



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ «ABBÈS LAGHROUR» KHENCHÉLA
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE



Département des Sciences de la matière

N° de série :.....

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)

Spécialité : Physique

Option : Physique des matériaux

Etude d'une cellule photovoltaïque à structure PIN

Dirigé par : Dr. MELLAL Saida

Réalisé par :

- *Hammadi Sara*
- *Houassi Sana*

Membres de jury :

- *Dr Khemissi Saadeddine MCA Président*
- *Dr Boubaa Driss MCB Examineur*

Présenté le : 13 /07/2021

Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux,
qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Mme : S.Mellal,
pour son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt
qu'ils ont porté à notre travail et ceci en acceptant de l'examiner.*

*Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé
de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À mes très chers parents,

À mon mari « YACINE », et mes enfants « MAHER et YARA »,

À mes frères « OMAR et KHALED » et ma chère sœur HOUDA,

À ma belle-famille ; spécialement :

À « ammi LAAMRI » que dieu ait son âme ,

À mes amies

Et à tous ceux qui me sont

chers.

SaRa

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes très chers parents, pour leur sacrifices, et qui n'ont jamais cessé de
m'encourager que Dieu me les garde.*

Mes très chères sœurs : Mounira ,Loubna ,Rim ,Sabrin

Mes très chers frères : Ahmed et Sami

Tous mes amis (es)

SANA

Table des matières

Table des matières

<i>Remerciements</i>
<i>Table des matières</i>	i
<i>Liste des figures</i>	iii
<i>Liste des symboles</i>	v

<i>Introduction générale</i>	1
---	---

Chapitre I : Notions fondamentales sur le rayonnement solaire et semi-conducteurs

I.1. Introduction	3
I.2. Le rayonnement solaire	3
I. 2.1. Trajet optique ou Masse d'air	4
I.2.2 Spectre solaire	5
I.3. Généralités sur les semi conducteurs	6
I.3.1 Semi-conducteurs intrinsèques	7
I.3.2. Semi-conducteurs extrinsèques	8
I.4. Interaction rayonnement - semi conducteur	9
1.4.1 Absorption de rayonnement et création des paires électron-trou	9
1.4.2 Génération optique des porteurs	11
1.4.3 Recombinaison des porteurs	11
I.5. La jonction PN	12
I.5.1. Caractéristique courant tension de la jonction PN	13
I.5.2. La jonction PN sous l'effet du rayonnement	17
I.6. Conclusion	18

Chapitre II : Conversion photovoltaïque et cellule solaire PIN

II.1 Historique de la conversion photovoltaïque	19
II.2. Les avantages du photovoltaïque	19
II.3 Cellule photovoltaïque	20

II.3.1 Structure de cellule photovoltaïque	20
II.4. Principe de Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque à structure PIN	21
II.4.1 Généralités sur le fonctionnement d'une cellule solaire PIN	21
II.4.2 Epaisseurs des zones de charge d'espace et champ électrique dans une structure PIN	22
II.5. Comportement de la cellule photovoltaïque éclairée	26
II.5.1 Schéma équivalent de la cellule idéale	26
II.5.2 Photocourant	27
II.6. Caractéristique (I-V) d'une cellule solaire	30
II.7. Paramètres d'une cellule solaire	31
II.7.1. Paramètres physiques	31
II.7.2. Paramètres photovoltaïques	32
II.8. Conclusion	34
<i>Chapitre III : Simulation de la cellule PIN</i>	
III.1. Introduction	35
III.2. Organigramme de calcul	35
III.3 Résultats et discussion	36
III.3.1. Caractéristiques J(V) et P(V) de la cellule PN	36
III.3.2 Caractéristiques J(V) et P(V) de la cellule PIN	37
III.3.3. Comparaison entre les caractéristiques des cellules PN et PIN	38
III.3.4. Effet de l'épaisseur de la zone intrinsèque	39
III.3.5 Effet de la concentration intrinsèque de la région intermédiaire	42
III.3.6. Influence du dopage de l'émetteur et de la base de la Cellule PIN	43
III.3.7 Influence des paramètres d'excitation sur la caractéristique I(V)	47
III.4 Conclusion	50
<i>Conclusion générale</i>	52
<i>Références bibliographiques</i>	54

Liste des figures

<i>Figure I.1. Le rayonnement solaire</i>	3
<i>Figure I.2. Description du nombre de masse d'air</i>	4
<i>Figure I.3. Le spectre solaire AM0, AM1.5G (Global) et AM1.5D (Direct)</i>	6
<i>Figure I.4. Liaisons covalentes avec les atomes voisins</i>	6
<i>Figure I.5. Diagramme de bande</i>	7
<i>Figure I.6. Dopage de type N</i>	8
<i>Figure I.7. Dopage de type P</i>	9
<i>Figure I.8. Incidence, réflexion et réfraction de la lumière à l'interface air/semiconducteur</i>	10
<i>Figure I.9. Diffusion des trous et les électrons dans la jonction PN</i>	12
<i>Figure I.10. Zone de transition dans la jonction PN</i>	13
<i>Figure I.11. Schéma explicatif de la création du pair électron trous par l'effet lumineux.....</i>	18
<i>Figure I.12. L'exposition de la jonction PN à la lumière</i>	18
<i>Figure II.1. Schéma simplifié illustratif d'une cellule solaire</i>	21
<i>Figure. II.2. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire dont la structure est une jonction PIN</i>	22
<i>Figure. II.3. Schéma d'une structure PIN</i>	23
<i>Figure II.4. Zone de charge d'espace de la jonction PI et IN</i>	23
<i>Figure II.5. Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale</i>	26
<i>Figure II.6. Les courants dans une cellule PIN</i>	27
<i>Figure. II.7. Caractéristique courant/ tension d'une cellule solaire</i>	30
<i>Figure. II.8. Caractéristique I-V dans le nouveau repère</i>	31
<i>Figure II.9. Caractéristiques I(V) et paramètres I_{cc}, V_{oc}</i>	32
<i>Figure III.1. Organigramme de calcul des caractéristiques $J = f(V)$ et $P = f(V)$ et du rendement η</i>	35
<i>Figure III.2. Caractéristiques $J = f(V)$ et $P = f(V)$ de la cellule solaire PN</i>	37
<i>Figure III.3. Caractéristiques $J = f(V)$ et $P = f(V)$ de la cellule solaire PIN</i>	38
<i>Figure III.4 Comparaison des caractéristiques J(V) des cellules PN et PIN</i>	38
<i>Figure III.5. Comparaison des caractéristiques P(V) des cellules PN et PIN</i>	39

<i>Figure III.6. Evolution de la caractéristique courant-tension $I(V)$ de la cellule PIN pour différentes épaisseurs de la zone intrinsèque</i>	40
<i>Figure III.7. Evolution de la densité de courant de la cellule PIN en fonction de l'épaisseur de la zone intrinsèque</i>	40
<i>Figure III.8. Représentation du rendement de la cellule solaire en fonction de W_i</i>	41
<i>Figure III.9. Effet de la concentrations n_i de la région intrinsèque sur la caractéristique $J(V)$ de la cellule PIN</i>	42
<i>Figure III.10. Variation de la densité de courant J_{pin} en fonction de la concentration intrinsèque n_i</i>	43
<i>Figure III.11. Effet du dopage de l'émetteur sur la caractéristique $J(V)$ de la cellule PIN</i>	44
<i>Figure III.12. Variation du courant J_{pin} en fonction du dopage de la couche émettrice</i>	44
<i>Figure III.13. Effet du dopage de l'émetteur sur le rendement de conversion</i>	45
<i>Figure III.13. Effet du dopage de l'émetteur sur le rendement de conversion</i>	46
<i>Figure III.15. Variation du courant J_{pin} en fonction du dopage de la base</i>	46
<i>Figure III.16. Effet du dopage de la base sur le rendement de la cellule PIN</i>	47
<i>Figure III.17. Caractéristique $J(V)$ de la cellule en fonction de l'intensité lumineuse</i>	48
<i>Figure III.18. Courbe de puissance de la cellule PIN en fonction de l'intensité lumineuse ...</i>	48
<i>Figure III.19. Caractéristique $J(V)$ de la cellule en fonction de la température</i>	49
<i>Figure III.20. Courbe de puissance de la cellule PIN en fonction de la température</i>	50

Liste des symboles

AM : Masse d'air.

h : Constante de Planck ($\approx 6,626 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$).

C : La vitesse de la lumière dans le vide ($300\,000 \text{ Km s}^{-1}$).

ν : La fréquence (s^{-1}).

λ : La longueur d'onde d'un photon en m.

p : La quantité du mouvement.

T : Température de la cellule.

k : Le vecteur d'onde.

q : La charge de l'électron.

$U_t = kT/q$: Potentiel thermodynamique.

E : Energie .

E_g : Largeur de la bande interdite (gap).

E_C : Energie bande de conduction.

E_v : Energie bande de valence.

n_i : Concentration intrinsèque.

n, p : Concentration des électrons et des trous respectivement.

n_0, p_0 : Concentration des électrons et des trous à l'équilibre respectivement.

N_a, N_d : Concentration des atomes accepteurs et des atomes donneurs respectivement.

N_t : Concentration des centres de recombinaison.

τ_n, τ_p : Durée de vie des électrons et des trous respectivement.

τ_0 : Durée de vie de recombinaison du porteur.

μ_n, μ_p : Mobilité des électrons et des trous respectivement.

D_n, D_p : Constante de diffusion des électrons et des trous respectivement.

L_n, L_p : Longueur de diffusion des électrons et des trous respectivement.

$\rho(x)$: Densité de charges électriques.

P : La puissance optique .

A : absorbance .

$\phi(E, x)$: Le flux de photons une distance x .

$\phi(E)$: Le flux de photons incidents d'énergie E .

$\phi_t(E)$: Le flux de photons transmis.

Φ_R : Le flux réfléchis.
 B : Le coefficient d'émission de photons dans les matériaux.
 U : le taux de recombinaison en porteurs libre $\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$.
 V_{th} : La vitesse thermique.
 C_n ; C_p : les coefficients efficaces de capture.
 A_n et B_n : Les constantes d'intégration .
 $\alpha(\lambda)$: Coefficient d'absorption.
 $R(E)$: Coefficient de réflexion.
 $\xi(x)$: Champ électrique.
 $G(\lambda, x)$: Taux de génération des paires électron-trous.
 J_r : Densité de courant de saturation inverse.
 J_{ph} : Densité de courant de photo génération.
 J : Densité de courant de sortie de la cellule.
 J_d : Densité de courant total de la diffusion.
 J_{obs} : Densité de courant d'obscurité.
 J_s : Densité de courant de saturation.
 J_{pdiff} : Densité de courant de diffusion de trous.
 J_{gn} : Densité de e courant de génération d'électrons.
 J_{pin} : Densité de courant de la cellule PIN.
 U_n, U_p : Taux de recombinaison des électrons et des trous respectivement.
 V_d : Potentiel de diffusion.
 V : Tension de sortie de la cellule.
 V_{oc} : Tension de circuit ouvert.
 V_m : Tension max.
 V_{dp} : Tension de diffusion de la jonction P-I.
 V_{dn} : Tension de diffusion de la jonction IN.
 I_m : Courant max.
 I_s : Le courant de saturation.
 I_d : Le courant traversant.
 I_{ph} : Le photocourant généré.
 FF : Facteur de forme.
 P_m : Puissance maximale.
 P_{in} : Puissance lumineuse incidente.

η : Rendement de conversion.

W : Epaisseur.

W_P : Epaisseur de la couche P.

W_I : Epaisseur de la couche intrinsèque .

W_N : Epaisseur de la couche N.

H : Epaisseur totale de la cellule.

L : Longueur de la cellule.

S : Surface de la cellule.

x_p, x_0, x_i et x_n : Les abscisses.

$E_p(x)$; $E_n(x)$ et $E_i(x)$: Les champs électrique dans les zones P ; N et intrinsèque.

ZCE : La zone de charge d'espace.

PV : La cellule photovoltaïque.

R_L : La charge extérieure

N_c : Densité d'état au bord de la bande de conduction.

N_v : Densité d'état au bord de la bande de valence.

Ψ : Potentiel électrostatique

P_{in} : Puissance incidente

C_j : Capacité de jonction.

τ : Durée de vie ambipolaire.

L_a : Longueur de vie ambipolaire.

T_p : Temps de transit des trous à travers la zone intrinsèque

J_T : Densité totale de courant dans la diode

Introduction
générale

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que ceux des pays en voie de développement ne cessent de se multiplier. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours. Cette consommation donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le recours au développement des énergies non polluantes est alors apparu comme l'ultime solution face à ce problème et de nombreuses voies de recherches se sont donc orientées vers l'utilisation des énergies renouvelables [1].

Par énergie renouvelable on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les Energies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. L'intérêt est bien d'utiliser notre univers comme solution de production énergétique. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire photovoltaïque.

A l'ère du développement durable, l'énergie solaire photovoltaïque connaît une progression rapide en raison de son potentiel significatif comme source d'énergie renouvelable qui permet de produire de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque.

En effet, la capacité mondiale a augmenté de 10% en 2021 pour atteindre une capacité totale installée de 220 GW selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) [2]. Cependant, le rendement de la conversion photovoltaïque reste relativement faible. Donc la conception et la réalisation de cellules photovoltaïques sont des problèmes d'actualité pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire.

L'expérience montre que le fonctionnement des cellules solaires dépend fortement de plusieurs paramètres; internes (matériau, géométrie, dopage...) et externes (lié à l'entourage du fonctionnement: éclairage, concentration, température, etc). L'étude de l'influence de ces différents paramètres sur le fonctionnement des photopiles solaires est possible à travers la connaissance de l'influence de chaque paramètre sur la caractéristique I-V de la cellule.

Dans notre étude, nous nous intéressons à l'étude de la cellule photovoltaïque à base de jonction PIN et nous nous sommes fixés pour de but d'étudier l'influence des paramètres technologiques et géométriques les plus importants sur les performances de la cellule solaire PIN par simulation en utilisant le logiciel MATLAB.

Nous avons réalisé ce travail en trois chapitres après avoir présenter l'introduction générale:

Le premier chapitre consiste à présenter quelques notions générales sur le rayonnement solaire, les principes de base des semiconducteurs, notamment leur structure en bandes d'énergies et la concentration des porteurs de charges à l'état d'équilibre, pour les trois types de semiconducteur, à savoir le semiconducteur intrinsèque, type N et type P, les phénomènes d'interaction de la lumière avec les matériaux semiconducteurs et une dernière partie et consacrée à la jonction PN et ses équations fonctionnelles.

Le deuxième chapitre est consacré à la conversion photovoltaïque et la cellule solaire à base d'une structure PIN où on présente son principe de fonctionnement, sa caractéristique courant-tension et les paramètres qui gouvernent son fonctionnement.

Le troisième et dernier chapitre, est consacré à la simulation numérique du comportement de la cellule solaire de structure PIN à base de silicium monocristallin. Les résultats obtenus sont présentés et commentés.

Enfin, le mémoire se termine par une conclusion générale récapitulant les résultats obtenus au cours de la simulation et donne quelques critères s'inscrivant dans la perspective d'une meilleure efficacité des cellules solaires à base d'une structure PIN.

Chapitre 1

*Notions fondamentales sur
le rayonnement solaire
et les semi-conducteurs*

I. 1. Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie [3]. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Le nom Photovoltaïque vient du Grec, il est composé de deux parties:

- **Photos** : Lumière.
- **Volt** : Unité de tension électrique, du nom Alessandro Volta.

Ce phénomène fut découvert au 19^{ème} siècle par le physicien Alexandre Edmond Becquerel. La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. Depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des années 70. Le photovoltaïque fut utiliser pour l'alimentation en énergie de petites maisons isolées et d'équipements de télécommunications [4].

Aujourd'hui, grâce à sa fiabilité et à son concept respectueux de l'environnement, le photovoltaïque prend une place prépondérante [5].

Pour comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur le rayonnement solaire, les matériaux semi-conducteurs et leurs interactions avec la lumière ; Ainsi que la jonction PN qui la base des cellules photovoltaïques.

I. 2. Le rayonnement solaire

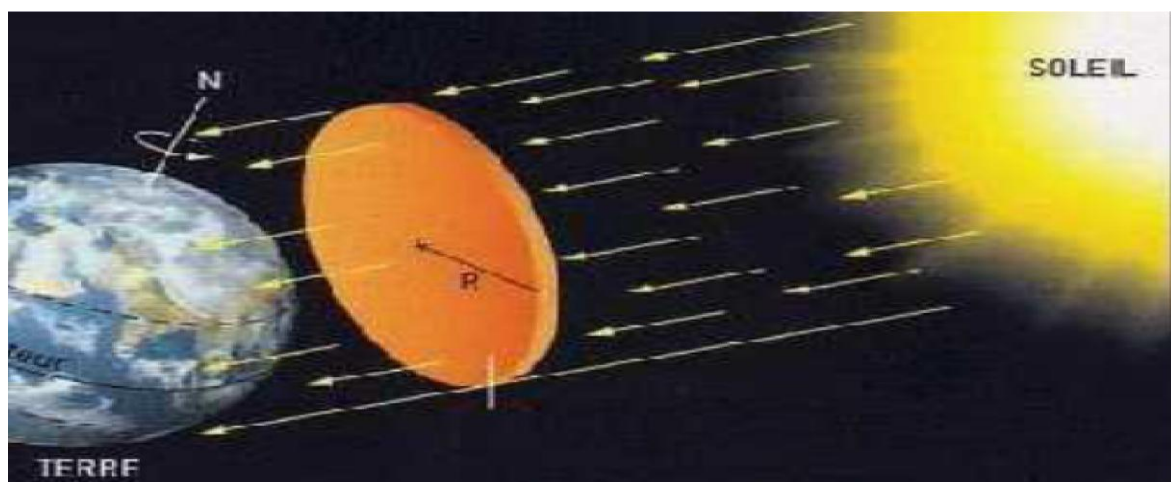


Figure I.1. Le rayonnement solaire

Le soleil est une étoile, c'est-à-dire un astre qui produit sa propre énergie. L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclaircissement (noté généralement par la lettre « G », elle est exprimée en watts par mètre carré (W/m^2) [6].

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à $1367W/m^2$ [7].

I. 2.1. Trajet optique ou Masse d'air

On appelle masse d'air AM , la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique. La masse d'air définie par [8] :

$$AM = 1/ \sin \theta \quad (I.1)$$

Où :

θ : représente l'angle entre la position du soleil et le zénith exprimée en (Deg).

Le spectre solaire AM0 correspond à une masse d'air nulle pour un rayonnement arrivant au dessus de la couche atmosphérique à incidence normale, AM1 pour un soleil vertical à la terre (le soleil est au zénith), et AM1.5 pour un rayonnement solaire correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith.

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith [9].

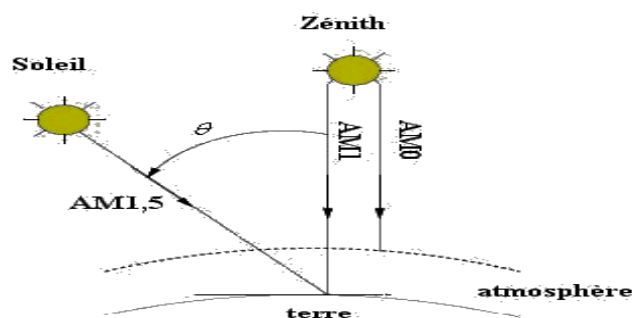


Figure I.2. Description du nombre de masse d'air.

La puissance AM 1, 5 standard (soit $1000 W/m^2$) est la référence pour les calculs énergétiques au sole [10].

I.2.2 Spectre solaire

Jusqu'au début du XXe siècle, la lumière était considérée seulement comme une onde électromagnétique. Mais certains phénomènes n'ont pas été expliqués dans le cadre de cette théorie ondulatoire, comme l'effet photoélectrique par exemple. En 1900 Planck a proposé une nouvelle approche attestant que la lumière est composée des paquets d'énergie, appelés ultérieurement photons par Einstein, où chaque paquet d'énergie est lié à une longueur d'onde par la relation :

$$E_{\text{photon}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.2})$$

h : la constante de Planck ($\approx 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)

c : la vitesse de la lumière dans le vide ($300\,000 \text{ Km s}^{-1}$)

ν : La fréquence (s^{-1})

λ : La longueur d'onde (m).

Ensuite, De Broglie a introduit la notion conciliante de la dualité de la lumière où elle peut être considérée à la fois comme des corpuscules (paquets d'énergie) et comme une onde électromagnétique, où les deux aspects sont liés par :

$$\mathbf{p} = \frac{h}{\lambda} \quad (\text{I.3})$$

Où p est la quantité du mouvement d'un corpuscule. Dans le domaine du photovoltaïque, on s'intéresse au deuxième aspect, qui atteste que la lumière se propage sous forme de paquets d'énergie appelés photons [11].

Cette quantité d'énergie quitte la surface du soleil sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de **$0,22\mu\text{m}$ à $10\mu\text{m}$** , l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit:

- **7 %** dans la bande des ultraviolets ($\lambda < 0,4\mu\text{m}$).
- **46 %** dans la bande visibles ($0,4\mu\text{m} \leq \lambda \leq 0,8\mu\text{m}$).
- **47 %** dans la bande des infrarouges ($\lambda > 0,8\mu\text{m}$). [12]

La figure 1.3 montre l'intensité de la lumière émise par le soleil en fonction de la longueur d'onde.

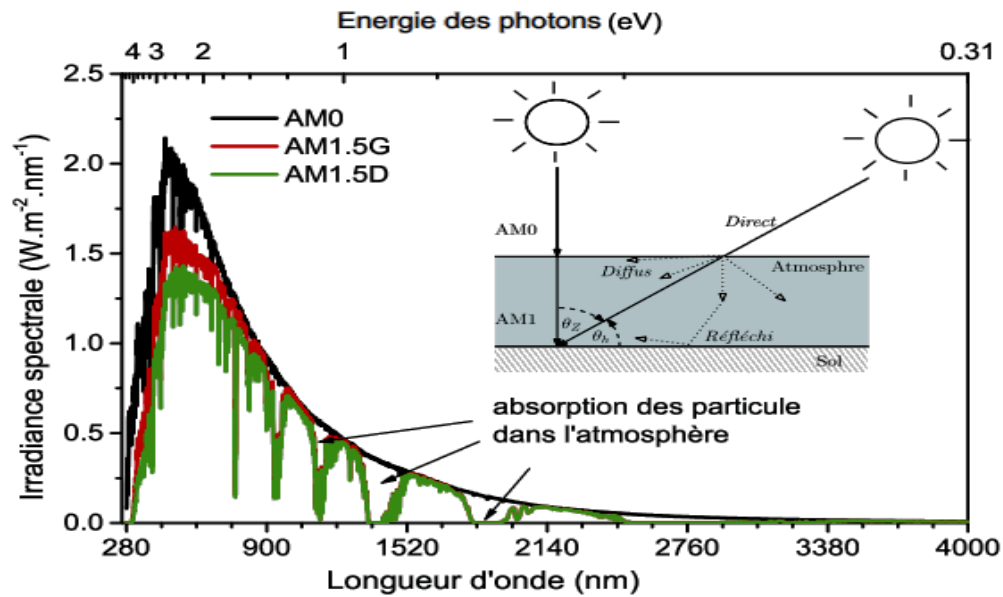


Figure 1.3. Le spectre solaire AM0, AM1.5G (Global) et AM1.5D (Direct), obtenus par le standard ASTM G173-03 [13]

I.3. Généralités sur les semi conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec les atomes voisins. Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique.

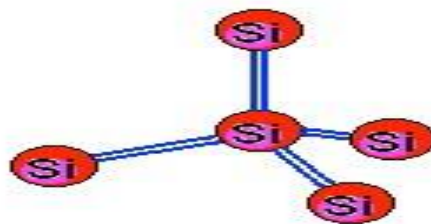


Figure 1.4. Liaisons covalentes avec les atomes voisins

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge.

- **Notion de bandes d'énergie**

Le diagramme énergétique d'un matériau est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparé par une bande interdite. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon, ...)

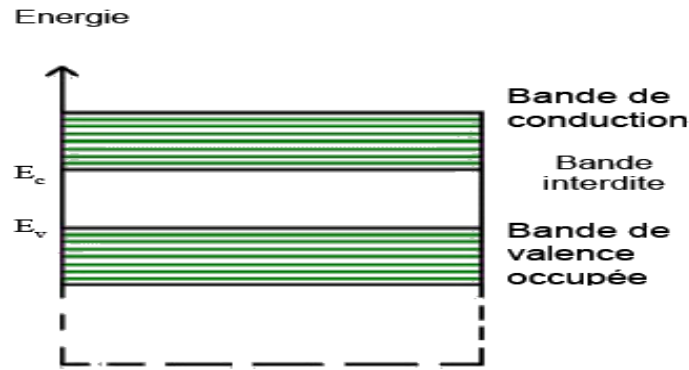


Figure I.5. Diagramme de bande

Le tableau (I.1) donne quelques exemples de largeur de bande interdite

Atome	E_G (eV)	Type de matériau
C (Carbone)	5.5	Isolant
Si (Silicium)	1.1	semi-conducteur
Ge (Germanium)	0.7	semi-conducteur
Sn(Etain)	0	Conducteur

Tableau I.1 Exemple de valeurs du gap de quelques matériaux.

Pour mieux appréhender le comportement des semi-conducteurs, nous devons étudier plus en détail les populations d'électrons et de trous dans chacune des bandes de conduction et de valence.

I.3.1. Les semi-conducteurs intrinsèques

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur non dopé, c'est à dire qu'il contient peu d'impuretés (atomes étrangers) en comparaison avec la quantité de trous et d'électrons générés thermiquement. Le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque est très faible.

Dans un *semi-conducteur pur* (intrinsèque), le nombre de trous est égal au nombre d'électrons et on a :

$$n_0 = p_0 = n_i \quad (I.4)$$

n_0 : Densité des électrons

p_0 : Densité des trous

n_i : Densité intrinsèque du semi-conducteur

Pour le silicium $n_i = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-3}$ à 300°K.

I.3.2. Semi-conducteurs extrinsèques

Il est possible en introduisant certaines impuretés en quantité contrôlée (dopage), d'augmenter et privilégier un type de porteurs : électrons libres ou trous libres.

❖ Dopage de type N

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent. Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre. On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif).

Pour les semi-conducteurs extrinsèques, la densité de dopant est toujours très supérieure à densité de porteurs intrinsèques $N_D \gg n_i$. Dans le cas d'un type N, la densité d'électrons est donc proche de celle du dopant donneur N_D . La relation étant toujours vérifiée, nous obtenons pour les densités de porteurs :

$$n = N_D \quad (I.5)$$

$$p = \frac{n_i^2}{N_D} \quad (I.6)$$

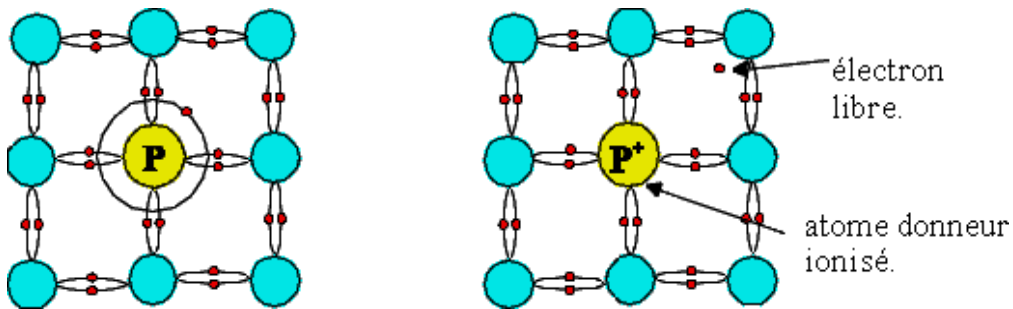


Figure I.6. Dopage de type N

❖ Dopage de type P

De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant. Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore.

Par analogie avec les semi-conducteurs de type N et en notant N_A la densité d'accepteurs, les densités de porteurs pour un semi-conducteur de type P sont [14]:

$$n = \frac{n_i^2}{N_A} \quad (\text{I.7})$$

$$P = N_A \quad (\text{I.8})$$

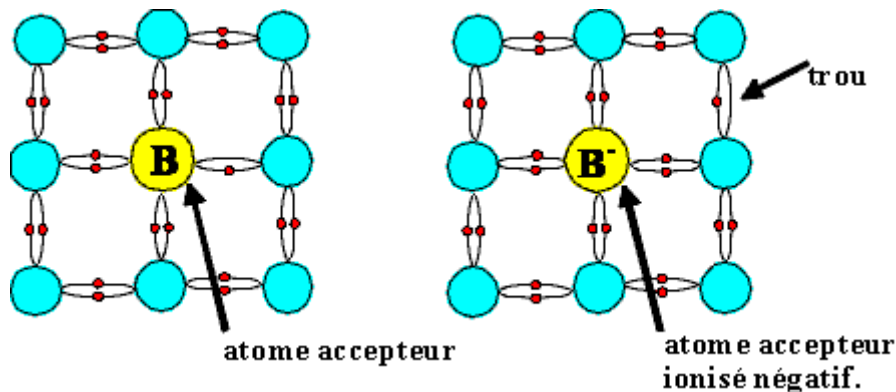


Figure I. Dopage de type P

I.4. Interaction rayonnement - semi conducteur

L'interaction du rayonnement avec les électrons d'un semi conducteur se manifeste selon trois processus :

- **Absorption fondamentale**

Lorsque le photon absorbé provoque un saut d'électron d'un état occupé de la bande de valence vers un état vide de la bande de conduction, on dit qu'il y a absorption.

- **Emission spontanée**

Lorsqu'un électron de la bande de conduction retombe spontanément sur un état vide de la bande de valence, il y'a émission spontanée.

- **Emission stimulée**

Si le photon absorbé induit la transition d'un électron de la bande de conduction vers un état vide de bande de valence avec émission d'un photon, l'émission est dite stimulée [15].

1.4.1 Absorption de rayonnement et création des paires électron-trou

Quand un semi-conducteur est soumis à une irradiation lumineuse, des électrons peuvent être excités depuis la bande de valence vers la bande de conduction par absorption de photons, pourvu que l'énergie des photons soit supérieure à E_g , l'énergie de bande interdite.

En optique, le coefficient d'absorption ou absorptivité est une quantité locale définie à partir de la dérivée de l'absorbance A par rapport au chemin optique L parcouru par un rayonnement électromagnétique dans un milieu donné (exprimé en m^{-1} ou en cm^{-1}) :

$$\alpha(E) = -\frac{dA(E,x)}{dx} = -\frac{1}{\phi(E,x)} \frac{d\phi(E,x)}{dx} \quad (I.9)$$

Avec $\phi(E,x)$ est le flux de photons d'énergie E à une distance x de la surface.

À partir d'une valeur proche de l'énergie de bande interdite, ce coefficient présente une valeur constante (alentours de 10^4 cm^{-1}). On parle ainsi de seuil d'absorption optique.

Soit $\phi_0(E)$ le flux de photons incidents d'énergie E , C'est le nombre de photons d'énergie E qui frappent l'unité de surface du semiconducteur par seconde, il s'exprime en $ph/s.cm^{-2}$. Si $R(E)$ est le coefficient de réflexion du semiconducteur pour le rayonnement d'énergie E ,

Le flux de photons $\phi_t(E)$ transmis à la surface, c'est-à-dire entrant effectivement dans le semiconducteur, s'écrit :

$$\phi_t(E) = (1 - R(E))\phi_0(E) \quad (I.10)$$

Le flux à une distance x de la surface du matériau s'écrit :

$$\phi(E, x) = \phi_t(E)e^{-\alpha(E).x} \quad (I.11)$$

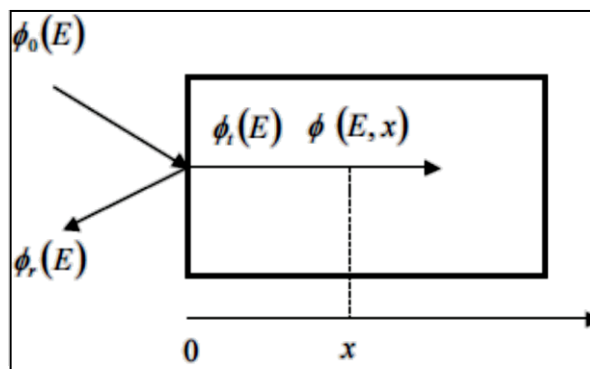


Figure I.8. Incidence, réflexion et réfraction de la lumière à l'interface air/semi-conducteur

Si l'énergie des photons est inférieure du gap ($E < E_g$), et dans le cas des semiconducteurs intrinsèques, $\alpha(E)$ est nul, le matériau est transparent à ce rayonnement. Par contre si $E > E_g$, $\alpha(E) \neq 0$, le matériau absorbe le rayonnement .

Relation entre grandeurs importantes

La puissance optique:

$$P(\text{Watts}) = E(\text{joules}) \cdot \phi(\text{photons/s}) ; \text{ Avec } E : \text{énergie d'un photon.}$$

La partie réfléchi du flux:

$$\phi_R(E) = R(E) \cdot \phi_0(E) \quad (\text{I.12})$$

1.4.2 Génération optique des porteurs

Chaque photon absorbé crée une paire (électrons/trous), le nombre de paires (électrons/trous) par seconde est appelé le taux de génération g . à une abscisse x ,

$$g(E, x) = -\frac{d\phi(E, x)}{dx} = \alpha(E) \cdot \phi(E, x) \quad (\text{I.13})$$

Le nombre de paires électron/trou créés cette photo-excitation à l'abscisse x est :

$$\Delta n(E, x) = \Delta p(E, x) = g(E, x) \quad (\text{I.14})$$

Le nombre de photons absorbés = nombre de paires électrons/trous générées [16].

1.4.3 Recombinaison des porteurs

Il existe deux mécanismes de recombinaison des porteurs de charges dans les semiconducteurs : la recombinaison radiative et la recombinaison non radiative

➤ Recombinaison radiative

La recombinaison radiative correspond à la recombinaison d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence, avec émission d'un photon d'énergie proche de celle du gap du matériau (processus inverse de la photo-génération). Le mécanisme de recombinaison radiative est un processus dominant dans les semi-conducteurs à gap direct (comme le GaAs, InP,...). Pour les semiconducteurs à gap indirect, ce mécanisme est relativement rare du fait que cette transition ne peut avoir lieu qu'avec l'assistance d'un photon.

La recombinaison radiative de porteurs se manifeste sous forme d'émission de photons qui de la recombinaison, ainsi le taux global d'émission de photons R correspond au taux de recombinaisons radiatives de porteurs:

$$R = Bnp + R_{st} \quad (\text{I.15})$$

Avec n et p sont les concentrations des porteurs, et B constante représente le coefficient d'émission de photons dans les matériaux.

➤ **Recombinaison non radiative** c.-à-d. l'énergie émise se fait soit sous forme de phonon (vibration du réseau, thermalisation), d'électron Auger, de centre de recombinaison ou d'autres phénomènes [16].

On distingue plusieurs processus dans ce mécanisme:

- La recombinaison par effet Auger : l'énergie des partenaires qui se recombinent est transférée à une troisième particule qui devient chaude. Ce mécanisme trouve son analogue dans le processus de désexcitation des atomes.
- La recombinaison excitonique: c'est le cas dans lequel l'électron et le trou forment un exciton.
- La recombinaison phonique: dans ce cas l'énergie des partenaires est transférée au réseau [15].

I.5. La jonction PN

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopée P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition.

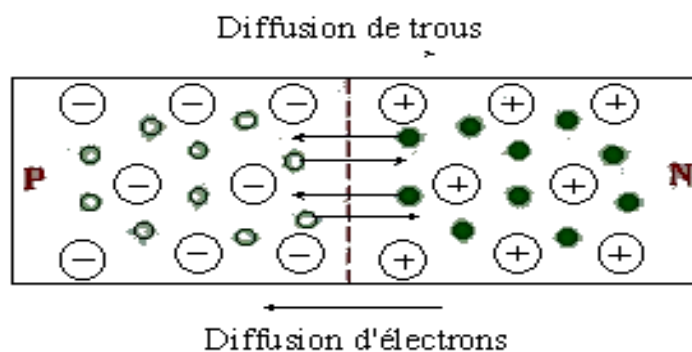


Figure I.9. Diffusion des trous et les électrons dans la jonction PN

Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner [17].

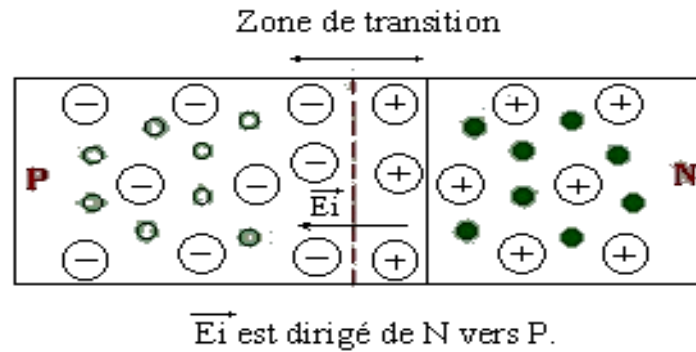


Figure I.10. Zone de transition dans la jonction PN

I. 5.1. Caractéristique courant tension de la jonction PN

On distingue deux régimes de fonctionnement qui dépendent de la polarisation de la jonction :

- la polarisation directe qui correspond au régime passant (si le potentiel appliqué est supérieur à celui de la barrière de potentiel V_b , la barrière de potentiel est levée, les porteurs majoritaires peuvent traverser la jonction sans être bloqués, un courant apparaît.
- la polarisation inverse correspond au régime bloqué, seuls les porteurs minoritaires peuvent créer un courant dans la diode car ils n'ont pas de barrière de potentiel qui les retiennent. Ce courant est le courant I_s ou courant de saturation.

I. 5.1.1. Le courant en polarisation directe

Dans ce cas, le déséquilibre des courants favorise la diffusion des porteurs majoritaires, qui franchissent facilement la barrière de potentiel et ils diffusent dans les zones neutres de type opposées ou ils deviennent des porteurs minoritaires et se recombinent.

Un courant de diffusion prend naissance dans ces deux régions, certains de ces porteurs se recombinent en traversant la zone de charges d'espace et donnent naissance à un courant de recombinaison.

❖ Contribution des régions quasi-neutres P et N

La densité des porteurs minoritaires dans les régions quasi-neutres P et N se déduit de l'équation de continuité donné par:

- Dans un semi-conducteur de type P:

$$\partial n_p = G_n - U_n + \frac{1}{q} \cdot \text{div} \vec{J}_n \quad (\text{I.16})$$

Avec :
$$U_n = \frac{\Delta n}{\tau_p} = \frac{n_p n_{p0}}{\tau_p} \quad (\text{I.17})$$

- Dans un semi-conducteur de type N:

$$\partial p_n = G_p - U_p + \frac{1}{q} \cdot \text{div} \vec{J}_p \quad (\text{I.18})$$

Avec :
$$U_p = \frac{\Delta p}{\tau_p} = \frac{p_n p_{n0}}{\tau_p} \quad (\text{I.19})$$

n_{p0} et p_{n0} : représentent respectivement, les concentrations des porteurs minoritaires dans les régions P et N à l'équilibre.

Les densités de courant J_n et J_p s'écrivent comme suit:

$$J_n = qn\mu_n \vec{\xi} + qD_n \cdot \text{grad} n \quad (\text{I.20})$$

$$J_p = qn\mu_p \vec{\xi} + qD_p \cdot \text{grad} p \quad (\text{I.21})$$

Sachant que :

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = G_n - \frac{n_p n_{p0}}{\tau_p} + \mu_n \left(n_p \frac{d\xi}{dx} + \xi \frac{dn_p}{dx} \right) + D_n \frac{\partial^2 n_p}{dx^2} \quad (\text{I.22})$$

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = G_p - \frac{p_n p_{n0}}{\tau_p} + \mu_p \left(p_n \frac{d\xi}{dx} + \xi \frac{dp_n}{dx} \right) + D_p \frac{\partial^2 p_n}{dx^2} \quad (\text{I.23})$$

Dans les zones neutres $\zeta(x)=0$, il n'y a pas de génération de porteurs $G_n = G_p = 0$

Ainsi à l'état stationnaire, les équations de continuité s'écrivent:

Coté N:
$$-\frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 p_n}{dx^2} = 0 \quad (\text{I.24})$$

Coté P:
$$-\frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} + D_n \frac{\partial^2 n_p}{dx^2} = 0 \quad (\text{I.25})$$

Ou encore :

$$\frac{\partial^2 (p_n - p_{n0})}{dx^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{D_p \tau_p} = 0 \quad (\text{I.26})$$

et

$$\frac{\partial^2 (n_p - n_{p0})}{dx^2} - \frac{n_p - n_{p0}}{D_n \tau_n} = 0 \quad (\text{I.27})$$

La résolution de ces deux équations donne:

$$n_p(x) - n_{p0} = n_{p0} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) e^{\frac{x-x_p}{L_n}} \quad (\text{I.28})$$

et

$$p_n(x) - p_{n0} = p_{n0} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) e^{\frac{x-x_n}{L_p}} \quad (\text{I.29})$$

Avec $L_{n,p} = \sqrt{D_{n,p} \cdot \tau_{n,p}}$: longueur de diffusion des électrons (L_n) ou des trous (L_p).

Les majoritaires ajustent leur concentration pour maintenir la neutralité électrique:

$$\Delta n_n = \Delta p_n ; \Delta p_p = \Delta n_p \quad (\text{I.30})$$

Les densités des courants de diffusion J_p et J_n sont données par les relations:

$$|J_p| = qD_p \frac{\partial p_n}{\partial x} = q \frac{D_p}{L_{pn}} p_{n0} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) e^{\frac{x-x_n}{L_{pn}}} \quad (\text{I.31})$$

$$|J_n| = qD_n \frac{\partial n_p}{\partial x} = q \frac{D_n}{L_{np}} p_{p0} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) e^{\frac{x-x_p}{L_{np}}} \quad (\text{I.32})$$

La densité du courant des trous J_p en $x=x_n$ (coté N) est donnée par:

$$|J_p|_{x=x_n} = qD_p \frac{\partial p_n}{\partial x} \Big|_{x=x_n} = q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (\text{I.33})$$

La densité du courant d'électron J_n en $x=-x_p$ (coté P) est donnée par :

$$|J_n|_{x=-x_p} = qD_n \frac{\partial n_p}{\partial x} \Big|_{x=-x_p} = q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (\text{I.34})$$

Le courant total de la diffusion est donnée par:

$$J_{d.obs} = J_p + J_n = \left(\frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \right) \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) = J_s \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) ; (A.cm^{-2}) \quad (\text{I.35})$$

J_s : est appelé courant de saturation de la jonction et vaut:

$$J_s = qn_i^2 \left(\frac{D_p n}{L_{pn} N_D} + \frac{D_n p}{L_{np} N_A} \right) ; (A.cm^{-2}) \quad (\text{I.36})$$

❖ *Contribution de la zone de charge d'espace*

Dans une jonction en polarisation directe. Le mécanisme des porteurs minoritaires dû aux centres proches au mieux de la bande interdite, prédomine et donne naissance dans cette zone à une densité de courant de la forme :

$$J_{obs} = q \int_{-xp}^{xn} U dx \quad (I.37)$$

On démontre à partir de la formule de Schokley Read Hall que le taux de recombinaison U s'écrit:

$$U = \frac{C_p C_n V_{th} N_t (np - n_i^2)}{C_n [n + n_i \exp(\frac{E_t - E_i}{KT})] + C_p [p + n_i \exp(\frac{E_i - E_t}{KT})]} \quad (I.38)$$

U: en porteurs libre $\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$

V_{th} : La vitesse thermique.

N_t : Concentration des centres de recombinaison.

On suppose que le centre de recombinaison se confond avec le niveau intrinsèque ($E_t = E_i$), et que les coefficients efficaces de capture par les centres recombinants soient identiques ($C_n = C_p = C$).

La formule (I.38) devient :

$$U = \frac{np - n_i^2}{\tau(n + p + 2n_i)} \quad (I.39)$$

U a une valeur maximale quand le niveau intrinsèque est égal à $(E_{Fn} + E_{Fp}) / 2$

$$U = \frac{1n_i}{2\tau} [\exp(\frac{qV}{2KT}) - 1] \quad (I.40)$$

Le courant de recombinaison s'écrit :

$$J_{r.obs} = \frac{qW}{2} \cdot \frac{n_i}{\tau} [\exp(\frac{qV}{2KT}) - 1] \quad (I.41)$$

Avec:
$$\tau = \frac{1}{cV_{th}N_t} \quad (I.42)$$

τ : durée de vie des porteurs.

Dans la majorité des applications, la densité du courant d'obscurité comporte des composantes de diffusion et de recombinaison dans la zone de charge d'espace.

$$J_{obs} = J_{d.obs} + J_{r.obs} = J_{s1}[\exp(\frac{qV}{KT}) - 1] + J_{s2}[\exp(\frac{qV}{2KT}) - 1] \quad (I.43)$$

Avec J_{s1} , J_{s2} : les courants de saturation correspondants respectivement au phénomène de diffusion et de recombinaison.

Notons que le courant d'obscurité varie avec la température, par l'intermédiaire de la potentielle thermodynamique $\frac{KT}{q}$ et la densité intrinsèque n_i . Ainsi le courant quand la température augmente [18].

I.5.2. La jonction PN sous l'effet du rayonnement

Quant une jonction PN est exposée à un flux lumineux, les photons provenant, si leur énergie est suffisante, vont casser une liaison covalente et donc créer une paire électron-trou, cette énergie correspond à l'énergie nécessaire que doit absorber l'électron afin qu'il puisse quitter la bande de valence (où il sert à assurer la cohésion de la structure) vers la bande de conduction, le rendant ainsi mobile et capable de générer un courant électrique. L'existence de la bande interdite entraîne l'existence d'un seuil d'absorption.

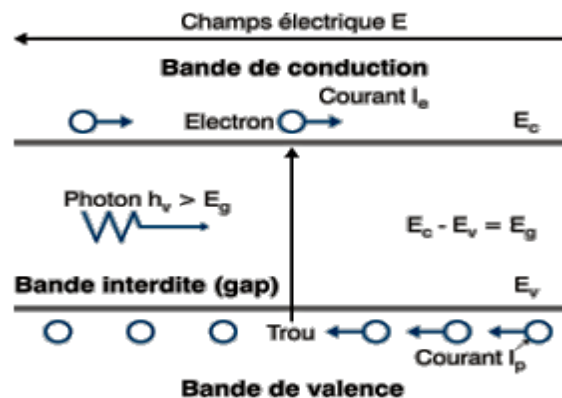


Figure I.11. Schéma explicatif de la création d'une paire électron-trou par l'effet lumineux.

Lors de l'absorption d'un photon, il apparaît des paires électrons-trou porteur (apparition simultanée d'un porteur n et d'un porteur p dans la jonction). Les porteurs p créés ont tendance à migrer vers le côté n et les porteurs n vers le côté p, renforçant la barrière de potentiel.

Une partie des porteurs générés par le rayonnement sera elle aussi soumise à divers phénomènes de recombinaison (disparition simultanée d'un porteur n et d'un porteur p, ceci dans le cas d'une jonction PN sans polarisation).

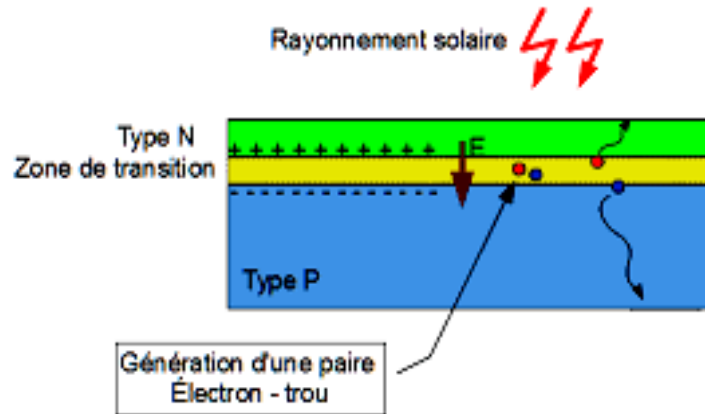


Figure I.12. Exposition de la jonction PN à la lumière.

Ce principe est à la base du fonctionnement de plusieurs dispositifs optoélectroniques [18].

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné les notions fondamentales sur le rayonnement solaire, les matériaux semi-conducteurs et leur interaction avec la lumière. Nous avons aussi dans ce chapitre pu comprendre et déterminer de manière approximative les caractéristiques principales de la jonction PN ainsi les courants qui circulent dans la jonction dans différentes situations. Cette initiation est nécessaire pour bien comprendre le mécanisme de la conversion photovoltaïque.

Chapitre 2

Conversion photovoltaïque

et

cellule solaire PIN

II.1 Historique de la conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque se définit par la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement solaire) en énergie électrique continue directement utilisable. Il a été découvert par Antoine Becquerel en 1839 qui mis en évidence l'apparition d'une tension aux bornes de deux électrodes immergées dans une solution électrolytique, lorsque celle-ci était exposée à la lumière naturelle. Ce n'est que 115 ans plus tard en 1954 que Chapin et al. des laboratoires Bell ont développé la première cellule solaire au silicium, avec un rendement énergétique de 6 %. Dès lors, de nombreux et rapides progrès ont été réalisés dans ce domaine, notamment motivés par la conquête de l'espace. Cependant pour des raisons techniques et économiques, cette nouvelle source d'énergie a tardé à s'imposer en dehors du domaine spatial et ce n'est qu'au cours des années 1980, que la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et est même devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel (montres, calculatrices,...). Depuis les années 1990, et pour les raisons évoquées auparavant, l'énergie photovoltaïque a suscité un intérêt grandissant et de nombreuses avancées technologiques [19].

II.2. Les avantages du photovoltaïque

Le photovoltaïque possède de nombreuses qualités qui présente autant d'avantages :

- La source d'énergie « le soleil » est gratuite, omniprésente, et inépuisable [20].
- La conversion directe des radiations solaires en électricité c'est-à-dire pas de hautes températures, Pas de pollution [21].
- Basé sur un phénomène physique imperceptible, son fonctionnement n'occasionne strictement aucune nuisance ou impact sur l'environnement immédiat : ni mouvement, ni bruit, ni odeur, ni émission quelconque donc le risque de panne ou d'accident est donc quasiment nul et le niveau de fiabilité très élevé.

Les caractéristiques physiques des matériaux photovoltaïques ne s'altèrent pas dans le temps (sauf pour les matériaux organiques), et la baisse de rendement des panneaux, que l'on peut éventuellement observer et due essentiellement aux imperfections mineures de fabrication, est très lente et très limitée, ce qui permet aux fabricants d'apporter une garantie de rendement pouvant aller jusqu'à 30 ans.

L'alternance jour/nuit étant un phénomène universel, même si sa répartition temporelle peut être très différente selon les lieux, le photovoltaïque peut fonctionner en tout point du globe terrestre avec un écart de potentiel annuel allant de 1 à 4 en entre le moins bon et le meilleur site.

La quantité d'énergie récupérable en un lieu donné est directement proportionnelle à la surface exposée à la lumière du soleil, ce qui confère au photovoltaïque un caractère intrinsèquement modulaire et flexible

Toutes ces qualités dont le photovoltaïque dispose fait que ses domaines d'application sont extrêmement divers et peuvent répondre à une grande variété de besoins dans toutes sortes de situations, d'autant plus que les différentes technologies de fabrication des modules qui sont aujourd'hui disponibles et qui le seront demain grâce aux nombreux axes recherche de l'industrie permettent d'adapter le système photovoltaïque aux caractéristiques du lieu et à l'utilisation prévue de l'énergie produite.

II.3 Cellule photovoltaïque

La cellule PV, aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui transforme en énergie électrique l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie inépuisable, le soleil. Elle exploite les propriétés des matériaux semi-conducteurs.

II.3.1 Structure de cellule photovoltaïque

La figure (II.1) ci-dessous montre un schéma simplifié d'une cellule photovoltaïque typique car l'architecture des dispositifs photovoltaïques modernes se révèle particulièrement complexe. La cellule photovoltaïque sera donc une plaquette du matériau semi-conducteur; où la jonction PN représente le cœur de la cellule photovoltaïque; elle représente le vrai générateur dans le dispositif.

Les contacts métalliques en face avant et en face arrière, constituent la structure de cheminement permettant de récupérer les porteurs photogénérés, pour cela, deux électrodes sont élaborées sur la plaquette du semi-conducteur, l'une qui recouvre la totalité de la face arrière pour assurer le contacte avec la zone p, et l'autre en forme de grille sur la face avant, la géométrie de cette grille étant un compromis entre une faible occultation du rayonnement et un bon contact électrique avec la zone n [24].

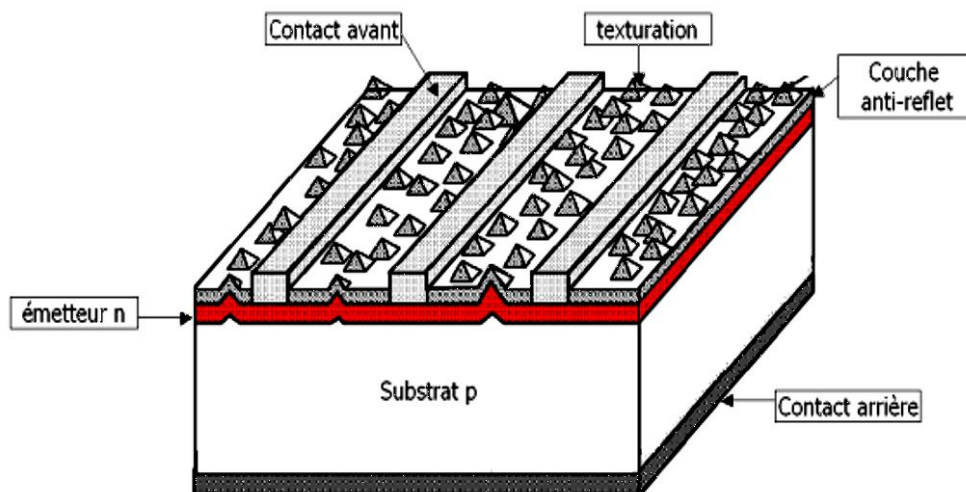


Figure II.1. Schéma simplifié illustratif d'une cellule solaire. [23]

Les cellules solaires sont recouvertes d'une couche antireflet qui protège la cellule et réduit les pertes par réflexion. C'est une couche qui donne aux cellules solaires leur aspect bleu foncé.

Dans la cellule à structure PIN, on insère une couche isolante entre les deux couches semi conductrices de type p et de type n de la jonction PN. Ceci permet d'obtenir et de contrôler dans la zone isolante un champ électrique de contact maximal et constant qui transforme cette zone en ZCE, ce qui permet une meilleure séparation des charges dans cette zone et leur accélération vers leurs électrodes respectives. L'avantage de ces structures PIN est donc l'augmentation de la zone de charge d'espace qui participe à la photo génération. Il en résulte des longueurs de diffusion plus grandes que celles à simple jonction PN.

Ceci a pour objectif d'accroître le nombre de porteurs photo-crés et de réduire leurs recombinaisons au niveau de la ZCE [24].

II.4. Principe de Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque à structure PIN

II.4.1 Généralités sur le fonctionnement d'une cellule solaire PIN

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque est illustré sur la figure (II.2), qui représente le fonctionnement d'une jonction PIN où la zone intrinsèque est une région dépourvue de porteurs libres qui se comporte comme une zone intrinsèque. Les photons incidents $h\nu$ créent des porteurs dans chacune des régions P, I, N, et leur comportement diffère suivant la région de la jonction où ils sont créés.

Dans les régions électriquement neutres P et N, les photoporteurs minoritaires diffusent, ceux qui atteignent la zone de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique, dirigé de la partie chargée positivement à la partie chargée négativement (voir figure II.2), vers la région où ils deviennent majoritaires. Il y a donc une séparation des porteurs dans la zone intrinsèque vers les régions P et N. Ces photo-porteurs contribuent donc au courant par leur diffusion, ils créent un photocourant de diffusion.

Dans la zone intrinsèque, les paires électrons-trous créées par les photons sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région type N et le trou vers la région de type P. Ces porteurs donnent naissance à un photocourant de génération [25].

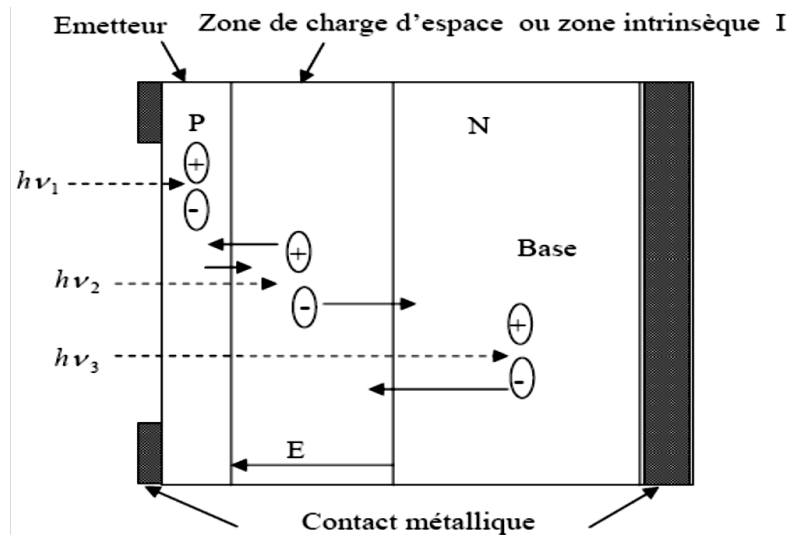


Figure. II.2. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire dont la structure est une jonction PIN [22]

Sur cette figure, on constate l'existence de trois régions : les régions P et N séparées par une large zone intrinsèque, symbolisée par la lettre I.

II.4.2 Epaisseurs des zones de charge d'espace et champ électrique dans une structure PIN

La structure de la cellule peut être schématisée par trois régions P, I et N (figure II.3). La zone intrinsèque s'étend entre les abscisses x_0 et x_i , alors que les zones de charge d'espace coté P et coté N s'étalent respectivement entre x_p et x_0 , et x_i et x_n . La longueur totale de la cellule est L.

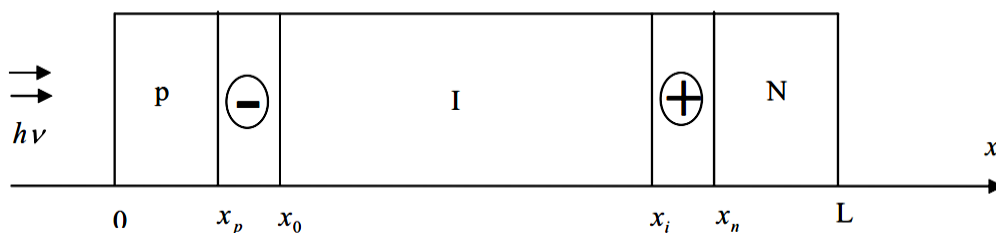


Figure. II.3 Schéma d'une structure PIN

La densité de charge s'écrit pour la structure PIN (d'après la figure II.3) :

$$\rho(x) = \begin{cases} -eN_a \text{ pour } x_p \leq x \leq x_0 \\ en_i = |-ep_i| \text{ dans la région intrinsèque } x_0 \leq x \leq x_i \\ eN_d \text{ pour } x_i \leq x \leq x_n \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

enfin : $\rho(x) = 0$ pour $x \leq x_p$ et $x \geq x_n$

Vu que la densité de charges se répartit de façon différente coté P et coté N de la jonction, il serait avantageux de considérer l'étude de cette structure PIN en deux parties : une structure PI et une structure IN, où chacune d'elle sera considérée comme une jonction avec la présence d'une zone de charge d'espace. La jonction P-I peut être considérée comme une jonction PN où $N_d = n_i$ et la jonction I-N peut être considérée comme une jonction PN, où nous avons $N_d = n_i = p_i$.

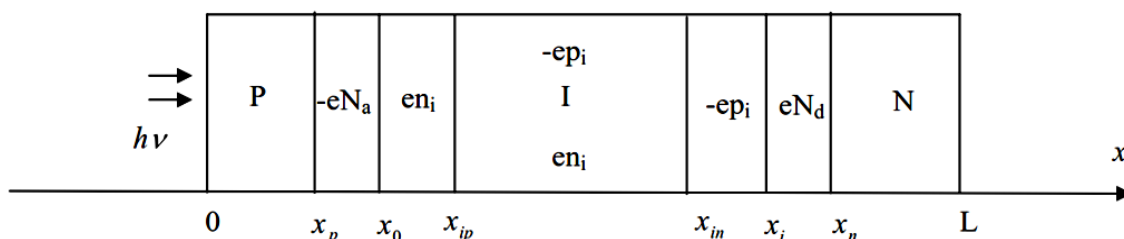


Figure II.4. Zone de charge d'espace de la jonction PI et IN

D'après la théorie classique de la jonction PN, donnant l'épaisseur x_n , en remplaçant N_d par n_i dans la zone intrinsèque, et puisque la zone I est considérée comme région N, nous obtenons :

$$x_{ip} - x_0 = \left(\frac{2\varepsilon}{e} V_{dp} \left(\frac{N_a}{n_i(N_a+n_i)} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.2})$$

V_{dp} est la tension de diffusion de la jonction P-I, qui est la tension aux bord de la ZCE de cette jonction, avec $V_{dp} = U_T \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \approx U_T \ln \frac{N_a}{n_i^2}$ avec $U_T = \frac{KT}{q}$ et $N_d = n_i$

De même, pour la jonction IN nous obtenons:

$$x_i - x_{in} = \left(\frac{2\varepsilon}{e} V_{dn} \left(\frac{N_d}{p_i(p_i + N_d)} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.3})$$

Où V_{dn} est la tension de diffusion de la jonction IN.

$$\text{Donc} \quad V_{dn} = U_T \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \approx U_T \ln \frac{N_d}{n_i^2} \quad (\text{II.4})$$

Concernant le champ électrique dans les deux zones de charge d'espace étalées dans les zones P et N, la théorie classique de la jonction PN prévoit qu'il a une allure linéaire à l'intérieur des deux parties de la ZCE, et il est nul à l'extérieur de cette zone, c'est-à-dire dans les régions restantes quasi-neutres P et N.

Il est bien connu que la zone de charge d'espace de la cellule doit avoir une valeur importante pour que le photo courant soit essentiellement dû à la photo génération de porteurs dans cette zone. Cette épaisseur doit être artificiellement augmentée pour optimiser les performances de la cellule en intercalant une région intrinsèque entre les zones P et N. Ainsi cette condition devrait garantir qu'un champ électrique important puisse exister dans toute la région intrinsèque.

Vu que c'est le champ électrique dans la ZCE qui permet le transport les porteurs générés, il est nécessaire que ce champ soit intense. Pour obtenir un champ intense et non nul dans la région I, il faut tout d'abord considérer que dans la pratique, les cellules solaires sont conçues avec une région intrinsèque beaucoup plus épaisse que les régions P et N.

D'après la figure II.4, en appliquant l'équation de neutralité dans la ZCE d'une jonction PN on a: $(x_0 - x_p)N_a = (x_{ip} - x_0)n_i$ Pour le coté IP

$$\text{Soit} \quad (x_0 - x_p) = \frac{n_i}{N_a} (x_{ip} - x_0)$$

$$(x_{ip} - x_0) = \frac{N_a}{n_i} (x_0 - x_p)$$

Avec $N_a \gg n_i$

$$\text{Donc } x_{ip} \gg x_0 \quad (\text{II.5 .a})$$

De la même manière on peut arriver à $x_i \gg x_{in}$ pour le coté IN.

$$\text{Donc } x_{in} \gg x_i \quad (\text{II.5 .b})$$

Tenant compte de ces inégalités (II.5.a et II.5.b), et afin d'étaler au maximum la région I, nous pouvons supposer que les points x_{ip} et x_{in} peuvent se projeter sur des abscisses $x_{ip} < L$ et $x_{in} < 0$ (les limites réelles de la cellule). Pour arriver à cette condition, nous devons considérer que : $x_{ip} < L$ et $x_{in} < 0$

Cette condition permet d'élargir l'épaisseur de la zone intrinsèque du point de vue théorique. Le calcul du champ $E_i(x)$ dans la zone intrinsèque est la somme des champs résultants dans cette zone.

Pour $x_n \leq 0 \leq x \leq x_p$

$$E_p(x) = -\frac{ep_i}{\varepsilon}(x - x_{in}) \quad (\text{II.6})$$

Pour $x_n \leq x \leq L \leq x_{ip}$

$$E_n(x) = -\frac{en_i}{\varepsilon}(x - x_{ip}) \quad (\text{II.7})$$

Avec $n_i = p_i$

$$\begin{aligned} E_p(x) + E_n(x) &= \frac{ep_i}{\varepsilon}[x - x_{ip} - x + x_{in}] = \frac{en_i}{\varepsilon}(x_{in} - x_{ip}) \\ E_p(x) + E_n(x) &= -\frac{en_i}{\varepsilon}(x_{ip} - x_{in}) = E_i(x) \end{aligned} \quad (\text{II.8})$$

Finalement :

$$E_i(x) = -\frac{en_i}{\varepsilon}(x_{ip} - x_{in}) \text{ pour } x_0 \leq x \leq x_i \quad (\text{II.9})$$

Cette relation montre que le champ électrique dans la zone intrinsèque est constant, et qu'il est d'autant plus intense que $(x_{ip} - x_{in})$ est élevé, ce qui justifie un élargissement important de la zone intrinsèque de la cellule solaire.

II.5. Comportement de la cellule photovoltaïque éclairée

II.5.1 Schéma équivalent de la cellule idéale

Dans notre cas, le courant traversant la cellule non éclairée peut se ramener à la formulation suivante donnée par la théorie de la jonction PN [8] :

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{eV}{nKT}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.10})$$

Où I_s est le courant de saturation et n est un facteur empirique dit facteur d'idéalité ou de qualité de la diode.

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique de la cellule idéale (figure.II.5)

Le schéma équivalent simplifié de la cellule idéale est représenté ci-dessous :

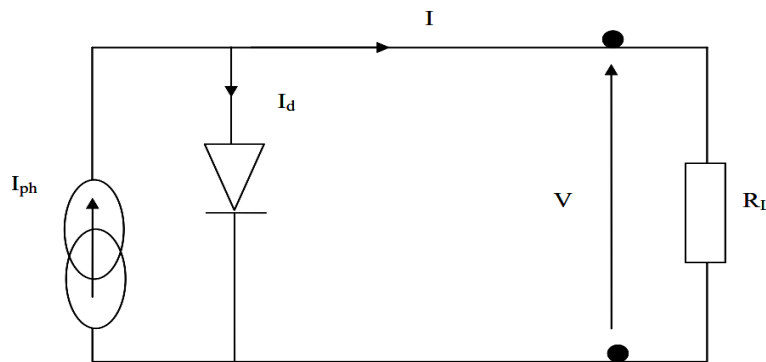


Figure II.5. Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale

L'expression du courant qui traverse la cellule éclairée est alors [26]:

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{eV}{nKT}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.11})$$

Où I_{ph} représente le photocourant généré.

Ainsi, nous pouvons déduire la tension V à ces bornes :

$$V = nU_t \ln\left(\frac{I_{ph} + I_s - I}{I_s}\right) \quad (\text{II.12})$$

$U_t = KT / e$ est le potentiel thermodynamique, où K est la constante de Boltzmann.

II.5.2 Photocourant [27]

Le photocourant I_{ph} d'une photopile solaire définit la quantité des paires électron-trou créé traversant la jonction sans recombinaison.

Le photocourant résultant est la somme de trois composantes :

- Le courant de diffusion des photoélectrons de la région de type P.
- Le courant de photogénération dans la zone intrinsèque.
- Le courant de diffusion des phototrous de la région de type N.

Le photocourant total est la somme de ces trois composantes, qui est constant le long de la cellule. Le calcul du photocourant est obtenu en sommant en $x = x_n$ l'ensemble de ces composantes (figure II.6).

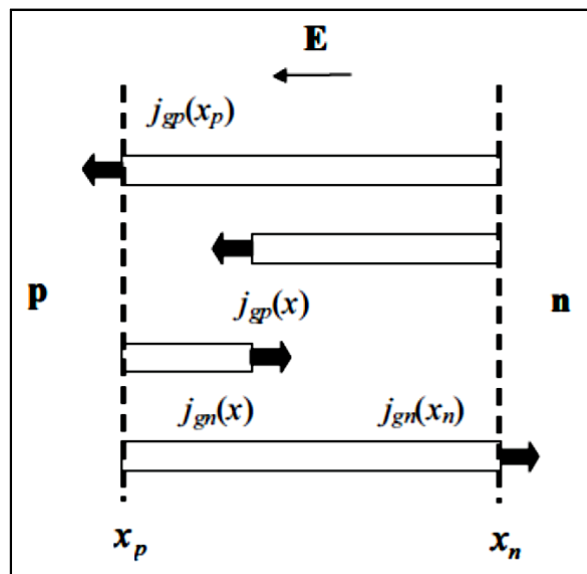


figure II.6. Les courants dans une cellule PIN

Les paires électrons-trous sont créés suite à l'absorption d'un flux de photon incident. Le taux de génération optique g est égal à :

$$g = \Phi \alpha e^{-\alpha x} \quad (\text{II.13})$$

Avec Φ le flux entrant de photons d'énergie supérieure au gap, à $x = 0$ et α le coefficient d'absorption.

❖ Courant de diffusion d'électrons dans la zone P

Dans la zone P, les électrons créés (minoritaires) diffusent vers la zone intrinsèque. En négligeant le champ électrique dans cette zone, l'équation de continuité des électrons en excès Δn s'écrit :

$$\frac{d^2\Delta n}{dx^2} - \frac{\Delta n}{L_n^2} = -\frac{\Phi\alpha\tau_n}{L_n^2} e^{-\alpha x} \quad (\text{II.14})$$

Avec L_n la longueur de diffusion des électrons et τ_n leur durée de vie.

En supposant que tous les électrons ayant atteint la zone intrinsèque soient propulsés vers la droite par le champ électrique E , et que la recombinaison en surface à $x = 0$ soit égale à s_0 , on obtient comme conditions aux limites pour l'équation (II.14) :

$$\Delta n(x = x_p) = 0 \text{ et } s_0\Delta n(x = 0) = D_n \left. \frac{d\Delta n}{dx} \right|_{x=0} \quad (\text{II.15})$$

On obtient l'expression de Δn , mettant en jeu les constantes d'intégration A_n et B_n calculées avec les conditions aux limites (II.15) :

$$\Delta n = A_n e^{(-x/L_n)} + B_n e^{(x/L_n)} + \frac{\Phi\alpha\tau_n}{1-\alpha^2 L_n^2} e^{-\alpha x} \quad (\text{II.16})$$

Le courant de diffusion d'électrons en $x = x_p$ s'exprime par :

$$J_{ndiff}(x_p) = qD_n \left. \frac{d\Delta n}{dx} \right|_{x_p} = qD_n \left[\frac{A_n}{L_n} e^{(-x_p/L_n)} + \frac{B_n}{L_n} e^{(x_p/L_n)} - \frac{\Phi\alpha\tau_n}{1-\alpha^2 L_n^2} e^{-\alpha x_p} \right] \quad (\text{II.17})$$

En négligeant les recombinaisons dans zone intrinsèque, tous les électrons arrivant en $x = x_p$ se retrouvent en $x = x_n$, conduisant ainsi à : $J_{ndiff}(X_n) = J_{ndiff}(X_p)$.

❖ Courant de diffusion d'électrons dans la zone N

Dans la zone N, les trous créés (minoritaires) diffusent vers la zone intrinsèque. En négligeant le champ électrique dans cette zone, l'équation de continuité des trous en excès Δp s'écrit :

$$\frac{d^2\Delta p}{dx^2} - \frac{\Delta p}{L_p^2} = \frac{\alpha\tau_p}{L_p^2} e^{-\alpha x} \quad (\text{II.18})$$

avec L_p la longueur de diffusion des trous et Δp leur durée de vie.

Les trous atteignant la zone intrinsèque sont évacués vers la gauche, et on considère que L (longueur de la structure) est suffisamment grand devant L_n et $1/\alpha$. Les conditions aux limites sont donc :

$$\Delta p(x = L \rightarrow \infty) = 0 \text{ et } \Delta p(x = L) = 0 \quad (\text{II.19})$$

En utilisant ces conditions aux limites, on obtient :

$$\Delta p = \frac{\Phi \tau_p}{1 - \alpha^2 L_p} e^{-\alpha x_n} (e^{-\alpha(x-x_n)} - |e^{-(x-x_n)/L_p}|) \quad (\text{II.20})$$

Le courant de diffusion de trous en $x = x_n$ s'exprime par :

$$J_{pdiff}(x_n) = -q D_p \left. \frac{d\Delta p}{dx} \right|_{x_n} = -q \Phi \frac{\alpha L_p}{1 + \alpha L_p} e^{-\alpha x} \quad (\text{II.21})$$

Courant de génération dans la zone Intrinsèque I

En négligeant les recombinaisons dans zone intrinsèque, l'équation de continuité en régime stationnaire pour le courant de génération des électrons s'écrit :

$$\frac{1}{q} \frac{dj_{gn}}{dx} + g(x) = 0 \quad (\text{II.22})$$

L'intégration de (II 21) conduit à :

$$j_{gn}(x_n) - j_{gp}(x_p) = -q \int_{x_p}^{x_n} g(x) dx = -q \int_{x_p}^{x_n} \Phi \alpha e^{-\alpha x} dx \quad (\text{II.23})$$

Le courant de génération d'électrons est créé depuis x_p jusqu'à X_n , $j_{gp}(x_p)$ est donc nul.

On obtient après intégration :

$$j_{gn}(x_n) = -q \Phi (e^{-\alpha x_p} - e^{-\alpha x_n}) \quad (\text{II.24})$$

On peut calculer de façon similaire le courant de génération de trou, créé depuis x_n jusqu'à x_p . Ce courant est nul en $x = x_n$ et le courant de génération total en $x = x_n$ est donc égal au courant de génération d'électrons :

$$j_g(x_n) = j_{gn}(x_n) \quad (\text{II.25})$$

❖ Photocourant total

Le photocourant j_{ph} total est la somme des courants décrits par les expressions (II.17), (II.21), (II.24) et (II.25). La zone P est en pratique de faible épaisseur de sorte que le nombre de paires électron-trou créées dans la zone de charge d'espace soit important. On peut négliger dans ce cas le courant de diffusion d'électrons (II.17) et considérer que $x_p \approx 0$ et $x_n \approx W_i$ (largeur de la zone intrinsèque). On obtient finalement :

$$j_{ph} = j_g(x_n) + j_{pdiff}(x_n) = -q\Phi \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha_p L_p} e^{-\alpha x} \right) \quad (\text{II.26})$$

Le photocourant le plus important est obtenu en réalisant la condition $\alpha W_i \gg 1$, on obtient ainsi $j_{ph} \approx -q\Phi$. Ce courant maximum correspond à une conversion et une collecte de tous les photons d'énergie supérieure au gap pénétrant la cellule.

II.6. Caractéristique (I-V) d'une cellule solaire

Sous obscurité la cellule fonctionne comme une diode, elle a la même caractéristique. Sous éclaircissement la caractéristique I(V) de la cellule ne passe plus par l'origine des coordonnées et commence à décaler vers le bas et plus le photocourant est important plus le décalage est grand (I est grand), dans la pratique, on mesure soit le photocourant débité par la cellule, soit le photovoltage qui apparaît aux bornes de la cellule. La caractéristique I(V) est donnée par l'expression II.11 :

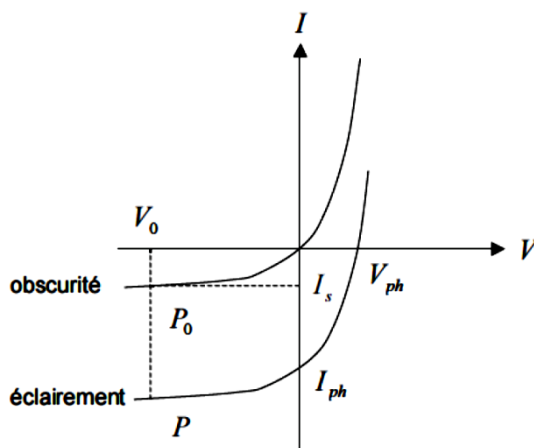


Figure. II.7. Caractéristique courant/ tension d'une cellule solaire

La cellule photovoltaïque possède une caractéristique I(V) non linéaire (figure- II.7). La caractéristique balaie 3 quadrants sur les 4 existants. Dans le 3ème quadrant, le système fonctionne en récepteur dont la résistance varie fortement avec l'éclaircissement, c'est la

photorésistance. Dans le 4^{ème} quadrant, le système fonctionne en générateur dont le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairement et dont la tension à vide est celle de la diode en polarisation directe (0.5 à 0.8 Volts pour Si) c'est la cellule photovoltaïque à jonction PN, dans cette région le produit VI est négatif (figure II.7) la cellule fournit de l'énergie [27]. Si on se limite à cette région active et si on compte positivement le courant inverse, la figure II.7 se ramène à la figure II.8.

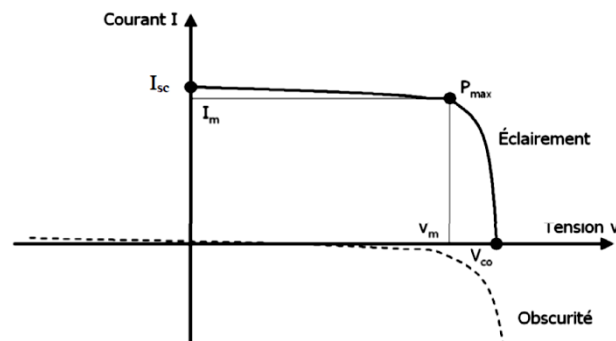


Figure. II.8. Caractéristique I-V dans le nouveau repère.

II.7. Paramètres d'une cellule solaire [28]

Un ensemble de paramètres physiques, technologiques et photovoltaïques sont à connaître ou à calculer pour élaborer ou caractériser une cellule solaire.

II.7.1. Paramètres physiques

Les paramètres physiques sont : le gap énergétique, la concentration intrinsèque, les masses effectives, la durée de vie des porteurs, la mobilité des porteurs de charges, la constante de diffusion, le coefficient d'absorption et le coefficient de réflexion.

❖ Le coefficient d'absorption

Le premier phénomène à optimiser est l'absorption de la partie la plus intense du spectre solaire par un matériau approprié, ayant pour résultat la libération d'électrons. Logiquement on pense que le matériau idéal doit être choisi parmi les matériaux à petits "gap" afin d'absorber tous les photons solaires y compris les photons infrarouges dont l'énergie est inférieure à 1 eV.

Mais ce choix abaisse la valeur de la tension de sortie de la photopile qui est égale à E_g/q . En réalité, elle est directement proportionnelle au "gap" du matériau ; en tous cas elle ne peut lui être supérieure. Comme la puissance du photo-générateur est au plus égale au produit du courant par la tension, un compromis sur la valeur du "gap" est donc inévitable. Il est en général compris entre 1 et 1.5 eV et ne dépend que du matériau utilisé. A cause de nombreuses sources de pertes, dans la réalité, la tension de circuit ouvert d'une photopile dépasse rarement la valeur de la moitié du "gap". On conçoit bien que le système idéal à deux niveaux n'est pas adapté à un spectre continu de longueurs d'ondes comme le spectre solaire.

❖ Le coefficient de réflexion

Dans le cas de la photopile idéale on fera l'hypothèse que 100 % du rayonnement pénètre dans le matériau, sachant qu'en réalité il faudra tenir compte de la réflexion sur la face avant et de l'absorption du verre protecteur, de la réflexion due au changement d'indice, et de la perte de surface active due à l'ombre portée par les grilles métalliques de collecte.

II.7.2. Paramètres photovoltaïques

La caractéristique courante tension qui relie les trois grandeurs, I , I_{ph} et I_d (V) permet de déterminer quatre grandeurs caractéristiques principales du fonctionnement des cellules solaires : Le courant de court-circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{oc} , le facteur de forme FF, le rendement de conversion d'énergie η [13].

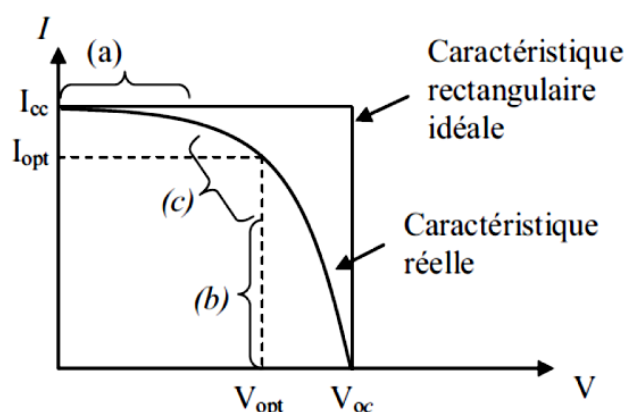


Figure II.9. Caractéristiques $I(V)$ et paramètres I_{cc} , V_{oc}

La caractéristique $I(V)$ de la figure II.9 se divise en trois parties : La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement, La

zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{co} , La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

❖ Le courant de court-circuit I_{CC}

Le courant de court-circuit exprimé en mA, est le courant qui circule dans la cellule sous éclairage et en court-circuitant les bornes de la cellule. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges et de la température.

❖ La tension en circuit ouvert V_{CO}

La tension de circuit ouvert exprimée en V est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

$$V_{CO} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_{CC}}{I_S} + 1 \right) \quad (\text{II.27})$$

❖ La puissance débitée

La puissance fournie par la pile est donnée par le produit $V.I$, de l'équation (II.11) on obtient :

$$P = V.I = V. \left[I_{ph} - I_S \left(\exp \left(\frac{eV}{nKT} \right) - 1 \right) \right] \quad (\text{II.28})$$

Cette puissance est maximum au point P_m (figure II.8) définie par $dP/dV = 0$, la puissance débitée est alors donnée par le produit $V_m \cdot I_m$ qui s'écrit :

$$P_m = V_m I_m \quad (\text{II.29})$$

❖ Le facteur de forme FF

Le paramètre FF est le facteur de remplissage ou facteur de forme, il mesure le caractère rectangulaire de la courbe $I(V)$. Il varie de 0,25 pour une cellule à faible rendement à 0,9 pour une cellule idéale. Le facteur de forme est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{V_{CO} I_{CC}} = \frac{V_m I_m}{V_{CO} I_{CC}} \quad (\text{II.30})$$

❖ Le rendement

La performance d'une cellule photovoltaïque se mesure par son rendement de conversion de la lumière du soleil en électricité. Le rendement, η (efficiency) des cellules PV 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 P_{in} .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{ff \times V_{oc} \times I_{cc}}{P_{in}} \quad (\text{II.31})$$

L'expression du rendement montre que les performances d'une photopile résultent directement des valeurs des trois paramètres I_{cc} , V_{co} et FF.

II.8. Conclusion

Ce chapitre s'est consacré au principe de la conversion photovoltaïque et l'étude de la cellule solaire à base d'une structure PIN, où on expose sa structure, son principe de fonctionnement, sa caractéristique courant-tension et les paramètres qui gouvernent son fonctionnement.

Chapitre 3

Simulation de la cellule PIN

III.1. Introduction

La simulation numérique des cellules solaires est un outil d'analyse et d'étude incontournable pour le développement de la technologie photovoltaïque, elle permet de prédire les comportements et les performances des cellules solaires avant leur fabrication.

Dans ce chapitre, nous allons exposer les résultats de la simulation d'une cellule solaire au silicium, à base d'une jonction PIN, en se basant essentiellement sur la modélisation du comportement électrique de la cellule, présentée au chapitre II précédent. Nous implantant un programme MATLAB sous forme d'un fichier script qui comprend différentes équations, du schéma équivalent, nécessaire pour tracer les courbes $I(V)$ et $P(V)$ de la cellule solaire, ainsi que son rendement.

Le but visé dans ce travail est d'arriver à optimiser les paramètres photoélectriques (densité de courant), géométriques (épaisseur de la région intrinsèque) et technologiques (concentration intrinsèque, dopage de l'émetteur et de la base) de la cellule afin d'obtenir le meilleur rendement possible.

III.2. Organigramme de calcul

L'organigramme de calcul établi dans le cadre de notre programmation est indiqué ci-dessous.

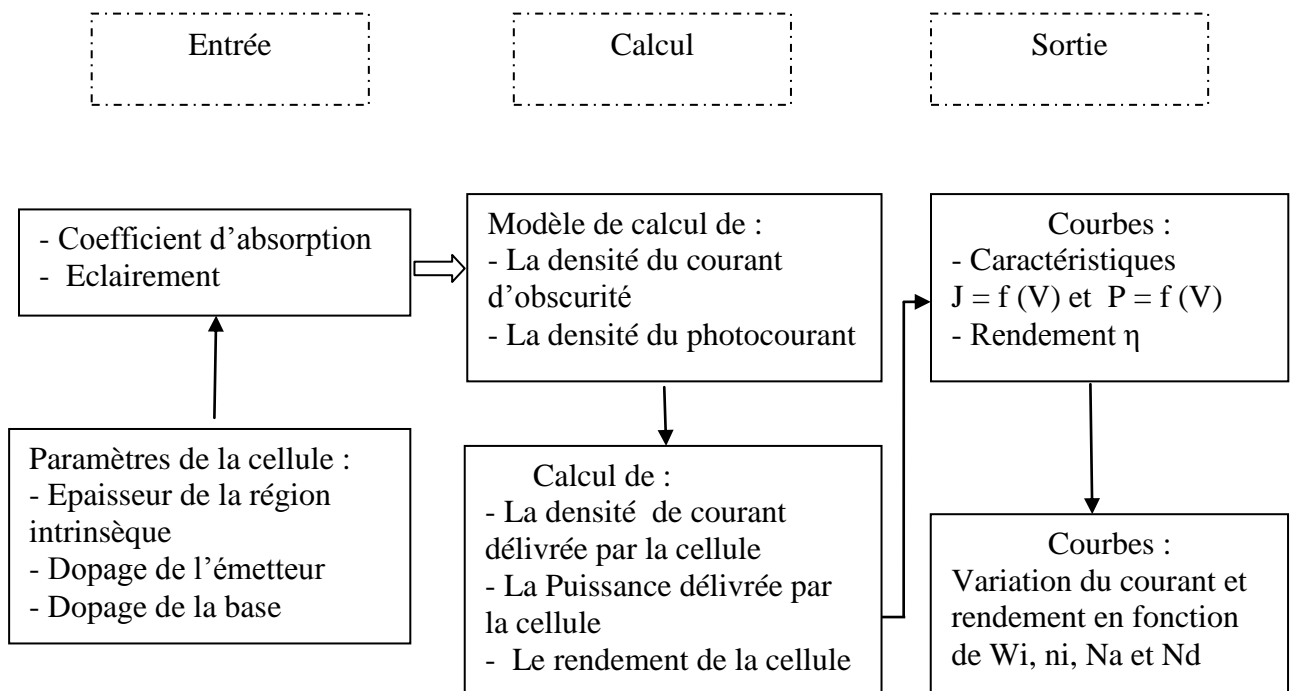


Figure III.1. Organigramme de calcul des caractéristiques $J = f(V)$ et $P = f(V)$ et du rendement η

L'organigramme permet le calcul de ce qui suit :

- Caractéristique $J = f(V)$ et $P = f(V)$ de la cellule PN.
- Caractéristique $J = f(V)$ et $P = f(V)$ de la cellule PIN.
- Variation de la densité de courant J_{pin} de la cellule PIN en fonction de l'épaisseur de la région intrinsèque $J_{pin} = f(W_i)$.
- Variation du rendement de la cellule PIN en fonction de l'épaisseur de la région intrinsèque $\eta = f(W_i)$.
- Variation de la densité de courant J_{pin} de la cellule PIN en fonction de la concentration intrinsèque de la région intrinsèque $J_{pin} = f(n_i)$.
- Variation du rendement de la cellule PIN en fonction de la concentration intrinsèque de la région intrinsèque $\eta = f(n_i)$.
- Variation de la densité de courant J_{pin} de la cellule PIN en fonction du dopage de l'émetteur $J_{pin} = f(N_a)$.
- Variation du rendement de la cellule PIN en fonction du dopage de l'émetteur $\eta = f(N_a)$.
- Variation de la densité de courant J_{pin} de la cellule PIN en fonction du dopage de la base $J_{pin} = f(N_d)$.
- Variation du rendement de la cellule PIN en fonction du dopage de la base $\eta = f(N_d)$.
- Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $J = f(V)$ et $P = f(V)$.
- Influence de la température sur les caractéristiques $J = f(V)$ et $P = f(V)$.

III.3 Résultats et discussion

Les caractéristiques des cellules photovoltaïques PN et PIN sont simulées sous les conditions standards de fonctionnement (éclairage : 1000 W m^{-2} , masse optique : AM 1.5, température de cellule : $25 \text{ }^\circ\text{C}$)

III.3.1. Caractéristiques $J(V)$ et $P(V)$ de la cellule PN

Nous avons tracé sur la figure (III.2) les caractéristiques $J(V)$ et $P(V)$ de la cellule solaire conventionnelle PN.

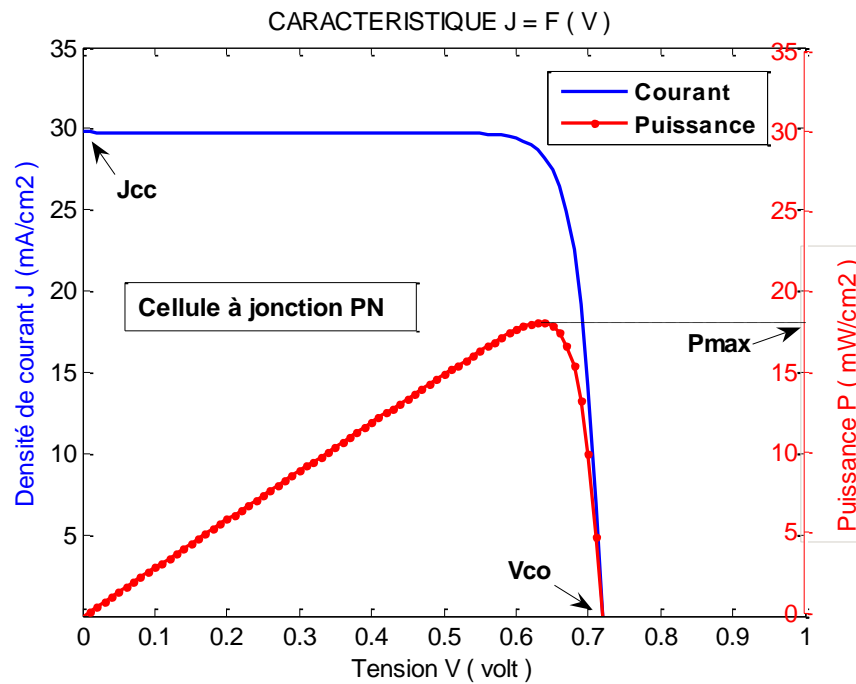


Figure III.2. Caractéristiques $J = f(V)$ et $P = f(V)$ de la cellule solaire PN

Nous constatons que l'allure de ces caractéristiques est en bon accord avec l'allure théorique de la figure II.18.

La courbe $J(V)$ est une exponentiel gaussienne sa forme proche de celle d'un rectangle. L'intensité électrique maximale est égale $J_{cc} = 30 \text{ mA/cm}^2$ et la tension maximale est égale $V_{co} = 0,725\text{V}$.

On a pu obtenir la caractéristique $P = f(V)$, qui met en évidence le point de fonctionnement, à puissance maximale pour certaines conditions d'éclairement. La puissance $P = J.V$ est nulle en court-circuit et en circuit-ouvert. Elle passe par un maximum quand on parcourt la caractéristique $J-V$ de $P_{\max} = 18 \text{ mW/cm}^2$ d'où un rendement de la conversion photovoltaïque de 18%.

III.3.2 Caractéristiques $J(V)$ et $P(V)$ de la cellule PIN

Les caractéristiques $J(V)$ et $P(V)$ de la cellule solaire PIN, sont présentées sur la (figure III.3).

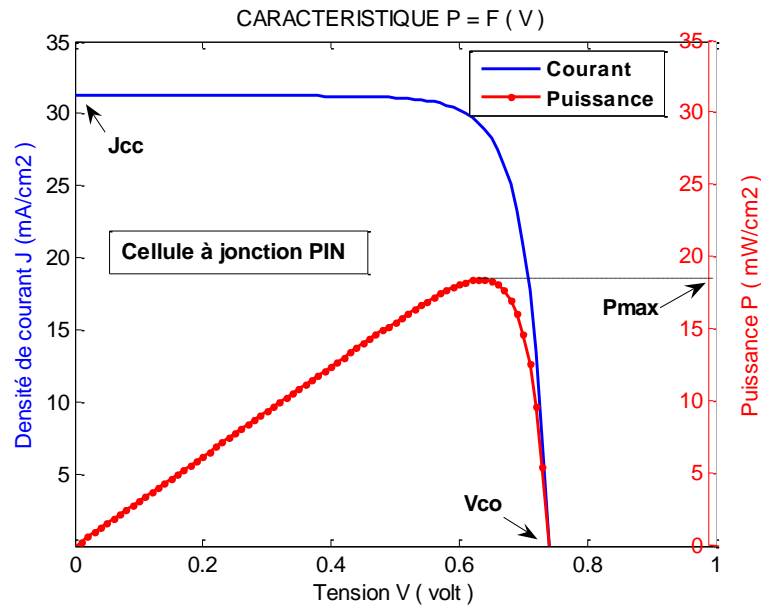


Figure III.3. Caractéristiques $J = f(V)$ et $P = f(V)$ de la cellule solaire PIN

Cette cellule a un courant de court-circuit $J_{cc} = 32,5$ mA/cm² et la tension maximale est égale $V_{co} = 0,75$ V. et une puissance maximale de $18,5$ mW/cm² d'où un rendement de la conversion photovoltaïque de 18,5%.

III.3.3. Comparaison entre les caractéristiques des cellules PN et PIN

Les courbes représentant les caractéristiques $J(V)$ et $P(V)$ des cellules solaires PN et PIN sont illustrées successivement par les figures III.3 et III.4.

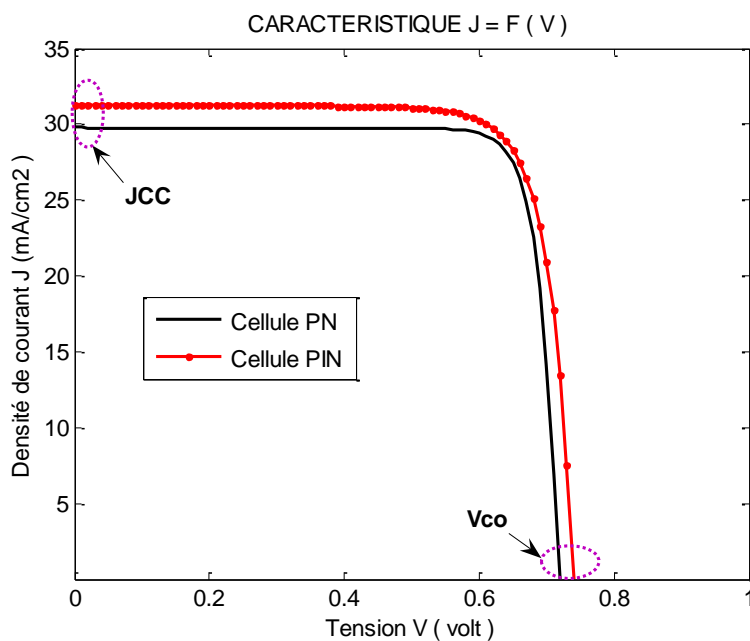


Figure III.4 Comparaison des caractéristiques $J(V)$ des cellules PN et PIN

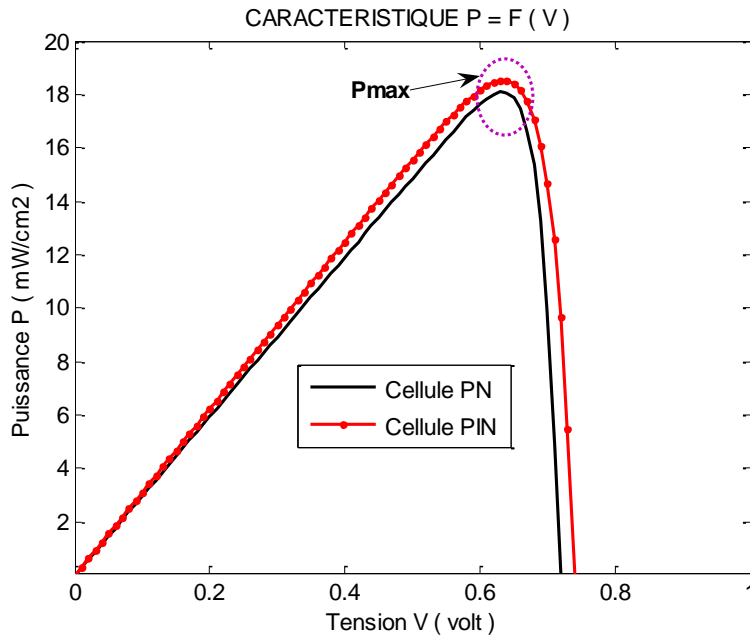


Figure III.5. Comparaison des caractéristiques $P(V)$ des cellules PN et PIN

D'après les figures III.4 et III.5, les performances électriques de la cellule photovoltaïque à jonction PIN sont supérieures à celles de la cellule à jonction PN. En effet Pour les deux cellules PN et PIN; dans la partie gauche des caractéristiques la courbe $J(V)$, le courant de court circuit J_{cc} est plus important pour une cellule PIN que pour une cellule PN, par contre pour la tension de circuit ouvert V_{co} il y a une légère variation au profit de la cellule à structure PIN. Chose qui a permet à cette dernière une meilleure puissance de fonctionnement.

On remarque que l'introduction d'une couche intrinsèque a fait augmenter le J_{cc} et le rendement. En faisant augmenter la zone intrinsèque, on augmente la zone de charge d'espace et le photocourant est essentiellement dû à la photogénération des porteurs dans cette zone, de plus les porteurs générés ont plus de chance d'arriver aux contacts pour être collectés avant qu'ils se recombinent, d'où l'augmentation du photocourant.

III.3.4. Effet de l'épaisseur de la zone intrinsèque

Dans ce paragraphe, nous allons étudier les variations des caractéristiques de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche intrinsèque W_i vu que cette couche joue un rôle très important dans les propriétés photovoltaïques de la cellule en particulier lors des phénomènes d'absorption.

Nous avons varié l'épaisseur W_i (μm) de la zone intrinsèque puis nous avons relevé les différents paramètres de la cellule PIN.

III.3.4.1 Effet de l'épaisseur de la zone intrinsèque sur $J(V)$ de la cellule PIN

Les courbes de la caractéristique $J(V)$ de la cellule solaire à structure PIN pour différentes valeurs d'épaisseur de la zone intrinsèque sont données par les figures ci-dessous :

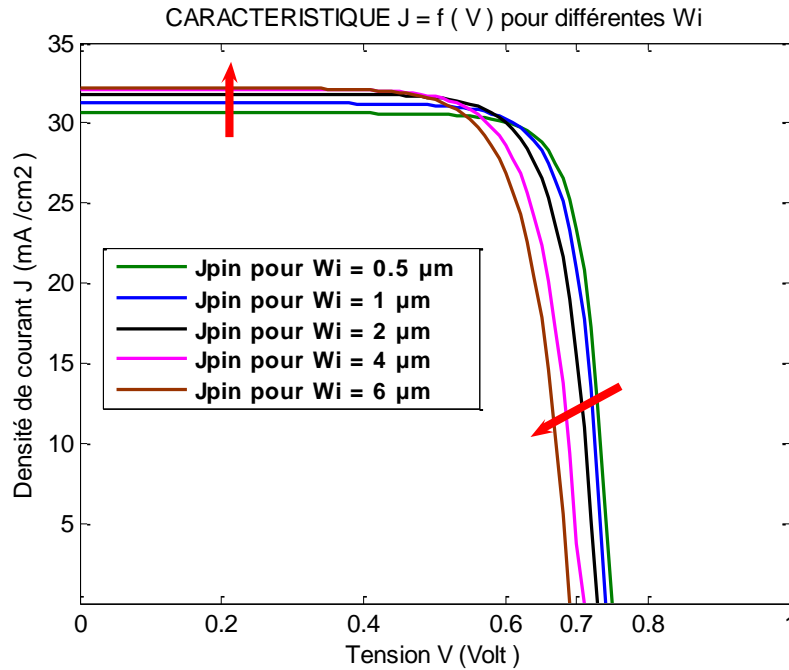


Figure III.6. Evolution de la caractéristique courant-tension $I(V)$ de la cellule PIN pour différentes épaisseurs de la zone intrinsèque

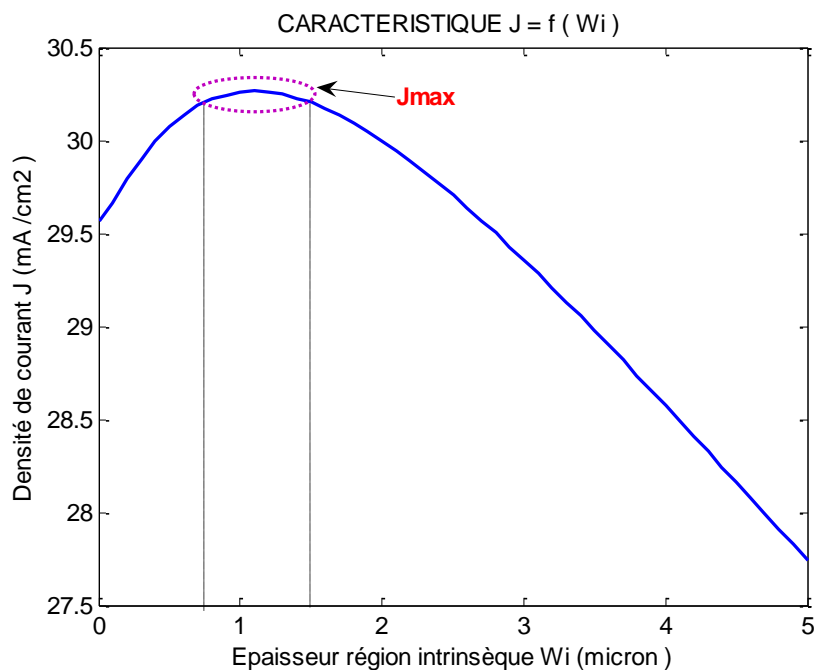


Figure III.7. Evolution de la densité de courant de la cellule PIN en fonction de l'épaisseur de la zone intrinsèque

D'un point de vue technologique, de meilleures performances des cellules PIN sont obtenues pour des valeurs $\alpha \cdot W_i \gg 1$. Où α est le coefficient d'absorption qui est constant, alors W_i , l'épaisseur de la région intrinsèque, doit être maximale.

La figure III.6 montre que le courant de court circuit J_{cc} croît avec l'augmentation de l'épaisseur W_i de la zone intrinsèque, il atteint la valeur de $32,17 \text{ mA/cm}^2$. Au contraire la tension de circuit ouvert diminue avec l'augmentation de l'épaisseur W_i de la zone intrinsèque, puisqu'elle dépend de la géométrie de la jonction considérée.

La figure III.7 montre que dès l'intégration d'une couche intrinsèque de $0,5 \mu\text{m}$ le courant débité par la cellule augmente. La zone intrinsèque prolonge la zone de charge d'espace de la cellule et donc augmente l'absorption des photons et la rapidité de la collecte du photocourant et donc l'augmentation de la densité du photocourant débité jusqu'à une valeur maximale de $30,27 \text{ mA/cm}^2$ pour W_i allant de $0,75 \mu\text{m}$ à $1,5 \mu\text{m}$ puis diminue pour les valeurs supérieures à cette épaisseur, du fait que l'augmentation de l'épaisseur de la zone intrinsèque augmente le risque de la recombinaison des photoporteurs.

III.3.4.2 Effet de l'épaisseur de la zone intrinsèque sur le rendement de la cellule PIN

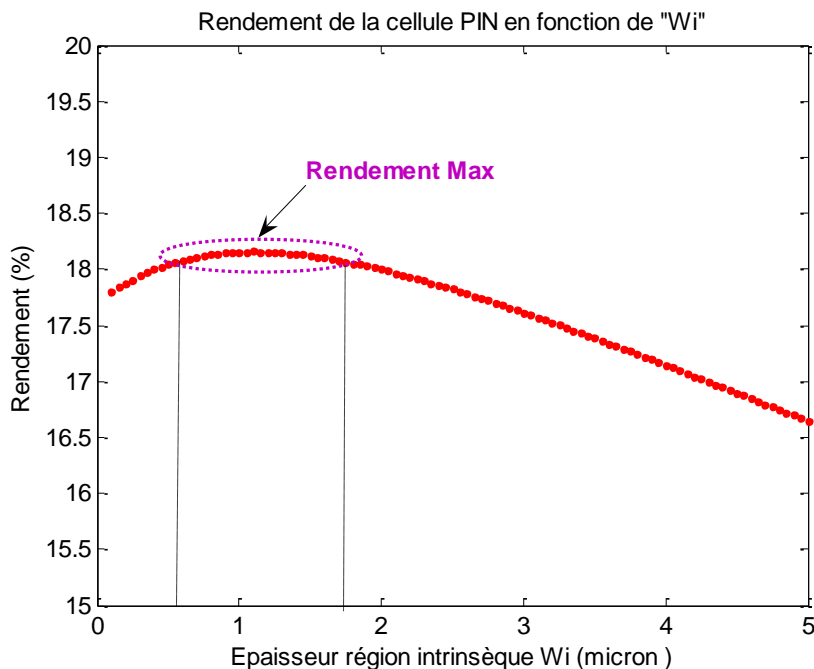


Figure III.8 : Représentation du rendement de la cellule solaire en fonction de W_i

D'après la figure III.8, nous remarquons que le rendement varie en fonction de l'épaisseur W_i . Il atteint une valeur maximale de 18,16 % pour une épaisseur de $W = 1,1 \mu\text{m}$.

Au-delà de $1,1\mu\text{m}$ le rendement diminue. Lorsque l'épaisseur W_i augmente, les électrons générés peuvent se recombiner avant d'atteindre les contacts et ne seront donc pas collectés d'où la diminution du rendement.

III.3.5 Effet de la concentration intrinsèque de la région intermédiaire

La variation de la densité de courant pour différents concentrations n_i de la région intrinsèque est représentée sur les figures III.9 et III.10.

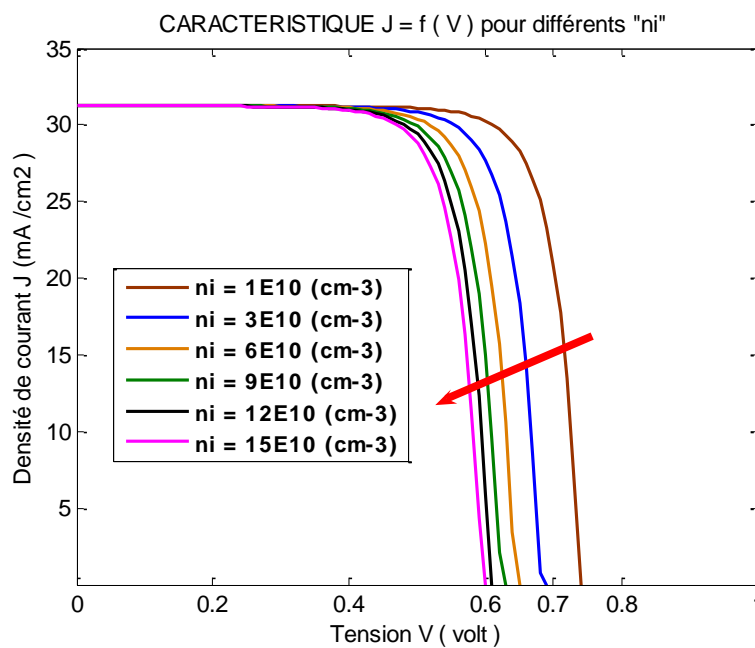


Figure III.9. Effet de la concentrations n_i de la région intrinsèque sur la caractéristique $J(V)$ de la cellule PIN

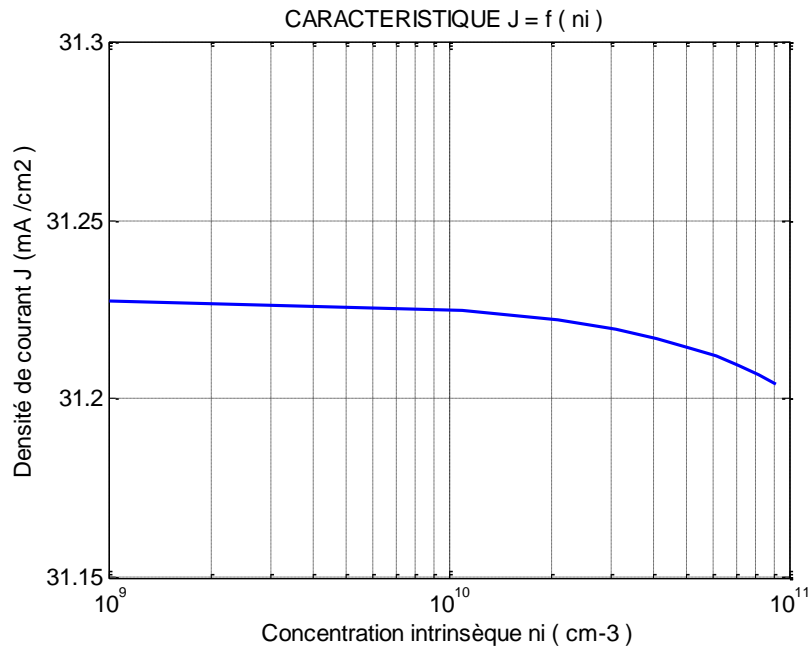


Figure III.10. Variation de la densité de courant J_{pin} en fonction de la concentration intrinsèque n_i

Dans notre simulation, nous avons fait varier cette concentration électronique de $1.10^{10} \text{ cm}^{-3}$ à $15.10^{10} \text{ cm}^{-3}$, pour l'épaisseur optimale ($W_i = 1,1 \mu\text{m}$) de la couche intrinsèque.

Sur la figure III.9, on remarque qu'une augmentation de la concentration électronique intrinsèque ne fait que diminuer V_{co} , cette diminution est due à l'augmentation de la densité de courant de saturation (J_{s1}) qui dépend de la concentration des porteurs minoritaires selon l'équation(1.36). Alors qu'elle n'a pas d'effet sur la densité de courant J_{pin} , sauf une légère diminution pour un concentration $n_i = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, ce qui est confirmé par la figure III.10 .

III.3.6. Influence du dopage de l'émetteur et de la base de la cellule PIN

Dans cette partie, nous nous intéressons aux caractéristiques technologiques des régions : zone P (émetteur) et zone N (base), car elles interviennent dans le comportement photovoltaïque de la cellule.

Dans ces régions, il s'agit de faire varier, le dopage et interpréter son effet sur les paramètres de la cellule.

III.3.6.1. Effet du dopage de l'émetteur sur les paramètres de la cellule PIN

Afin d'optimiser le dopage de la région émetteur, nous avons tracé la variation des différentes caractéristiques de sortie de la cellule en fonction du dopage de l'émetteur entre 10^{17} cm^{-3} et 10^{20} cm^{-3} , tout en tenant compte que l'émetteur est une région fortement dopée.

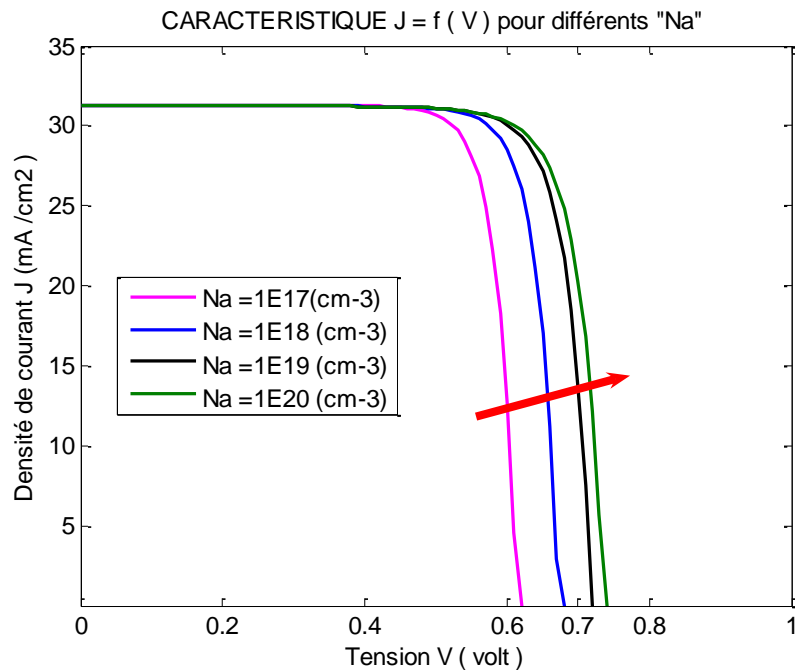


Figure III.11. Effet du dopage de l'émetteur sur la caractéristique $J(V)$ de la cellule PIN

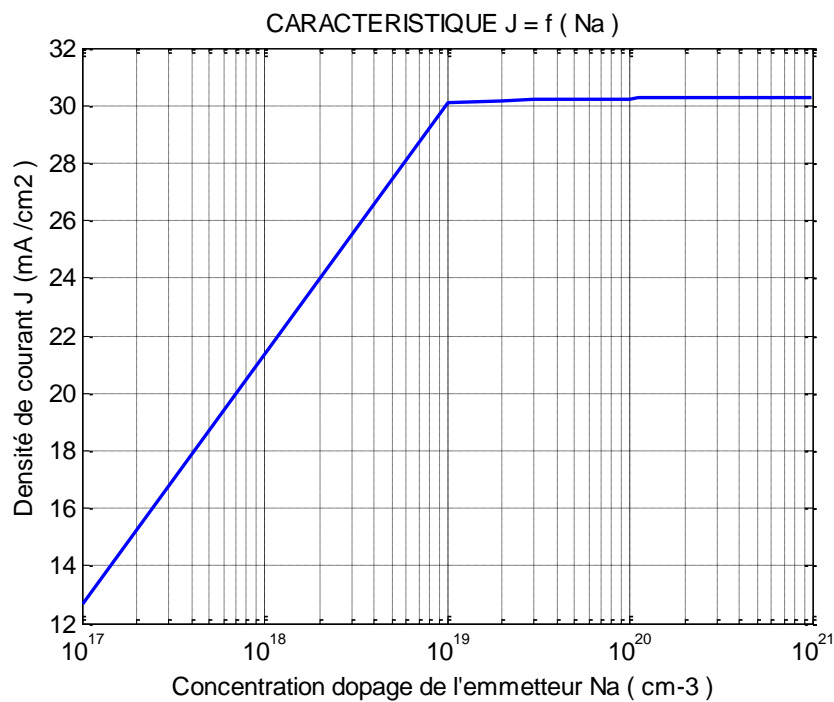


Figure III.12. Variation du courant J_{pin} en fonction du dopage de la couche émettrice

De la figure III.11 et la figure III.12 ; on constate que pour les faibles valeurs de dopage , entre $1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ et $1.10^{19} \text{ cm}^{-3}$, la variation de J_{cc} et V_{co} est considérable, Mais pour les fortes valeurs de dopage, à partir de $1.10^{19} \text{ cm}^{-3}$, les deux caractéristiques se stabilisent à leurs valeurs maximales et restent constantes ($J_{pin} = 30,27 \text{ mA/cm}^2$ pour $V_{co} = 0,75 \text{ V}$), cela revient à la faible épaisseur de l'émetteur.

De ce fait, l'utilisation d'un niveau de dopage de l'émetteur assez élevé ne dégrade pas les performances de la cellule, car les longueurs de diffusion des porteurs minoritaires sont supérieures à l'épaisseur de l'émetteur.

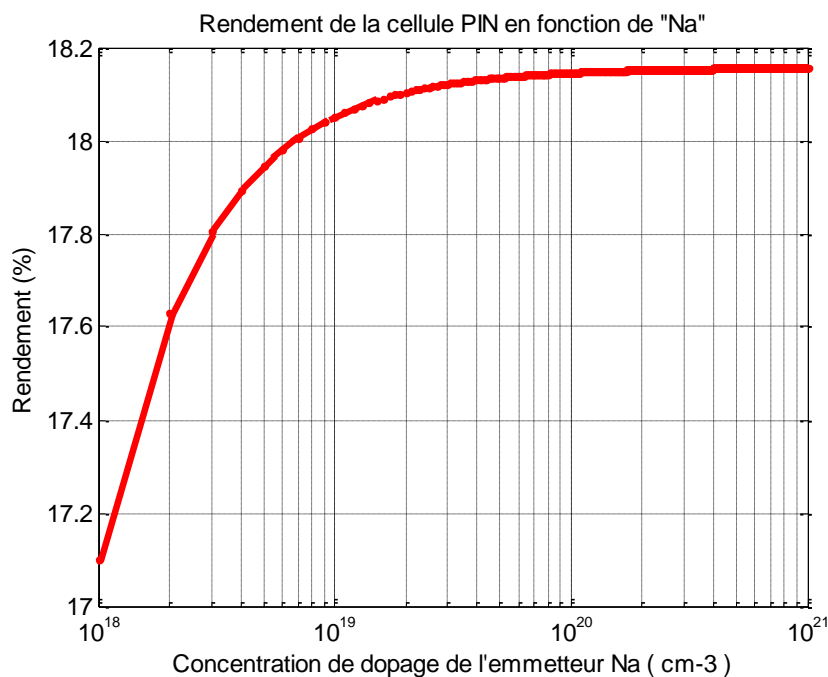


Figure III.13. Effet du dopage de l'émetteur sur le rendement de conversion

Sur la figure III.13, nous avons représenté l'évolution du rendement de la cellule avec le dopage ,qui a la même allure que celle du courant délivre. ainsi il atteint sa plus grande valeur pour des concentrations de dopages supérieures à 10^{20} cm^{-3} .

Nous pouvons conclure, à partir de cette étude sur l'influence du dopage de l'émetteur, que le choix d'un dopage $N_a=10^{20} \text{ cm}^{-3}$ pour une faible épaisseur de l'émetteur, qui donne un J_{pin} de $30,27 \text{ mA/cm}^2$ et un rendement de 18,16%.

III.3.6.2. Effet du dopage de la base sur les paramètres de la cellule PIN

Afin d'optimiser le dopage de la région base, nous avons tracé la variation des différentes caractéristiques de sortie de la cellule en fonction du dopage N_d de cette région, tout en tenant compte que la base est une région faiblement dopée.

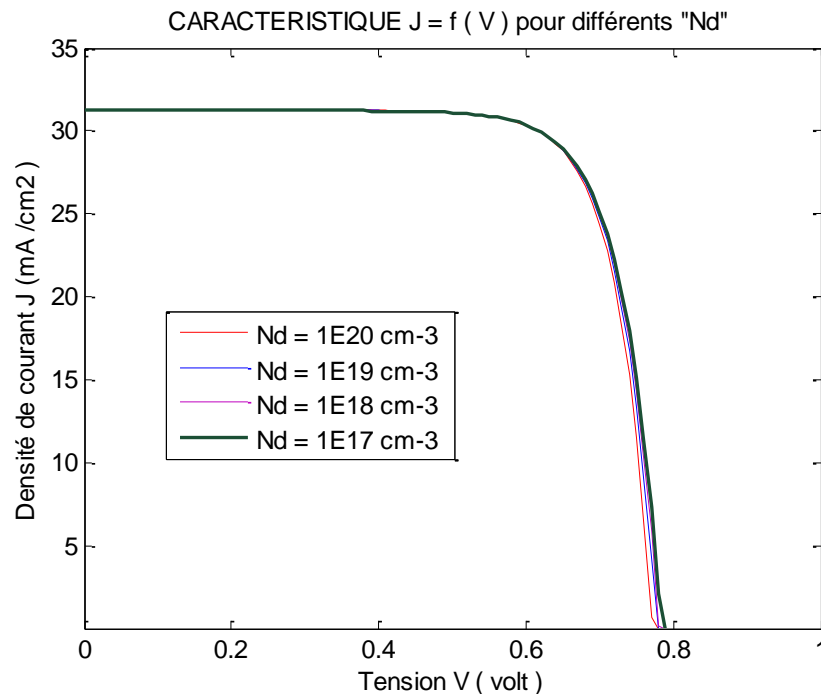


Figure III.14. Effet du dopage de la base sur la caractéristique $J(V)$ de la cellule PIN

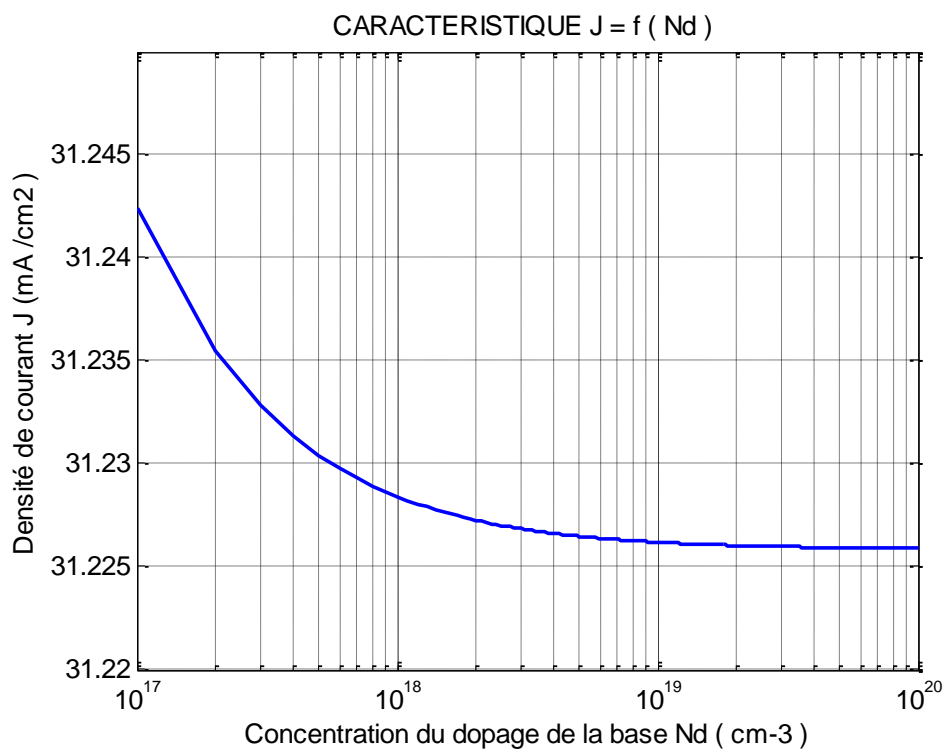


Figure III.15. Variation du courant J_{pin} en fonction du dopage de la base

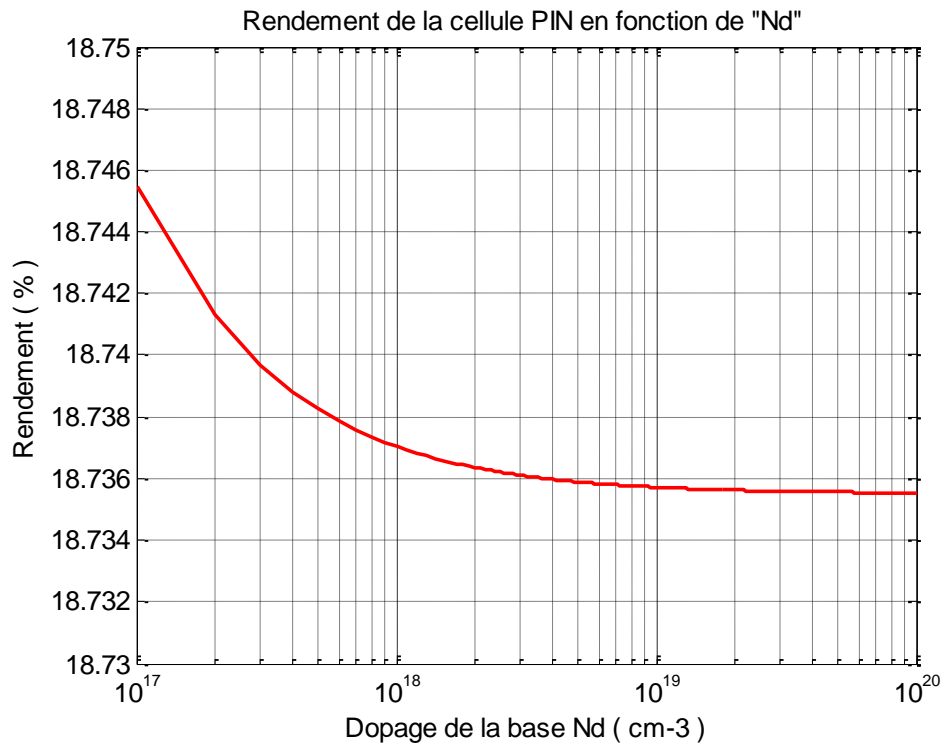


Figure III.16. Effet du dopage de la base sur le rendement de la cellule PIN

Les figures III.14, III.15 et III.16, représentent les différentes caractéristiques de sortie de la cellule, à savoir le courant délivré par la cellule J_{pin} , la tension en circuit ouvert V_{co} et le rendement η , en fonction du dopage N_d de la base. Ces figures indiquent que l'augmentation du dopage de la couche de type N (la base) n'a pas beaucoup d'influence sur les paramètres photovoltaïques. J_{pin} est le seul paramètre qui a diminué faiblement avec le dopage et par suite une légère diminution du rendement de conversion de la cellule solaire.

Ce résultat confirme l'importance de choisir une faible valeur du dopage pour la base $N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

III.3.7 Influence des paramètres d'excitation sur la caractéristique I(V)

Cette partie qui suit traite l'influence des paramètres d'excitation sur les performances d'une cellule PIN. Il s'agit de faire varier la température et l'intensité de rayonnement.

III.3.7.1 Effet de l'intensité de rayonnement sur les caractéristiques de la cellule solaire PIN

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu une température constante à différents irradiations. En faisant varier l'intensité lumineuse on a obtenu les courbes illustrées par les figures III.17 et III.18.

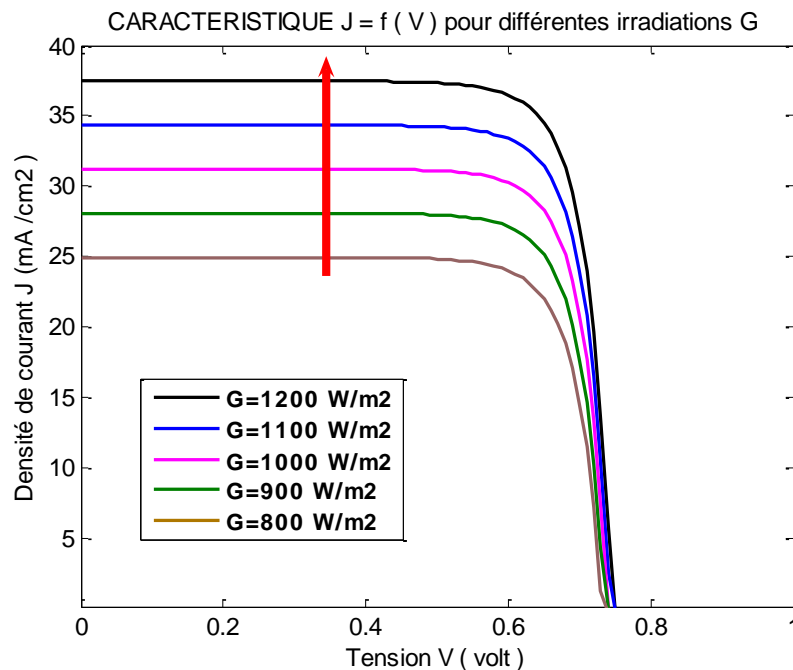


Figure III.17. Caractéristique $J(V)$ de la cellule en fonction de l'intensité lumineuse

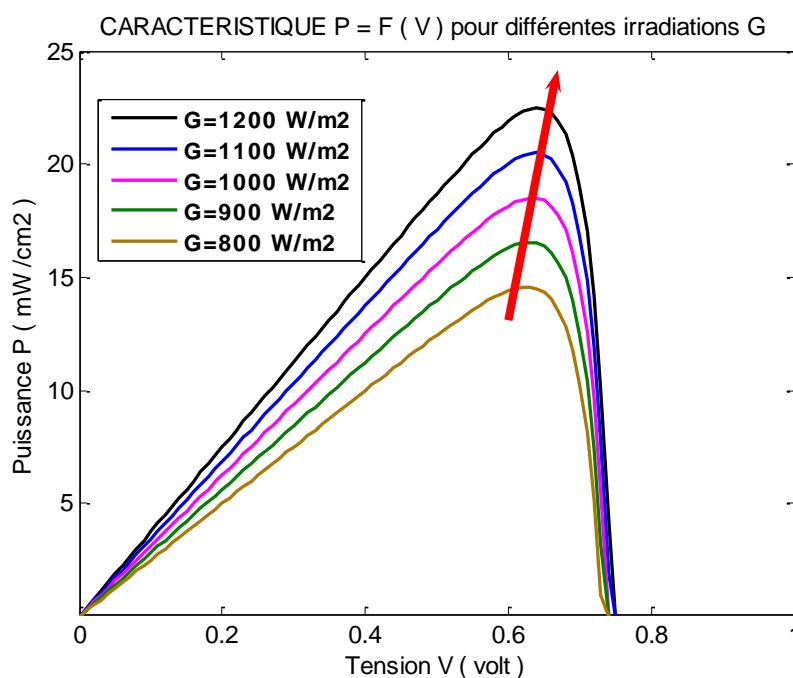


Figure III.18. Courbe de puissance de la cellule PIN en fonction de l'intensité lumineuse

Dans la figure III.17, on remarque que l'accroissement du courant de court-circuit J_{cc} est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert V_{co} , car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement et la tension du circuit ouvert est une fonction logarithmique.

La figure III.18 montre l'influence de l'irradiation sur la puissance P qui augmente avec une irradiante croissante.

III.3.7.2 Effet de la température sur les caractéristiques de la cellule solaire PIN

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules solaires, près de 80% de la puissance reçue est perdu sous forme de chaleur.

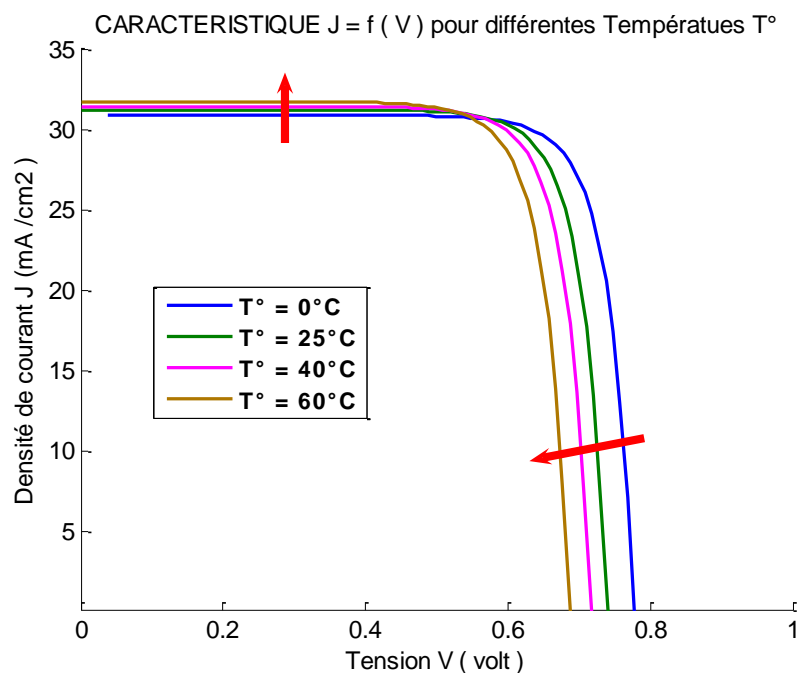


Figure III.19. Caractéristique $J(V)$ de la cellule en fonction de la température

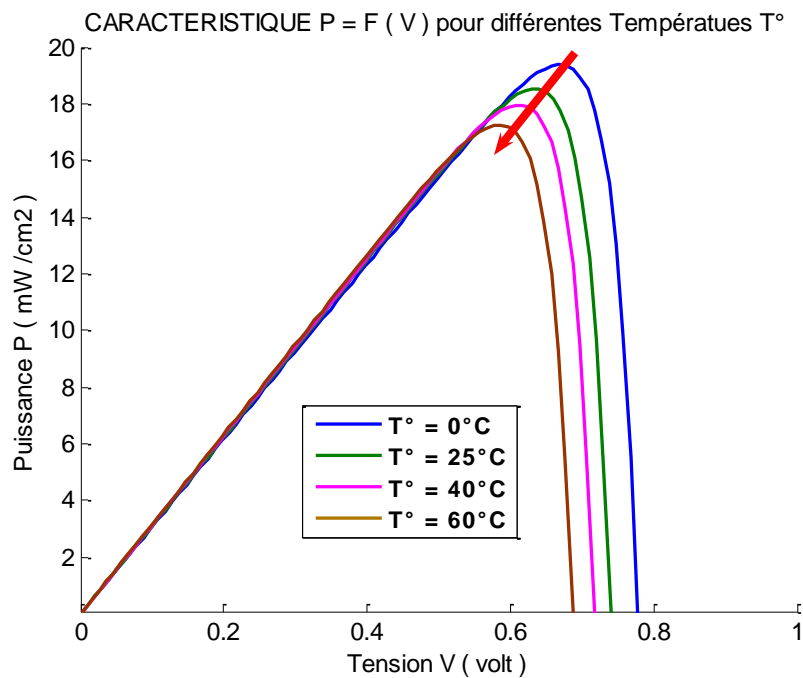


Figure III.20. Courbe de puissance de la cellule PIN en fonction de la température

Des résultats illustrés sur les figures III.19 et III.20, quand la température augmente, on observe une légère croissance du courant de court circuit et une décroissance importante de la tension de circuit ouvert de la cellule solaire du à l'accroissement de la concentration intrinsèque et la diminution de la valeur du gap avec la température. Cette augmentation de J_{cc} est nettement moins importante que la baisse de tension. Le V_{co} diminue de 0,03V par palier de 25°C. L'augmentation de température se traduit au total par une baisse relative de la puissance disponible.

III.4 Conclusion

En résumé, la simulation du comportement d'une cellule solaire à base de silicium nous a indiqué que le comportement des cellules solaires PIN est étroitement lié à la température, l'éclairement de fonctionnement, au dopage de l'émetteur et à l'épaisseur de la couche intrinsèque. Le photocourant d'une cellule solaire PIN est plus important que celui d'une cellule solaire PN grâce à cette couche intrinsèque I.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude d'une cellule solaire à base d'une structure PIN en silicium cristallin.

Dans un premier temps, nous avons présenté des notions de base sur l'énergie solaire et les matériaux semi-conducteurs, ainsi que les mécanismes physiques impliqués lors de l'interaction rayonnement matière.

A la fin de ce chapitre, nous avons exposé la jonction PN. Comme chacune des régions de la jonction obéit aux lois classiques qui régissent le comportement électrique des semiconducteurs (la loi de Poisson et l'équation de continuité pour les porteurs minoritaires), il nous a été possible de décrire le comportement électrique de la structure PN, en spécifiant les différents courants mis en jeu.

Dans le deuxième chapitre, la cellule solaire à base d'une structure PIN a été présentée où on a exposé son principe de fonctionnement. Le calcul de la densité des porteurs minoritaires nous a permis d'accéder aux différentes densités de courants dans les trois régions du dispositif. Ainsi, au terme de cette étude, nous avons pu donner l'expression finale du photocourant total traversant la structure PIN. nous avons terminé par donner le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque idéale, sous éclairage, ainsi que ses caractéristiques courant-tension et puissance-tension et leurs paramètres les plus influents.

Le troisième et dernier chapitre, du présent travail, aborde la simulation numérique du comportement de la cellule solaire de structure PIN à base de silicium. Nous avons pris en considération les régions frontale et arrière de la cellule ainsi que la partie la plus influente du point de vue fonctionnement : la région intrinsèque, dont le rôle est primordial dans les phénomènes d'absorption des porteurs. Les effets des paramètres technologiques et d'excitation sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ ont été simulés.

Les principaux résultats issus de la modélisation et la simulation peuvent être résumés dans les points suivants :

le photo-courant et le rendement dans la cellule à structure PIN sont plus importants que ceux d'une cellule à jonction PN, et que les différents paramètres technologiques (épaisseur zone intrinsèque, dopage), et environnementaux (éclairage, température) jouent un rôle

important. Il est donc primordial de bien choisir les valeurs optimales pour obtenir la cellule solaire la plus performante.

En nous intéressant à l'étude de l'influence de l'épaisseur de la région intrinsèque et des dopages des trois régions de la cellule PIN, nous en avons déduit que de bonnes performances de la cellule pourraient être obtenues pour une couche intrinsèque à base de semi-conducteur ayant une faible concentration intrinsèque, de l'ordre de 10^{10} cm^{-3} , avec une épaisseur maximale $W_i = 1,1 \mu\text{m}$. Nous avons finalisé cette partie de l'étude de la cellule en confirmant que cette valeur de rendement optimal est obtenue pour un émetteur fortement dopé (10^{20} cm^{-3}) et une base faiblement dopée (10^{17} cm^{-3}).

Dans son ensemble, notre travail nous a permis, à l'aide de nos simulations, de mieux comprendre le comportement électrique et photovoltaïque de la cellule solaire à base de jonction PIN, en dégagant certains paramètres que nous avons jugés adéquats pour fournir de bonnes performances à ce dispositif, tels que les dopages des régions émetteur et base, l'épaisseur et la concentration intrinsèque de la couche intrinsèque.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

- [1] "La production mondiale d'énergie solaire photovoltaïque", <http://www.planetoscope.com/solaire/211-production-mondiae-d-energie-solairephotovoltaique.html>.
- [2] Agence Internationale de l'Energie (AIE), <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity> [Accessed 10/07/2021]
- [3] : <http://www.solarserver.de/?gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSzY7xw>.
- [4] : Boualem, Dendib, " Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative." Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbes-Sétif, 2007]
- [5] : Les systèmes photovoltaïques : Guide de l'acheteur, Ressources naturelles, Canada, 2002.
- [6] : S. Naoual, " Modélisation et Extraction Automatique des Paramètres d'un Générateur ", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [7] : A. Zerga, "Optimisation du rendement d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin de type n+ p ", Mémoire de Magistère, Tlemcen-1998.
- [8] : Salima Alem-Boudjemline, "Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques plastiques", Ecole Doctorale D'Angers, Université d'Angers, 30 novembre 2004.
- [9] :B. Flèche, D. Delagnes, "Energie Solaire Photovoltaïque", STIELT Electrotechnique, Juin 2007.
- [10]: Harold J.hovel, " Semiconductors and semimetals " ,vol.11,solar cells, academic press new York, san Francisco, London , 1975.
- [11] : Walid El-Huni, "Modélisation de cellules solaires multi-tandem bas cout et très haut rendement a base de nitrures des éléments de III-V" , Thèse de Doctorat ,Université Paris-Saclay, 30 Septembre 2016
- [12] : B. Equer, "Energie solaire photovoltaïque physique et technologie de la conversion photovoltaïque ", 1ère édition, ELLIPES, Paris, 1993
- [13] : "NREL:ReferenceSolarSpectrumIrradiance. ", <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>. Accessed : 2016-01-01.

- [14] : Francis Lévy, "Physique et technologie des semi conducteurs", Presses Polytechniques et Universitaires, Romandes (PPUR), Paris, 1994.
- [15] : Abdelali aouina, "Rôle du rayonnement dans l'élaboration et l'étude de nanoagregats semi conducteurs de Zns" mémoire magister en physique.
- [16] : Khemissi Saad Eddine, "Physique des Composants Optoélectroniques" Cours et TD Master2, Physique des Matériaux ,Université Abbes Laghrour – Khenchela
- [17] : Servagent, "Physique des semi-conducteur", Ecole des Mines de Nantes, SCIRN-PRN Université du Maine 2007
- [18] : Chachou Imane et Baddiar Hanane, "Etude de l'influence des paramètres technologiques sur la caractéristique IV d'une photodiode PIN en Si", Mémoire de Master, Université de Moulay Tahar – Saida - 2016
- [19] : M. Urien, "Cellules photovoltaïques organiques à base copolymères à blocs de type rigide-flexible", Thèse Doctorat, Université Bordeaux I, 2008.
- [20] : Cristian schittich «Construire en verre », presse polytechnique et universitaire romandes.
- [21]: A.Goetzberger, V.U.Hoffmann " photovoltaic solar energy generation " Springer Series in optical sciences, 2005.
- [22] : Benloucif Nisrine, «Potentialités de films de silicium polycristallin LPCVD destinés à l'étude d'une cellule solaire multicouches » Thèse de Doctorat, Université des frères Mentouri (Constantine).
- [23]: S.W.Angrist, " Direct Energy conversion", 4th ed. Boston: Allyn and Bacon, Inc
- [24] : Y. Veschetti, " Modélisation caractérisation et réalisation de nouvelles structures Photovoltaïques sur substrat de silicium mince", Thèse de doctorat, Physique des semi-conducteurs, université Louis Pasteur (Strasbourg I), 2005.
- [25]: V. Shah, « Thin-film silicon solars cells», 1st Edition, Engineering Science, EPFL Press A Swiss academic, 440 pages, 2010.
- [26] : H. Mathieu, "Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques ", Edition Masson, Paris 1990.
- [27] : Alexandre Vauthelin. "Fabrication et caractéristiques de cellules photovoltaïques multi-jonctions à base de matériaux antimoniures (III-Sb) pour applications sous fortes concentrations solaires". Electronique. Université Montpellier, 2018.
- [28] : Houda Chabane, " Etude d'une cellule solaire a base de structure PIN", Mémoire de Magister, Université Hadj Lakhdar de Batna,2015.

Résumé :

Avec les diverses applications de l'énergie solaire photovoltaïque dans les domaines terrestre et spatial, l'amélioration de l'efficacité de conversion des cellules solaires devient indispensable. Le rendement de la cellule solaire dépend des photons absorbés et des paires électrons-trous générés dans la zone de charge d'espace, qui doit avoir une valeur optimale pour que le photocourant soit essentiellement dû à la photogénération de porteurs dans cette zone. Il est donc judicieux d'augmenter artificiellement l'épaisseur de la zone de charge d'espace en intercalant une couche intrinsèque I entre P et N, ce qui donne une cellule solaire à base d'une structure PIN.

Dans ce contexte, nous étudierons cette cellule par la simulation numérique. On définit une cellule PN de référence avec un ensemble de paramètres physiques, on analyse leurs influences sur le rendement de conversion. Ensuite, on a intercalé une couche intrinsèque I entre les deux régions N et P, pour obtenir une cellule à structure PIN qu'on étudiera pour déterminer l'influence de différents paramètres, tels que le dopage, l'épaisseur de la zone intrinsèque I, la température et l'intensité du flux lumineux sur le rendement de conversion.

Abstract :

With the various applications of solar photovoltaic energy in the terrestrial and space fields, improving the conversion efficiency of solar cells is becoming essential. The efficiency of the solar cell depends on the absorbed photons and the electron-hole pairs generated in the space charge region, which must have an optimum value so that the photocurrent is mainly due to the photogeneration of carriers in this region. It is therefore wise to artificially increase the thickness of the space charge zone by inserting an intrinsic layer I between P and N, resulting in a solar cell based on a PIN structure.

In this context, we will study this cell by numerical simulation. We define a reference PN cell with a set of physical parameters, we analyze their influences on the conversion efficiency. Then, we interposed an intrinsic layer I between the two regions N and P, to obtain a cell with a PIN structure that we will study to determine the influence of various parameters, such as the doping, the thickness of the intrinsic zone I, the temperature and the intensity of the luminous flux on the conversion efficiency.

ملخص :

مع تعدد التطبيقات المختلفة للطاقة الشمسية الكهروضوئية في المجالات الأرضية والفضائية ، أصبح تحسين فعالية التحويل في الخلايا الشمسية أمراً ضرورياً. تعتمد فعالية الخلية الشمسية على الفوتونات الممتصة والأزواج ثقب_الإلكترون المتولدة في منطقة الشحن الفضائي ، والتي يجب أن يكون لها قيمة مثالية بحيث يرجع التيار الضوئي أساساً إلى التوليد الضوئي للحاملات في هذه المنطقة. لذلك من الحكمة زيادة سمك منطقة الشحن الفضائي بشكل مصطنع عن طريق إدخال طبقة من شبه موصل نقي I بين P و N ، مما ينتج عنه خلية شمسية تعتمد على بنية PIN.

في هذا السياق ، سوف ندرس هذه الخلية عن طريق المحاكاة العددية. نحدد خلية PN مرجعية بمجموعة من المعلمات المادية ، ونحلل تأثيرها على كفاءة التحويل. بعد ذلك ، قمنا بإدخال طبقة من شبه موصل نقي I بين المنطقتين N و P ، للحصول على خلية بنية PIN و التي سنقوم بدراستها لتحديد تأثير المعلمات المختلفة ، مثل التطعيم سمك المنطقة I ، درجة الحرارة وشدة التدفق الضوئي على فعالية التحويل.