

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج
University of Mohamed El Bachir El Ibrahimi – Bordj Bou Arreridj
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم الإلكترونيك
Department of Electronics

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLÔME DE MASTER

FILIERE : ELECTRONIQUE

Spécialité : Microélectronique

Par :

Chaâbane MADOU

Lilya LAIDANI

Intitulé

***Analyse approfondie des paramètres clés d'une cellule
solaire au Silicium par simulation numérique***

Soutenu le :

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Mme. F. KHERRAT</i>	<i>MAA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mme. F. KHALED</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Z. MESSAI</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022



Remerciements

Nous remercions, en premier lieu, Dieu (ALLAH) tout puissant qui a nous donnés la patience, le courage, la force et la volonté nécessaires afin d'accomplir ce mémoire.

En second lieu, nous tenons à exprimer, nos vifs remerciements et notre gratitude à notre encadreur Dr. Fahima KHALED pour Ses précieux conseils, sa grande disponibilité et son suivi permanent durant toute la période du projet surtout dans les circonstances que nous traversons.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre travail ;

Nos remerciements à tous les enseignants du département d'électronique et tous ceux qui furent à un moment ou à tout instant partie prenante de ce travail.

Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près et de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire, Merci.

Dédicaces

Avec un énorme plaisir, un cœur débordant de joie, que je dédie ce modeste travail :

À mon cher père, qui m'a toujours répondu dans les moments les plus difficiles, son soutien et ses encouragements m'ont toujours donné la force de poursuivre mes études.

À ma chère maman, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, qui m'a comblé de son soutien et m'a voué un amour inconditionnel. Tu es pour moi un exemple de courage et de sacrifice.

À ma grand-mère et mon grand-père pour leur amour, leur gentillesse et leurs prières qui m'ont beaucoup aidé dans mes études. Je veux donc vous remercier pour cette présence essentielle dans ma vie, et vous dire que je vous aime de tout mon cœur.

À mes frères Amine et Haithem, mes princesses Zanza et Amani je vous souhaite à tous une vie pleine de succès.

À tous les membres de ma famille, petits et grands..

A tous mes amis « Affen, Antar, Abd Elrahim, Mohemmed »

À Ma meilleure amie, ma sœur et mon binôme Lilya , merci pour ta patience, ton effort pour tout ce que tu as fait pour la réussite de ce projet.

Merci pour cette belle amitié

À mes amis, mes enseignants et pour ceux qui m'ont donné de l'aide un jour, qu'Allah vous paye pour tous vos bienfaits.

Chaâbane

Dédicace

Je dédie ce travail

A mon père qui a beaucoup souffert pour nous pour une vie meilleure

Merci mon Père !

A ma mère qui a donné cher et qui a tant sacrifié pour

que j'arrive au bon port

Merci ma Mère !

A ma petite et ma grande famille

mes frères Oussama, Kayes, Poucef ;

mes sœurs Hiba, Tassnim

A tous mes amis surtout Houda

*Je dédie aussi tous mon respect et toutes mes
appréciations à ceux qui m'ont aidé pendant toute ma
carrière. Vous étiez tous un grand soutien pour moi.*

Merci infiniment.

Lilya

Sommaire

Liste des Figures	
Liste des Tableaux	
Liste des symboles et abréviations	
Introduction générale	11
Chapitre I : Cellules solaires au Silicium	
1. Cellules solaires au Silicium cristallin	13
1.1. L'Énergie Solaire	13
1.2. L'effet photovoltaïque	14
1.3. La cellule solaire photovoltaïque	14
1.3.1. Principe de fonctionnement	15
1.3.2. Caractéristiques électriques	16
1.3.3. Types des cellules photovoltaïques	17
<i>a- Selon la structure</i>	17
<i>b- Selon la technologie de production</i>	18
Cellules cristallines	18
Cellules à base de couches minces	18
2. Structure cristallographique et bandes d'énergie	18
2.1. Cristallographie	19
2.2. Cristallisation du Silicium	20
3. Propriétés optiques du Silicium	21
3.1. Propriétés optiques du Silicium cristallin (c-Si)	21
3.2. Propriétés optiques du silicium microcristallin ($\mu\text{c-Si:H}$)	22
4. Structure de base d'une cellule solaire au silicium cristallin	23
4.1. Architecture de la cellule photovoltaïque	23
4.2. Principaux éléments dans la cellule	23
4.2.1. Face avant	24
4.2.2. Face arrière	24
4.3. Cellule en Silicium monocristallin	25
4.4. Cellule en Silicium polycristallin	25
5. Cellule solaire à haut rendement	26
5.1. Rendement des cellules multicristallines	27
5.2. Types des Cellule solaire à haut rendement	27
5.2.1. Cellules à jonction : Cellules tandem (Cellule micro-morphe)	27
5.2.2. Cellules multi-jonctions	28

Chapitre II : Cellules solaires au Silicium

1. Introduction	30
2. Présentation du programme de simulation PC1D	30
3. Structure et simulation de la cellule	32
3.1. Paramètres de simulation	32
3.2. Représentation de la structure	34
4. Détermination de l'épaisseur optimale de l'émetteur	35
4.1. Influence de la variation de l'épaisseur de l'émetteur sur la caractéristique I(V)	35
4.2. Influence sur la longueur de diffusion	36
5. Détermination de l'épaisseur optimale de l'absorbeur	37
5.1. Influence de la variation de l'épaisseur de l'absorbeur la caractéristique I(V)	37
5.2. Influence sur la photogénération des porteurs	39
6. Choix du dopage de l'émetteur	41
6.1. Caractéristiques J(V) et performances photovoltaïques pour différents dopages de l'émetteur	41
6.2. Influence du dopage de l'émetteur sur les paramètres internes	42
6.2.1. L'effet sur la longueur de diffusion	42
6.2.2. L'effet sur la durée de vie des porteurs	43
7. Choix du dopage de l'absorbeur	45
7.1. Caractéristiques J(V) et performances photovoltaïques pour différents dopages de l'absorbeur	45
7.2. Influence du dopage de l'absorbeur sur les paramètres internes	46
7.2.1. L'effet sur la longueur de diffusion et la durée de vie des porteurs	46
7.2.2. L'effet sur la conductivité	48
8. Conclusion	48
Conclusion générale	49
Références bibliographiques	50

Liste des Figures

Fig I.1	La masse d'aire	13
Fig I.2	Analyse spectrale du rayonnement solaire	14
Fig I.3	Principe de l'effet photovoltaïque	14
Fig I.4	a) Photogénération dans la cellule solaire b) Diagramme d'énergie	15
Fig I.5	Caractéristique I(V) d'une cellule solaire sous obscurité	16
Fig I.6	Quelques types des cellules solaires selon la technologie de production	18
Fig I.7	Maillé élémentaire du silicium	19
Fig I.8	Déférents structures d'un Silicium Cristallin	19
Fig I.9	Techniques de Cristallisation du Silicium	20
Fig I.10	Bandes d'énergie pour les électrons d'atomes de Si arrangés en mailles	21
Fig I.11	Propriétés optiques du Silicium cristallin (c-Si et μ c-Si)	22
Fig I.12	Schéma d'une cellule solaire standard	23
Fig I.13	Structure de base d'une Cellule Solaire	25
Fig I.14	Cellule solaire haut rendement	26
Fig I.15	Schéma d'une structure tandem	28
Fig I.16	Principe de la cellule multi-jonction	28
Fig II.1	L'interface du programme PC1D	31
Fig II.2	Schéma global du dispositif d'une cellule solaire.	31
Fig II.3	Informations sur chaque instruction	32
Fig II.4	Schéma de la structure	34
Fig II.5	Influence de la variation de l'épaisseur de l'émetteur sur la caractéristique I(V)	35
Fig II.6	Influence de W_n sur les performances photovoltaïques	36
Fig II.7	Influence de la variation de l'épaisseur de l'émetteur sur la longueur de diffusion	37
Fig II.8	Influence de la variation de l'épaisseur de l'absorbeur sur la caractéristique I(V).	38
Fig II.9	Influence de la variation de W_p sur les performances photovoltaïques	39
Fig II.10	Influence de la variation de l'épaisseur de l'absorbeur sur la	40

	photogénération des porteurs	
Fig II.11	Influence de la variation de dopage de l'émetteur sur la caractéristique I(V).	41
Fig II.12	Influence de la variation Nd sur les performances photovoltaïques	42
Fig II.13	Influence du dopage de l'émetteur sur la longueur de diffusion	43
Fig II.14	Influence du dopage de l'émetteur sur la durée de vie des porteurs	45
Fig II.15	Influence du Nd sur les paramètres internes (L'effet sur la Conductivité)	46
Fig II.16	Influence de la variation de dopage de l'absorbeur sur la caractéristique I(V).	47
Fig II.17	Influence du Na sur les paramètres internes (L'effet sur la longueur de diffusion)	47
Fig II.18	Influence du Nd sur les paramètres internes (L'effet sur la durée de vie des porteurs)	47
Fig II.19	Influence du dopage de l'émetteur sur les paramètres internes (L'effet sur la Conductivité)	48

Liste des Tableaux

Tableau.1	Réglages et paramètres de notre « cas d'origine »	34
------------------	---	----

Listes des symboles et abréviations

Abréviations

PN	Positif - Négatif
MIS	Métal, Isolant et Semi-conducteur
ZCE	Zone de Charge d'Espace
Cz	Czochralski
FZ	Fusion de Zone
BV	Bande de Valence
c-Si	Crystalline Silicon
μ -Si :H	Hydrogenated MicroCrystalline Silicon(μ : Micro)
PV	PhotoVoltaïque
PERL	Passivated Emitter with Rear Locally diffused
PC1D	Personnel Computer One Dimensionnel
OTC	Oxyde Transparent Conducteur
SRV	Surface Recombination Velocity

Symboles

<i>E</i>	L'énergie d'un photon
<i>AM</i>	La masse d'air
FF	Le facteur de forme
η	Le rendement de conversion
Zn	Zinc
O	Oxygen
Ni	Nickel

Introduction générale

Avec l'épuisement progressif des sources d'énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) et des besoins énergétiques toujours croissants, les énergies renouvelables joueront à l'avenir un rôle de plus en plus important dans notre société.

La plus forte croissance parmi les énergies renouvelables est l'énergie solaire photovoltaïque. La conversion directe du rayonnement solaire en électricité est son principal avantage alors que le principal inconvénient de cette source d'énergie était son coût qui commence ces quelques années à être compétitif. Actuellement, cette industrie est donc soutenue par des politiques nationales comme en Allemagne, en Chine, au Japon et aux USA qui permettent à ces pays de réduire leur dépendance énergétique et de respecter plus ou moins leurs engagements concernant les émissions de gaz à effet de serre. Le matériau principal des cellules photovoltaïques est le silicium. Il est abondant dans la nature, combiné à l'oxygène sous forme d'oxydes (silice, silicates). La réduction de la silice (minerai de quartz) par le carbone (bois, charbon, houille, pétrole) produit un silicium bon marché

Les cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser le meilleur rendement énergétique. La modélisation d'une cellule solaire est l'outil performant qui nous permettra de lier les caractéristiques de cette cellule avec les propriétés du matériau et la technologie de fabrication afin d'améliorer les performances de la cellule.

L'objectif de notre travail est l'étude par simulation numérique ainsi d'une cellule solaire au silicium par le logiciel de simulation PC1D. Pour ce faire, le mémoire a été structuré en deux chapitres en plus d'une introduction et d'une conclusion générale.

Dans la première partie nous avons d'abord présenté les cellules solaires au Silicium cristallin, les types des cellules photovoltaïques, la structure cristallographique et bandes d'énergie, ainsi que les propriétés optiques du silicium cristallin.

Dans le deuxième chapitre nous avons étudié et analysé d'une manière approfondie les paramètres clés de la cellule solaire au silicium à l'aide du logiciel PC1D afin de déterminer les paramètres optimaux pour l'épaisseur, le dopage de l'émetteur et celui de la base pour voir leurs influences sur les performances photovoltaïques.

Chapitre I

Cellules solaires au Silicium

1. Cellules solaires au Silicium Cristallin

Une cellule solaire, est un composant électronique qui, exposé à la lumière, produit de l'énergie du rayonnement solaire grâce à l'effet photovoltaïque. [01]

1.1. L'Énergie Solaire

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du Soleil, traversant l'atmosphère qui en absorbe une partie, et parvenant à la surface de la Terre.

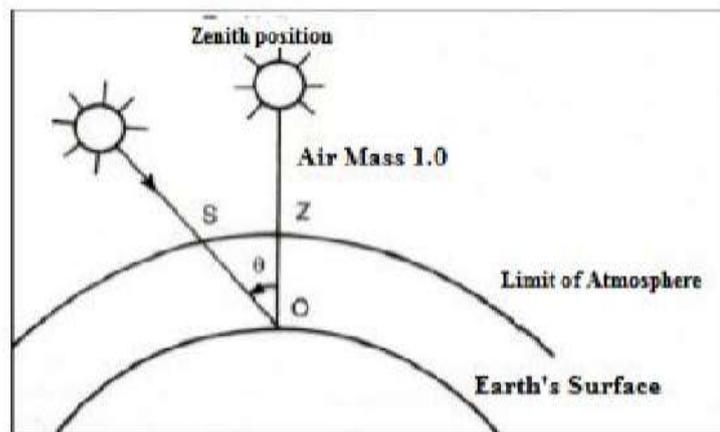


Fig I.1. La masse d'air

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

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

h : Constante de Plack C : Vitesse de la lumierre λ : Longueur d'onde

- La masse d'air :
$$AM = \frac{1}{\cos(\alpha)} \quad (\text{I.2})$$
- Rayonnement solaire : Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 μm à 10 μm . La figure I.2 représente la variation de la répartition spectrale énergétique. [02]

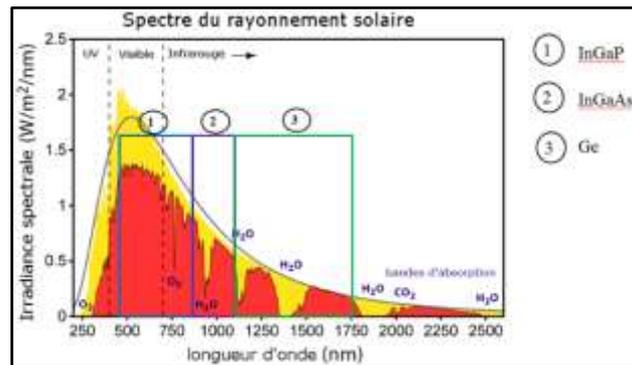


Fig I.2 Analyse spectrale du rayonnement solaire

1.2. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est utilisé dans l'énergie solaire photovoltaïque pour produire de l'électricité. Les matériaux semi-conducteurs (tels que le silicium) ont la particularité de favoriser l'effet photovoltaïque dans les panneaux solaires en raison du comportement électrique qu'ils ont lors de l'impact avec des photons de lumière. Les modules solaires sont constitués de cellules photovoltaïques, qui sont des dispositifs semi-conducteurs fabriqués avec ce type de matériau. Normalement, ces matériaux semi-conducteurs sont formés à partir de silicium pur avec l'ajout d'impuretés de certains éléments chimiques. [03]

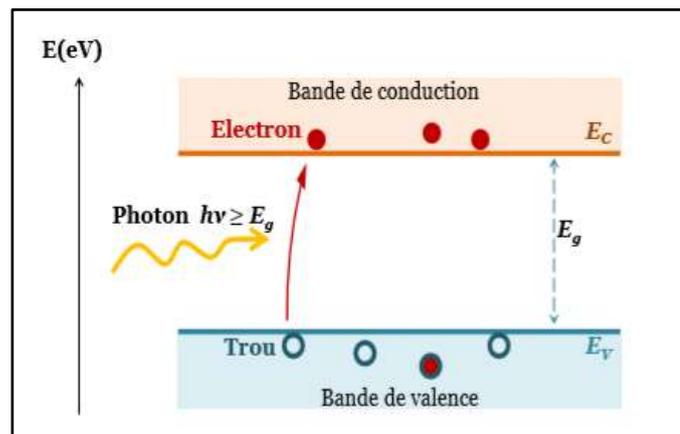


Fig I.3 Principe de l'effet photovoltaïque

1.3. La cellule solaire photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est une photodiode optimisée pour produire un flux de courant d'électrons en réponse à une irradiation par une lumière utilisant l'effet photovoltaïque. La jonction par laquelle la lumière pénètre dans le semi-conducteur doit être suffisamment mince

pour passer la plupart de la lumière sur la région active (région d'appauvrissement) où la lumière est convertie en paires électrons/ trous. [04]

1.3.1. Principe de fonctionnement

Trois phénomènes physiques de base traduisent le fonctionnement d'une cellule solaire :

- 1- *L'Absorption des photons* : dont $h\nu > E_g$ par le matériau.
- 2- *La Création de paires électrons/trous*; les photons incidents créent des paires électrons-trous dans chacune des régions N,P et ZCE. Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création.
- 3- *La Collecte* : les paires électro-trous se font retourner par voie d'un champ électrique de la jonction vers les régions où elles seront majoritaires (Figure I.4.a) c.-à-d. les électrons vers l'émetteur (région type N) et les trous vers la base (région type P).

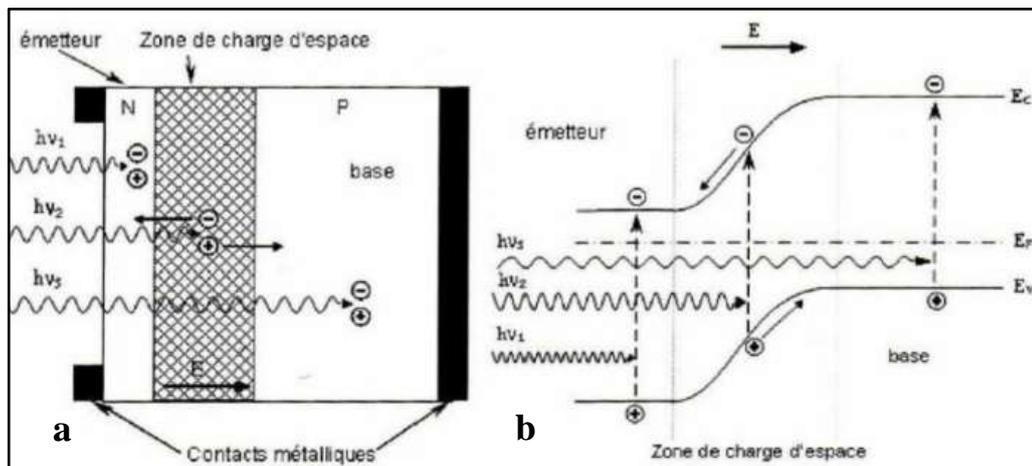


Fig I.4. a) Photogénération dans la cellule solaire

b) Diagramme d'énergie

La structure d'une cellule solaire est similaire à celle d'une jonction PN, le courant sous obscurité dans telle structure est donné par la formule suivante :

$$I_{obs} = I_s \left[e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right] \quad (I.3)$$

I_{obs} : le courant sous obscurité, I_s : le courant de saturation de la diode, q : charge de l'électron, V : tension appliquée, K : constante de Boltzmann, T : température absolu en Kelvin, Le coefficient « n » est le facteur d'idéalité de la diode, fonction de la qualité de la

jonction (égale à 1 si la diode est idéale, et égal à 2 si la diode est entièrement gouvernée par la génération/recombinaison. [05]

1.3.2. Caractéristiques électriques

Les paramètres d'une cellule photovoltaïque sont déterminés à partir de la courbe caractéristique courant-tension (Figure I.5) qui décrit le fonctionnement de la cellule.

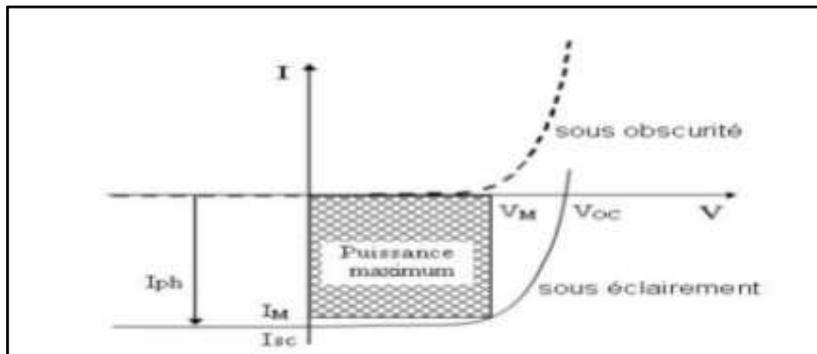


Fig I.5 Caractéristique I(V) d'une cellule solaire sous obscurité

Courant de court-circuit I_{CC} : Le courant de court-circuit I_{CC} qui correspond au courant produit à tension nulle $V = 0$. Le courant est d'autant plus élevé que l'absorption de la cellule est grande et que les recombinaisons sont faibles éclairéments.

Tension de circuit ouvert V_{CO} : La tension à circuit-ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend du type de la cellule solaire, des matériaux de la couche active et de l'éclairément de la cellule :

$$I = 0 \rightarrow I_s \left[e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right] - I_{p\Box} = 0 \quad V_{CO} : \text{est donné par : } V_{CO} = \frac{KT}{q} \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right] \quad (I.4)$$

Facteur de forme (FF) : Le facteur de forme (FF) de la courbe I-V exprime la différence entre la puissance réelle débitée par la cellule et sa puissance idéale. Il détermine la qualité électrique de la cellule, il est déterminé par l'équation suivante :

$$FF = \frac{V_{MAX} \cdot I_{MAX}}{V_{CO} \cdot I_{CC}} \quad (I.5)$$

Le rendement η : Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivré par la cellule P_{max} et la puissance lumineuse incidente $P_{incidence}$:

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{P_{incidente}} = \frac{V_{MAX} \cdot I_{MAX}}{P_{incidente}} = \frac{V_{CO} I_{CC} FF}{P_{incidente}} \quad (1.6)$$

1.3.3. Types des cellules photovoltaïques

a- Selon la structure

a-1- La structure à jonction PN : La jonction p-n est considérée comme la clé du succès des cellules photovoltaïques. La meilleure solution pour séparer les charges consiste à utiliser un champ électrique qui doit, pour bien faire, apparaître spontanément durant la fabrication des cellules. C'est pourquoi le fonctionnement même des cellules photovoltaïques repose sur l'utilisation de jonctions p-n.

a-2-La structure Schottky : Une photodiode Schottky est constituée d'un substrat de silicium de type n, sur lequel est déposée une couche mince métallique, généralement de l'or. On réalise ainsi une barrière Schottky. Le photocourant de génération est analogue à celui d'une photodiode à jonction PN. L'avantage de la photodiode Schottky réside dans le fait que la couche métallique, si elle est suffisamment mince (10 nm) pour le passage de la lumière, est transparente au rayonnement dans le domaine du proche ultra violet, ce qui n'est pas le cas de la zone frontale des autres types de photodiode.

a-3-La structure MIS : Dans ces cellules, un film isolant très mince 0.2 Å est formé entre le métal et le substrat semi-conducteur. L'isolant est obtenu soit par oxydation superficielle du silicium thermiquement ou chimiquement par le (HNO₃, soit par dépôt de (SiO₂) en atmosphère contrôlée, puisque l'oxyde peut être formé à basses températures et aucun procédé de diffusion n'est impliqué, un rendement de 18% est obtenu par cette structure dans la condition AM1.

a-4-La structure à jonction PIN : Nous venons de voir l'intérêt d'avoir une ZCE suffisamment grande pour que le photocourant soit essentiellement créé dans cette zone. Il est possible de maintenir des niveaux de dopages élevés dans les régions N et P sans réduire l'extension de la zone de déplétion, dont la largeur est dès lors pour l'essentiel déterminé par l'épaisseur d'une couche I qui est intercalée entre les régions N et P. Ce qui nous donne la cellule solaire à structure PIN qui est le but de ce mémoire. Donc on augmente

artificiellement l'épaisseur de la ZCE. Les photoporteurs atteignent très vite leur vitesse limite. [04]

b-Selon la technologie de production :

b-1- Cellules cristallines : Ces cellules, généralement en silicium, ne comprennent qu'une seule jonction p-n. On distingue deux types de cellules cristallines :

2. **Cellules en silicium polycristallin :** Le silicium polycristallin est produit par des techniques de croissance qui assurent la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux (dénommé silicium multicristallin) afin de limiter les effets néfastes des joints de grains. [07]
3. **Cellules en silicium monocristallin :** Les cellules au silicium monocristallin offrent le meilleur rendement parmi les panneaux solaires disponibles dans le commerce : entre 13 % à 15% .

b-2- Cellules à base de couches minces : cette filière se base sur l'utilisation des couches minces dont les épaisseurs sont de l'ordre de quelques centaines de nanomètres à quelques micromètres. Cela est permis par une absorption bien plus importante dans ces matériaux si on les compare au silicium. [05]

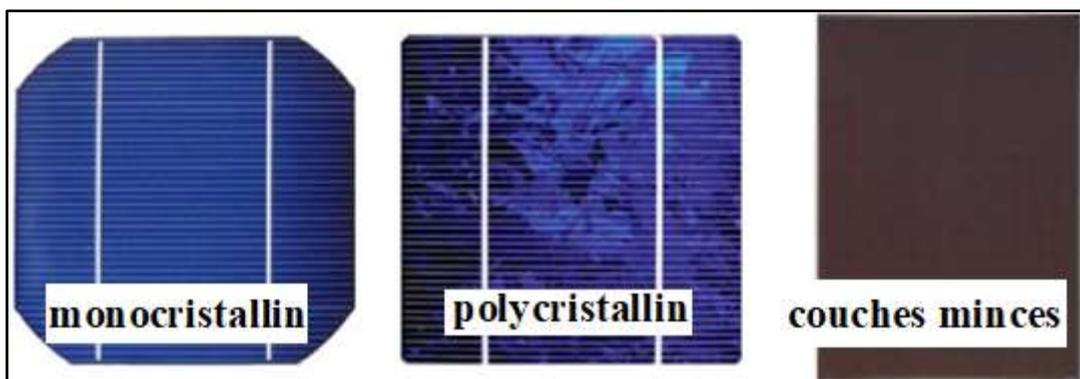


Fig I.6 Quelques types des cellules solaires selon la technologie de production

2. Structure cristallographique et bandes d'énergie

Le silicium est le deuxième élément le plus abondant de la croûte terrestre après l'oxygène (O). Il constitue 26% de son poids. C'est un semi-conducteur à gap indirect de 1.12

2. Structure cristallographique et bandes d'énergie

eV à la température ambiante. Sa densité intrinsèque des porteurs est de $8.56 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ à la même température. [8]

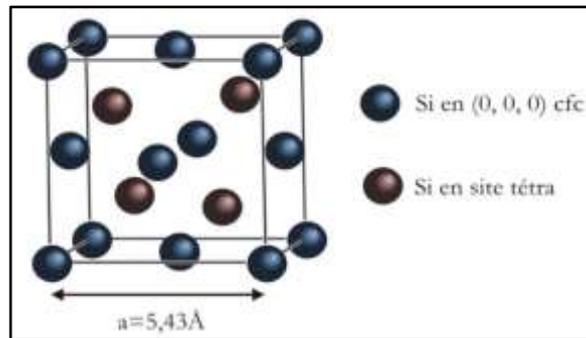


Fig I.7 Maillé élémentaire du silicium [09]

On obtient le silicium de grade métallurgique (MG-Si) par la réduction de la silice avec le carbone (C) dans un four à arc électrique. Le creuset du four est rempli de la silice et du carbone puis est porté à une température élevée d'environ 1800 °C. La réaction globale de cette réduction est donnée par : $\text{SiO}_2 \text{ (solide)} + 2\text{C (solide)} \rightarrow \text{Si (liquide)} + 2\text{CO (gaz)}$.

2.1. Cristallographie

Le silicium a une structure de type diamant (comme le germanium et la forme diamant du carbone), avec un paramètre de maille de 0,543 071 0 nm³. [01]

Comme les autres éléments du groupe 14 (dont le carbone), le silicium est un cristallogène : il peut exister sous forme cristalline. Pour le carbone, il s'agit du diamant, qui possède une structure cristalline caractéristique. Le silicium possède également cette structure cristalline lorsqu'il est pur. Le paramètre de la maille a , c'est-à-dire la longueur d'une arête du cube, est de 0,543 071 0 nm.

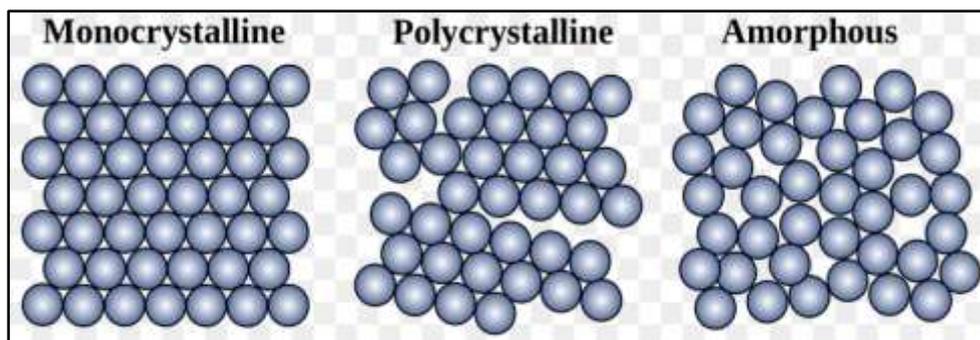


Fig I.8 Différents structures d'un Silicium Cristallin

2.2. Cristallisation du Silicium

Plusieurs techniques sont utilisées pour cristalliser le silicium purifié, les plus connues sont, le procédé « Czochralski » (Cz) et le procédé Zone de Fusion « Float Zone » (FZ) qui produisent du silicium monocristallin.

-Le procédé « Czochralski » (Cz) : Cette méthode qui a été inventée par Jan Czochralski (1916), consiste à faire fondre le silicium polycristallin dans un creuset à 1450 °C, des dopants (bore et phosphore) peuvent alors être ajoutés pour doper le silicium de type p ou de type n. Un germe de silicium monocristallin avec une orientation cristallographique précise (100 par exemple) est placé en contact avec la surface du bain en fusion. Le silicium solidifié et tiré lentement vers le haut, prend l'orientation cristallographique du germe. (Figure I.9.a).

-Le procédé de Fusion de Zone (FZ) : Cette technique consiste à passer plusieurs fois un barreau de silicium polycristallin dans un anneau à induction qui fait fondre localement le silicium (Figure 9.b). Un germe monocristallin est placé à l'extrémité du barreau de silicium pour débiter la croissance du lingot. Le silicium monocristallin se forme du bas vers le haut, de sorte que toutes les impuretés existantes sont entraînées par ségrégation vers le haut avec la zone fondue. Le silicium monocristallin obtenu est plus purifié que celle du procédé (Cz). Le procédé (FZ) est significativement plus cher que celui de (Cz), il n'est utilisé pour le photovoltaïque que dans des cas exceptionnels. [02]

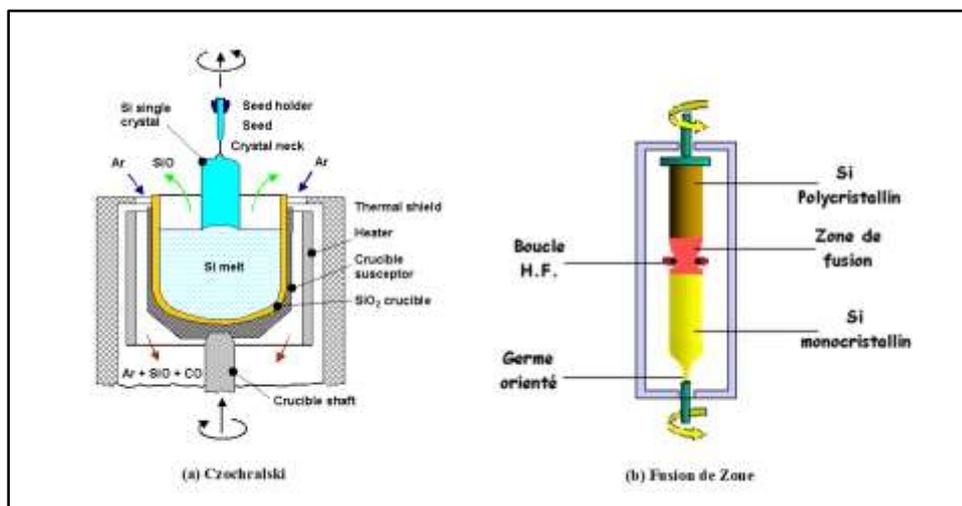


Fig I.9 Techniques de Cristallisation du Silicium

2.3. Bandes d'énergie

A présent considérons des atomes de silicium Si arrangés aux nœuds d'un réseau périodique, mais avec une maille très grande de telle manière que les atomes puissent être considérés comme isolés. Les deux niveaux les plus énergétiques sont repérés par E_1 et E_2 . Rapprochons homothétiquement les atomes les uns des autres, les états énergétique électronique se scindent et forment deux bandes continues appelées bande de conduction BC et bande de valence BV. La figure (I.10) montre la formation de ces bandes en fonction de la distance interatomique. [11]

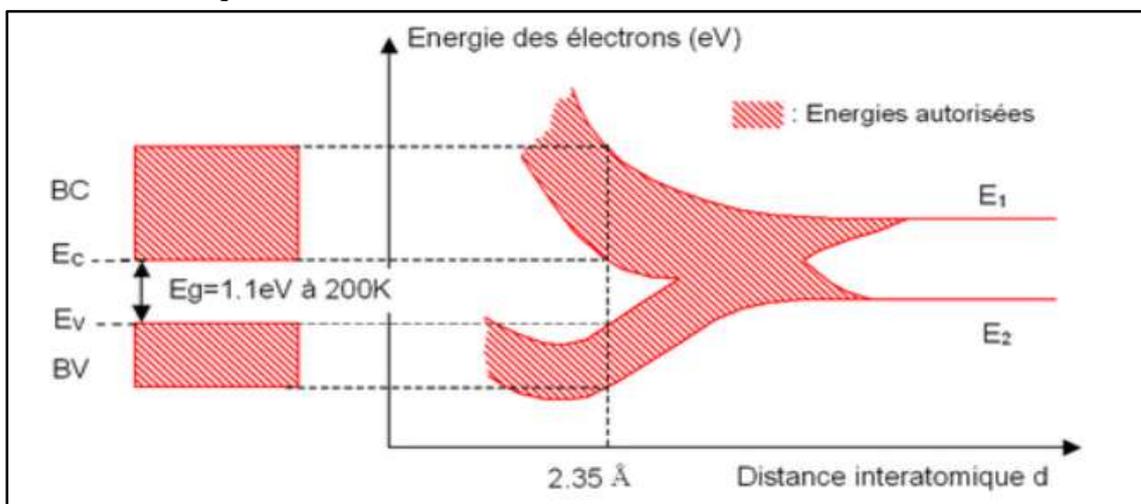


Fig I.10 Bandes d'énergie pour les électrons d'atomes de Si arrangés en mailles

3. Propriétés optiques

3.1. Propriétés optiques du Silicium cristallin (c-Si)

Le c-Si possède un gap de 1.12 eV à température ambiante et à pression atmosphérique. C'est un semi-conducteur à gap indirect. Le minimum énergétique de la bande de conduction ne se trouve pas au même moment \vec{K} que le maximum de la bande de valence (c-à-d le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence sont situés en des points différents de l'espace de \vec{K}). Pour des transitions directes d'électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, les énergies des photons doivent être beaucoup plus grandes que celles de la bande interdite E_g .

Les transitions optiques peuvent également se produire à des énergies plus faibles par un processus à deux étapes faisant intervenir non seulement est que l'absorption optique est réduite de manière significative dans le domaine du visible.

3.2. Propriétés optiques du silicium microcristallin ($\mu\text{-Si:H}$)

Le spectre d'absorption optique présenté sur la figure (I.11), montre un coefficient d'absorption supérieur pour le $\mu\text{-Si:H}$ que pour le c-Si, dans le domaine du visible (c-à-d. pour des énergies supérieures à 1.8 eV). Cet effet peut être expliqué par l'absorption lumineuse des régions amorphes du matériau et par le phénomène de diffusion de la lumière au sein du $\mu\text{-Si:H}$ [23-24]. Entre 1.1 eV et 1.6 eV, le $\mu\text{-Si:H}$ présente un coefficient d'absorption voisin de celui du c-Si. Ainsi, son absorption est supérieure dans le rouge et l'infrarouge comparé au cas de l'a-Si:H. Dans la zone d'absorption de la bande interdite (c-à-d. pour des énergies inférieures à 1.1eV), le coefficient d'absorption du $\mu\text{-Si:H}$ dépasse largement celui du c-Si et est légèrement plus élevé que celui de a-Si (silicium amorphe) :H. Ceci résulte de la présence des bandes localisées (aux joints des grains) et des défauts profonds, similaires à ceux trouvés dans le a-Si :H.

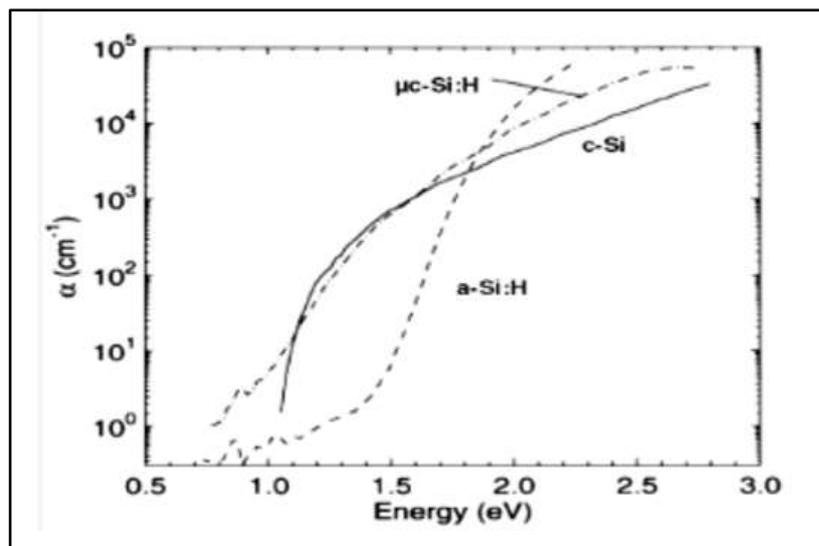


Fig I.11 Propriétés optiques du Silicium cristallin (c-Si et $\mu\text{-Si}$)

4. Structure de base d'une cellule solaire au silicium cristallin

4.1. Architecture de la cellule photovoltaïque

Les premières cellules solaires c-Si réalisées dans les années 1950 utilisaient des substrats de type n (dopés phosphore). À cette époque, leur première application n'était pas terrestre, mais spatiale, pour l'alimentation de satellites. Les substrats de type p se révélant plus résistants aux radiations, les cellules PV ont ensuite été développées sur du c-Si dopé Bore. Ces premières cellules étaient seulement constituées d'une jonction diffusée (émetteur) et d'un contact ohmique. Par rapport à ces simples photodiodes, l'architecture des cellules PV a ensuite rapidement évolué, et abouti à une architecture dite « standard » schématisée sur la figure (I.12).

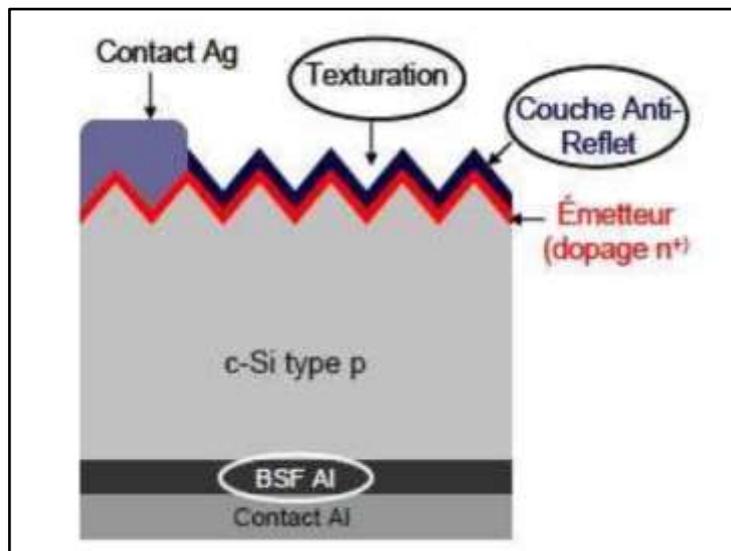


Fig 12. Schéma d'une cellule solaire standard

4.2. Principaux éléments dans la cellule

- Le substrat : le plus utilisé est le verre sodé ; on peut aussi utiliser des substrats flexibles (type Upolex) ou métalliques.
- Un contact ohmique inférieur.
- Une couche absorbante.
- Une couche tampon.
- Un oxyde transparent conducteur (OTC) : ITO, ZnO.
- Un contact ohmique supérieur (grille métallique) : Ni-A

4.2.1. Face avant

Afin de recueillir les porteurs photogénérés à partir du substrat semiconducteur sans perte d'énergie, des grilles métalliques sont utilisées sur la face avant. La métallisation peut provoquer un ombrage élevé et des pertes de résistance. Un compromis entre la transparence et la résistance série conduit à la production de lignes métalliques très étroites mais épaisses et très conductrices avec une faible résistance de contact. Ces doigts (fingers) métalliques de 10 à 15 μm d'épaisseur sont formés par lithographie ou évaporation. Pour rendre le contact sélectif, le substrat sous les lignes métalliques doit être fortement dopé.

Lorsque la surface exposée n'est pas passivée, l'émetteur doit être le plus mince possible car la vitesse de recombinaison en surface (SRV: surface recombination velocity) élevée réduit la collecte de la lumière absorbée, et en plus, fortement dopé pour diminuer la recombinaison. Si la surface est passivée, l'efficacité est augmentée en diminuant le niveau de dopage.

4.2.2. Face arrière

Généralement, le contact arrière des cellules solaires industrielles est formé par une couche d'aluminium pleine surface déposée par sérigraphie. Un champ répulsif de porteurs appelé BSF (Back Surface Field) est formé dont le rôle est de diminuer la vitesse de recombinaison en face arrière. Pour les cellules à haut rendement, la passivation est essentielle.

Afin de diminuer la vitesse de recombinaison, différentes alternatives à la sérigraphie de la couche d'aluminium sont utilisées pour passiver la face arrière. La diffusion du bore dans le silicium permet d'avoir un meilleur effet répulsif du BSF grâce à la plus grande dissolution du bore dans le silicium. La hauteur de la barrière de potentiel formée est plus importante et donc des concentrations de $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ sont atteintes au lieu de $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ pour l'aluminium.

De plus, au niveau des performances électriques, les vitesses de recombinaison pour un champ arrière à base de bore varient entre 500 cm/s et 1000 cm/s alors que pour l'aluminium, elles peuvent aller jusqu'à 5000 cm/s. Par contre, il n'y a pas d'amélioration véritable sur le rendement, en plus la méthode nécessite une diffusion à très haute température.

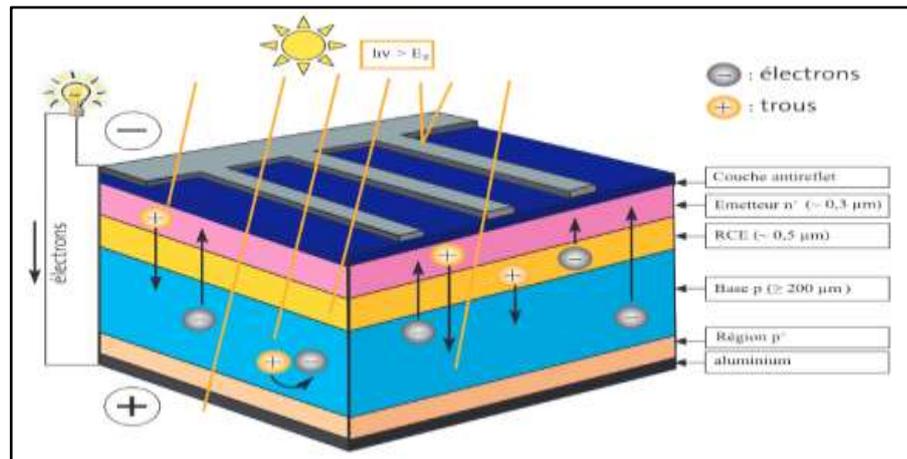


Fig I.13 Structure de base d'une Cellule Solaire

4.3. Cellule en Silicium monocristallin

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

Avantages : Meilleur rendement que le polycristallin (environ 150 Wc/m²) - Durée de vie importante (+/- 30 ans)

Inconvénients : Plus cher que le polycristallin - Rendement faible sous un faible éclairement

4.4. Cellule en Silicium polycristallin

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux. Lingot moins cher à produire que le monocristallin. Cependant, elle a un rendement faible sous un faible éclairement ou soleil diffus.

Avantages : Bon rendement (environ 100 Wc/m²) - Durée de vie importante (+/- 30 ans) - Moins cher que le monocristallin

Inconvénients : Rendement faible sous un faible éclairement. [10]

5. Cellule solaire à haut rendement

Afin de produire les rendements les plus élevés possibles, différentes techniques microélectroniques ont été utilisées. La cellule solaire haut rendement «PERL»(passivated emitter with rear locally diffused) a été développée à l'université de New South Wales «UNSW». Afin d'assurer une durée de vie maximale pour les porteurs minoritaires, des substrats de haute qualité de 450 μm d'épaisseur et de 1 $\Omega\cdot\text{cm}$ ont été utilisés. Parmi les avantages de la cellule PERL par rapport aux cellules conventionnelles, l'amélioration de la passivation de surface par une croissance thermique du SiO_2 qui permet également de maintenir des durées de vie élevées des porteurs minoritaires (supérieures à quelques millisecondes).

La figure (I.14) montre une structure de pyramide inversée à la surface avant qui réduit considérablement la réflexion à la surface avec une probabilité de pénétration de la lumière incidente double. Cette structure associée à un miroir de surface arrière forme une excellente structure de piégeage des photons faiblement absorbés entre la surface avant et arrière de la cellule et qui correspondent aux longueurs d'onde élevées.

La grille métallique est réalisée par photolithographie et pour réduire la réflexion en surface, une double couche anti reflet est appliquée à la surface avant de la cellule. La cellule PERL permet d'atteindre un rendement de 24,7% qui est considéré comme le rendement le plus élevé pour une cellule solaire en Silicium.

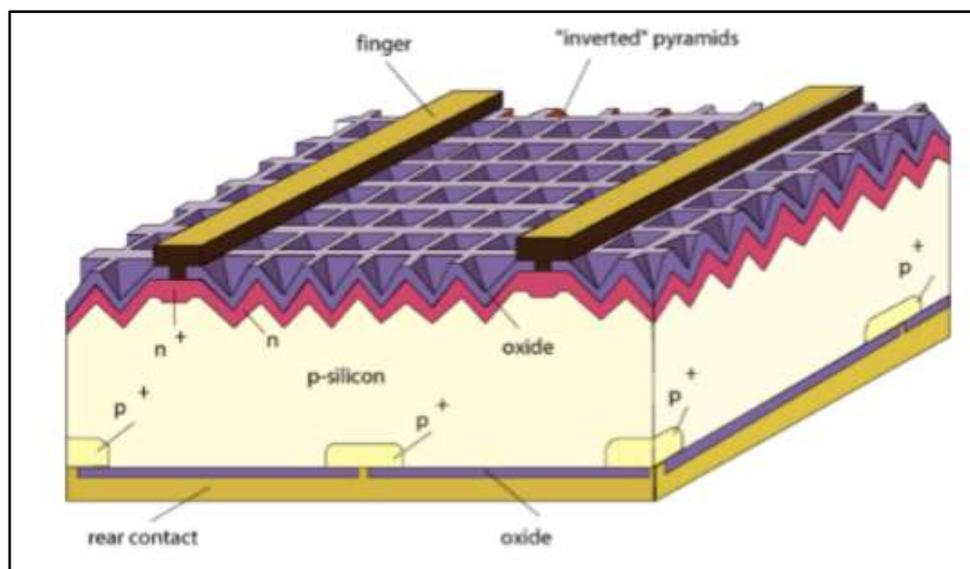


Fig I.14 Cellule solaire haut rendement

5.1. Rendement des cellules multicristallines

Le rendement d'une cellule photovoltaïque correspond au rapport entre la quantité d'énergie lumineuse transformée en électricité et la quantité d'énergie qui a été captée par le système. Il s'agit donc d'un pourcentage qui permet d'évaluer l'efficacité des cellules photovoltaïques. Plus ce pourcentage est élevé, plus la cellule produit d'électricité.

Les cellules qui ont le moins bon rendement sont celles au silicium amorphe : il est compris entre 6 % et 9 %.

Les cellules en silicium polycristallin ont un rendement situé entre 13 % et 18 %.

Enfin, les cellules ayant le meilleur rendement sont celles au silicium monocristallin, pour un rendement situé entre 16 % et 24 %.

Certains facteurs, autres que la technologie utilisée, peuvent avoir un impact sur le rendement d'une cellule photovoltaïque. C'est le cas par exemple de l'orientation et de l'inclinaison des panneaux solaires, de la zone géographique d'implantation ou encore de la présence de zone ombragée sur le toit. Pour rappel, un rendement optimal est possible avec une orientation sud, une inclinaison à 30°, une région ensoleillée et aucune zone d'ombre sur les panneaux (branches d'arbres ou bâtiments). [12]

5.2. Types des cellules solaire à haut rendement

5.2.1. Cellules à jonction : Cellules tandem (Cellule micro-morphe)

Quand on empile deux cellules simples l'une sur l'autre, on obtient des cellules tandem, La cellule « top » est mince (amorphe) et n'absorbe que les photons à haute énergie (bleue) tandis que la cellule « Botton » (en microcristallin) collectionne le reste des photons et les transforme en électricité par exemple : une couche mince de silicium amorphe empilée sur une couche silicium cristallin. Ce tandem optimise le rendement comparé à celui produit par des cellules simples toutes seules et ce, qu'elles que soient leurs caractéristiques (amorphes, cristallines ou microcristallines).

Les cellules empilées l'une sur l'autre sont mises en série grâce à une couche de recombinaison des porteurs de charges.

La tension de circuit ouvert du dispositif est donc la somme des tensions de circuit ouvert des cellules si elles étaient prises toutes seules, et le courant de court-circuit est le plus faible des deux cellules.

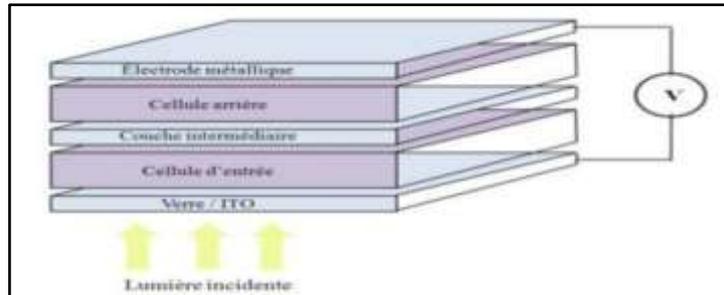


Fig I.15 Schéma d'une structure tandem

Cette structure offre l'avantage de pouvoir utiliser deux matériaux dont les bandes interdites (Spectres d'absorption) différent. Ce dispositif est capable d'absorber la somme des deux spectres d'absorption.

5.2.2. Cellules multi-jonctions

Les cellules multi-jonctions sont composées d'un grand nombre de semi-conducteurs (GaAs, Ge, GaInP2...) possédant chacun un spectre limité, de telle sorte que le choix des matériaux dont les longueurs d'onde limites soient les plus proches possibles les unes des autres. On obtient ces cellules multi-jonctions à partir de différentes couches minces, ce qui permet d'optimiser le travail d'absorption et obtenir un meilleur rendement, atteignant 50%. Le gros défaut de ces cellules est leur coût de fabrication, car aucune production industrielle n'a encore pu être mise en place. Ces cellules limitent les pertes d'énergie car il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants, Ainsi, il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de conversion très importants [13].

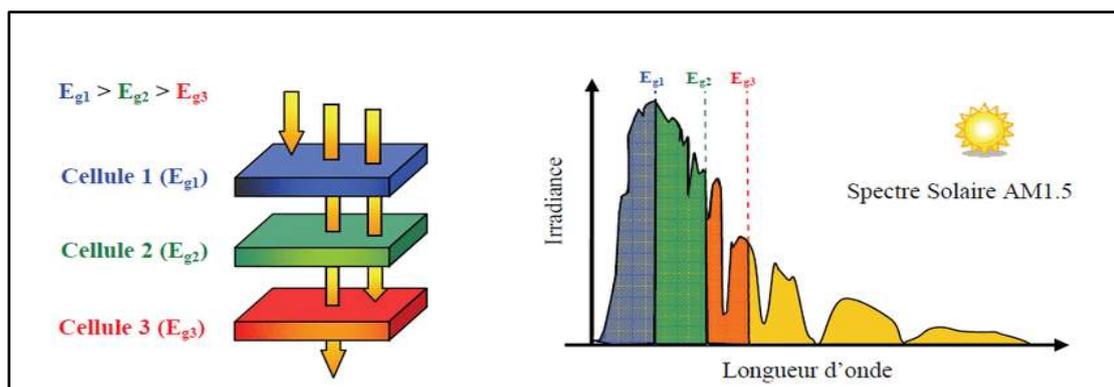


Fig I.16 Principe de la cellule multi-jonction.

Chapitre II

Simulation et Résultats

1. Introduction

Comme annoncé, ce mémoire se divise en deux parties, l'une théorique et l'autre pratique. Cette dernière, présentée dans les pages qui suivent, dans cette partie on va présenter les résultats de notre travail de simulation numérique des cellules solaires. La simulation numérique a été faite par le logiciel PC1D (Personnel Computer One Dimensionnel). Le but de cette étude est d'étudier l'analyse approfondie des paramètres clés d'une cellule solaire au silicium et de déterminer les paramètres optimaux donnant lieu les meilleures performances d'une cellule solaire photovoltaïques ensuite on va étudier l'influence des paramètres de la cellule sur les performances de la cellule photovoltaïques tels que l'épaisseur de couche d'oxyde transparent conducteur, le dopage ainsi que de la réflexion sur les paramètres photovoltaïques de ces cellules.

2. Présentation du programme de simulation PC1D

Le logiciel de simulation numérique des cellules solaires PC1D est largement utilisé dans le domaine photovoltaïque. Il a une grande réputation au sein du milieu de la recherche sur l'énergie solaire. Il a été développé à l'université « New South Wales of Sydney » en Australie qui est l'une des pionnières dans la spécialité. Son succès est basé sur sa vitesse d'exécution, son interface utilisatrice et ses mises à jour continues (la dernière en date étant la version 5.9). On peut simuler une structure photovoltaïque en introduisant ses paramètres (géométrie, dopages, paramètres électriques et optiques, etc....), en choisissant l'excitation et enfin en exécutant le programme pour l'obtention des résultats.

Le logiciel se compose de quatre parties. Les trois premières sont consacrées à la programmation où il faut introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation. La quatrième partie concerne les résultats de la simulation.

2. Présentation du programme de simulation PC1D

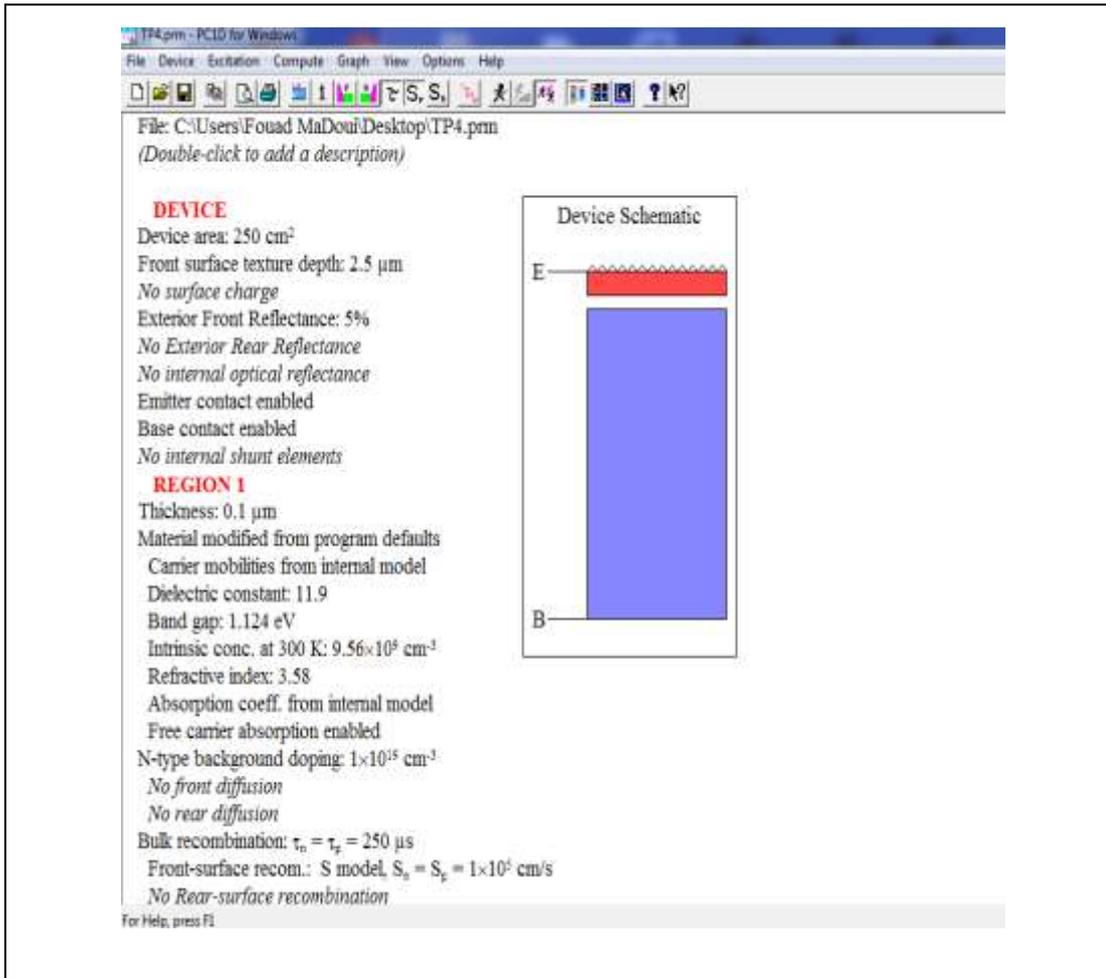


Fig II.1 L'interface du programme PC1D

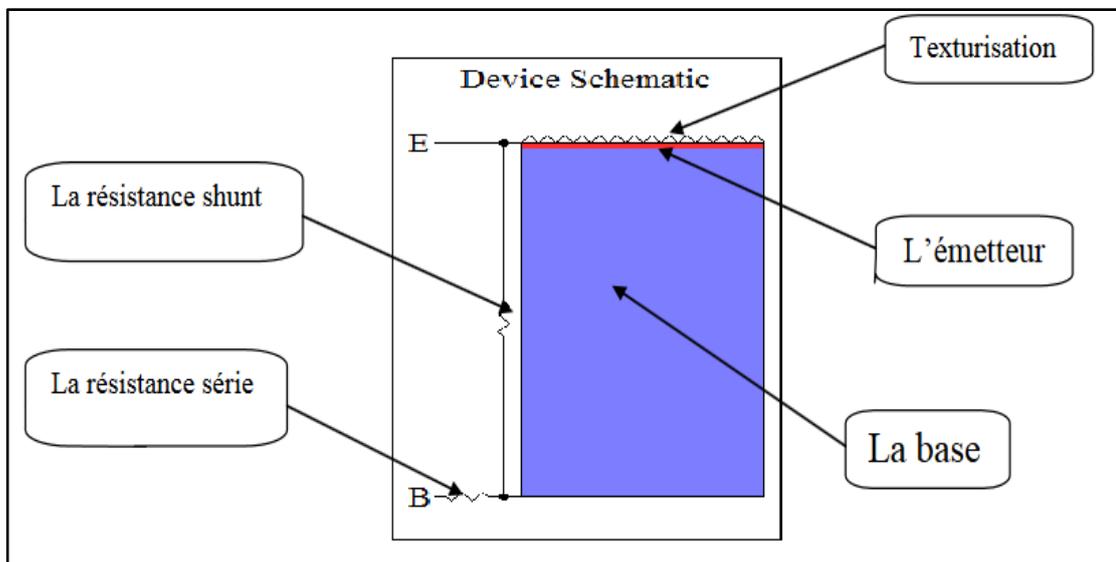


Fig II.2 Schéma global du dispositif d'une cellule solaire.

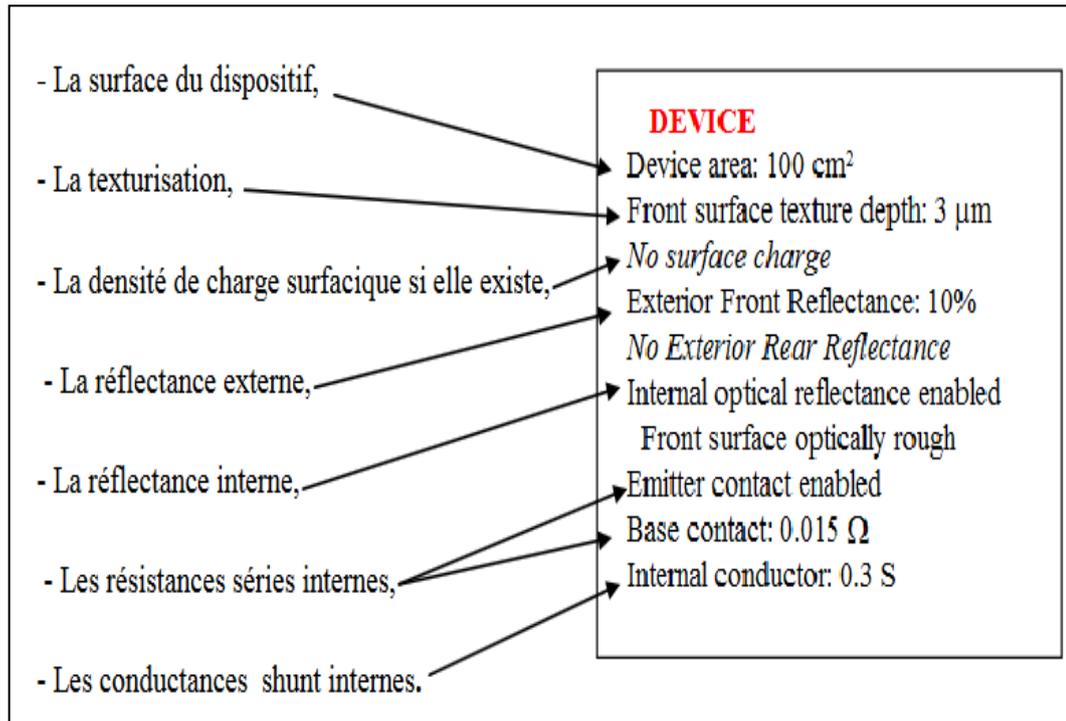


Fig II.3 Informations sur chaque instruction

3. Structure et simulation de la cellule

3.1. Paramètres de simulation

3.1.1. Les paramètres des régions

On peut introduire plusieurs régions (jusqu'à 5) selon la forme et les propriétés de la structure. Ces paramètres de région sont les suivants :

- ✓ L'épaisseur du matériau.
- ✓ Le matériau utilisé : les paramètres qui le décrivent sont stockés dans des fichiers d'extension (*.mat). Ils sont fournis avec le logiciel pour les matériaux les plus utilisés comme le silicium, le germanium et l'arséniure de gallium. Les paramètres placés dans ce fichier sont : les mobilités, la constante diélectrique (permittivité électrique), l'énergie du gap (eV), l'indice de réfraction, la concentration intrinsèque des porteurs (cm⁻³), le coefficient d'absorption optique (cm⁻¹) et l'absorption des porteurs libres.
- ✓ Le type et la concentration du dopage.
- ✓ Les durées de vie des porteurs.
- ✓ Les vitesses de recombinaison dans chaque région.

3.1.2. Les paramètres d'excitation

Le logiciel contient deux fichiers intégrés :

- ✓ Le fichier « One-Sun.exc » (intensité globale de tout le spectre d'un seul soleil) permet de simuler différentes caractéristiques (courant/tension-puissance/tension, etc...)
- ✓ Le fichier « Scan-qs.exc » (intensité de chaque longueur du spectre) pour la simulation de la réponse spectrale.
- ✓ Le mode d'excitation : il y a trois modes d'excitation (en équilibre, stationnaire et transitoire).
- ✓ La température.
- ✓ Le circuit collecteur (résistance, tension).
- ✓ L'éclairement (intensité, fichier d'air masse généralement AM1, 5G).

Dans le processus de fabrication de cellules solaires Si, épaisseur de l'émetteur (type n), épaisseur de la base (type p), la densité de dopant de l'émetteur (type n) et la densité de dopant de la base (type p) sont les plus importants paramètres. L'identification de l'ampleur de ces paramètres est une condition préalable à une cellule. Cependant, ces quatre paramètres diffèrent généralement de 2 à 4 ordres de grandeur. Dès lors, faire les expériences peuvent être une méthode très coûteuse dans le processus pour découvrir le meilleur paramètre ordre de grandeur. En comparaison, la simulation par PC1D est une méthode bon marché et efficace.

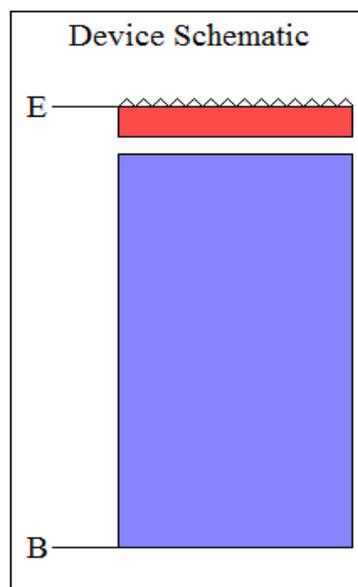
Dans la partie suivante, nous utilisons PC1D pour déterminer l'amplitude optimale des paramètres de la cellule solaire et développer une meilleure compréhension de la façon dont ces facteurs affectent les performances des cellules solaires.

Les réglages et paramètres de notre « cas d'origine » sont présentés dans le tableau (1). Tous les cas sont générés sur la base du "cas d'origine" en modifiant un seul paramètre.

Tableau.1. Paramètres de la cellule

Paramètres	Valeurs
Epaisseur de l'émetteur	0.10 μm
Epaisseur de l'absorbeur	100 μm
Dopage de l'émetteur	$10^{19} cm^{-3}$
Dopage de l'absorbeur	$5*10^{15} cm^{-3}$
Température	25°C
La surface de la cellule	250 cm^2
Energie de gap	1.124 eV
Concentration intrinsèque des porteurs	$9.56*10^9 cm^{-3}$
Réflexion externe	5%
Recombinaison dans le substrat	$\tau_n = \tau_p = 250 \mu s$
Recombinaison en face avant	100000 $cm S^{-1}$
Recombinaison en face arrière	100 $cm S^{-1}$
Texturation en surface avant	45°
Profondeur de texturayion	2.5 μm
Irradiation lumineuse	0.1 W cm^{-2}
Spectre	AM 1.5G

3.2. Représentation de la structure

**Fig II.4** Schéma de la structure

4. Détermination de l'épaisseur optimale de l'émetteur

4.1. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la caractéristique I(V)

Afin de voir l'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur les performances de la cellule, nous l'avons fait varier de 0,01 μm à 10 μm tandis que les autres paramètres restent inchangés.

Les différentes caractéristiques $I(V)$ sont représentées sur la figure (II.5). Le résultat révèle une relation inverse entre l'épaisseur de l'émetteur et le courant de court-circuit I_{cc} . Une augmentation considérable de I_{cc} de l'ordre de 6A est observée lorsque l'épaisseur de l'émetteur W_n diminue de 10 μm à 0,1 μm . En revanche, il n'y a qu'une légère amélioration de I_{cc} lorsque cette épaisseur est réduite de 0,1 μm à 0,01 μm .

Cette amélioration est nettement observée sur le graphe de la figure ci-dessous représentant les performances photovoltaïques de la cellule en fonction de l'épaisseur de l'émetteur. En effet, le meilleur rendement avoisinant les 17.2% est atteint pour une épaisseur de l'ordre de 0.1 μm et chute au-delà de cette valeur, ceci est dû à la diminution du courant de court circuit.

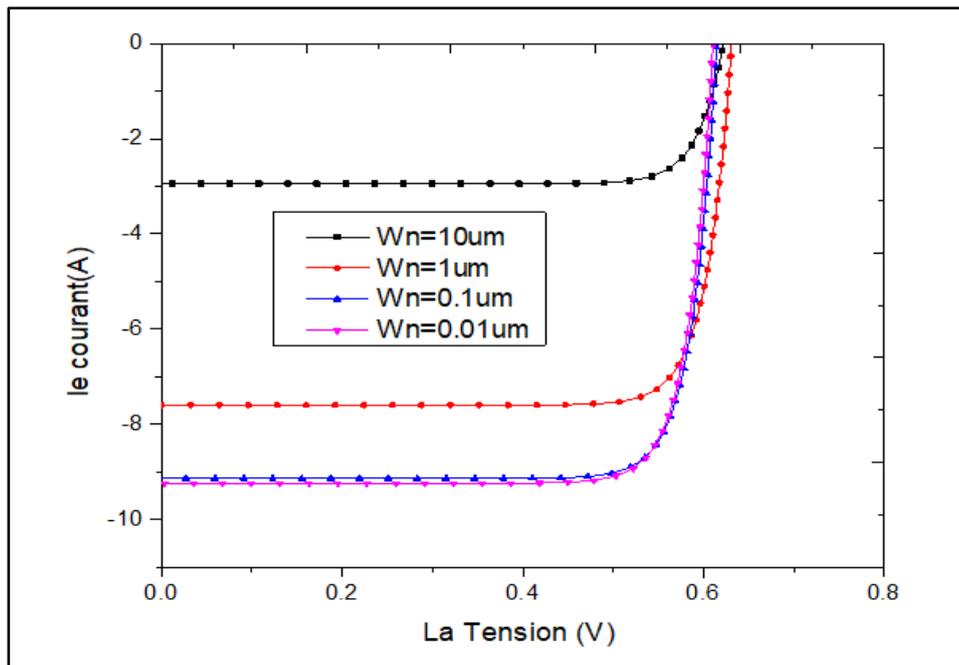


Fig II.5 Influence de la variation de l'épaisseur de l'émetteur sur la caractéristique I(V)

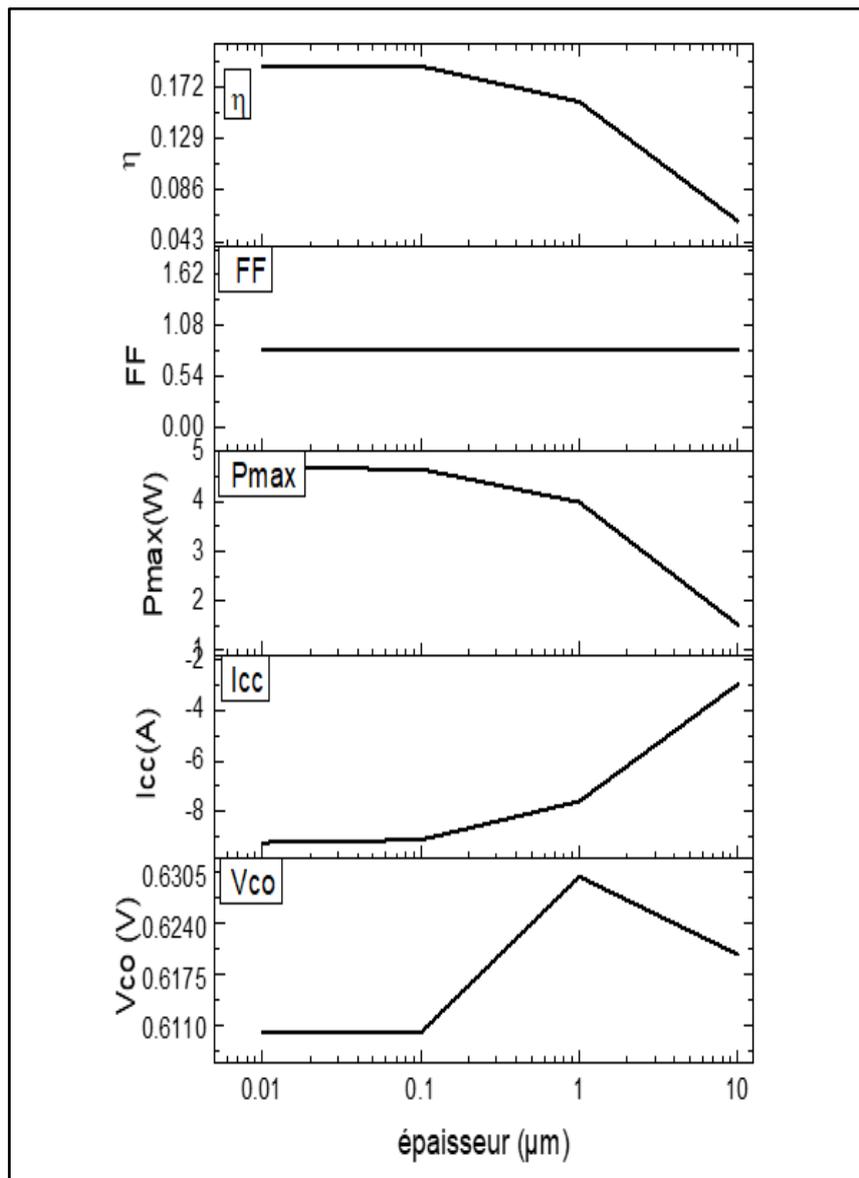


Fig II.6 Influence de W_n sur les performances photovoltaïques

4.2. Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la longueur de diffusion

Du moment que la probabilité de collecte des porteurs de charge au niveau de la jonction pn dépend fortement de la longueur de diffusion et des dimensions de la cellule, une faible épaisseur de l'émetteur est idéale pour une bonne diffusion. L'épaisseur optimale est ainsi $W_n=0.1\mu\text{m}$.

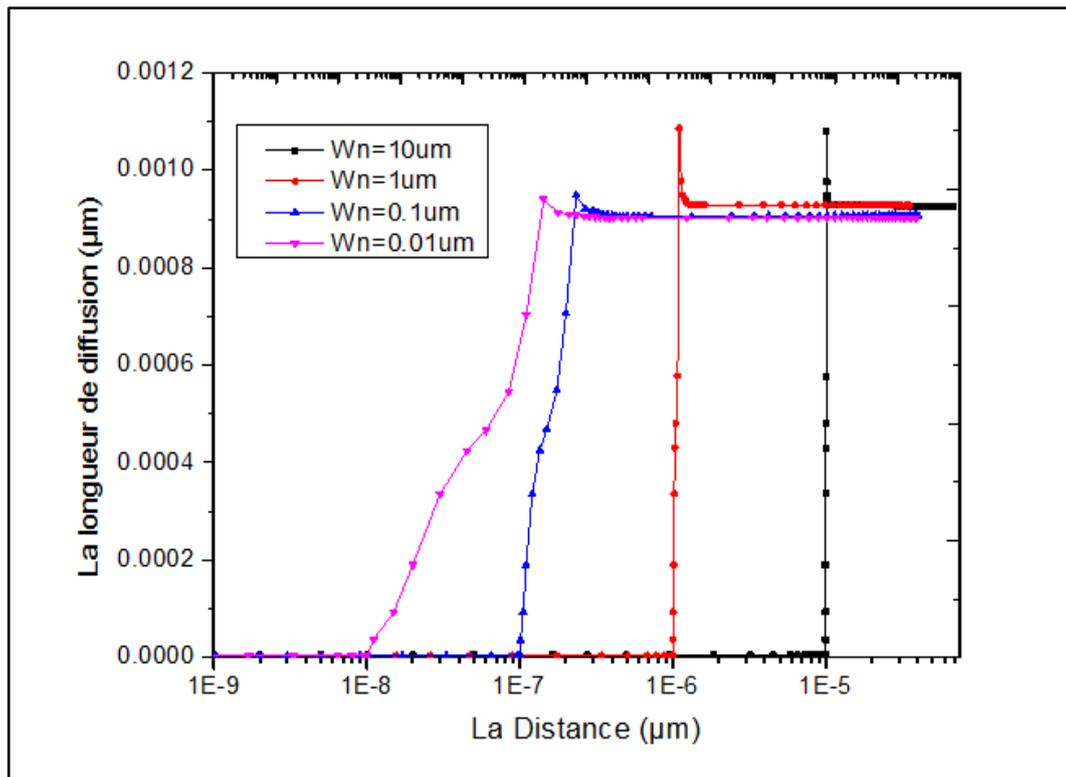


Fig II.7 Influence de la variation de l'épaisseur de l'émetteur sur la longueur de diffusion

5. Détermination de l'épaisseur optimale de l'absorbeur

5.1. Influence de l'épaisseur de l'absorbeur sur la caractéristique I(V)

Une variation de l'épaisseur de l'absorbeur dans l'intervalle allant de $10\mu\text{m}$ à $1000\mu\text{m}$ est effectuée dans le but de voir l'effet sur les performances de la cellule. Les caractéristiques I(V) représentées sur la Figure (II-8) montrent qu'une augmentation de l'épaisseur de l'absorbeur affecte considérablement le courant de court-circuit. En effet, lorsque l'épaisseur de l'absorbeur augmente, le nombre de photons croît également en excitant ainsi plus d'électrons dans la bande de conduction ce qui fait augmenter le courant de court-circuit.

5. Détermination de l'épaisseur optimale de l'absorbeur

La figure (II.9) expose les différents paramètres photovoltaïques lorsque l'épaisseur de l'absorbeur varie de $10\mu\text{m}$ à $1000\mu\text{m}$. On note l'augmentation de I_{cc} et du rendement de conversion η proportionnellement à l'augmentation de l'épaisseur. En revanche, la tension de circuit-ouvert V_{co} et le facteur de forme FF chutent à partir d'une épaisseur de $100\mu\text{m}$ ce qui fait de cette dernière l'épaisseur optimale.

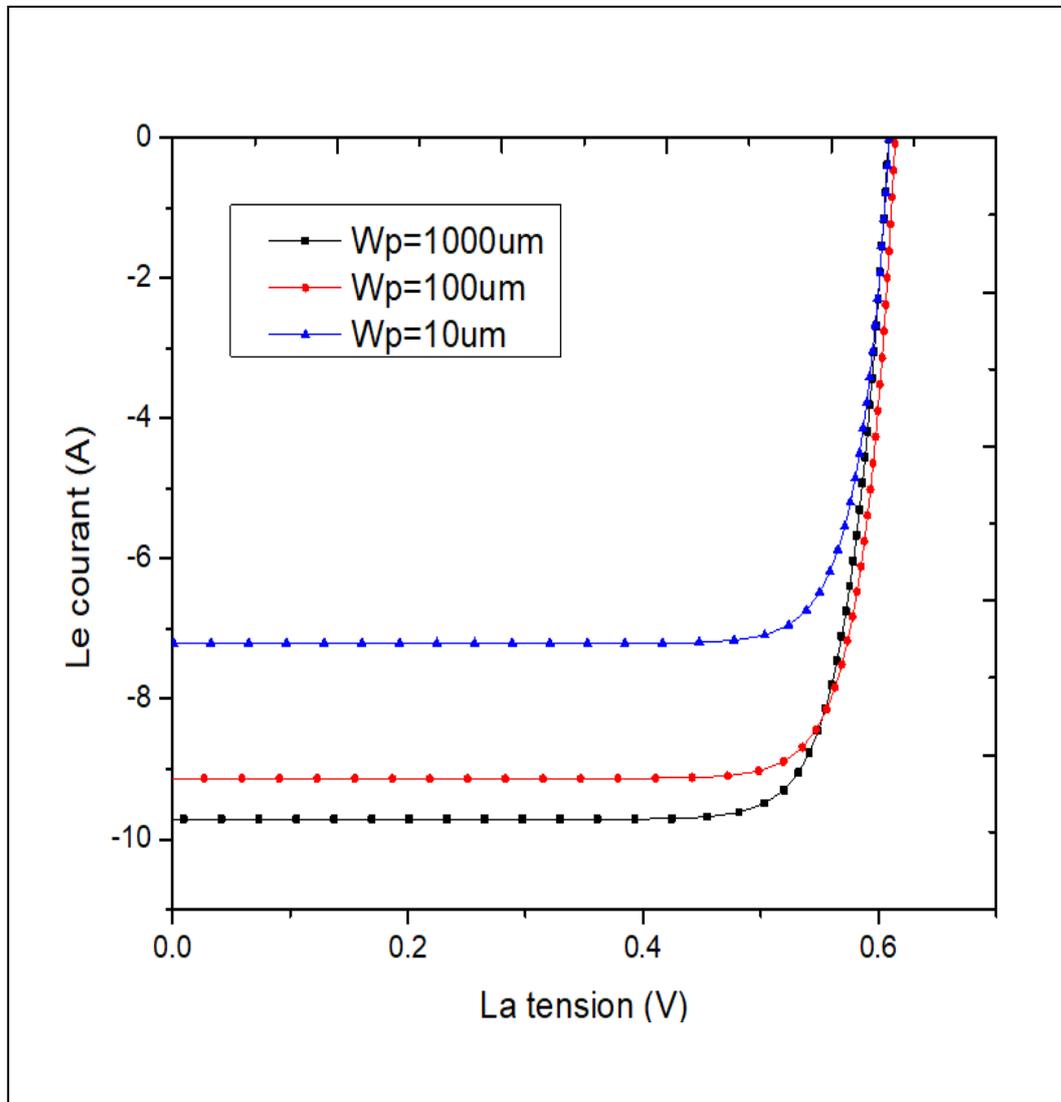


Fig II.8 Influence de la variation de l'épaisseur de l'absorbeur sur la caractéristique $I(V)$.

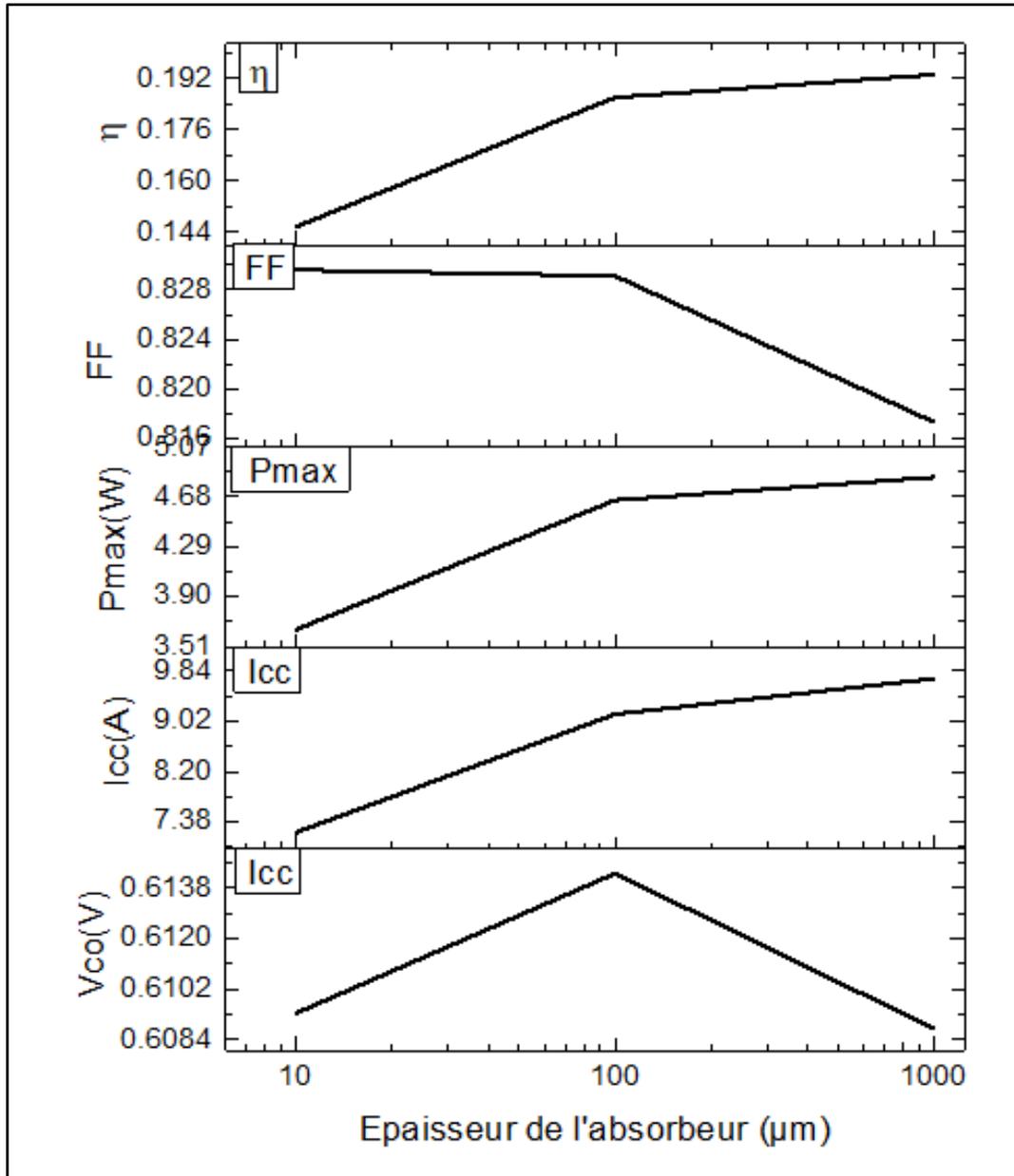


Fig II.9 Influence de la variation de W_p sur les performances photovoltaïques

5.2. Influence sur la photogénération des porteurs

D'après le graphique de la figure (II-10), le taux de porteurs photogénérés est minimal pour une épaisseur de 10 μm et croît continuellement avec l'augmentation de l'épaisseur jusqu'à atteindre son maximum pour l'épaisseur la plus élevée de l'absorbeur. Cependant, le risque de présence de la résistance série ainsi que le coût

5. Détermination de l'épaisseur optimale de l'absorbeur

élevé pour un absorbeur élevé conduit à se contenter d'une épaisseur de 100 μm seulement.

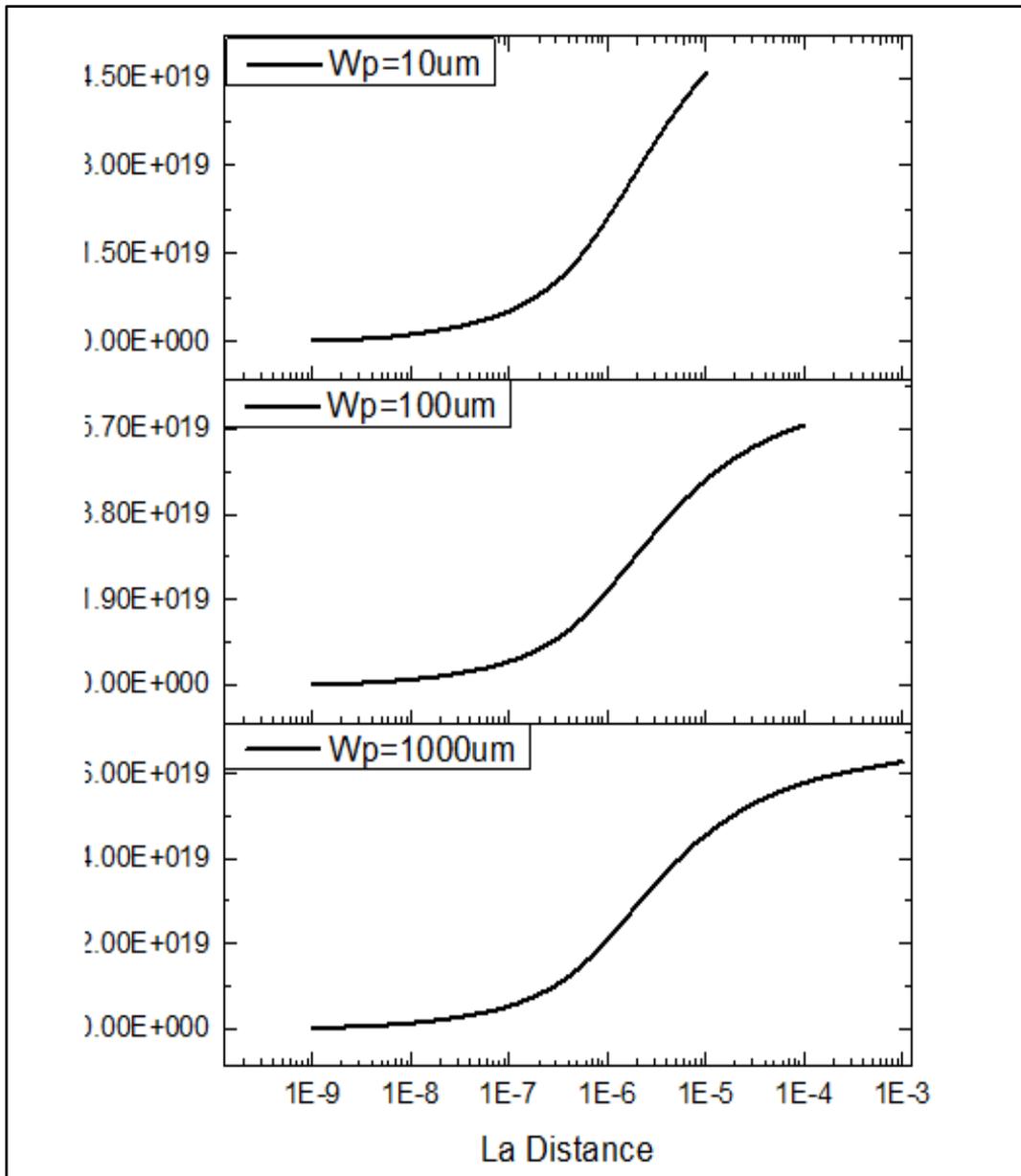


Fig II.10 Influence de la variation de l'épaisseur de l'absorbeur sur la photogénération des porteurs

6. Choix du dopage de l'émetteur

6.1. Caractéristique I(V) et performances photovoltaïques

Afin de déterminer les performances photovoltaïques de la cellule en fonction de dopage de l'émetteur, différentes concentrations des atomes donneurs sont proposées pour la simulation de notre cellule.

Sur la figure (II-11), on observe que la variation du dopage de l'émetteur affecte beaucoup plus la tension de circuit-ouvert V_{co} que le courant de court-circuit I_{cc} . Une augmentation de la tension V_{co} est perçue pour les forts dopages alors que le courant de court-circuit reste inchangé mais chute pour un dopage de 10^{21} cm^{-3} . Une tension de 0.63 V est obtenue pour un dopage optimal $N_d=1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Le graphe de la figure (II-12) représentant les performances photovoltaïques en fonction du dopage expose clairement ces résultats. Le rendement de conversion pour ce dopage optimal avoisine les 19%. [15]

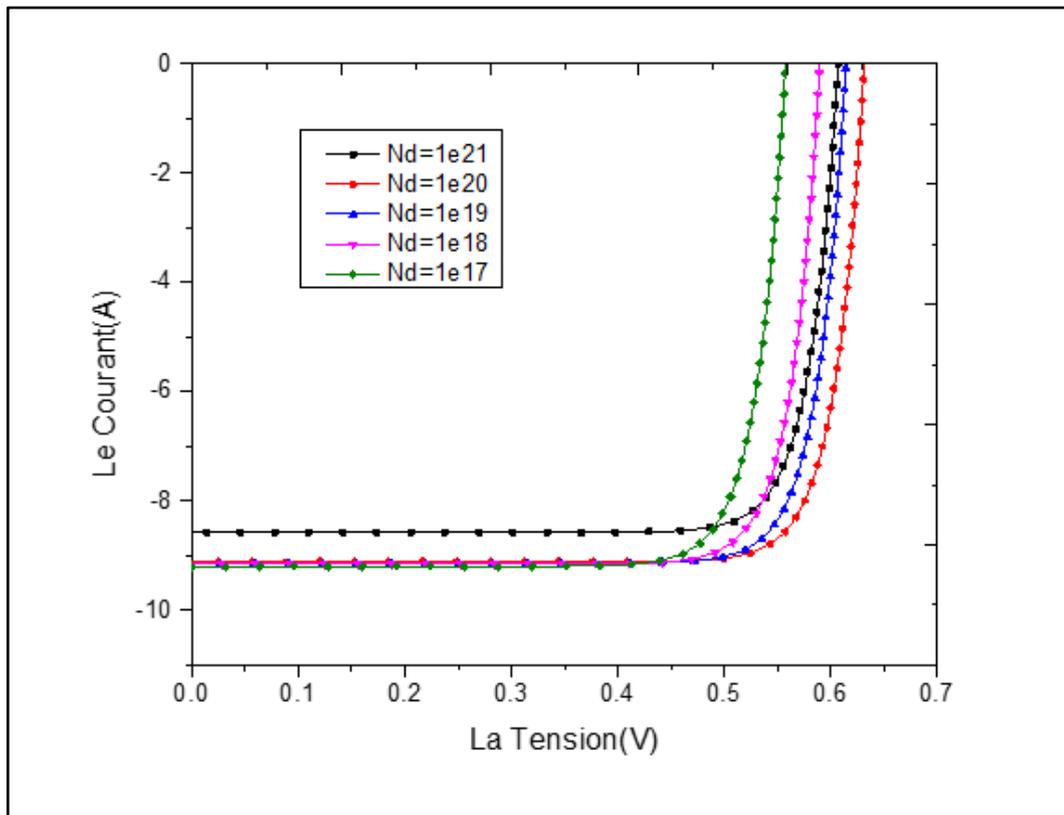


Fig II.11 Influence de la variation de dopage de l'émetteur sur la caractéristique I(V).

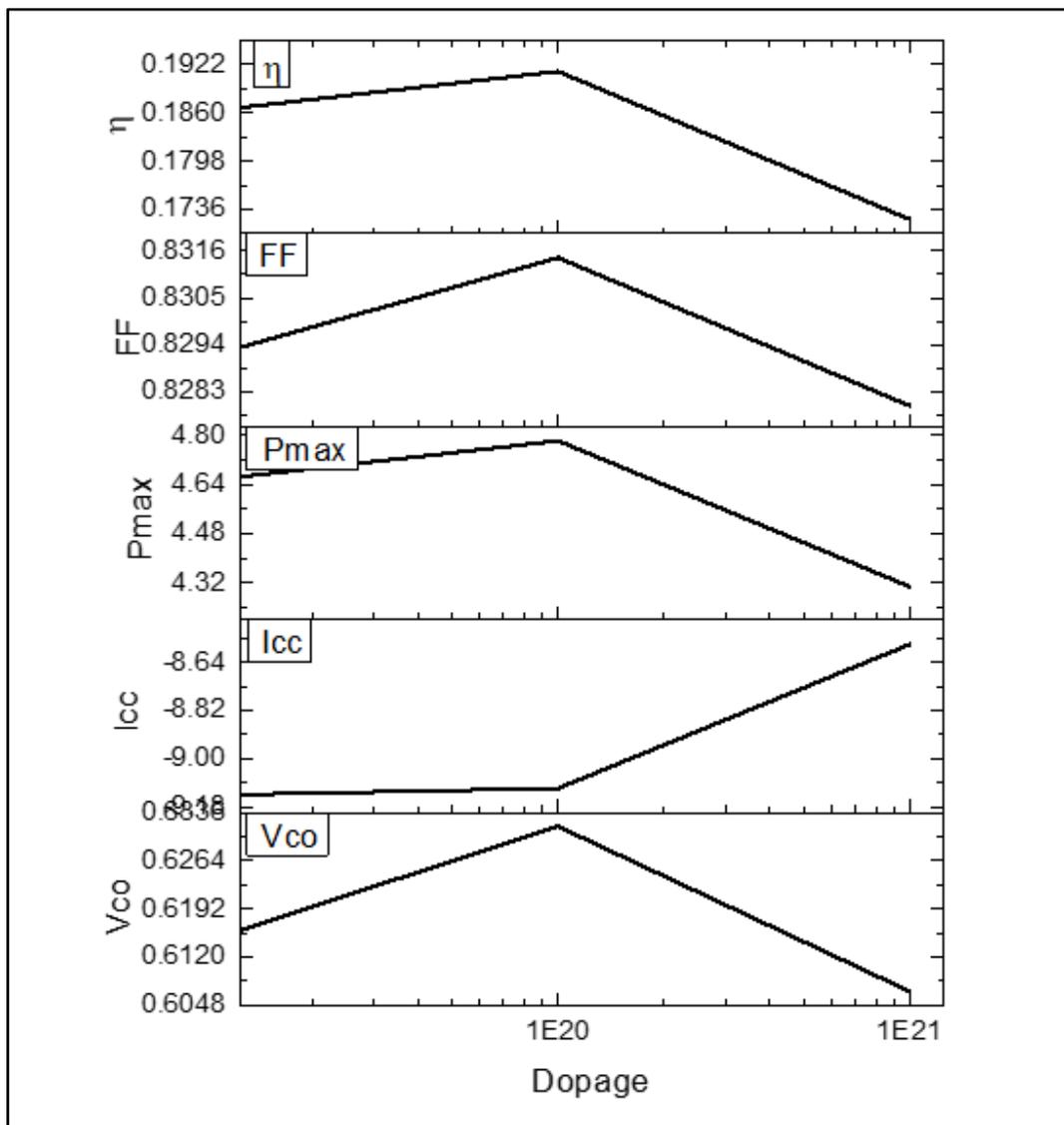


Fig II.12 Influence de la variation Nd sur les performances photovoltaïques

6.2. Influence du dopage de l'émetteur sur les paramètres internes

6.2.1. L'effet sur la longueur de diffusion

Comme l'émetteur est fortement dopé ($N_d=1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$), la recombinaison y est très importante et par conséquent la longueur de diffusion diminue.

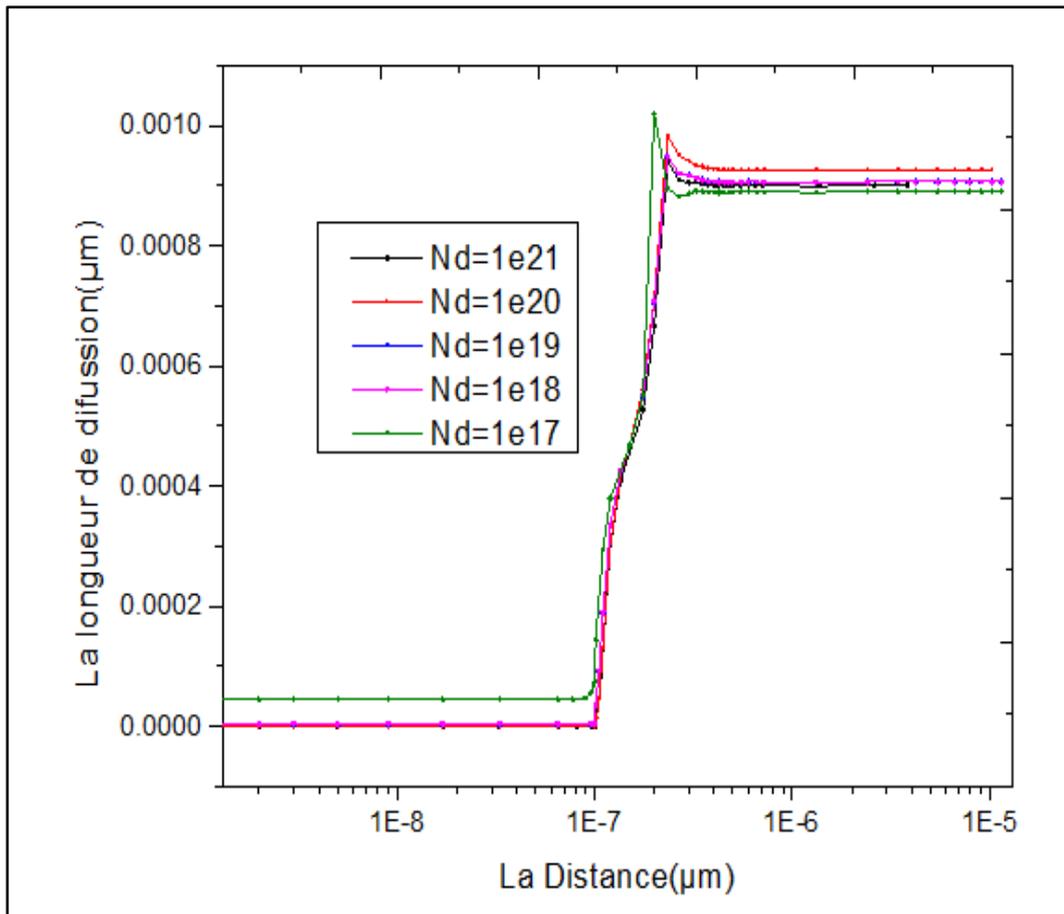


Fig II.13 Influence du dopage de l'émetteur sur la longueur de diffusion

6.2.2. L'effet sur la durée de vie des porteurs

De même, la durée de vie des porteurs minoritaires τ diminue également pour les dopages élevés de l'émetteur puisqu'il existe une relation de proportionnalité entre τ et la longueur de diffusion. Les faibles longueurs de diffusion sont responsables de la recombinaison des porteurs de charge ce qui les empêche d'atteindre la jonction.

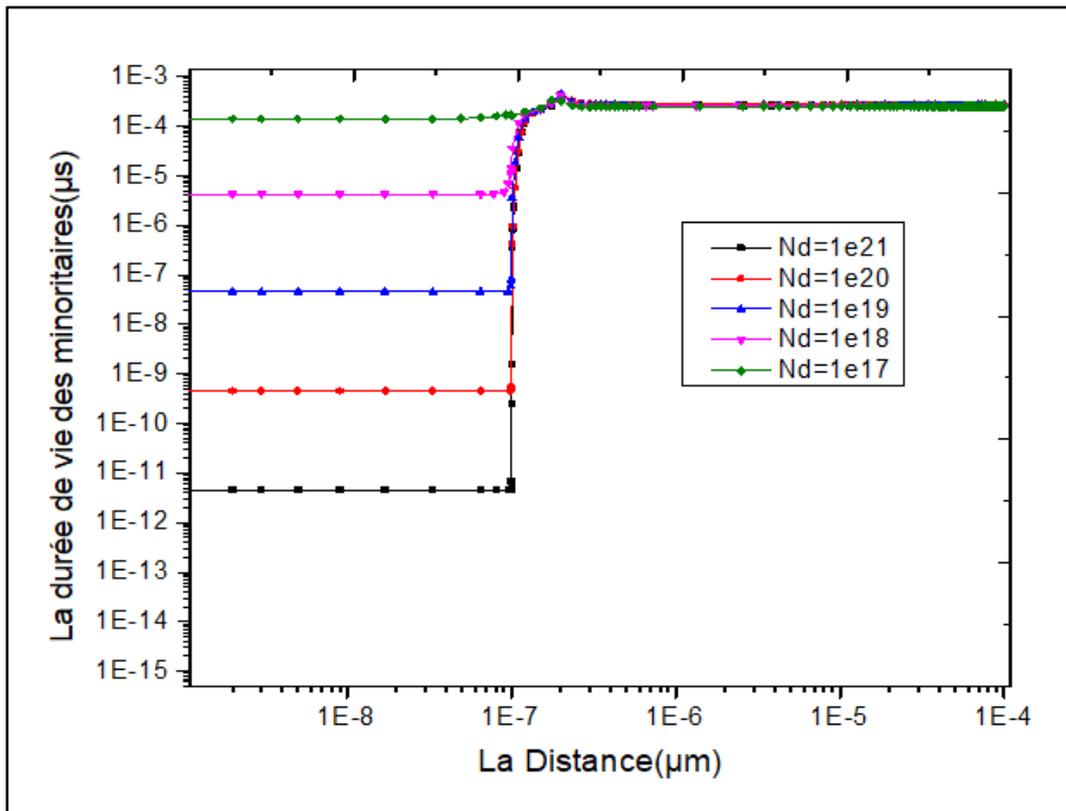


Fig II.14 Influence du dopage de l'émetteur sur la durée de vie des porteurs

6.2.3. L'effet sur la conductivité

Il est connu que l'augmentation du dopage fait diminuer le gap et par conséquent la tension V_{co} augmente. La figure (II-15) représentant l'effet du dopage sur la conductivité montre que cette dernière croît dans la région n avec l'élévation du dopage de l'émetteur ce qui fait réduire la résistance série et augmenter la tension.

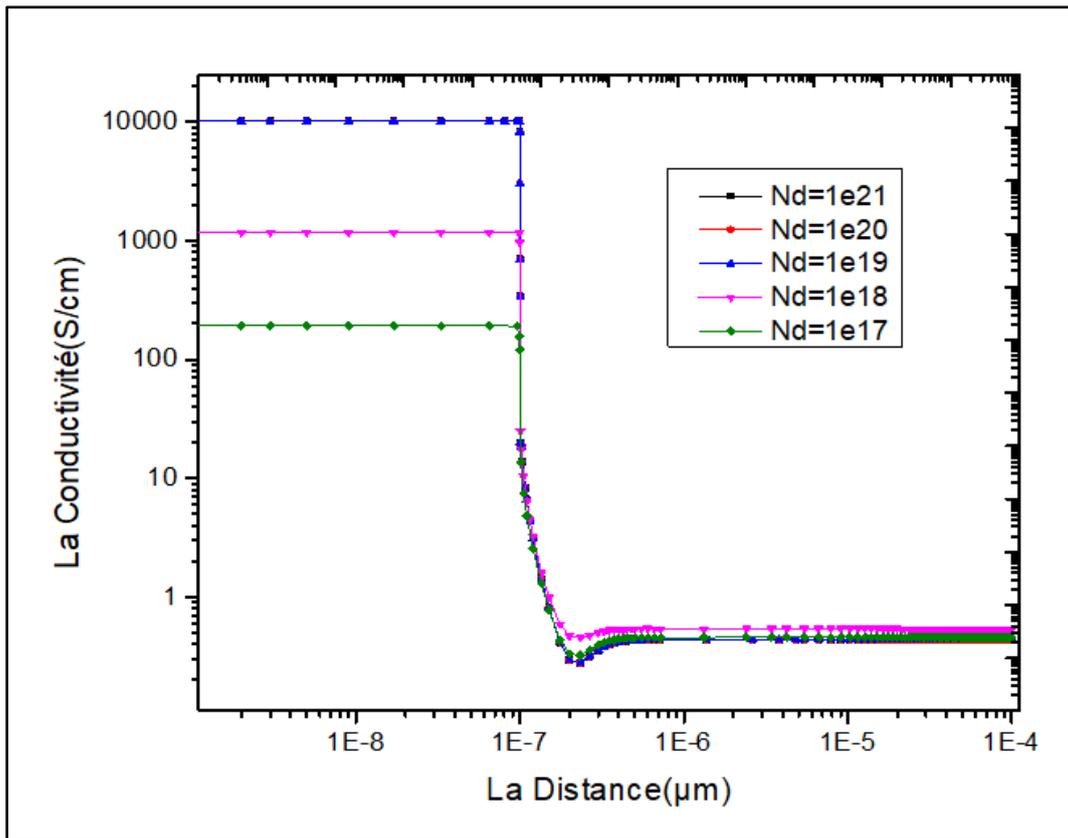


Fig II.15 Influence de Nd sur la conductivité

7. Choix du dopage de l'absorbeur

7.1. Caractéristiques I(V) et performances photovoltaïques pour différents dopages de l'absorbeur

D'après les caractéristiques I(V) de la cellule pour différents dopages de l'absorbeur représentées sur la figure (II-16), il est clair qu'un dopage de $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ est optimal pour notre cellule alors qu'au-delà de cette valeur, le courant de court-circuit diminue et bien sûr le rendement de conversion.

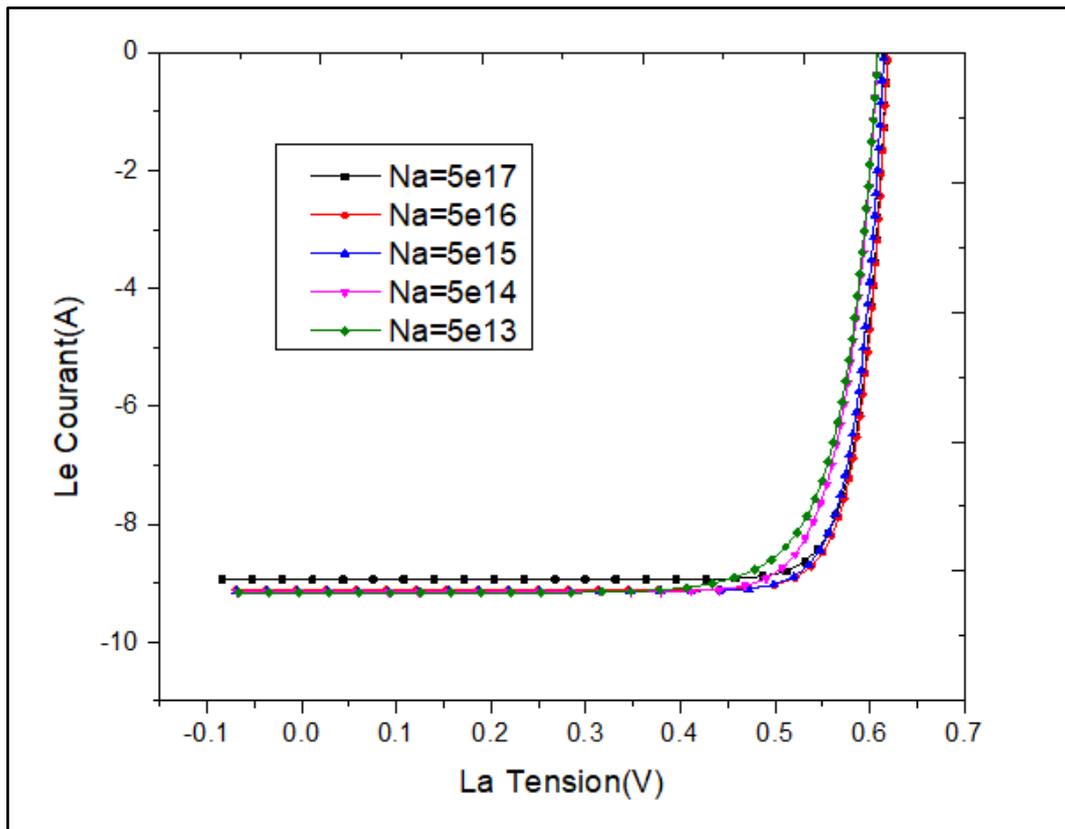


Fig II.16 Influence de la variation de dopage de l'absorbeur sur la caractéristique I(V).

7.2. Influence du dopage de l'absorbeur sur les paramètres internes

7.2.1. L'effet sur la longueur de diffusion et la durée de vie des porteurs

Les figures (II-17) et (II-18) représentent la longueur de diffusion ainsi que la durée de vie des minoritaires pour une variation du dopage de l'absorbeur dans la plage allant de 5×10^{13} à $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Ces deux grandeurs varient proportionnellement l'une avec l'autre mais inversement avec le dopage de l'absorbeur. En effet, l'augmentation du dopage de l'absorbeur jusqu'à la valeur de $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ réduit légèrement la longueur de diffusion et la durée des porteurs minoritaires alors que pour $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ atomes dopants, la diminution est importante. Il est clair que cette variation se manifeste dans la zone p de la cellule.

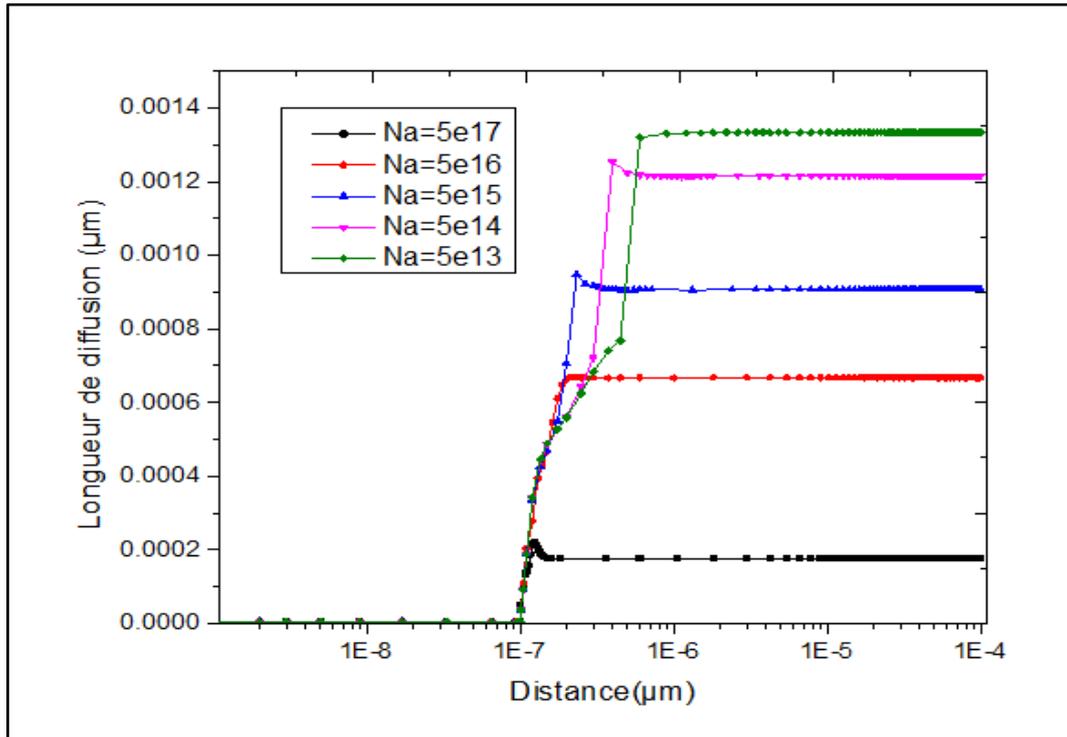


Fig II.17 Influence de Na sur la longueur de diffusion

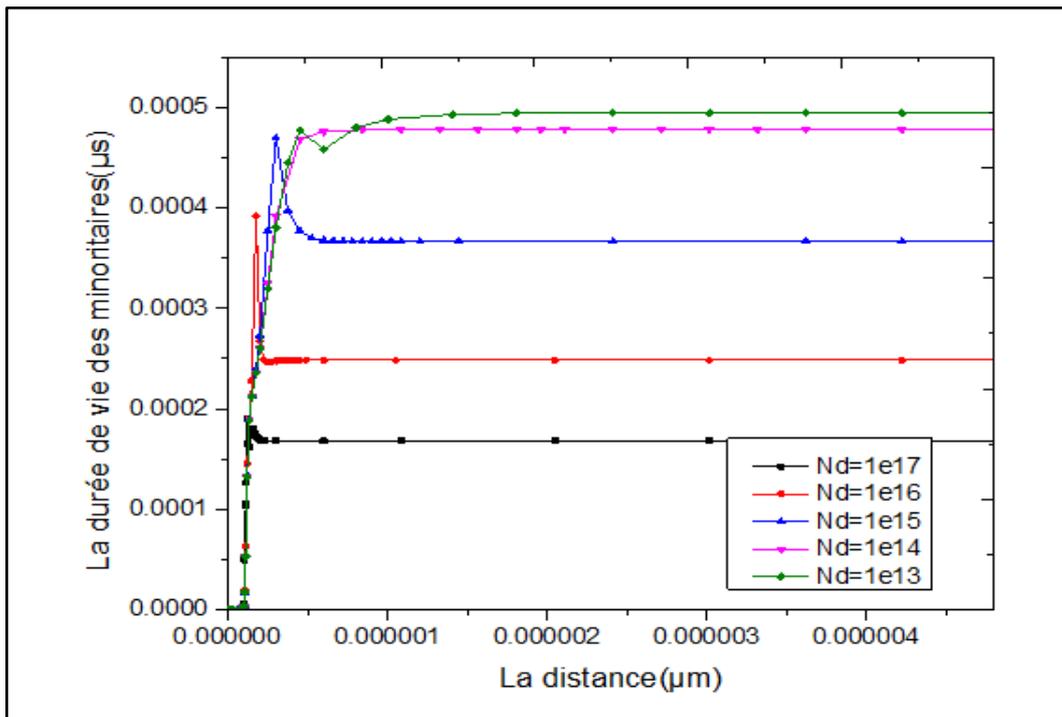


Fig II.18 Influence de Nd sur les paramètres la durée de vie des porteurs)

7.2.2. L'effet sur la conductivité

La meilleure conductivité est évidemment obtenue pour les dopages les plus élevés à savoir 5×10^{16} et $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, cependant, d'après les représentations graphiques précédentes, ce dernier dopage n'est pas optimal ce qui nous conduit à choisir le dopage $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. On note une faible conductivité pour les dopages restants présentés sur la figure (II-19).

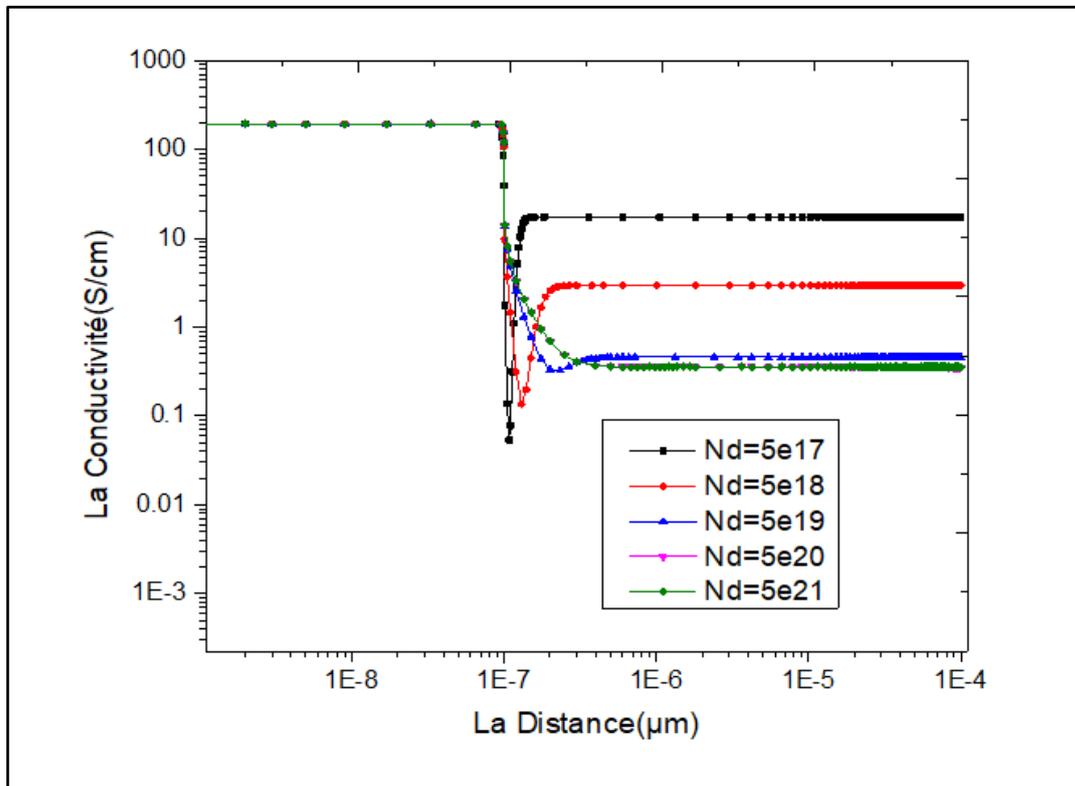


Fig II.19 Influence du dopage de l'émetteur sur la conductivité

8. Conclusion

A l'aide du programme de simulation numérique PC1D, on a démontré que les grandeurs optimales de l'épaisseur de l'émetteur, de l'épaisseur de l'absorbeur, de la densité de dopant de l'émetteur et de la densité de dopant de la base sont respectivement $0,1 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, 10^{20} cm^{-3} et $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Ce travail montre également le potentiel de PC1D à être largement utilisé dans le processus de conception de cellules solaires en raison de son efficacité et de sa fiabilité.

Conclusion générale

Le développement des énergies renouvelables est devenu une priorité, sinon une nécessité de survie à l'échelle humaine pour se détourner de la course insensée vers le mur invisible des contraintes et du fini.

La filière photovoltaïque a connu des bonds et rebonds significatifs en matière de performances et de coût ces dernières décennies puisqu'elle a profité, d'une part, comme les autres filières technologiques des nouvelles connaissances acquises dans le domaine des matériaux, et d'autre part de la simulation qu'elle provoque chez les chercheurs puisqu'elle leur pose un noble défi.

Notre objectif est d'étudier les paramètres influençant les performances d'une cellule solaire à base de silicium. L'analyse approfondie des paramètres clés de la cellule solaire au silicium à l'aide du logiciel PC1D a permis de déterminer les paramètres optimaux comme l'épaisseur, le dopage de l'émetteur et le dopage de la base. Les caractéristiques $I(V)$ de la cellule ont également été analysés pour prévoir le comportement des paramètres internes comme la longueur de diffusion, la durée de vie des minoritaires, la conductivité, etc. Le programme PC1D a prouvé son efficacité dans la détermination de ces paramètres afin de pouvoir passer à l'expérimental.

Références bibliographiques

[01] fr.wikipedia.org, Cellule photovoltaïque, « Introduction », Article vitrifiée jusqu'à le (27 novembre 2021).

[02] Djamaia BOUGHANEM, Influence des propriétés du silicium amorphe hydrogéné sur la performance d'une Cellule solaire HIT, Thèse de MASTER, Physique des Matériaux, Université Abdelhamid Ben Badis – Mostaganem.

[03] fr.lenergie-solaire.net, Effet photovoltaïque et son principe de fonctionnement.

[04] Houda CHABANE, Etude d'une cellule solaire à base de structure PIN, Thèse de Magister en électronique, Université Hadj Lakhdar de Batna, (2015).

[05] Imen KIHAL, Etude et simulation des cellules solaires photovoltaïques à base de silicium, Thèse de Master en Physique des Matériaux, université Mohamed Seddik ben yahia-Jijel,(2020).

[06] HANDBOOK OF SEMICONDUCTOR WAFER CLINING TECHNOLOGY (Science, Technology, and Applications), Werner Kren; NOYES PUBLICATIONS, Westwood New Jersey, U.S.

[08] A.Mekemeche,, Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes., Thèse de Doctorat en conversions photovoltaïques, Université Mostaganem, (2017).

[09] Eric MOYEN Conception et élaboration de substrats semi-conducteurs nanostructurés nouvelles applications en nanosciences, Sungkyunkwan University, researchgate.net

[10] Physique des semi-conducteurs, optique-ingenieur.org

[11] mypower.engie.fr

[12] M. Petibon Stéphane « nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2009.

[13] M. Petibon Stéphane « nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, (2009).

[14] Dr. Fahima KHALED, Dispositifs photovoltaïques, Polycopié de cours destiné aux étudiants de Master 1 en microélectronique, Département d'Électronique, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université Mohamed Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arreridj.

[15] Dr. Xiyang Cai, Xinjie Zhou, Ziyi Liu, Fengjing Jiang, Qingchun Yu, « An in-depth analysis of the silicon solar cell key parameters' optimal magnitudes using PC1D simulations »

Résumé

Dans ce présent travail, on a rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite procédé à une analyse des caractéristiques principales des cellules solaires, ainsi que les paramètres limitant le rendement.

On a fait varier quelques paramètres essentiels de cette cellule pour voir leurs influences sur les caractéristiques de la cellule que sont le courant de court-circuit I_{cc} , la tension de circuit-ouvert V_{co} , le facteur de forme FF, la puissance au point de fonctionnement maximal et enfin le rendement énergétique.

Mots clés : Rayonnement solaire, cellules solaires, I_{cc} , V_{co} , FF, rendement énergétique.

Abstract

In the present word, we recalled some notions on solar radiation, and its applications in the photovoltaic field - solar cells -. We then analysed their main characteristics as well as the parameters limiting their performance. We varied some essential parameters of this cell to see their influences on the characteristics of the cell which are the short-circuit current I_{sc} , the open-circuit voltage V_{oc} , the form factor FF, the power at the maximum operating point and finally the energy efficiency.

Keywords: solar radiation, solar cells, I_{sc} , V_{oc} , FF, energy efficiency.

ملخص

في هذا العمل قمنا باستذكار بعض المفاهيم الأساسية حول موضوع الإشعاع الشمسي و تطبيقاته في المجال الكهرو ضوئي، ثم قمنا بتحليل الخصائص الرئيسية لهذه التطبيقات - أي الخلايا الشمسية-، و كذا دراسة التقنيات المطبقة لتحسين أدائها، ثم ناقشنا بعض المعلمات الأساسية لهذه الخلايا الكهروضوئية من أجل معرفة مدى تأثيرها على خصائصها الكهربائية الأساسية، والمتمثلة في تيار الدائرة القصيرة (I_{cc})، وجهد الدائرة القصيرة (V_{co})، وعامل الشكل (FF)، وكذا الطاقة المتشكلة عند أقصى نقطة تشغيل، و أخيرا كفاءة الطاقة المنتجة من طرف هذه الخلايا

الكلمات المفتاحية : الإشعاع الشمسي، الخلايا الشمسية، جهد الدائرة القصيرة (I_{cc})، تيار الدائرة القصيرة (V_{co})، عامل الشكل (FF)، كفاءة الطاقة المنتجة.