone 3 où se situe le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale), la puissance fournie et la tension de circuit ouvert obtenues par ces modèles sont supérieures par rapport aux modèles à une diode.

Le modèle à deux diodes a un léger avantage, car il fait appel à la recombinaison des porteurs minoritaires dans le volume du matériau. (les branches de chacune des diodes représentent respectivement le courant de diffusion dans la base et l'émetteur (I_{d1}), et le courant de génération-recombinaison (I_{d2}) dans la zone de charge d'espace de la jonction (ZCE).

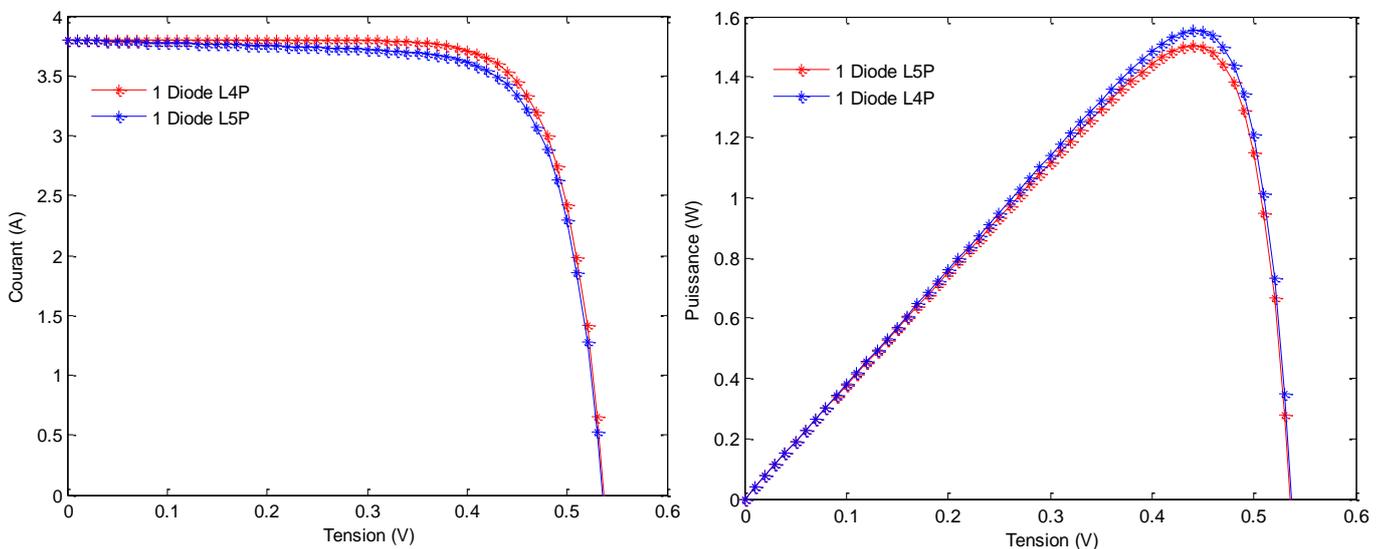


Fig. III.9-Caractéristique I-V pour les modèles L4P, L5P.

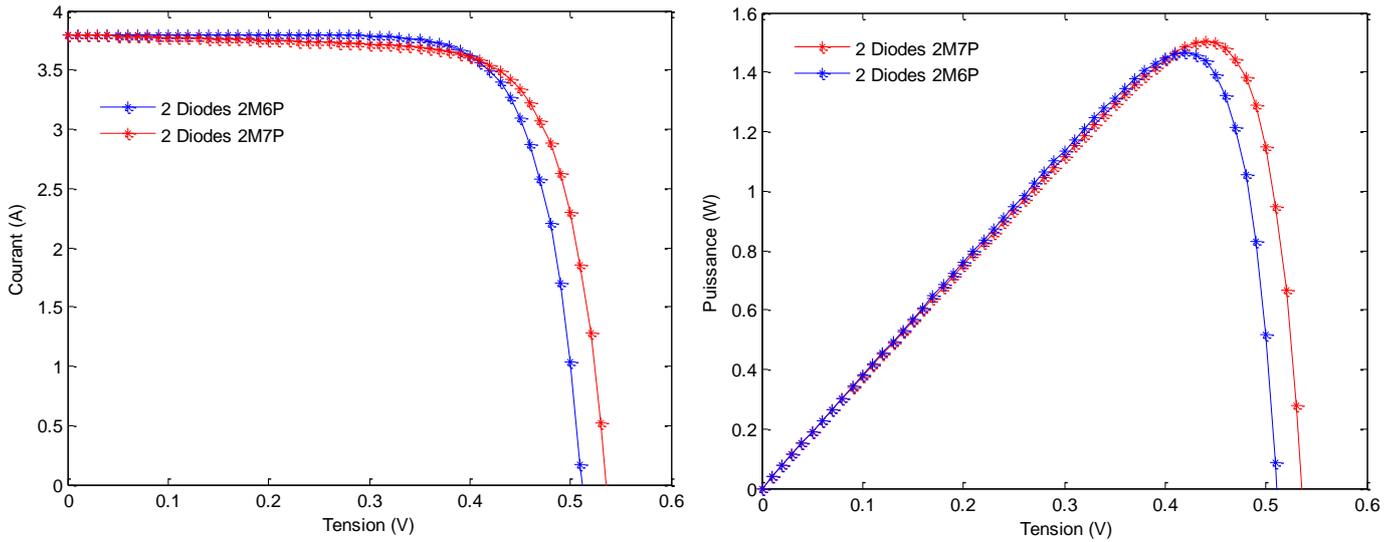


Fig.III.10.Caractéristique I-V pour les modèles 2M7P,2M6P.

II.5. Vérification du modèle proposé à STC:

Les figures III.11 et III.12 présentent les courbes $I-V$ et $P-V$ générés par le modèle proposé et les données expérimentales à STC. Trois modules à différentes technologies (monocristallin, polycristallin et amorphe) sont présentés.

L'analyse de courbes expérimentales et théoriques montre que les paramètres obtenus avec le modèle proposé s'adaptent très bien les courbes $I-V$ et $P-V$ pour les modules mono et polycristallins sous STC. [5]

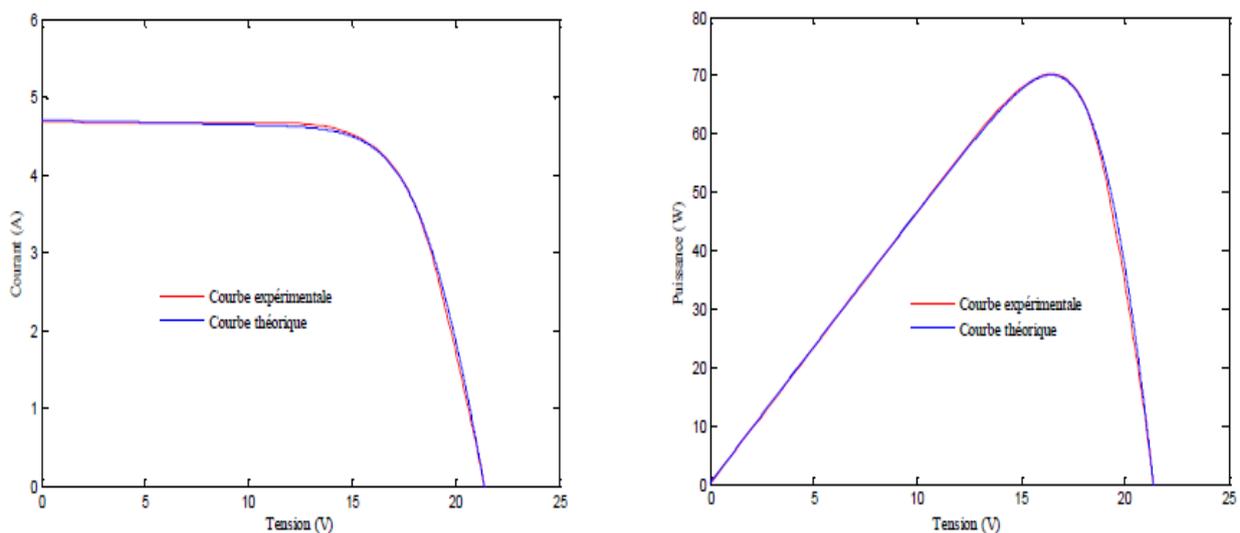


Fig. III.11.Courbe I-V et P-V pour le module SP-70 en silicium monocristallin à STC.[5]

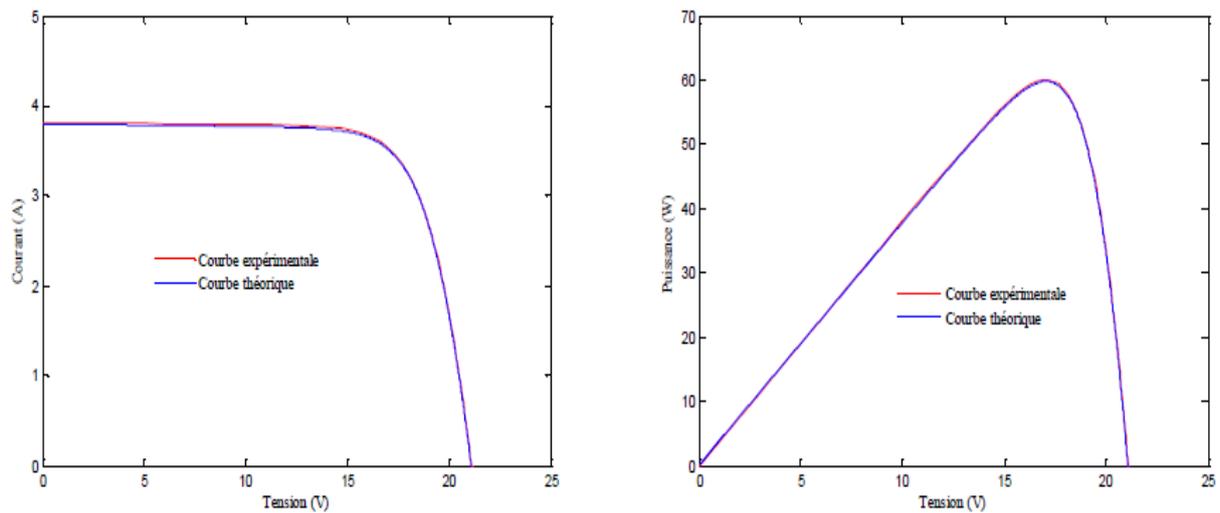


Fig. III.12. Courbes I-V et P-V pour le module MSX-60 en silicium poly-cristallin à STC. [5]

III.6. Comparaison des modèles photovoltaïques avec le modèle proposé :

En vue de vérifier le modèle proposé, une comparaison est effectuée avec le modèle à 2M6P, en utilisant des mesures expérimentales extraites à partir de la fiche technique des modules photovoltaïques de **CONDOR Electronique**.

Les spécifications paramètres électriques des modules à STC sont résumées dans le tableau III.1.

Modules	I_{cc}	V_{oc}	I_p	V_p	a_{Icc}	a_{voc}	N_{cs}
CO 60C Monocristallin	9.01	37.36	8.37	31.19	0.06	-0.32	60
CO 60C Poly cristallin	8.32	36.66	7.96	30.26	0.06	-0.33	60

Tableau III. 1. Les caractéristiques électriques.

Les tableaux III.2 et III.3 présentent les paramètres électriques calculés par le modèle à 2M6P, le modèle proposé, respectivement.

Modules	I_l	Γ	R_s	R_{sh}	I_0
CO 60C Monocristallin	9.16	1.3	0.6	114.5	$1.15 e^{-10}$
CO 60C Poly cristallin	8.2	1.4	0.4	120.115	$5 e^{-10}$

Tableau III. 2. Les paramètres calculés par le modèle à 2M6P.

Modules	I_l	Γ	R_s	R_{sh}	I_0
CO 60C Monocristallin	9.135	1.4	0.6	550	$1.15 e^{-6}$
CO 60C Poly cristallin	9.11	1.3	0.5	580.115	$5 e^{-6}$

Tableau III. 3. Les paramètres calculés par le modèle proposé.

Les tableaux III.2 et III.3 montrent une comparaison entre les deux modèles présentés au-dessus pour deux modules photovoltaïques. Ces modules sont: CO 60C du type monocristallin et CO 60C du type poly cristallin. Les tests sont effectués à différents éclairagements ou/et températures par le modèle proposé.

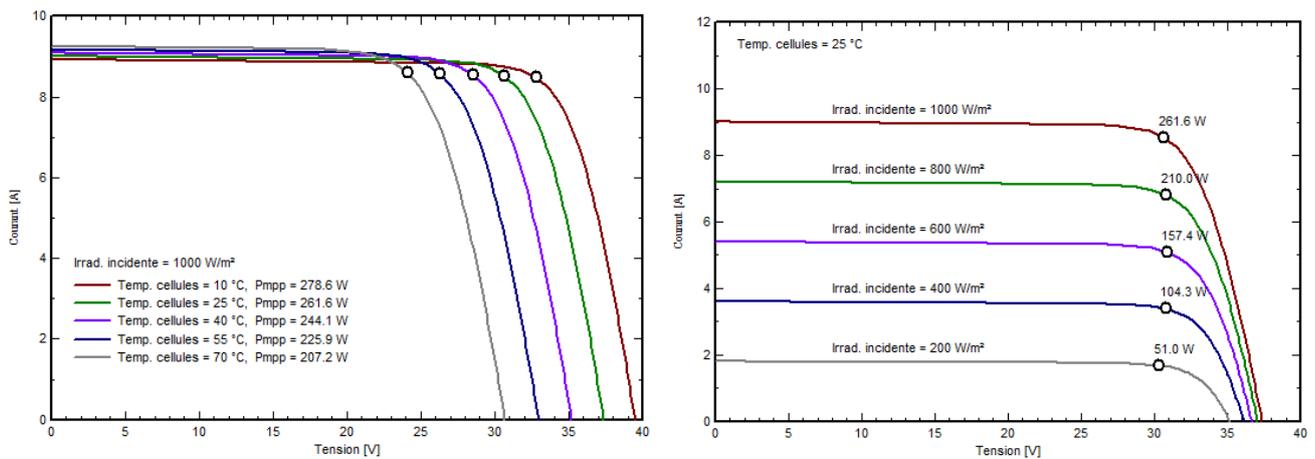


Fig. III.13. Caractéristiques I-V du module CO 60C monocristallin pour différents éclairagements et températures.

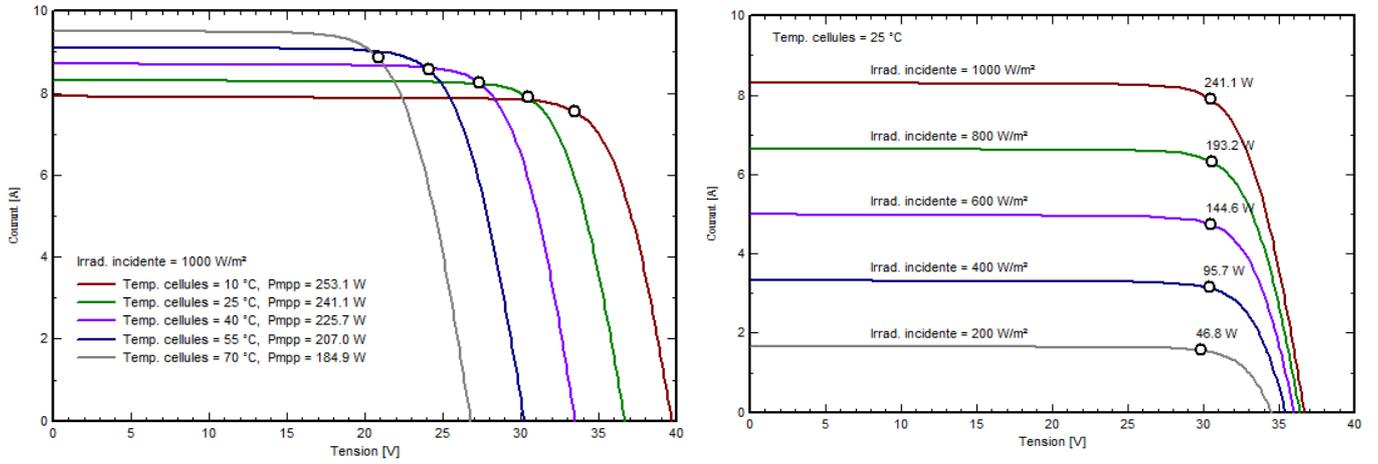


Fig. III.14. Caractéristiques I-V du module CO 60C poly cristallin pour différents éclairagements et températures.

Conclusion générale

Dans cette thèse, nous avons présenté quelques modèles photovoltaïques existants dans la littérature et montré comment retrouver leurs caractéristiques électriques à base des valeurs nominales (les valeurs données par le fabricant).

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet en général. Nous avons exposé un petit historique et avons fourni une explication sur le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

Le second chapitre, une approche générale concernant la modélisation des modules photovoltaïques, qui passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. De nombreux modèles mathématiques sont présents.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié le modèle à une diode avec cinq paramètres inconnus, en utilisant seulement les données du fabricant. Nous nous intéressons à développer un modèle simple de caractérisations des modules, c'est un modèle à cinq paramètres, il utilise seulement les informations fournies par le fabricant des panneaux photovoltaïques. Ensuite, une validation et une comparaison de ce dernier par rapport à d'autres modèles existant dans la littérature sera présentée.

REFERENCES

- [1] S. Vecchi, " Développement de cellules photovoltaïques à hétéro jonction de silicium et contacts interdites en face arrière", Thèse de doctorat, Université Lyon, France, 2013.
- [2] B. Mustapha, " Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque", Thèse de Magistère, Université d'Oran, Algérie, 2006.
- [3] A. Nouar, " Etude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales", Thèse de Magistère, Université Mentouri Constantine, Algérie, 2010.
- [4] A. Fatima, "Croissance de couche minces de silicium par épitaxie en phase liquide", Thèse de Doctorat, Université de Lyon, France, 2007.
- [5] A. Nouar, " Evaluation et validation de la performance des modèles de circuits équivalents de la cellule photovoltaïque", Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, Algérie, 2016.
- [6] G. Walid, "Simulations des performances des cellules solaires à base de matériaux organiques ", Thèse de Magistère, Université Mentouri Constantine, Algérie, 2015.
- [7] S. Fateh, " Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique", Thèse de Magistère, Université Sétif, Algérie, 2011.
- [8] F. Heroguel, "les cellules photovoltaïques," Ecole Normale Supérieure, Lyon Epreuve de projet, 2007.
- [9] R. Maouedj, "application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de bouzareah", Mémoire de Magister, Université de Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, 2005.
- [10] "*La cellule photovoltaïque*" Centre de recherche de développement de l'ECAM.
- [11] B. Mohammed, "Modélisation d'un Système de captage photovoltaïque autonome", Mémoire de Magister, Centre Universitaire de Bechar, 2007-2008.
- [12] A. C. Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ", Institut National de Science Appliquée de Toulouse, Thèse de doctorat.2009.
- [13] Dj. Mohamed, "contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couples au réseau électrique,", thèse de doctorat en science, université de Batna, 2008.

- [14] A. Labouret, "*Energie solaire Photovoltaïque*", Le manuel du professionnel, paris, 2003.
- [15] M. Oukachmih, "les cellules photovoltaïques a base de matériaux organiques discotiques", Thèse de doctorat, université paul sabatier, 2003.
- [16] Al. Busaid '' Economics of Photovoltaic Water Pumping System in Sultanate of Oman'', Bachelor of Engineering (Instrumentation & Control). University of Southern Queensland, 2005.
- [18] A. Betka, " Perspectives for the sake of photovoltaic pumping development in the south", Thèse de Doctorat, University of Batna, Algeria, 2005.
- [19] Walker, Geoff R, "Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model" , Australasian Universities Power Engineering Conference, Brisbane, 2000.
- [20] E. Matagne, R. Chenni, R. El Bachtiri, " A photovoltaic cell model based on nominal data Only", Proceedings of the international conference on power Engineering Energy and Electrical Drives-Powering , Setubal, Portugal, 12-14 April, ISBN: 1-4244-0895-4, pp. 562-565, 2007.
- [21] E. E. van Dyk, B. J. Scott, E. L. Meyer, A. W. R. Leitch, "Temperature dependence of performance of crystalline silicon modules", S Afr J Sci, Vol. 96, pp. 198–200, 2000.
- [22] M. C. Gonzalez, J. J. Carroll, "Solar cells efficiency variations with varying atmospheric conditions", Solar Energy, Vol. 53, No. 5, pp. 395–402, 1994.
- [23] K. Bücher, G. Kleiss, D. Dätzner," Photovoltaic modules in buildings: performance and safety", Renewable Energy, Vol. 15, pp. 545–51, 1998.
- [24] J. P. Charles, A. Haddi, A. Maouad, H. Bakhtiar, A. Zerga, A. Hoffmann, P. Mialhe." La jonction, du solaire à la microélectronique". Revue des Energies Renouvelables, Vol. 3, pp. 1-16, 2000.
- [25] H. L. Tsai, "Insolation-oriented model of photovoltaic module using Matlab/Simulink", Solar Energy, Vol. 84, pp. 1318–1326, 2010.
- [26] W. Desoto, S. Klein, W. Beckman, "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance", Solar Energy, Vol. 80, pp. 78–88, 2006.
- [27] M. Madani," Réalisation des couches antireflets dans les cellules solaires à couches minces". Thèse de magister, Université de Tlemcen, Algérie, 2006.
- [28] M. Rachid," Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de tlemcen et de bouzareah", Thèse de Magister, Université de Tlemcen, Algérie, 2005.
- [29] W.C. Benmoussa, S. Amara, A. Zerga," Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin", Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 301 – 306, Tlemcen, 2007.

- [30] P. H. Nguyen, C. Michel, J. Bottin, " Etude de la conversion photovoltaïque : effets des résistances parasites des photopiles", *Revue de physique Appliquée* 18 :775-779, 1983.
- [31] D. Sera, R. Teodorescu, P. Rodriguez," PV panel model based on datasheet values", In: *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE'07*, pp. 2392–2396, 2007.
- [32] R. Khezzer, M. Zereg, A. Khezzer," Modeling improvement of the four parameter model for photovoltaic modules", *Solar Energy*, Vol. 110, pp. 452–462, 2014.
- [33] E. Matagne, R. Chenni, R. EI Bachtiri," A photovoltaic cell model based on nominal data only", In: *IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, POWERENG'07*, pp. 562–565, 2007.
- [34] H. Tian, F. M. David, K. Ellis, E. Muljadi, P. Jenkins," A cell-to-module-to-array detailed model for photovoltaic panels", *Solar Energy*, Vol. 86, pp. 2695–2706, 2012.
- [35] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, E. R. Filho," Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays", In: *Proceedings of the 10th Brazilian power electronics conference (COBEP)*, 2009.
- [36] B. Mustapha," Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque", *Thèse de Magistère, Université d'Oran, Algérie*, 2006.
- [37] A. Quarteroni, F. Saleri, P. Gervasio," *Calcul scientifique cours, exercices corrigés et illustrations en Matlab et Octave*", 2nd ed, Springer-Verlag, Italia, 2010.
- [38] A. Wagner," Peak-power and internal series resistance measurement under natural ambient conditions". *Proceedings EuroSun, Copenhagen*, pp. 1-7, 19-22 June 2000.

Résumé

L'utilisation de l'énergie solaire dans les sites isolés pour différentes applications, présente un intérêt primordial pour la population des pays, mais les générateurs photovoltaïques possèdent deux inconvénients majeurs qui sont un rendement faible et un coût élevé.

Nous montrons dans ce travail comment obtenir un modèle de cellule solaire comportant cinq paramètres, en utilisant comme données, les valeurs nominales fournies par le fabricant : tension à vide, courant de court-circuit, tension et courant correspondants au point à puissance nominale, ainsi que les coefficients de température de tension à vide, de courant de court-circuit et de la puissance maximale.

Mot clés: Cellule solaire, modèle, module photovoltaïque, modèle à cinq paramètres.

ملخص

تعتبر الطاقة الشمسية من أهم الطاقات المتجددة التي تستعمل في المناطق النائية, المعزولة او البعيدة عن شبكة توزيع الطاقة الكهربائية لما لها من فوائد كثيرة. لكن هناك عدة مشاكل تعرقل استعمالها نذكر من بينها تكلفتها الباهظة ومردودها الضعيف.

نبين في هذا العمل كيف نتحصل على نموذج لخلية شمسية يحتوي على خمسة عناصر, استخدمنا المعطيات المقدمة من طرف المصنع : فرق الكمون للدائرة المفتوحة, تيار الدائرة القصيرة, التيار و فرق الكمون الموافقان للاستطاعة القصوى, كذلك معامل الحرارة لفرق كمون الدائرة المفتوحة, لتيار الدائرة القصيرة و الاستطاعة القصوى.

كلمات مفتاحية: خلية شمسية, نموذج لوح, نموذج ذات اربع عناصر.

Abstract

The use of solar in isolated sites for different applications, presents many interests for third world countries. However photovoltaic generators do have two main disadvantages namely: High cost, bad efficiency.

We show in this work how to obtain a four and five parameters model of solar cell using as data only nominal values supplied by the manufacturer: open circuit voltage, short circuit current, voltage and current corresponding to the peak power. As well as the temperature coefficients of open circuit voltage, short circuit current and maximum power.

Keywords: Solar cell, model, photovoltaic module, five parameters model.