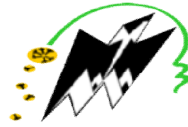


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOD MAMMERI TIZI-OUZOU



FACULTÉ DES SCIENCES
DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

MÉMOIRE DE MASTER

Filière: Physique
Option: Nanophysique

Présenté par

Nabila Boumali

Intitulé du sujet

*Etude d'une cellule photovoltaïque.
Application du modèle électrique à une diode.*

Devant le jury :

M. Belkhir Abderrahmane	Professeur	UMMTO	Président
Mme F.LALAM	Professeur	UMMTO	Examineur
Mme D .ZEMBRI-NEBBALI	Maître de Conférences B	UMMTO	Rapporteur

Soutenu publiquement le: 02 /10 /2021



Remerciements

En premier lieu je tiens à remercier Madame Zembri-Nebbali Djamila, Maître de conférences à l'Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou (UMMTO), et lui témoigner ma gratitude pour sa patience, sa disponibilité et son soutien qui ont contribué énormément à l'accomplissement de ce travail.

Ma gratitude va également à Monsieur NEBBALI Rezki, Maître de conférences à l'UMMTO, de m'avoir permis d'intégrer le laboratoire d'Energétique, Mécanique et Matériaux (LEMM).

Je tiens aussi à remercier tous les enseignants du département de physique ; d'avoir enrichi nos connaissances et de nous avoir guidé durant tout le cursus universitaire.

Je tiens à remercier infiniment mes chers parents que j'aime beaucoup, Mes sœurs et mes frères, mes neveux qui sont la lumière de ma vie, qui m'ont toujours encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.

Un grand merci pour les personnes les plus chères et les plus proches de moi : Aziza, Ouardia, Kahina, Sara, Mokhtar, Djamila et Ouiza.

Mes sincères remerciements vont à tous ceux et celles qui, de près ou de loin, ont permis à travers leurs conseils et leurs compétences la réalisation de ce modeste mémoire.

Ce travail de recherche a été réalisé au laboratoire d'Energétique, Mécanique et Matériaux (LEMM) de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Dédicaces

Avant tout, je remercie ALLAH le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour accomplir cet humble travail.

Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour ;

*A la mémoire de mon grand frère **Boussad**, Je ne saurais exprimer mon grand chagrin en ton absence. J'aurai aimé que tu sois à mes côtés ce jour. , que Dieu l'accueille en son vaste paradis.*

*A mes très chers parents « **Sacoura** », « **Merzouk** », « quoi que je fasse ou que je dise je ne saurais point vous remercier comme il se doit, aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour ma considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien être, et votre présence à mes cotés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles ». Quisse Dieu, le très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie.*

*A mes très chers frères **Arezki**, **M'Hamed**, **Mahdi**, **Nourdinne**, **Kamel**, ma source de joie et de bonheur.*

*A mes chères sœurs **Lila**, **Fatiha**, **Fatima**, merci pour vos encouragements je vous souhaite bonheur, santé à vous et vos enfants.*

*A mes très chères neveux **Fanis**, **Mohamed**, **Maya**, **Malak**, **Inas** et **Aroudy**.*

*A mes très chers **Asiza**, **Ouardia**, **Lahina**, **Sara**, **Mokhtar**, **Djamila** et **Quiza**. Qui m'ont toujours encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.*

A mes enseignants et mes ami(e)s d'études.

« Soyons reconnaissants aux personnes qui nous donnent du bonheur. Elles sont les charmants jardiniers par qui nos âmes sont fleuries » Marcel Proust.

Résumé :

Les dispositifs électroniques existant : circuits intégrés, lampe DEL (diode électroluminescente) ou cellule photovoltaïques mettent à profit les propriétés des électrons dans les semi-conducteurs. Le silicium occupe la position dominante parmi les semi-conducteurs.

La cellule photovoltaïque est le plus grand gage pour une énergie propre et renouvelable, c'est un composant électronique généralement à base de silicium, lorsqu'elle est exposée à la lumière elle produit de l'électricité par l'effet photovoltaïque.

Pour décrire le fonctionnement et le comportement d'une cellule photovoltaïque (PV), on adopte différents modèles électriques dont le modèle à une diode. Ce dernier permet d'évaluer le courant et la tension délivrés par la cellule PV.

Dans ce présent travail, il sera question d'évaluer la puissance électrique délivrée par une cellule PV de température T_{PV} , exposée à un rayonnement solaire d'intensité G_T . Pour ce faire, un programme de calcul en langage Fortran sera réalisé.

Mots clés : conversion d'énergie, photovoltaïque, cellule solaire, semi-conducteur, modèle électrique

Abstract:

The existing electronic devices: integrated circuits, LED (Light-Emitting Diode) lamps or photovoltaic cells take advantage of the properties of electrons in semiconductors; silicon occupies the dominant position among semiconductors.

The photovoltaic cell is the greatest guarantee for clean and renewable energy, it is an electronic component generally based on silicon, when exposed to light it produces electricity through the photovoltaic effect.

To describe the operation and behavior of a photovoltaic (PV) cell, various electrical models are adopted, including the one-diode model. The latter makes it possible to evaluate the current and the voltage delivered by the PV cell. In this present work, it will be a question of evaluating the electrical power delivered by a temperature PV cell T_{PV} , exposed to solar radiation of intensity G_T . To do this, a calculation program in Fortran language will be used.

Keywords : energy conversion, photovoltaic, solar cell, semiconductor, electrical model

Introduction générale.....	2
Chapitre I Théorie des semi-conducteurs	5
2. Bandes d'énergies	6
3. Semi-conducteurs.....	6
3.1 Silicium	7
3.2 Semi-conducteurs intrinsèques	7
3.3 Semi-conducteurs extrinsèques (dopé)	8
3.3.1 Semi-conducteur de type n	8
3.3.2 Semi conducteur de type p	9
3.4 Effet du dopage sur les niveaux des bandes de conduction et de valence	9
4. Jonction PN	9
5. Effet photoélectrique.....	10
6. Influence du rayonnement solaire	11
7. Différentes Générations de cellules photovoltaïques.....	13
7. 1 Première génération :	13
7.1.1 Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin	13
7.1.2 Cellule photovoltaïque en silicium polycristallin	13
7. 2 Deuxième génération	13
7. 3 Troisième génération	14
8. Conclusion	14
Chapitre II Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque	15
1. Introduction.....	16
2. Modèles électriques associés.....	16
2.1 Modèle à une diode	17
2.2 Modèle à deux diodes.....	17
3. Puissance électrique d'une cellule solaire.....	18
4. Le facteur de forme	18
5. Le rendement	19
Chapitre III Simulations numériques.....	20
1.Introduction	21
2. Modélisation mathématique et simulations numériques.....	21
3. Organigramme de calcul.....	21

4 Influence du rayonnement solaire et de la température sur le sur l'intensité de courant d'un panneau photovoltaïque.....	25
4.1. Influence du rayonnement solaire	26
4.2 Influence de la variation de la température sur le PV.....	28
5 Puissance maximale du panneau PV	30
6. Conclusion	31
Conclusion générale	32
Références bibliographique	34

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : EVOLUTION DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE LIEES A L'ENERGIE.....	2
FIGURE 2 : PRODUCTION ELECTRIQUE MONDIALE EN EOLIEN ET SOLAIRE	3
FIGURE I.1 : PRESENTATION DES BANDES D'ENERGIE D'UN METAL, SEMI-CONDUCTEUR ET ISOLANT.....	6
FIGURE I.2 : DENSITE DES PORTEURS INTRINSEQUES EN FONCTION DE LA TEMPERATURE	7
FIGURE I.3 : STRUCTURE CRISTALLINE DU DIAMANT.....	7
FIGURE I.4 : REPRESENTATION DES LIAISONS D'UN CRISTAL DE SILICIUM INTRINSEQUE	8
FIGURE I.5: SILICIUM DOPE AU PHOSPHATE (A) A $T=0\text{ K}$ ET (B) A $T > 0\text{ K}$	8
FIGURE I.6 : SILICIUM DOPE AU BOR (A) A $T=0\text{ K}$ ET (B) $T>0\text{ K}$	9
FIGURE I.7 : EFFET DU DOPAGE SUR LA BANDE DE VALENCE ET LA BANDE DE CONDUCTION.....	9
FIGURE I.8 : LA REPRESENTATION D'UNE JONCTION P-N	10
FIGURE I.9 : SCHEMA DE FONCTIONNEMENT D'UNE PHOTOPILE	11
FIGURE I.10 : NORMES DE MESURES DU SPECTRE D'ENERGIE LUMINEUSE EMIS PAR LE SOLEIL NOTION DE LA CONVENTION AM	11
FIGURE I.11: SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE.....	12
FIGURE I.12 : ILLUSTRATION D'UNE PHOTOVOLTAÏQUE EN SILICIUM MONOCRISTALIN	13
FIGURE I.13: ILLUSTRATION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE EN SILICIUM POLY CRISTALLIN	13
FIGURE I.14 : EVOLUTION DE LA PRODUCTION DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE CELLULES PV	14
FIGURE II.1 : COURBES CARACTERISTIQUE I-V SOUS SUBCURITE ET SOUS ECLAIREMENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	17
FIGURE II.2 : MODELE A UNE DIODE D'UNE CELLULE PV	17
FIGURE II.3 : MODELE A 2 DIODES	17
FIGURE III.1: ORGANIGRAMME DE CALCUL	21
FIGURE III.2: COURBE CARACTERISTIQUE $I=f(V)$ DANS LES CONDITIONS STANDARDS	23
FIGURE III.3 : DANS LES CONDITIONS STANDARDS	24
FIGURE III.4 : INFLUENCE DU RAYONNEMENT SOLAIRE SUR LA CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION $I(V)$ DU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE PV A 25°	25
FIGURE III.5 : PUISSANCE DELIVREE PAR LE PANNEAU PV SOUS DIFFERENTES INTENSITES DE RAYONNEMENT SOLAIRE A 25°	26
FIGURE III.6 : INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT SUR LA CARACTERISTIQUE $I=f(V)$	27
FIGURE III.7 : POINT DE PUISSANCE MAXIMALE DU MODULE PV	27
FIGURE III.8 : LA VARIATION DE LA PUISSANCE MAXIMALE DU MODULE PV EN FONCTION DU RAYONNEMENT SOLAIRE POUR UNE TEMPERATURE FIXE A 25°C	28
FIGURE III.9 : LA VARIATION DE LA PUISSANCE MAXIMALE DU MODULE PV EN FONCTION DE LA TEMPERATURE SOUS UNE INTENSITE DE RAYONNEMENT SOLAIRE FIXE	29

Liste des tableaux

TABLEAU I-1 : ENERGIES DE GAPS DE QUELQUES SEMI-CONDUCTEURS	12
TABLEAU III-1 : CARACTERISTIQUE GENERALE DU PANNEAU PV.....	22
TABLEAU III-2 : VALEURS DES PARAMETRES DANS LES CONDITION DE REFERENCE	22
TABLEAU III-3 :VALEURS CALCULEES DU POINT DE FONCTIONNEMENT OPTIMAL POUR $G_T=1000W/M^2$ ET TP=25°C	22
TABLEAU III-4 : INTENSITE DU COURANT TENSION ET PUISSANCE AUX BORNES DU PV POUR DIFFERENTES VALEURS D'ECLAIREMENTS	26
TABLEAU III-5: INTENSITE DU COURANT TENSION ET PUISSANCE AUX BORNES DU PV POUR DIFFERENTES VALEURS DE TEMPERATURE	28

Nomenclature

Symbole	Unité	Définition
T	c	Température
E_T	J	Energie thermique
K	$J.K^{-1}$	Constante de Boltzmann (1.38×10^{-23})
T_0	c	Température ambiante
E_g	J	Energie du gap
p_0	m^{-3} ou cm^{-3}	densité de trous à l'équilibre thermodynamique
n_i	m^{-3} ou cm^{-3}	densité intrinsèque de porteurs libres
W	M	Largeur de déplétion
N_D	m^{-3} ou cm^{-3}	Densité d'impuretés (dopant) de type donneur
N_A	m^{-3} ou cm^{-3}	Densité d'impuretés (dopant) de type accepteur
V_0	V	Tension de la Z-C-E
λ	m	Longueur d'onde
MA	-	Qualité de l'air
AM_0	-	La masse d'air nulle
AM_1	-	La masse d'air standard
\hbar	JS	La constante de Plank réduite ($\frac{h}{2\pi}$)
C	$m.s^{-1}$	Célérité de la lumière dans le vide (3.10^8)
$\vec{j}_{diffusion}$	$A.m^{-2}$	La densité du courant de diffusion
\vec{j}_{trous}	$A.m^{-2}$	La densité du courant des charges positives
e	C	Charge de l'électron ($1.6 \times 10^{-19}c$)
$\mu_{p,n}$	$m^2V^{-1}s^{-1}$	Mobilité des trous d'indice (p) ou des électrons d'indice (n)
ϵ_0	Fm^{-1}	Permittivité du vide $5.45 \times 10^{-12}Fm^{-1}$
ϵ		Permittivité du matériau
I	A	Courant
I_L	A	Courant photonique
I_s	A	Courant de la saturation
R_S	Ω	Resistance en série
R_P	Ω	Resistance en parallèle
V	Volt	Tension
I_{s1}, I_{s2}	A	Courant inverse de saturation

R_{sh}	OHM	Résistance shunt
V_{OC}	V	Tension de circuit ouvert
I_{cc}	A	Courant de court-circuit
P_{max}	W	Puissance maximale
I_{max}	A	Courant maximale
V_{max}	V	Tension maximale
FF	-	Facteur de forme
H	-	Rendement
P_{IN}	W	Puissance incidente
E	J	Energie de photon
h	$J s^{-1}$	Constante de plank
BV	(J) ou (eV)	Bande de valence
BC	(J) ou (eV)	Bande de conduction
BI	(J) ou (eV)	Bande interdite

Introduction générale

Introduction générale

La consommation mondiale d'énergie est en croissance continue. Entre 1973 et 2018 la consommation a progressé de 113 % [1]. Cette énergie est principalement d'origine fossile et fissile, sa répartition en 2017 est de 31.2.% pétrole, 27.1% charbon, 24.2% gaz naturel et 4.9% uranium [2]. Au rythme auquel ces ressources sont utilisées, on risque une pénurie pour les générations futures tout en favorisant l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre. En effet, la teneur en CO₂ dans l'atmosphère a augmenté de 59,6% en 90 ans (Figure 1), ce qui provoque une élévation de la température de la planète engendrant un déséquilibre et des catastrophes naturelles.

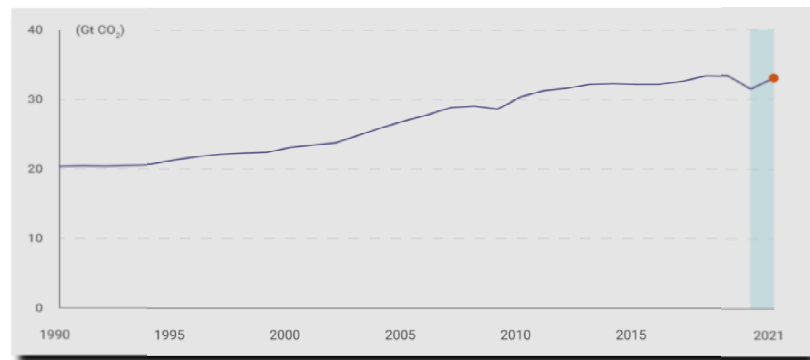


Figure 1 : évolution des émissions de gaz à effet de serre liées à l'énergie [27]

Pour maintenir l'épanouissement économique et social de l'homme sans mettre en péril notre planète, la transition vers les énergies renouvelables est primordiale. Cela permet de faire face aux enjeux d'approvisionnement d'énergie, de ralentir l'épuisement des ressources naturelles et également de réduire la pollution mondiale par les gaz à effet de serre. On dénombre parmi les énergies renouvelables l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. L'accès à toutes ces énergies indépendamment de l'endroit et du temps n'est cependant pas possible. La seule énergie disponible partout et accessible à tous est l'énergie solaire

L'énergie solaire est une énergie renouvelable prometteuse dans le domaine industriel et pourrait remplacer les énergies fossiles. On distingue l'énergie solaire photovoltaïque qui permet la conversion de l'énergie solaire en électricité et l'énergie solaire thermique où le rayonnement solaire est utilisé pour chauffer un fluide tel que les chauffe-eau. La production photovoltaïque dans le monde connaît une croissance exponentielle (Figure 2) [3].

Introduction générale

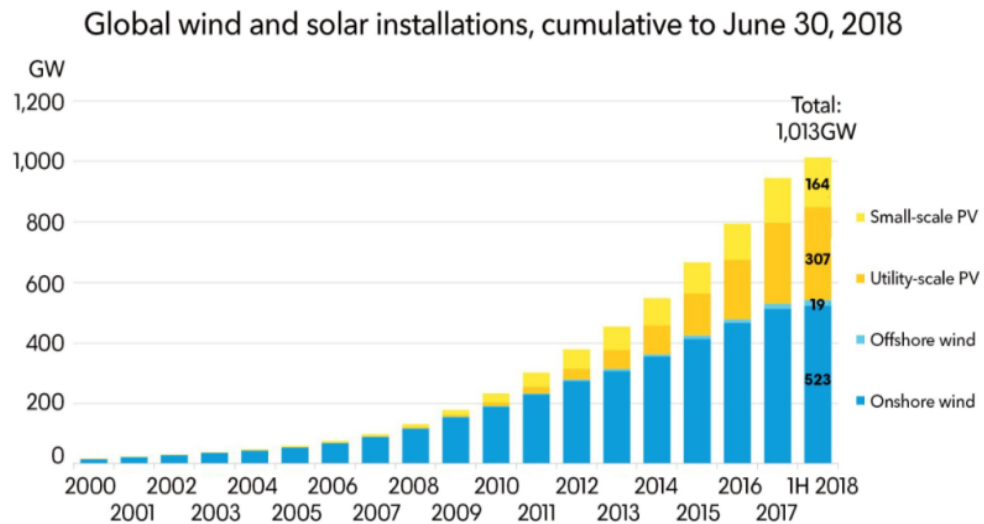


Figure 2 : Production électrique mondiale en éolien et solaire (Fraunhofer, 2017).

La conversion de la lumière en électricité appelée effet photovoltaïque a été découverte par E. Becquerel en 1839. Le laboratoire Bell a mis en avant l'utilisation des matériaux semi-conducteurs dans la conversion énergétique. En 1941 Einstein expliqua l'effet photoélectrique, propulsant ainsi l'intérêt et l'utilisation des cellules solaires PV principalement dans le domaine spatial.

A ce jour, plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'étude des cellules solaires PV et à l'amélioration de leurs rendements, d'une part en proposant de nouveaux matériaux semi-conducteurs avec des caractéristiques physiques plus intéressantes comme de l'arsenic ou du gallium, et d'autre part dans la conception des systèmes photovoltaïques le cas d'installation des panneaux photovoltaïques avec des systèmes de refroidissement et de stockage d'électricité.

La modélisation d'une cellule solaire PV permet de décrire, d'expliquer et de prédire certains aspects. Des modèles électriques sont utilisés pour étudier le comportement des cellules solaires et déterminer leurs caractéristiques courant-tension. Les modèles utilisés peuvent être classés en deux catégories: les modèles à double diodes et les modèles à une diode.

Introduction générale

Dans ce présent travail, il sera question d'évaluer la puissance électrique délivrée par une cellule photovoltaïque de température T_{PV} , exposée à un rayonnement solaire d'intensité G_T .

Le premier chapitre est consacré à l'étude des propriétés des matériaux semi conducteurs, utilisés dans la fabrication des cellules solaires photovoltaïques, et à la compréhension du phénomène photoélectrique.

La description du fonctionnement et du comportement d'une cellule photovoltaïque (PV) fait objet du deuxième chapitre. En adoptant le modèle électrique à une diode, on évalue le courant, la tension et la puissance délivrés par la cellule PV.

Au chapitre 3, on présente les simulations d'un panneau solaire PV. L'influence de l'intensité du rayonnement solaire et de la température du panneau sur les intensités de courant et de tension ainsi que la puissance électrique délivrées par ce panneau sont étudiées.

Chapitre I Théorie des semi-conducteurs

Chapitre I : Théorie des semi conducteurs

1. Introduction

Les panneaux solaires photovoltaïques sont constitués à partir d'un ensemble de cellules qui permettent de convertir l'énergie solaire en électricité. Ces cellules sont généralement composées de silicium qui est un matériau semi-conducteur [4]. Pour la bonne compréhension de ce phénomène photopile on a recours à la théorie des semi-conducteurs.

2. Bandes d'énergies

Le comportement électrique et optique des matériaux est décrit via la théorie des bandes. En effet, un matériau consiste en une combinaison d'un très grand nombre d'atomes auxquels sont associées des états atomiques. Le recouvrement de ces derniers donnent naissance au concept de bandes d'énergies permises définies par la bande de valence (BV) qui contient les niveaux d'énergie les plus bas et la bande de conduction (BC) qui contient les niveaux d'énergie les plus élevés (Figure I-1). Par ailleurs, le transfert d'électrons s'effectue d'une bande vers une autre.

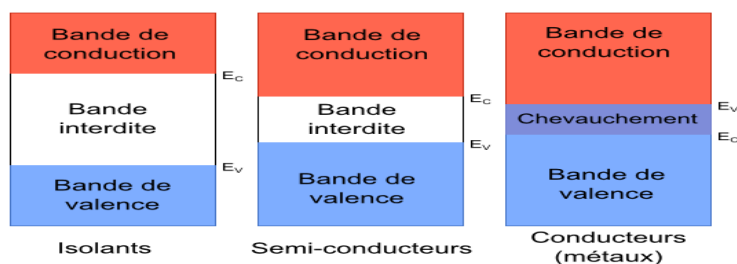


Figure I-1 : Présentation des bandes d'énergie d'un métal, semi-conducteur et isolant

Cependant, dans les semi-conducteurs, en plus des bandes (BC) et (BV) on observe une bande interdite (BI) [6]. Elle est caractérisée par une énergie de gap E_g (Figure I.1). Pour qu'un électron de valence se déplace de la bande BV vers la bande BC il doit acquérir une énergie supérieure à celle du gap (Tableau I.1).

3. Semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des matériaux caractérisés par des propriétés optoélectronique permettant de transformer la lumière en courant électrique.

Les semi-conducteurs (S/C) sont des matériaux solides dont la conductivité électrique dépend de la température et de l'exposition à la lumière. L'étude des S/C montre qu'au voisinage du zéro absolu, le matériau se comporte comme un isolant, alors qu'il est conducteur à des températures plus élevées (Figure I-2).

Chapitre I : Théorie des semi conducteurs

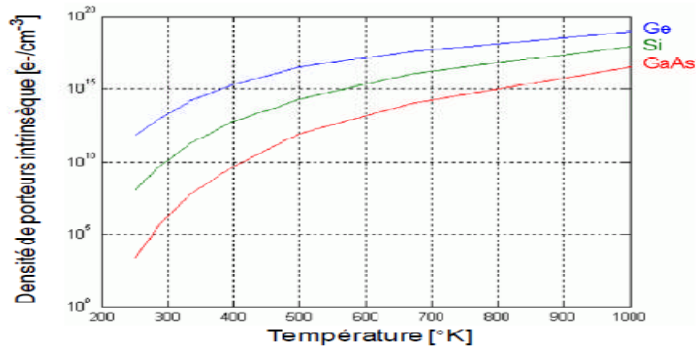


Figure I-2 : Densité des porteurs intrinsèques en fonction de la température [5].

3.1 Silicium

Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé dans le domaine du photovoltaïque du fait de ses bonnes propriétés et de son abondance naturelle [4]. Le silicium est un semi-conducteur de symbole (Si) et de numéro atomique (14), il se cristallise sous forme d'une structure cristalline diamant avec des liaisons covalentes (Figure I-3) [6].

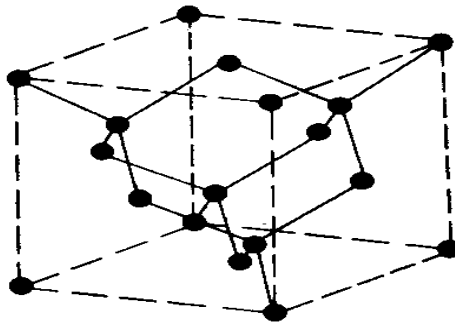


Figure I-3 : Structure cristalline du diamant

3.2 Semi-conducteurs intrinsèques

Ce sont des matériaux formés à base d'un seul élément chimique [4] principalement du silicium qui se cristallise dans une structure diamant avec les quatre atomes les plus proches voisins selon des liaisons covalentes (Figure I-4).

Dans ces semi-conducteurs, la formation des électrons libres est liée exclusivement à la température. Au zéro absolue, tous les électrons se trouvent dans la (BV), ce qui rend le S/C isolant [10]. Dès que la température augmente et atteint une valeur qui confère aux électrons une énergie thermique ($E_T = \frac{3}{2}KT_0$) suffisante qui est supérieure ou égale à l'énergie de gap ($E_T \geq E_g$), les électrons se déplacent de la (BV) vers la (BC). Ce qui génère des trous (de charge positive) dans la bande de valence [4]. Ces porteurs de charges peuvent se déplacer dans le cristal, ils assurent ainsi la conduction électrique.

Chapitre I : Théorie des semi conducteurs

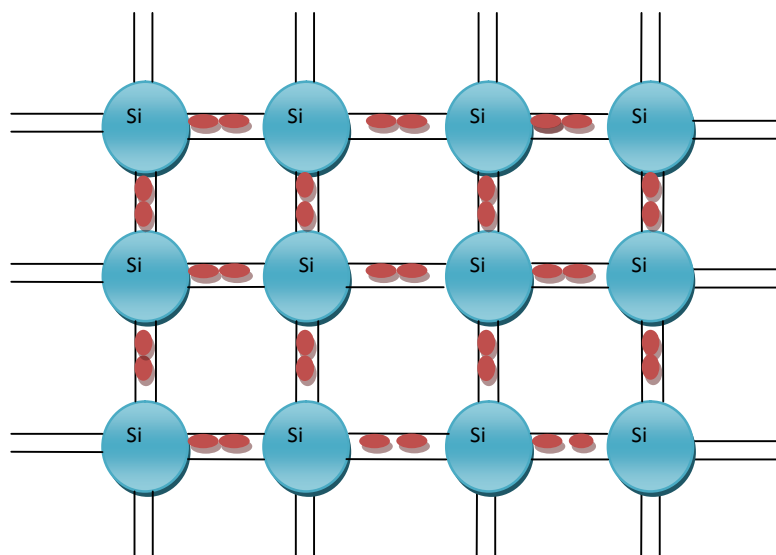


Figure I-4 : Représentation des liaisons d'un cristal de Silicium intrinsèque.

3.3 Semi-conducteurs extrinsèques (dopé)

Dans les cellules solaires on utilise des semi-conducteurs dopés [7]. Le but du dopage est d'augmenter soit le nombre d'électrons dans la bande de conduction, soit le nombre de trous dans la bande de valence. On remplace certains atomes de silicium du réseau cristallin par de faibles quantités d'éléments chimiques composés d'atomes pentavalents ou trivalents. Ce qui augmente le nombre d'électrons libres ou de trous dans le matériau et rend le S/C bon conducteur

3.3.1 Semi-conducteur de type n

Pour un tel semi-conducteur, quelques atomes pentavalents (phosphore) se substituent aux atomes de silicium dans le réseau cristallin, formant ainsi quatre liaisons covalentes avec les plus proches voisins. Cependant, un cinquième électron reste libre. Ainsi, la bande de conduction est globalement négative, on parle alors de dopage négatif ou de dopage n (Figure I-5).

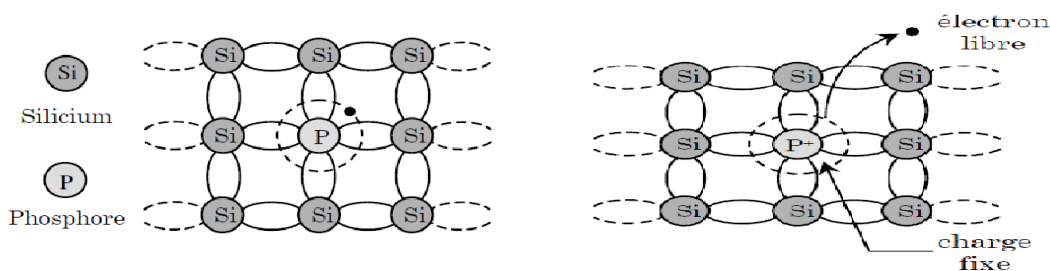


Figure I-5 : Silicium dopé au phosphate (a) à $T = 0\text{ K}$ et (b) à $T > 0\text{ K}$.

Chapitre I : Théorie des semi conducteurs

3.3.2 Semi conducteur de type p

Pour obtenir un S/C de type p, des impuretés de type trivalent (Bore), sont insérées dans le réseau cristallin, conduisant à trois liaisons covalentes entre l'atome de bore et les trois plus proches voisins de silicium. Cependant, la quatrième liaison reste déficitaire d'un électron, ce qui conduit à un plus grand nombre de trous que d'électrons (Figure I-6). D'où le nom d'un S/C de type p.

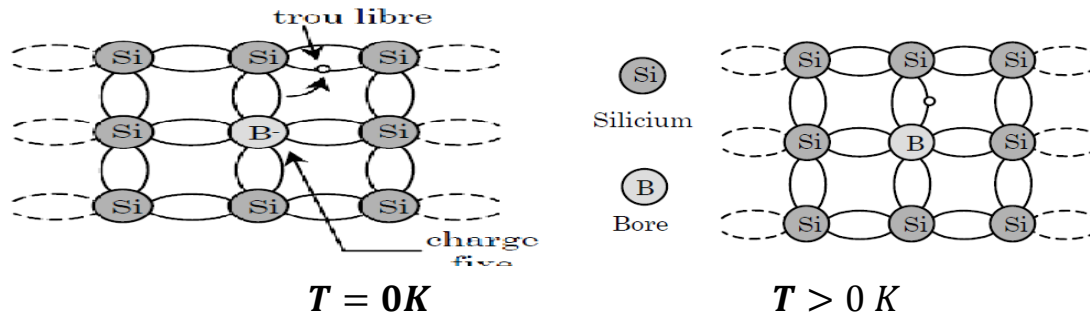


Figure I-6 : Silicium dopé au Bore

3.4 Effet du dopage sur les niveaux des bandes de conduction et de valence

Le dopage a un effet sur les bandes de valence et de conduction, en augmentant ou diminuant leurs extrémités. Le dopage avec une densité de donneurs N_D de type n abaisse la bande de conduction, alors celui de type P avec une densité d'accepteur N_A remonte la bande de valence (Figure I-7). Dans les deux cas, la bande interdite se réduit, ce qui facilite le déplacement des électrons.

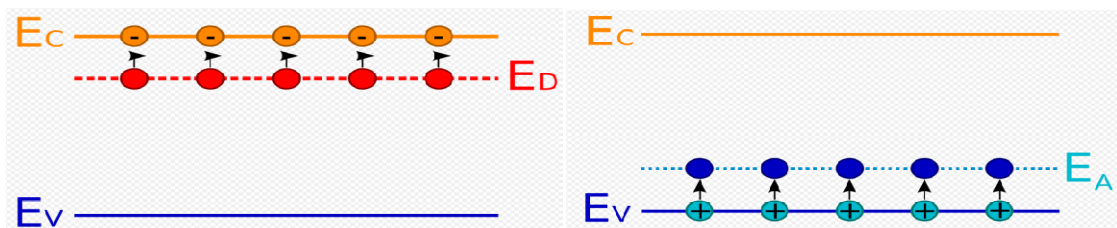


Figure I-7 : Effet du dopage de type n et p sur les bandes de valence et de conduction

4. Jonction PN

En combinant deux S/C de types n et p, on obtient une jonction P-N (Figure I-8) [8]. Les électrons et les trous diffusent spontanément de part et d'autre de la jonction, créant ainsi une zone de charge d'espace (ZCE), d'épaisseur W . Ces charges créent un champ électrique \vec{E} qui

Chapitre I : Théorie des semi conducteurs

s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse [9]

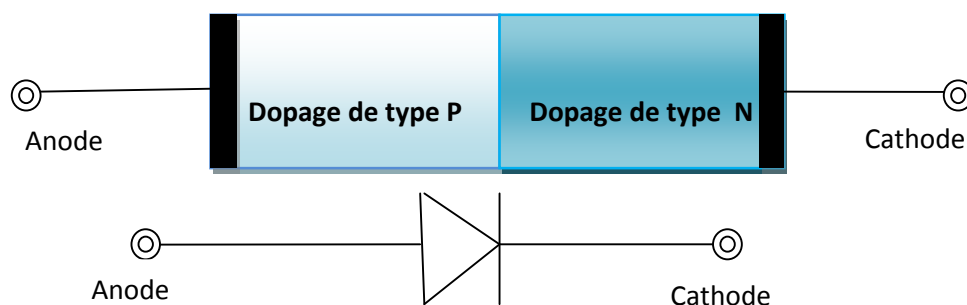


Figure I-8 : représentation d'une jonction P-N

La largeur de la région de déplétion W est liée au niveau de dopage des deux régions [10] et à la tension appliquée de part et d'autre de la jonction. Elle s'exprime par :

$$W = (x_n + x_p) = \sqrt{\left(\frac{2\epsilon\epsilon_0}{e}\right) \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}\right) V_0} \quad (\text{I-1})$$

Ou:

W : Largeur de déplétion

x_n et x_p : les extrémités de la zone de déplétion

La caractéristique courant-tension de la jonction p-n est non linéaire. Elle correspond à celle d'une diode

5. Effet photoélectrique.

Le photo-courant est un courant électrique créé dans un matériau semi-conducteur exposé à un rayonnement lumineux. Les électrons du S/C absorbent les photons et acquièrent suffisamment d'énergie et quittent la BV vers la BC en franchissant la bande interdite du S/C laissant place à des trous dans la BV. Sous l'effet du champ électrique interne, ces porteurs de charge se déplacent générant ainsi un courant de conduction, ce dernier provoque à son tour un gradient de concentration de porteurs de charges à l'intérieure du S/C créant ainsi un courant de diffusion, jusqu'à atteindre l'équilibre électrostatique [4].

Dans les deux régions neutres I et III (Figure I-9) le photon absorbé crée une paire d'électron-trou. L'absence du champ électrique dans ces deux régions implique l'absence du courant de conduction. Seule une partie de ces photo-porteurs ainsi produits se déplacent par diffusion jusqu'à la région de déplétion (Région II). Le champ électrique, présent dans cette région-II, oriente les électrons vers la zone n et les trous vers la zone p (c.-à-d. vers les régions où ils sont majoritaires). Ils créent ainsi un photo-courant de diffusion.

Chapitre I : Théorie des semi conducteurs

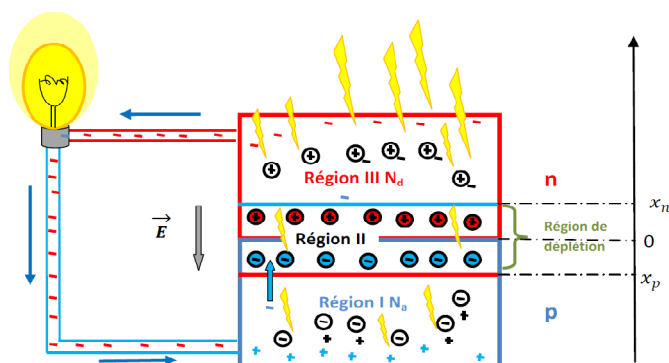


Figure I-9 Schéma de fonctionnement d'une photopile.

Le flux de diffusion des trous dans la région N s'exprime par :

$$\vec{J}_{diffusion} = \vec{J}_{trous} = -qD_h \vec{\nabla}_h \quad (I-2)$$

Ou :

$\vec{J}_{diffusion}$: La densité de courant de diffusion

\vec{J}_{trous} : La densité des charges positives

Le flux de diffusion des électrons dans la région **P** correspond à :

$$\vec{J}_{diffusion} = \vec{J}_{électrons} = qD_e \vec{\nabla}_e \quad (I-3)$$

Dans la zone de charge d'espace la paire électron-trou est séparée par un champ électrique de telle sorte que l'électron est propulsé vers la région N et le trou vers la région P. ces porteurs donnent naissance à un photo-courant de génération donné par :

$$\vec{J}_{conduction} = (q\mu_n n \vec{E} - q\mu_p p \vec{E}) = \sigma \vec{E} \quad (I-4)$$

6. Influence du rayonnement solaire

L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350W/m² (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre. Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint 1000 W/m² du (AM1) (Figure I-10) [11].

Chapitre I : Théorie des semi conducteurs

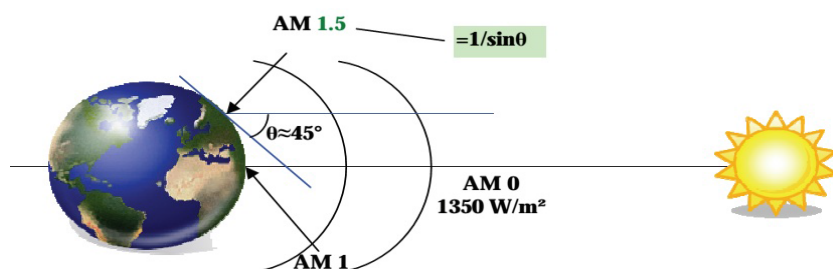


Figure I-10 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil notion de la convention AM

Etant donné que le soleil est la source inépuisable qui alimente les panneaux photovoltaïques, chaque rayonnement véhicule une énergie caractérisée par une longueur d'onde (Figure I-11.).

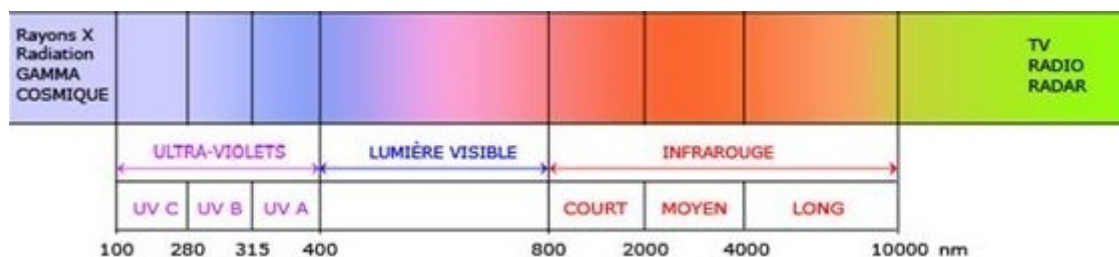


Figure I-11 : spectre électromagnétique

Pour produire de l'électricité, chaque type de semi-conducteur absorbe un rayonnement particulier. Les matériaux semi-conducteurs dont la largeur de la bande interdite est inférieure à 3eV absorbent dans le domaine du visible ($\lambda= 400-800$ nm), tandis que ceux dont largeur de la bande interdite est supérieure à 3 eV absorbent dans le domaine de l'ultraviolet (UV, $\lambda < 400$ nm). Par conséquent, chaque semi-conducteur absorbe sur une gamme spectrale particulière du rayonnement solaire selon la largeur de la bande interdite Tableau I-1.

Matériau	E_g (eV)
Ge	0,7
Si	1,12
GaAs	1,4
CdTe	1,6
Cu_2O	2,1
GaP	2,25
ZnO	3,2
TiO ₂	3,2
SnO ₂	3,7

Tableau I-1. Energies de gaps de quelques semi-conducteurs E_g (eV) [12]

7. Différentes Générations de cellules photovoltaïques

7.1 Première génération :

7.1.1 Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin

Ce type de cellule photovoltaïque est l'une des plus répandues. Elle est obtenue à partir de silicium monocristallin. Ces cellules photovoltaïques offrent un rendement de l'ordre de 15 à 22 % [13]. L'une des meilleurs sur le marché. La durée de vie des panneaux solaires composés de cellules en silicium monocristallin avoisine les 30 ans, ce qui est très rentable, malgré le coût élevé à l'achat.



Figure I-12 : illustration d'une photovoltaïque en Silicium monocristallin [26]

7.1.2 Cellule photovoltaïque en silicium polycristallin

Facilement reconnaissable grâce à ses cristaux bleus. On la trouve souvent dans les installations domestiques, agricoles ou industrielles. La fabrication de ce type de cellule photovoltaïque est plus simple que la version en silicium monocristallin. Son coût est donc moindre. Côté rendement du panneau solaire, on peut espérer entre 10 et 15 %, ce qui est nettement inférieur aux cellules monocristallines.

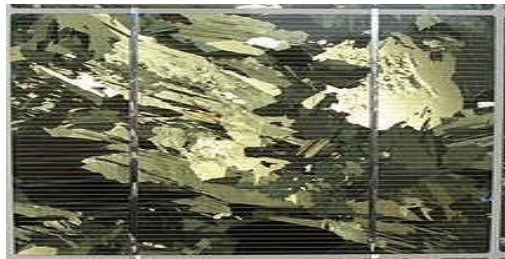


Figure I-13 : Illustration d'une cellule photovoltaïque en Silicium polycristallin [26].

7.2 Deuxièmes générations :

Cellule au silicium amorphe [14,15].

Cellule photovoltaïque tandem [16]

Cellule photovoltaïque CIGS (Cuivre, Indium, Gallium et Sélénium) [17]

Cellule en couche mince de tellurure de [15]

7.3 Troisièmes générations :

Pour améliorer davantage le rendement des cellules photovoltaïques on s'oriente vers les cellules de troisième génération. On distingue:

Cellule photovoltaïque multi-jonction [15].

Cellule CZTS (Cuivre Zinc Etain Soufre). [17].

Cellules solaires organiques [18].

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. Il existe trois principales filières technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques. Ces filières se partagent inégalement le marché Comme le montre la Figure I-14.

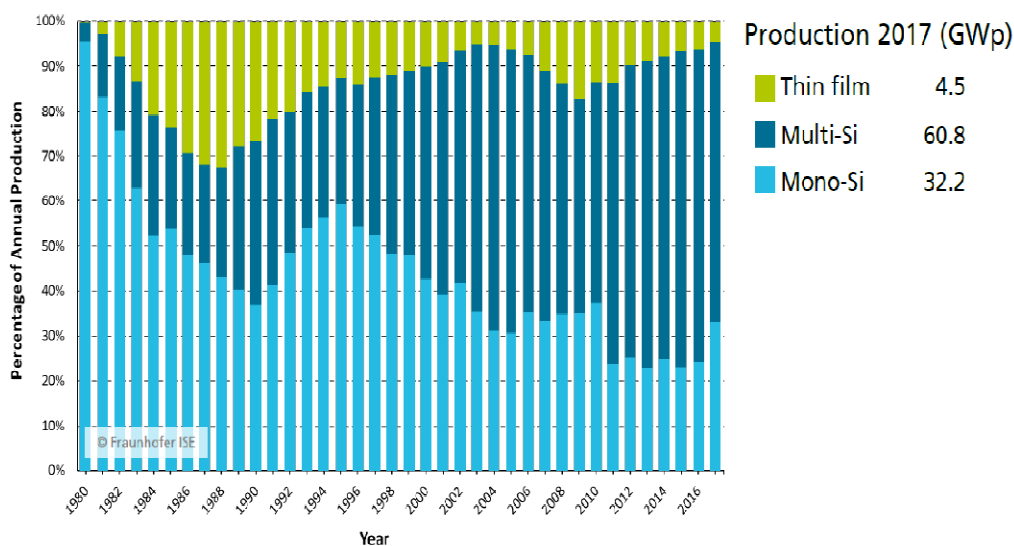


Figure I-14 : Evolution de la production des différentes technologies de cellules PV [16]

8. Conclusion

De nouvelles générations de matériaux semi conducteurs permettent l'amélioration des rendements des cellules photovoltaïques.

Afin d'évaluer la capacité de conversion de ces cellules, on fait appel à des modèles électriques. Ces derniers permettent le calcul des intensités de courant et de potentiel délivrés par ces cellules et donc la puissance électrique qu'elles développent au regard de sa température et de l'intensité du rayonnement solaire incident.

Le chapitre suivant s'intéresse justement à deux modèles électriques dits à une diode et à deux diodes.

Chapitre II Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque

Chapitre II : Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque

1. Introduction

Pour comprendre le comportement électrique d'une cellule solaire PV exposé au soleil, plusieurs circuits électriques équivalents sont proposés [19] Les modèles classiques les plus utilisés sont ceux à une et deux diodes permettant ainsi de définir sa courbe caractéristique. .

2. Modèles électriques associés

La caractéristique courant-tension de la cellule solaire est composé de deux termes, le premier sous obscurité I_d est un courant de diode, qui résulte de la polarisation du composant. Sous éclaircissement une paire électron-trou est créée engendrant la formation de deux courants l'un de diffusion et l'autre de conduction, Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant I_{ph} opposé au courant d'obscurité (figure II-1) [20]

$$I(V) = I_L - I_s (\exp(qV / kT) - 1) \quad (\text{II-1})$$

Avec

I_L : Photo-courant

I_s : Courant de la diode

q : Charge d'électron

V : La tension

K : Constante de Boltzmane

T : Température

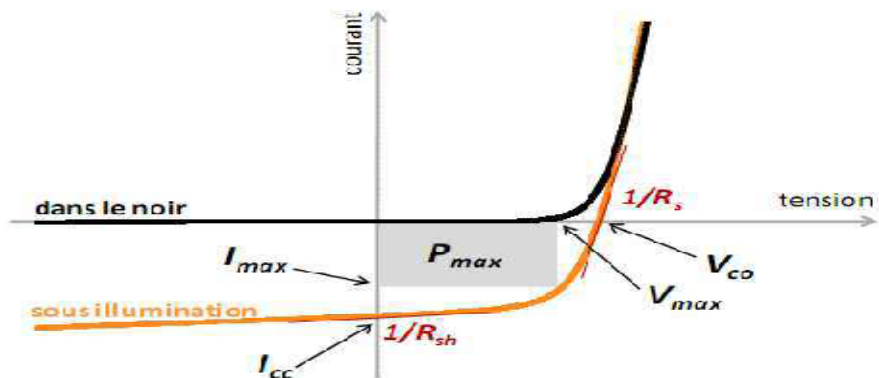


Figure II-1: Courbes caractéristiques I-V sous obscurité et sous éclaircissement d'une cellule photovoltaïque.

Il existe plusieurs modèles de circuit électriques équivalent pour schématiser le comportement d'une cellule photovoltaïque sous éclaircissement parmi eux on cite les modèles à une diode et deux diodes.

Chapitre II : Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque

2.1 Modèle à une diode

Le circuit équivalent d'une cellule solaire est idéalisé par une diode de jonction p-n, une source de courant I_L , d'une résistance série R_s qui reflète directement la qualité de fabrication des cellules PV et qui tient compte des pertes par effets joule (Résistivité du matériau semi-conducteur, résistances de contact des électrodes, résistance de la grille collectrice, le bus de collecte de courant) et une résistance parallèle de shunt R_{sh} qui traduit les pertes internes ou le courant de fuite à travers la diode de Shockley [21] :

$$I = I_L - I_s \left[\exp\left(\frac{V+IR_s}{a}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V+IR_s}{R_{sh}}\right) \quad (\text{II-2})$$

Le circuit équivalent correspondant est schématisé sur la figure (II-2):

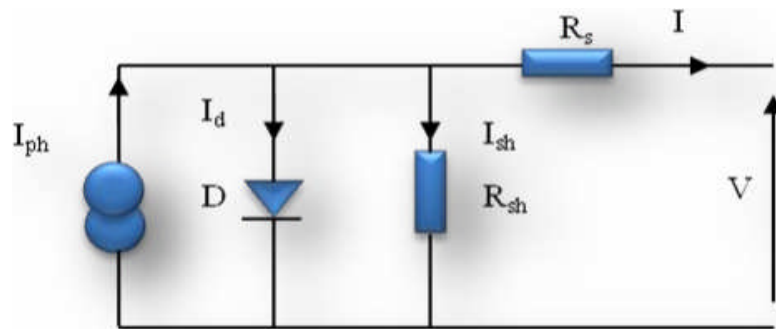


Figure II-2 : Modèle à une diode d'une cellule PV

Ce modèle implique cinq paramètres: photo-courant I_L , courant de saturation I_s , résistance série R_s , résistance de shunt R_{sh} , et paramètre de facteur d'idéalité a . Considérant que la valeur de la résistance shunt est infinie [28], la formulation analytique de ce modèle s'exprime par :

$$I = I_L - I_s \left[\exp\left(\frac{V+IR_s}{a}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-3})$$

2.2 Modèle à deux diodes

Dans ce modèle une diode supplémentaire est mise en parallèle au circuit du modèle simple à une diode [22] pour tenir compte des pertes de courant la figure II-3 illustre ce circuit.

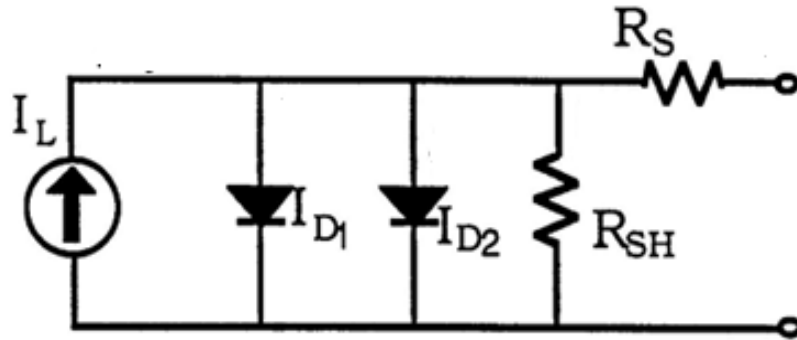


Figure II-3 : Modèle à deux diodes [8]

L'équation I (V) caractéristique de ce circuit est :

$$I = I_L - I_{s1} \left[\exp\left(\frac{V + I.R_s}{a_1}\right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp\left(\frac{V + I.R_s}{a_2}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II-4})$$

3. Puissance électrique d'une cellule solaire

La puissance délivrée par une cellule solaire est fortement conditionnée par la tension fournie [23]. Elle est traduite par la relation suivante :

$$P = I \times V \quad (\text{II-4})$$

Il existe un point optimal (I_{opt}, V_{opt}) pour lequel la puissance est maximale (P_{max}) (Min et al, 2015). Ce point est appelé le point de crête est il est déterminé en résolvant l'égalité suivante:

$$\frac{dp}{dI} \Big|_{I=I_{max}} = 0 \quad (\text{II-5})$$

Ce qui donne :

$$P_{max} = V_{max} I_{max} \quad (\text{II-6})$$

4. Le facteur de forme

Le facteur de forme est le paramètre qui détermine la qualité d'une cellule solaire PV [8]. Il est également le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer une cellule solaire et le produit entre la tension du circuit ouvert et le courant de court circuit ($V_{oc} \times I_{cc}$) . Plus le facteur de forme se rapproche de 1, meilleure est la cellule.

Le facteur de forme est défini par :

$$FF = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{oc} \times I_{cc}} \quad (\text{II-7})$$

Chapitre II : Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque

5. Le rendement

Le rendement de conversion s'exprime par le rapport entre la puissance électrique délivrée par le panneau PV de surface S et l'énergie solaire incidente sur cette même surface [20] :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{G_T \cdot S} \quad (\text{II-8})$$

Ou bien :

$$\eta = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{G_T \cdot S} \quad (\text{II-9})$$

Ou

G_T : Intensité du rayonnement solaire global incident sur le panneau PV

S : Surface du panneau photovoltaïque

I_{cc} : Courant de court-circuit

V_{oc} : Tension en circuit ouvert

6. Conclusion

Afin de déterminer la puissance délivrée par un panneau PV, le modèle électrique à une diode associé au panneau PV est utilisé. Ce modèles électrique sera exploité dans le chapitre suivant pour l'évaluation des intensités de courant et de tension et donc de la puissance électrique délivrés par ce panneau PV sous différentes conditions de rayonnement solaire et de température du panneau.

Chapitre III Simulations numériques

Chapitre III : Simulations numériques

1. Introduction

A travers le modèle électrique à une diode on évalue, pour différentes intensités de rayonnement solaire et températures du panneau PV, la puissance électrique ainsi que les intensités de courant et de tension développées par ce panneau PV.

2. Modélisation mathématique et simulations numériques

Pour décrire le fonctionnement et le comportement d'une cellule photovoltaïque (PV), on adopte le modèle électrique à une diode. Ce modèle se traduit par la relation (III-1). Il tient compte de quatre paramètres : I_L , I_s , a et R_s [24] qui sont donnés dans un état de référence caractérisé par une température de 25°C du panneau PV et un rayonnement solaire de 1000 $W.m^{-2}$.

$$I = I_L - I_s \left[\exp\left(\frac{V + I R_s}{a}\right) - 1 \right] \quad (III-1)$$

3. Organigramme de calcul

La puissance délivrée par le panneau PV est fortement conditionnée par la tension fournie [23]. Un point optimal du couple courant-tension correspondant aux valeurs (I_m, V_m) pour lesquelles un panneau PV délivre une puissance maximale [25]. La puissance s'exprime par :

On utilise la relation (II-4) qui donne la puissance générée par la cellule solaire.

$$P = V I \quad (III-2)$$

Tenant compte de la relation (III-1), on détermine la valeur optimale I_m en posant :

$$\frac{dP}{dI} \Big|_{I=I_m} = 0 \quad (III-3)$$

Par conséquent, la puissance électrique maximale (P_m) délivrée par le panneau PV correspond à :

$$P_m = V_m I_m$$

La puissance maximale P_m ainsi que V_m et I_m sont déterminés en appliquant la méthode numérique de dichotomie et par itérations successives. L'algorithme de calcul adopté est représenté sur la Figure ci-dessous :

Chapitre III : Simulations numériques

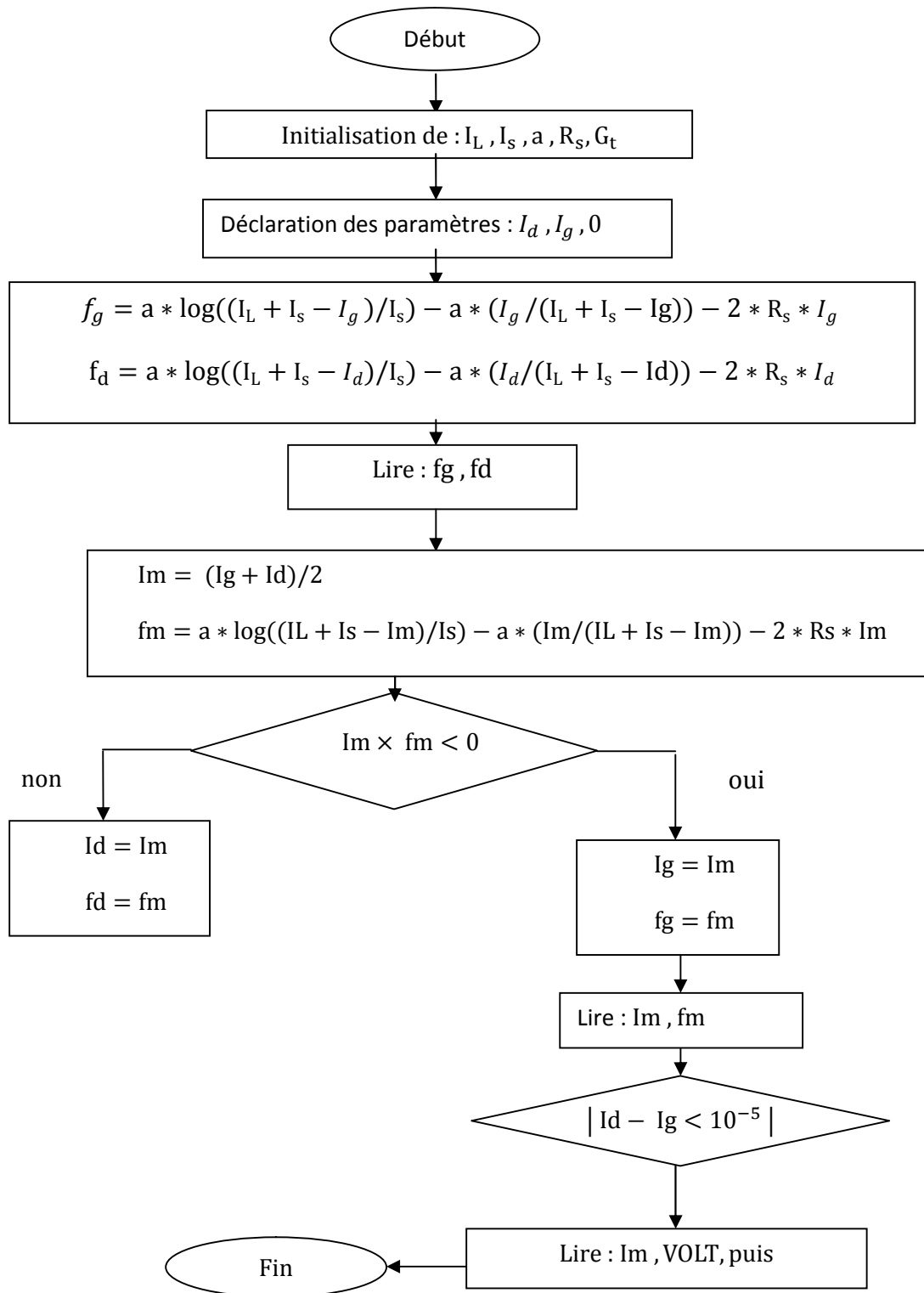


Figure III-1 : Organigramme de Calcul

Ou :

I_d = la valeur droite de l'intervalle $[I_g , d_d]$

I_g = la valeur gauche de l'intervalle $[I_g , d_d]$

Chapitre III : Simulations numériques

L'algorithme de calcul appliqué au modèle électrique à une diode (équation (III-1) permet de calculer les valeurs d'intensité de courant, de tension et de puissance du point de fonctionnement optimal aux bornes d'un panneau photovoltaïque monocristallin dont les caractéristiques sont représentées dans le Tableau III-1.

Caractéristiques techniques mesurées pour $R_G=1000W.m^{-2}$ et $T_P=25^\circ C$	
Modèle	ALSOLPANMO - 5W
Nombre de cellules du panneau PV	36
Puissance maximale de sortie	$5W \pm 3\%$
Tension maximal/ Tension en circuit ouvert V_{oc}	17.10 V/21.15 V
Intensité maximale de courant/Courant de court circuit I_{cc} :	0.29 A/0.35 A
Surface effective du panneau PV (290mm×220m×25mm)	$0.0638 m^2$

Tableau III-1 : Caractéristique générale du panneau PV [4]

Les paramètres du modèle électrique associés à ce panneau PV sont consignés dans le tableau ci-après :

A	I_s	R_s	I_L
1.5510	$0.3850 \cdot 10^{-6}$	0.4725	0.3111

Tableau III-2. Valeurs des paramètres dans les conditions de référence [4].

Pour une valeur de température fixée à $25^\circ c$:

$I_{max}(A)$	$V_{max}(V)$	$P_{max}(W)$
0.2847	16.8943	4.8103

Tableau III-3. Valeurs calculées du point de fonctionnement optimal pour $R_G=1000W.m^{-2}$ et $T_P=25^\circ C$

Le tableau III-3 montre une bonne concordance entre les valeurs calculées et fournies par le constructeur (Tableau III-1) dans les conditions standards ($T_p = 25^\circ c, R_g = 1000W/m^2$).

Les courbes III-2 et III-3 montrent la relation non linéaire qui existe entre l'intensité et la tension du panneau PV d'une part, et d'autre part entre la puissance et la tension, Elles permettent de comprendre le fonctionnement d'un module photovoltaïque soumis à un éclairage et à une température donnée

Chapitre III : Simulations numériques

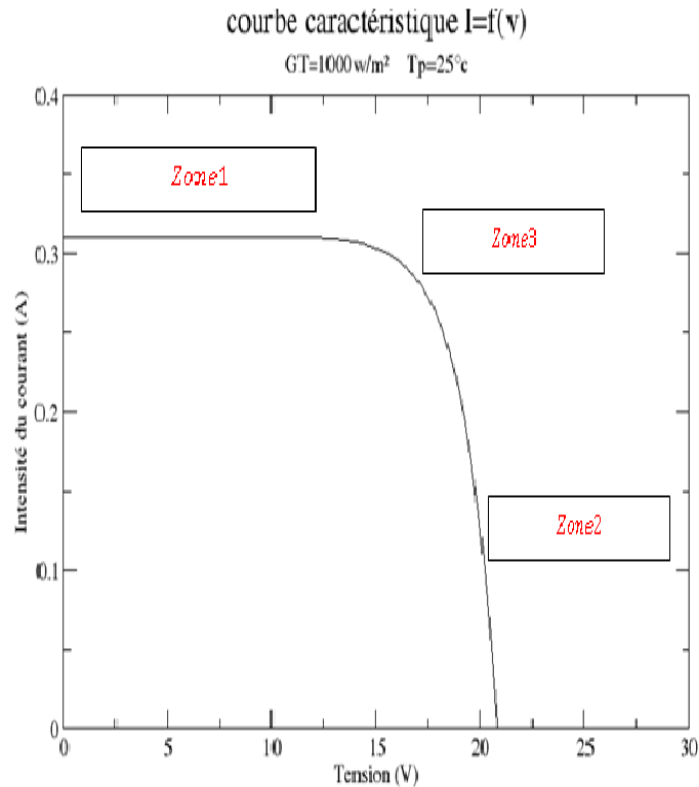


Figure III-2 : courbe caractéristique $I=F(V)$ dans les conditions standards
($G_T = 1000\text{Wm}^{-2}$ et $T_p = 25^\circ\text{C}$)

On peut décomposer les caractéristiques des générateurs photovoltaïques $I=f(V)$ en trois régions :

Zone1 : Région similaire à un générateur de courant I_{cc} , proportionnel au rayonnement et l'admittance interne peut être modélisée par $\frac{1}{R_{sh}}$.

Zone 2 : Région d'assimilation (équivalente à la tension V_{oc} d'impédance interne équivalente à la résistance série R_s).

Zone 3 : Région où l'impédance interne du générateur varie fortement de R_s à R_{sh} , Le point de fonctionnement maximum de l'alimentation du générateur est situé dans la zone 3. Ce point est appelé le point de puissance optimale, qui est caractérisé par le couple (I_{max}, V_{max}) .

Chapitre III : Simulations numériques

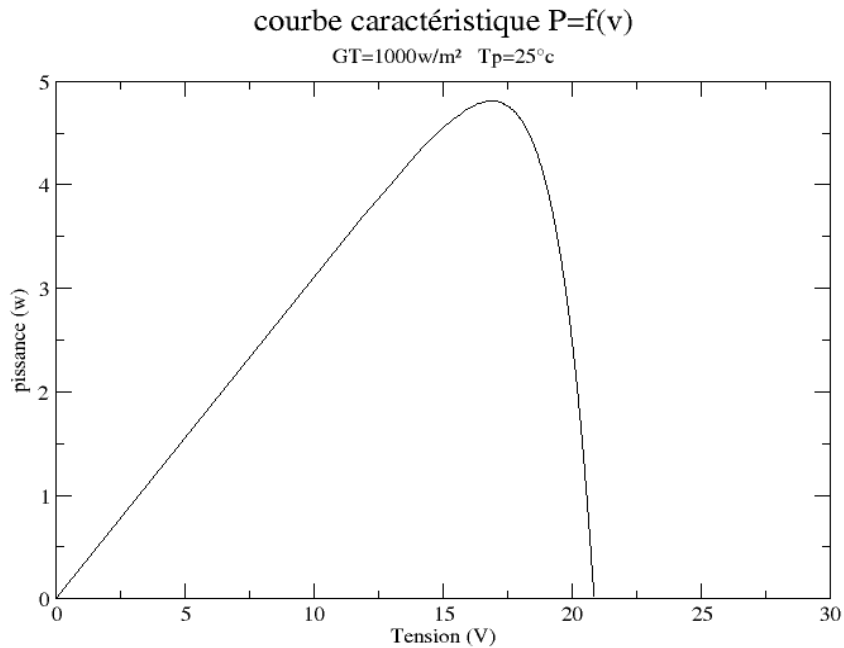


Figure III-3 : Evolution de la puissance électrique avec la tension dans les conditions standards

4. Influence du rayonnement solaire et de la température sur le PV

Le fonctionnement et le comportement d'un panneau photovoltaïque est décrit par le modèle électrique à une diode caractérisé par les quatre paramètres (III-1) qui sont données dans un état de référence caractérisé par une température de 25°C du PV et un rayonnement solaire de 1000 W. m⁻²

Sous d'autres conditions climatiques les équations suivantes sont utilisées pour évaluer ces paramètres:

$$a = (a_{\text{ref}} * T_C) / T_{\text{Cref}} \quad \text{(III-3)}$$

$$I_L = (G_T / G_{\text{Tref}}) * (I_{\text{Lref}} + M U_{\text{isc}} * (T_C - T_{\text{Cref}})) \quad \text{(III-4)}$$

$$I_s = I_{\text{sref}} * (((T_C / T_{\text{Cref}}) ** 3) * \exp(((E * N_s) / a_{\text{ref}}) * (1 - (T_{\text{Cref}} / T_C)))) \quad \text{(III-5)}$$

Ou

a_{ref} : Coefficient d'idéalité de la cellule aux conditions de références

T_C : Température du panneau PV

T_{Cref} : Température de référence de la cellule solaire

G_{Tref} : Intensité du rayonnement solaire de référence incident sur le panneau PV

Chapitre III : Simulations numériques

I_{Lref} : photo-courant sous les conditions de références ($G_{,ref}=1000W.m^{-2}$
et $T_{p,ref}= 25^{\circ}C$)

Ns : Nombre de cellules en série constituant le panneau photovoltaïque

Le comportement d'un panneau solaire photovoltaïque (PV) sous différentes intensités de rayonnement solaire et de températures est étudié pour évaluer le potentiel, l'intensité de courant et la puissance d'un PV en silicium monocristallin.

4.1. Influence du rayonnement solaire

En faisant varier l'intensité du rayonnement solaire incident sur la surface du PV, qui est maintenue à une température constante, la variation de l'intensité de courant et de la tension ainsi que de la puissance électrique sont illustrées par les Figures ((III.4 – 5). A partir des équations III-1, III-2, III-3 et les paramètres motionnés précédemment, on a réalisé un programme Fortran, qui nous permet de tracer les courbes caractéristiques.

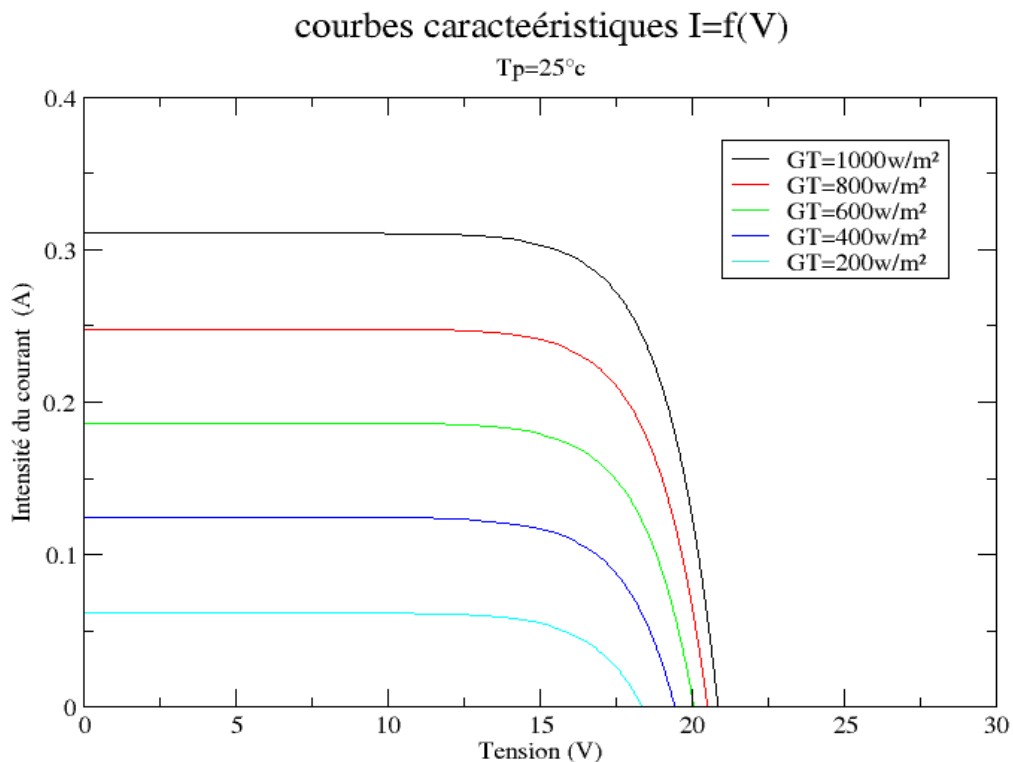


Figure III-4 : Influence du rayonnement solaire sur la caractéristique courant-tension $I(V)$ du panneau photovoltaïque PV de température 25°

Chapitre III : Simulations numériques

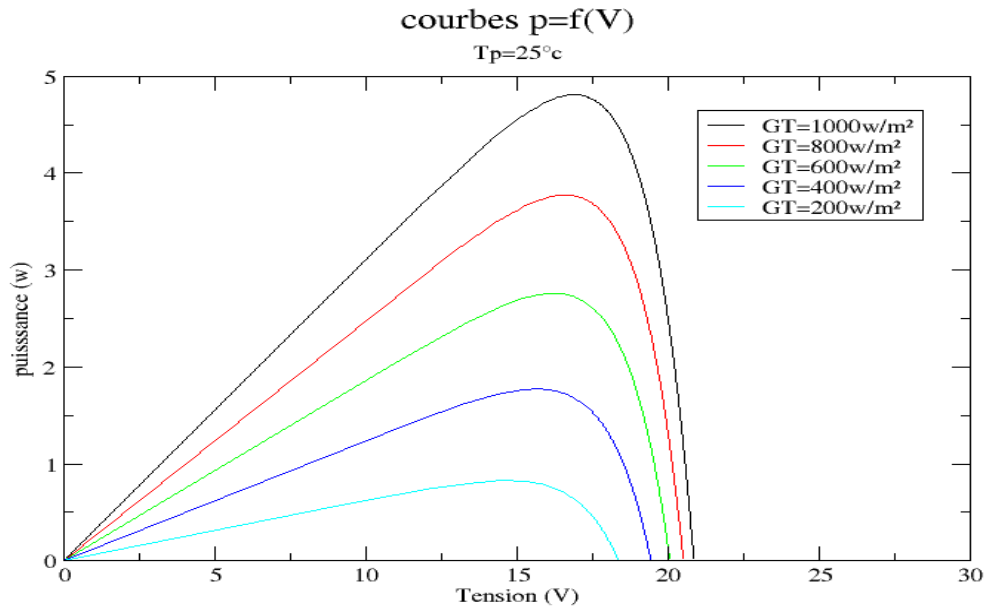


Figure III-5 : Puissance délivrée par le panneau PV de température de 25°C , sous différentes intensités de rayonnement solaire.

Les Figures III-4 et 5 illustrent les caractéristiques $I = f(V)$ et $P=f(V)$ du module photovoltaïque à température constante. Il apparaît que la tension de circuit ouvert varie faiblement avec l'intensité de rayonnement, alors que le courant de court circuit est très sensible (Figure III-4). Quant à la puissance délivrée par le panneau PV, elle dépend fortement de l'intensité de rayonnement solaire. La tension maximale aux bornes du PV et les intensités de courant optimales ainsi que la puissance électrique maximale (P_m) délivrée par le panneau PV sont données par le tableau III-4.

$G_T (W/m^2)$	I_{max}	V_{max}	P_{max}
1000	0.2847	16.8943	4.8103
800	0.208000324	11.0684833	3.6022803883
600	0.186000198	11.1919804	2.58171058
400	0.124000072	10.5932016	1.71355774
200	0.085069781	9.54974937	0.81239506

Tableau III-4. Intensité du courant, tension et puissance aux bornes du PV pour différentes valeurs d'éclairements

Chapitre III : Simulations numériques

Les valeurs maximales de I_{max} , V_{max} et P_{max} du panneau PV décroissent quand l'éclairement diminue, (Tableau III-4).

4.2 Influence de la variation de la température sur l'intensité de courant d'un panneau photovoltaïque

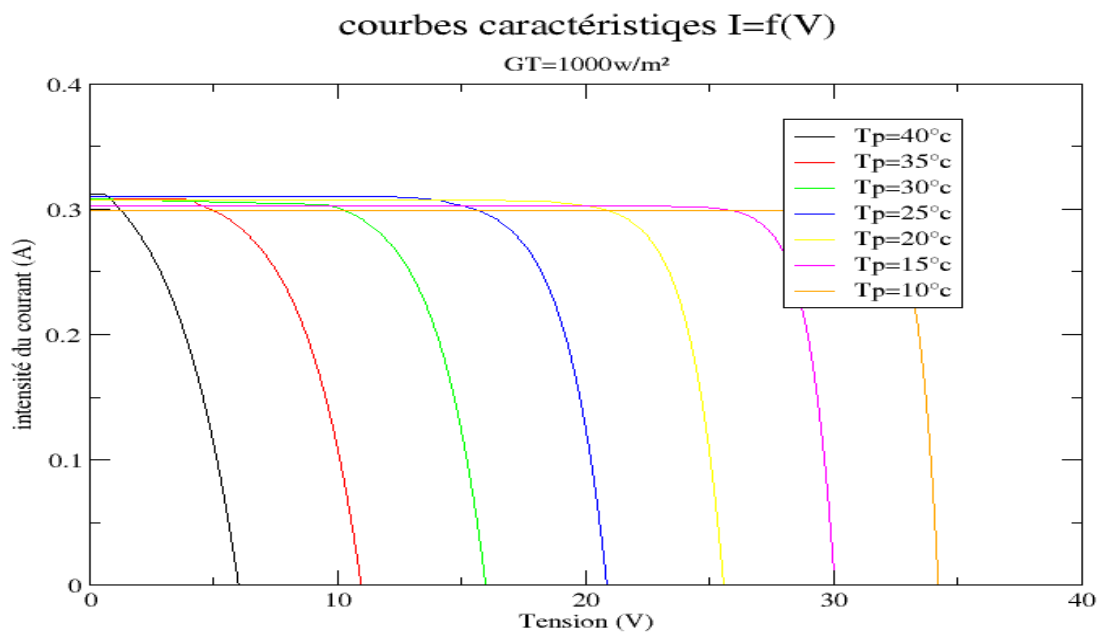


Figure III-6. Influence de l'éclairement sur la caractéristique I=F(V)

Pour une irradiation fixe (Figure (III-6)), la tension en circuit ouvert V_{co} augmente avec la diminution de la température, tandis que le courant de court-circuit I_{cc} varie faiblement.

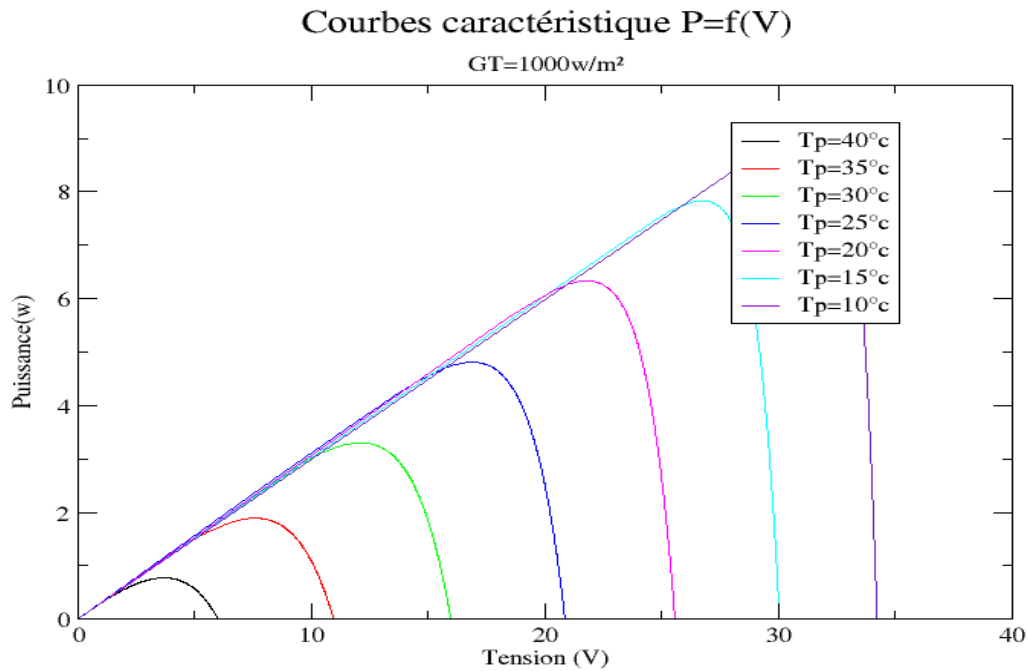


Figure III-7: Point de puissance maximale du module PV

Le point de puissance maximale varie avec l'ensoleillement, la température du module. La figure III-7 montre que l'augmentation de la température du PV affecte aussi la capacité de conversion énergétique. Le tableau ci-dessous donne quelques valeurs du point optimal (MPP) du panneau PV.

T_p °c	I_{max} (A)	V_{max} (V)	P_{max} (W)
10	0.2990	28.9564	9.16579
15	0.3029	22.2122	7.9302
20	0.3069	15.1518	6.2516
25	0.2847	16.8943	4.8103
30	0.3039	9.6065	3.69203
40	0.3079	3.8663	1.91908
45	0.3119	0.5999	0.48719

Tableau III-5. Intensité la courant, tension et puissance aux bornes du PV pour différentes valeurs de température.

5 Puissance maximale du panneau PV

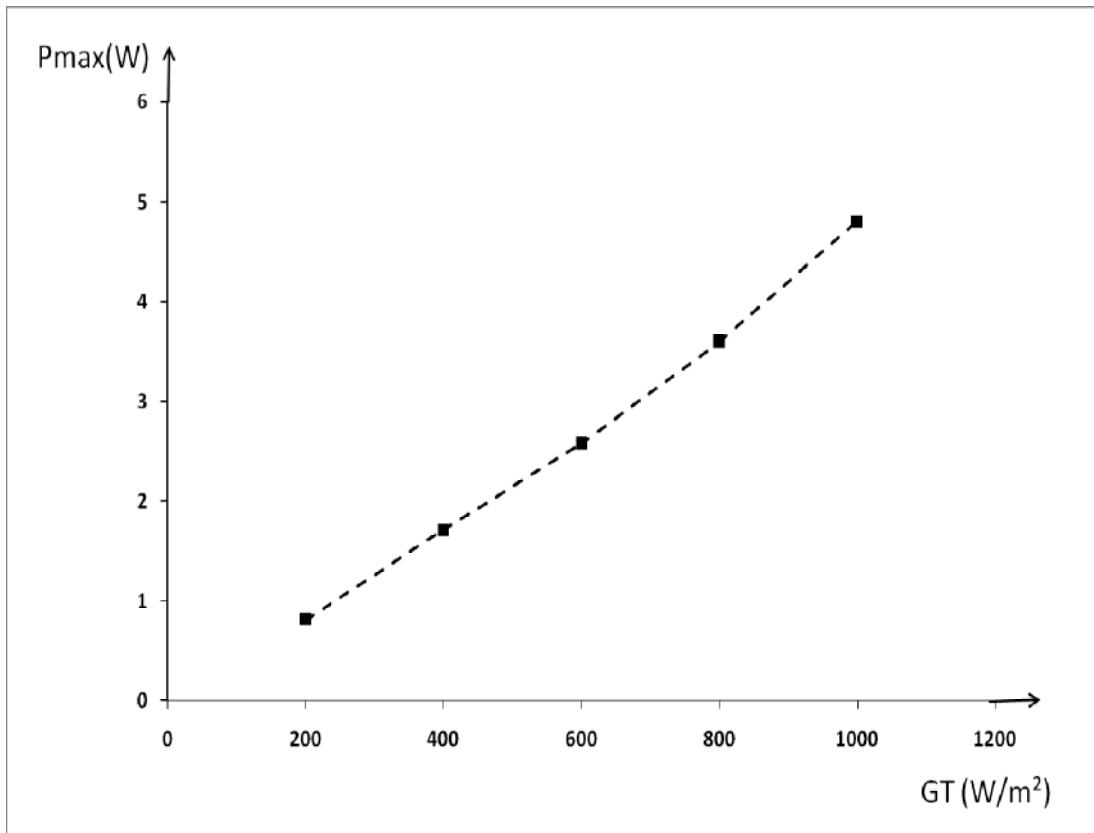


Figure III-8 : Variation de la puissance maximale du module PV en fonction du rayonnement solaire pour une température fixée du panneau PV

D'après la Figure III-8, on constate que la puissance maximale dépend fortement de l'intensité du rayonnement solaire de telle sorte que l'augmentation de l'intensité de l'irradiation s'accompagne de l'accroissement de la puissance maximale.

Chapitre III : Simulations numériques

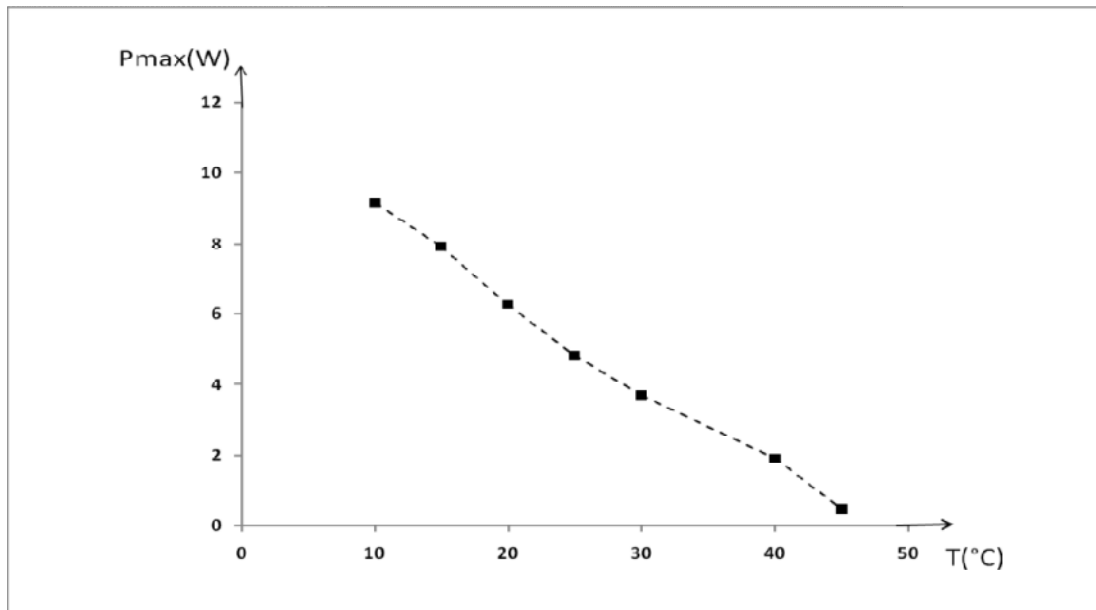


Figure III-9 : Variation de la puissance maximale du module PV en fonction de la température sous une intensité de rayonnement solaire fixé.

La Figure III-9 illustre l'évolution de la puissance délivrée par le panneau PV pour différentes températures de ce panneau. Il apparaît que l'augmentation de la température du panneau PV peut affecter de façon significative la capacité de conversion énergétique d'un panneau PV. En effet, le rendement d'un panneau PV diminue de 0.5% par degré Celsius d'augmentation de la température du panneau PV. Comme le montre cette figure, la puissance passe 4.8103W à 1.908 W quand la température augmente de 25 à 40 $^{\circ}C$.

6. Conclusion

L'objectif principal de cette étude est d'estimer les paramètres électriques du panneau PV permettant de tracer sa courbe caractéristique en utilisant le modèle électrique à une diode. Il apparaît à travers les simulations effectuées, que la température du panneau PV et l'intensité de rayonnement solaire constituent deux paramètres essentiels conditionnant la capacité de conversion énergétique des panneaux solaire PV.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail s'intéresse à l'effet des intensités de rayonnement solaire et de la température d'un panneau solaire sur sa capacité de conversion électrique. Pour ce faire, on a fait appel au modèle électrique à une diode pour l'évaluation des intensités de courant et de tension développées par ce panneau PV pour toute valeur d'intensité de rayonnement solaire (R_G) et de température du panneau PV (T_P).

Un programme de calcul, élaboré en Fortran, a permis d'étudier l'influence de ces deux paramètres (G_T , T_P).

Les résultats obtenus montrent que :

Pour une irradiation donnée, la tension en circuit ouvert V_{co} augmente avec la diminution de la température, tandis que le courant de court-circuit I_{cc} varie faiblement.

La tension de court circuit varie faiblement avec l'intensité de rayonnement, alors que le courant de court circuit est très sensible.

L'augmentation de la température du panneau PV peut affecter de façon significative la capacité de conversion énergétique d'un panneau PV.

L'augmentation de l'intensité de l'irradiation solaire s'accompagne de l'accroissement de la puissance maximale.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] **Bernadette Mérenne-Schoumaker**, Géographie de l'énergie : acteurs, lieux et enjeux, Belin, Paris, 2011. 279 p. (ISBN 978-2-7011-5897-6).

[2] Key World Energy Statistics. International Energy Agency, 2006, 82 p. Disponible sur : <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2006/key2006.pdf>

[3] **Alonso Corinne** « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de L'énergie ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003.

[4] **Zembri-Nebbali D., 2019.** « Caractérisation d'une cellule solaire et optimisation de sa capacité de conversion énergétique», Thèse de Doctorat, Université de Mouloud Mammeri, Tizi-ouzou, Algérie.

[5] **Wilfried von Ammon., Jochen Friedrich., Georg Müller., 2014.** “ Czochralski Growth of Silicon Crystals”.

[6] **Zachariasen.W. H., 1932.** “The atomic arrangement in glass, Journal of American chemical society”. Vol(54). pp. 3841-3851.

[7] **Daniel. S,** Modeling radiation effect on a triple junction solar cell using silvaco atlas”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2012.

[8] **Attia, John Okyere.** Semiconductor Physics”, Electronics and Circuit Analysis Using MATLAB. Ed. John Okyere Attia Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.

[9] **Sari A., Benyoucef B., Chikh-Bled B., 2007.** “Etude de la jonction PN d'un semiconducteur a l'équilibre thermodynamique”, Journal of Electron Devices. Vol(5). pp. 122-126 © JED [ISSN: 1682 -3427].

[10] **Lavery J., 2008.** “Quantum tunneling model of a P-N junction in silvaco”. Thesis Naval postgraduate school Monterey California.

[11] **Harold J., Hovel., 1975.** “Semiconductors and semimetal”. Solar cells, Academic Press. New York, San Fransisco.

[12] **Yu P.Y., Cardona M., 2001.** “Fundamentals of semiconductors: physics and materials properties”. springer-Verlag, Berlin Heidelbeg. New-York.

[13] **Mathieu H., 1998.** « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques ». 4^{ème} éditions, Masson, Paris, 1998

[14] **L. Bailly., 2010** "Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface,"Université Sciences et Technologies-Bordeaux I.

[15] **R. H. Michel Israël, Christophe Lerouge, Raphaël Allegre, Rémi Delville. -2006.** Mission pour la Science et la Technologie. Nanosciences, Microelectronique, Materiaux].

[16] **Fraunhofer ISE., 2017 .** "Photovoltaics report. Fraunhofer ISE, Freiburg.1, 12, 13, 15

Références bibliographiques

- [17] **Saliba M., Matsui T., Seo J., Domanski K., Correa-Baena J., Nazeeruddin M., Zakeeruddin S., Tress W., Abate A., Hagfeldt A., Grätzel M., 2016.** "Cesium-containing triple cation perovskite solar cells: improved stability, reproducibility and high efficiency" *Energy Environ. Sci.* Vol (9). pp 1989-1997.
- [18] **Nunzi JM., 2002.** «Organic photovoltaic materials and devices ». Elsevier, *C.R. Physique Vol (3)*. pp 523–542.
- [19] **Protin L., Astier S., 1990.** « Convertisseurs photovoltaïques ». Techniques de l'ingénieur Génie Electrique, D3-360. pp 1-18.
- [20] **Townsend T.U., 1981.** "A Method for Estimating the Long Term Performance of Characteristics of Solar Cells." *Solar Cells* vol(4) . pp 169–178.
- [21] **Duffie J A., Beckman W A., 1991.** Book, *Solar Engineering Of Thermal Processes* university of Wisconsin-Madison, New York.
- [22] **Goetzberger A., Hoffmann V.U., "Photovoltaic Solar Energy Generation", Springer** vol(205), pp 33.
- [23] **Kelly N. A. 2013.** "The Coupling Factor: A New Metric for Determining and Controlling the Efficiency of Solar Photovoltaic Power Utilization." *International Journal of Hydrogen Energy* vol(38). pp 2079–2094.
- [24] **De Soto W., Klein S. A., Beckman W. A., 2006.** "Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance". *Solar Energy*. vol(80). pp 78–88.
- [25] **Ye M., Wang X., Xu Y., 2009.** "Parameter extraction of solar cells using particle swarm optimization". *J.Appl. Phys.* Vol(105). pp 1–8.
- [26] **Maouedj Rachid,**"Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah", Mémoire De Magister soutenue en 2005.
- [27] **Benjamin Dessus,** "Le bois-énergie en Europe. Une étude prospective à l'horizon 2020", *Nature Sciences Sociétés* Volume 7, Issue 1, January–March 1999, Pages 72-77.
- [28] **Rauschenbach H S., 1980.** "Solar Cell Array Design Handbook: The Principles and Technology of Photovoltaic Energy Conversion". Van Nostrand Reinhold Company, 0442268424 (ISBN13: 9780442268428).