

Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique
Département de physique
Filière : Physique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master en physique
Option : **Physique des matériaux**

THEME :

Étude d'une cellule solaire n-PERT à base de
silicium cristallin

Etudiant-: **BELALIA Khaled**

Encadrant : **BEGHDAD Mohammed**

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, à mes très chers frères, à mes très chères sœurs pour leurs dévouements, leurs amours, leurs sacrifices et leurs encouragements.

Aux étudiants de la promotion 2^{ème} année Master physique 2018/2019 et à tous mes amis sans exception.

Remerciement

- *Tout d'abord, je tiens à remercier ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la force, le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.*
- *Je tiens remercier Monsieur Mohammed BEGHADAD, Professeur, mon encadreur, de m'avoir encadré et orienté afin de réaliser ce travail,*
- *Je tiens également à remercier chaleureusement le jury pour l'honneur qu'elle me fait en présidant le jury de mon mémoire.*
- *Que toutes les personnes qui ont contribué à ma formation soient remerciées pour tous les efforts qu'ils ont fournis.*
- *Enfin, je suis particulièrement reconnaissante à mes parents, mes frères, mes sœurs, et tous mes collègues qui ont ménagé des efforts pour me soutenir.*

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I :	
Rappels sur la physique des cellules solaires	
I.1 Historique du solaire photovoltaïque.....	4.
I.2 Utilisation du silicium dans le domaine photovoltaïque.....	4
I.3 Effet photovoltaïque.....	6
I.4 Conversion photovoltaïque.....	6
I.5 Dopage.....	6
I.5.1 Le mécanisme physique du dopage.....	7
a) Type N.....	7
b) Type P.....	8
I.5.2 La technologie de dopage.....	8
a) La diffusion thermique.....	8
b) L'implantation ionique.....	10
c) L'épitaxie.....	13
I.6 Modèles physiques utilisés.....	15
I.6.1 La mobilité.....	15
I.6.2 L'absorption parasite (Free Carrier Absorption (FCA)).....	16
I.7 Jonction PN à l'équilibre.....	17
I.8 La polarisation de la jonction PN.....	22
I.8.1 Polarisation directe.....	22
I.8.2 Polarisation inverse.....	23
I.9 Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques.....	24
I.10 Caractéristique courant-tension $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque.....	26
I.11 Spectre solaire.....	26
I.12 Les paramètres photovoltaïques.....	28
I.12.1 Courant de court-circuit.....	28
I.12.2 Tension de circuit ouvert.....	28

I.12.3	Facteur de forme	29
I.12.4	Rendement de conversion énergétique	29
I.12.5	Rendement Quantique	30
	a) Rendement Quantique Externe	30
	b) Rendement Quantique Interne	30
I.13	Les recombinaisons des porteurs	31
I.13.1	Recombinaison Radiative	31
I.13.2	Recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH)	32
I.13.3	Recombinaison Auger	32
I.14	L'équivalent électrique d'une cellule solaire	32
I.14.1	Modèle à 1 diode	32
I.14.2	Cas d'une cellule idéale	34
I.14.3	Modèle à 2 diodes	34

Chapitre II :

Les différentes filières au silicium cristallin des cellules photovoltaïques

II.1	Les cellules au silicium mono-cristallin (C-Si)	37
II.2	Les cellules au silicium non mono-cristallin	37
	II.2.1 Cellule au Silicium multi-cristallin	37
	II.2.2 Autres types de cellules au silicium non mono-cristallin	38
II.3	Technologie des cellules photovoltaïques	39
	II.3.1 La texturation	39
	II.3.2 La Couche Anti Reflet (CAR)	41
	II.3.3 La passivation	41
II.4	La cellule Al-BSF	42
II.5	La cellule PERC	44
II.6	Les cellules n-PERT monofaciale et bifaciale	46

Chapitre III :

Etude d'une cellule solaire n-PERT

III.1	Le logiciel PC1D-mod	48
III.2	Le choix des paramètres de la cellule	52

III.3 Les paramètres optiques	53
III-3-1 Indices de réfraction et coefficients d'absorption	53
III-3-2 Réflexions sur les deux faces de la cellule	54
III.4 Les résultats de l'étude	56
III.4.1 Effet de la température	56
a) Effet de la température sur le rendement de la cellule.....	56
b) Effet de la température sur la caractéristique I(V) de l'éclairement de la face avant	57
c) Effet de la température sur la caractéristique P(V) de l'éclairement de la face avant	58
III.4.2 Effet de la résistivité du substrat	58
III.4.3 Effet de la durée de vie du substrat (bulk lifetime)	59
III.4.4 Effet de la vitesse de recombinaison en surface (SRV)	60
III.4.5 Effet de l'épaisseur de la cellule	60
III.5 Les paramètres optimisés	61
Conclusion générale	62
Références	64

Listes des figures

Figure	Titre	Page
I-1	Les records des rendements	14
I-2	Silicium dopé au Phosphore (P)	15
I-3	Silicium dopé au Bore (B)	16
I-4	Principe du système de diffusion à tube ouvert typique	17
I-5	Concentrations normalisées des dopants en fonction de la profondeur en échelle linéaire	18
I-6	Concentrations normalisées des dopants en fonction de la profondeur en échelle logarithmique	18
I-7	Schéma de l'implanteur ionique	19
I-8	(a) Distribution unidimensionnelle du parcours moyen R (b) Distribution bidimensionnelle de R_p et ΔR_p (μm)	20
I-9	Parcours moyen projeté R_p et l'écart type ΔR_p du Bore (B) et Phosphore (P) dans le Silicium en fonction l'énergie	21
I-10	Dispositif d'épitaxie en phase liquide	22
I-11	Mobilité des électrons et des trous dans le substrat en fonction de la densité des donneurs	23
I-12	Les porteurs libres avant et après la diffusion, et la formation de la jonction PN	25
I-13	La diffusion des porteurs majoritaires d'une région à l'autre (structure de bandes de la jonction PN)	25
I-14	Jonction PN : a) La répartition des charges libres, b) Le profil du champ électrique, c) Le largeur de la barrière de potentiel.	26
I-15	Les longueurs de diffusion dans la jonction PN	29
I-16	Jonction PN polarisée en direct	29
I-17	Jonction PN polarisée en inverse	30
I-18	Le diagramme d'énergie en : a) Polarisation directe, b) Polarisation inverse	30
I-19	Potentiel de diffusion en : a) Polarisation directe, b) Sans polarisation, c) Polarisation inverse	31
I-20	Structure d'une cellule solaire (image de gauche), et diagramme de bandes d'énergie d'une cellule solaire (image de droite)	32
I-21	Les caractéristiques I(V) à l'obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque	32
I-22	Soleil au zénith (90° par rapport à l'horizon), niveau de la mer: AM 1, Soleil à 41.8° par rapport à l'horizon: AM 1.5, Soleil à 30° par rapport à l'horizon : AM 2	34
I-23	Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5	34
I-24	Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule solaire	35
I-25	Représentation des types de recombinaisons	37
I-26	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode	39

I-27	Schéma équivalent d'une cellule idéale	40
I-28	Schéma équivalent du modèle à deux diodes	41
II-1	Cellules photovoltaïques à base de Silicium mono-cristallin	42
II-2	Cellules photovoltaïques à base de Silicium multi-cristallin	43
II-3	Les différentes géométries de texturation : a) Pyramides inversées (inverted pyramids), b) Pyramides directes (upright pyramids), c) rainures (grooves).	45
II-4	La texturation de notre cellule solaire, sous forme de pyramides directes (upright pyramids)	45
II-5	Le rôle de la Couche Anti Reflet (CAR)	46
II-6	Les couches de passivation (Al_2O_3 et SiO_2)	47
II-7	Les constituants de la cellule solaire Al-BSF	48
II-8	Les constituants d'une cellule solaire PERC monofaciale	50
II-9	La structure de la cellule solaire n-PERT bifaciale	51
III-1	Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique	54
III-2	Fenêtre du logiciel PC1D utilisé pour notre simulation numérique	55
III-3	Variation du indice de réfraction de Si, SiN_x , Al_2O_3 , SiO_2 en fonction de la longueur d'onde du rayonnement	57
III-4	Variation du coefficient d'absorption de Si, SiN_x en fonction de la longueur d'onde du rayonnement	57
III-5	Texturation et passivation au front de la cellule	58
III-6	Texturation et passivation à l'arrière de la cellule	58
III-7	La réflexion extérieure des deux faces avant et arrière de la cellule	59
III-8	Le rendement en fonction de la température	60
III-9	Influence de la température sur la caractéristique I(V)	6
III-10	Influence de la température sur la puissance de sortie	61
III-11	La variation de rendement en fonction de la résistivité	62
III-12	La variation de rendement en fonction de la durée de vie du substrat	62
III-13	Le rendement en fonction de la vitesse de recombinaison en surface SRV	63
III-14	Le rendement en fonction de l'épaisseur de la base de la cellule	64

Liste des tableaux :

I-1	Les paramètres du modèle de la mobilité	23
I-2	Les paramètres de coefficients d'absorption des porteurs libres du Silicium	24
II-1	Les différents types du Silicium cristallin	44
II-2	Les technologies de fabrication d'une cellule solaire Al-BSF	49
III-1	Les paramètres initiaux de la cellule bifaciale n-PERT	56
III-2	Les paramètres optimisés pour notre étude	65
III-3	Les paramètres optimisés de la cellule	65

Abréviation	Expression complète
T	La température absolue de matériau en °K
λ	la longueur d'onde
N_C	La densité effective d'état dans la bande de conduction
N_V	La densité effective d'état dans la bande de valence
n	La densité des électrons (cm^{-3})
p	La densité des trous (cm^{-3})
n_i	La densité des porteurs intrinsèques, du semi-conducteur à une température donnée (cm^{-3})
E_g	L'énergie de gap (eV)
h	La constante de Planck : $h=6,6210^{-34}\text{J.s}$
AM	Air Masse
E_C	Le niveau énergétique du bas de la Bande de Conduction du semi-conducteur (eV)
E_V	Le niveau énergétique du haut de la Bande de Valence du semi-conducteur (eV)
k_B	La constante de Boltzmann : $1,38. 10^{-23}\text{J}/^\circ\text{K}=8,62.10^{-5} \text{eV}/^\circ\text{K}$
N_a	La densité des atomes accepteurs (cm^{-3})
N_d	La densité des atomes donneurs (cm^{-3})
μ_n	La mobilité des électrons ($\text{cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$)
μ_p	La mobilité des trous ($\text{cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$)
σ	La conductivité des matériaux ($\Omega^{-1}.\text{cm}^{-1}$)
ρ	La résistivité des matériaux ($\Omega.\text{cm}$)
σ_i	La conductivité intrinsèque des matériaux ($\Omega^{-1}.\text{cm}^{-1}$)
D_n	Le Coefficient de diffusion des électrons (cm^2/s)
D_p	Le Coefficient de diffusion des trous (cm^2/s)
L_n	La longueur de diffusion des électrons dans le matériau de type N (cm)
L_p	La longueur de diffusion des trous dans le matériau de type P (cm)
I_0	L'intensité incidente (photons/s)
$\alpha(\lambda)$	Le coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde (cm^{-1})
ZCE	La zone de charge d'espace
$\rho(x)$	La densité de charge de la ZCE ($\text{C}.\text{cm}^{-3}$)
V_n	Le potentiel électrostatique en $x=x_n$. (V)
V_p	Le potentiel électrostatique en $x=x_p$. (V)
E	Le champ électrique
V_d	Le potentiel de diffusion de la jonction PN. (V)
W_n	La largeur de la zone de charge d'espace ZCE de la région N (μm)
W_p	La largeur de la zone de charge d'espace ZCE de la région P (μm)
W	La largeur de charge d'espace ZCE (μm)
CAR	La Couche Anti Reflet
I_{S1}	La densité du courant de saturation de la jonction dans les zones neutres (mA/cm^2)
I_{ph}	Le photo-courant (A/cm^2)
R_S	La Résistance série ($\Omega.\text{cm}^2$) de la cellule
R_{Sh}	La Résistance parallèle ($\Omega.\text{cm}^2$) de la cellule
I_{S2}	Le courant de saturation de la diode D_2 (mA/cm^2)
I_{CC}	La densité de courant de court-circuit (mA/cm^2)
V_{CO}	La tension de circuit-ouvert (V)
P_m	La puissance électrique maximale (mW/cm^2)

FF	Le Facteur de Forme (%)
η	Le rendement de conversion de la cellule (%)
R_s	La réponse spectrale (A/W)
RQI	Le rendement quantique interne (%)
RQE	Le rendement quantique externe (%)
n_2	Le coefficient d'idéalité de diode D_2
n_1	Le coefficient d'idéalité de diode D_1
V_d	Le potentiel de diffusion (V)
V_a	La tension de polarisation (V)
τ	La durée de vie des porteurs (μm)

Introduction générale :

Depuis le début de la révolution industrielle, les besoins énergétiques, sous ses diverses formes, ont rencontré une augmentation très significative, ce qui a obligé les scientifiques de trouver de nouvelles solutions pour fournir et de développer, et même de rationaliser l'exploitation de ces énergies.

Pour générer cette énergie, plusieurs techniques sont utilisées, on trouve notamment les générateurs, basés sur l'énergie fossile, en particulier le pétrole, ou bien utilisant l'énergie nucléaire. Néanmoins, ces types d'énergie posent des problèmes environnementaux et même économiques, C'est pour cette raison que depuis environ un demi-siècle, le monde a commencé à s'intéresser aux énergies renouvelables peu polluantes et abondantes. Une énergie dite renouvelable doit se régénérer naturellement et indéfiniment à l'échelle temporelle de notre civilisation.

Parmi ces énergies, l'énergie issue du soleil répond actuellement à ces critères à la fois d'abondance à la surface terrestre et de régénération infinie à notre échelle. Elle peut ainsi être utilisée directement sous forme thermique et depuis la découverte de l'effet photovoltaïque, convertie en énergie électrique. Cette dernière, bien qu'elle soit connue depuis de nombreuses années, comme source pouvant produire de l'énergie allant de quelques milliwatts au mégawatt.

Aujourd'hui, l'une des énergies les plus modernes est l'énergie solaire. Il y a plusieurs méthodes d'utilisation de cette énergie pour produire de l'électricité. La méthode la plus importante est basée sur le principe de l'effet photovoltaïque [1].

Pour fabriquer les cellules photovoltaïques, on utilise des matériaux de propriétés particulières (les semi conducteurs) et ceci pour deux raisons :

Ils absorbent facilement la lumière et permettent de générer un champ et une tension électriques.

Avec la réalisation des premières cellules photovoltaïques en silicium, que l'on entrevoit la possibilité de fournir de grandes quantités d'énergie, d'abord utilisées à son origine pour l'alimentation des engins spatiaux. Leurs développements font de rapides progrès motivés par la conquête de l'espace. La crise pétrolière du début des années 70, a relancé l'idée du photovoltaïque à destination des particuliers. Aujourd'hui, le photovoltaïque est une technologie prouvée et utilisée couramment dans l'industrie et les collectivités surtout dans les pays industrialisés et dans les zones les plus reculés à travers le monde. Il se repose essentiellement sur les besoins des régions isolées en alimentation électrique fiable et peu coûteuse [2].

Dans ce mémoire, on a étudié la cellule solaire n-PERT à base de silicium cristallin. Elle est constituée de la juxtaposition de deux régions de types différents du même semi conducteur (émetteur et la base), en plus d'un champ de surface à l'arrière, le BSF (Back Surface Field), ainsi des couches de passivation et d'Anti Reflet que ce soit au front comme à l'arrière. Nous nous proposons dans ce travail d'étudier les paramètres de cette cellule pour améliorer le rendement de conversion. Notre choix s'est posé sur cette cellule à cause de sa poussée industrielle sur le marché mondial et qui est en train de concurrencer la cellule Al-BSF.

Dans le premier chapitre de cette étude, nous présentons un rappel sur la physique des cellules solaires en ce qui concerne l'utilisation du silicium dans le domaine photovoltaïque, et nous présentons des notions fondamentales sur les semi conducteurs, ensuite sur la jonction PN ainsi que le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïque et enfin nous décrivons le spectre solaire et la notion d'Air Masse.

Le deuxième chapitre concerne la présentation des différentes filières des cellules solaires au silicium cristallin et la place de la cellule étudiée dans ce travail, à savoir la cellule PERC en général et la cellule n-PERT en particulier.

Le troisième chapitre se rapporte à la simulation à l'aide du logiciel PC1D-mod de la cellule n-PERT ainsi que l'étude de l'effet de ses différents paramètres et leur optimisation par rapport aux différentes caractéristiques de la cellule que sont son courant de court circuit, sa tension de circuit ouvert, son facteur de forme et son rendement et présenter les résultats obtenus avec de possibles discussions.

Une conclusion générale viendra en fin de travail pour résumer tous les travaux de ce mémoire et de présenter les perspectives.

Chapitre I

Rappel sur la physique des cellules solaires

I.1 Historique du solaire photovoltaïque :

En 1839, Antoine Becquerel publie un travail intitulé : « les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires » relatif à une expérience menée par son fils Edmond avec une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide. Cette pile est capable de fournir un courant dès l'instant où elle est éclairée.

En 1877, W. G. Adams et R. E. Day découvrent l'effet photovoltaïque du sélénium, et C. Fritts met au point le premier panneau photovoltaïque à base de cellules au sélénium. Il est surtout le premier à croire à l'énorme potentiel de l'énergie solaire. À cette époque, le niveau des connaissances scientifiques ne permettait pas d'expliquer le fonctionnement de ces dispositifs,

Et ce n'est qu'en 1905 qu'Albert Einstein publie un article convaincant sur l'effet photoélectrique, ce qui lui a valu le prix Nobel en 1921.

Depuis cette date, les recherches n'amenèrent pas de grands progrès, mais, en 1940, Adler, reprenant une idée émise par Garrison en 1923, montre que la tension de circuit ouvert d'une cellule photovoltaïque varie comme le logarithme de l'intensité d'illumination, alors que le courant varie de façon linéaire (Auwers et Kerschbaum). R. S. Ohl décrit, en 1941, la première réalisation d'une jonction p-n dans le silicium, à effet photovoltaïque, mais il faut attendre l'année 1954 pour que des chercheurs des Bell Telephone Laboratories (États-Unis), D. M. Chapin, C. S. Fuller et G. L. Pearson, annoncent (et déposent un brevet en 1957) la mise au point d'une cellule dont le rendement de conversion énergétique atteint 6%, marquant ainsi véritablement la naissance de l'électricité photovoltaïque. Par la suite, le développement des techniques utilisées dans l'industrie des semi-conducteurs (redresseurs et transistors) a permis de faire progresser la qualité [3].

I.2 Utilisation du silicium dans le domaine photovoltaïque :

L'élément le plus utilisé pour la fabrication des cellules solaires est le silicium (plus de 95% du marché mondial). En effet, c'est un élément très abondant sur la croûte terrestre. Le coût des cellules photovoltaïques à base de silicium est donc moins élevé que celui des cellules basées sur certains éléments ou composites (Ge, GaAs, CdTe, InSe, ...). Le silicium cristallin est d'une grande performance. La technologie qui se base sur ce matériau permet de fabriquer des cellules avec de hauts rendements actuels (~24%), mais avec un coût de production élevé.

Chapitre I : Rappel sur la physique des cellules solaires

Par ailleurs, la qualité du matériau nécessaire pour réaliser des cellules solaires doit être d'une grande pureté, et représente une grande partie du prix de revient total.

Le silicium amorphe est beaucoup moins cher que le silicium cristallin. Mais il est aussi bien moins performant à cause de sa structure désordonnée qui conduit à des défauts dans le gap.

La technologie se basant sur le Silicium amorphe permet de réduire le coût de production des cellules (matériau moins cher, faible budget thermique, possibilité d'utiliser des couches minces). Mais les rendements obtenus sont faibles relativement à ceux obtenus avec le silicium cristallin [4].

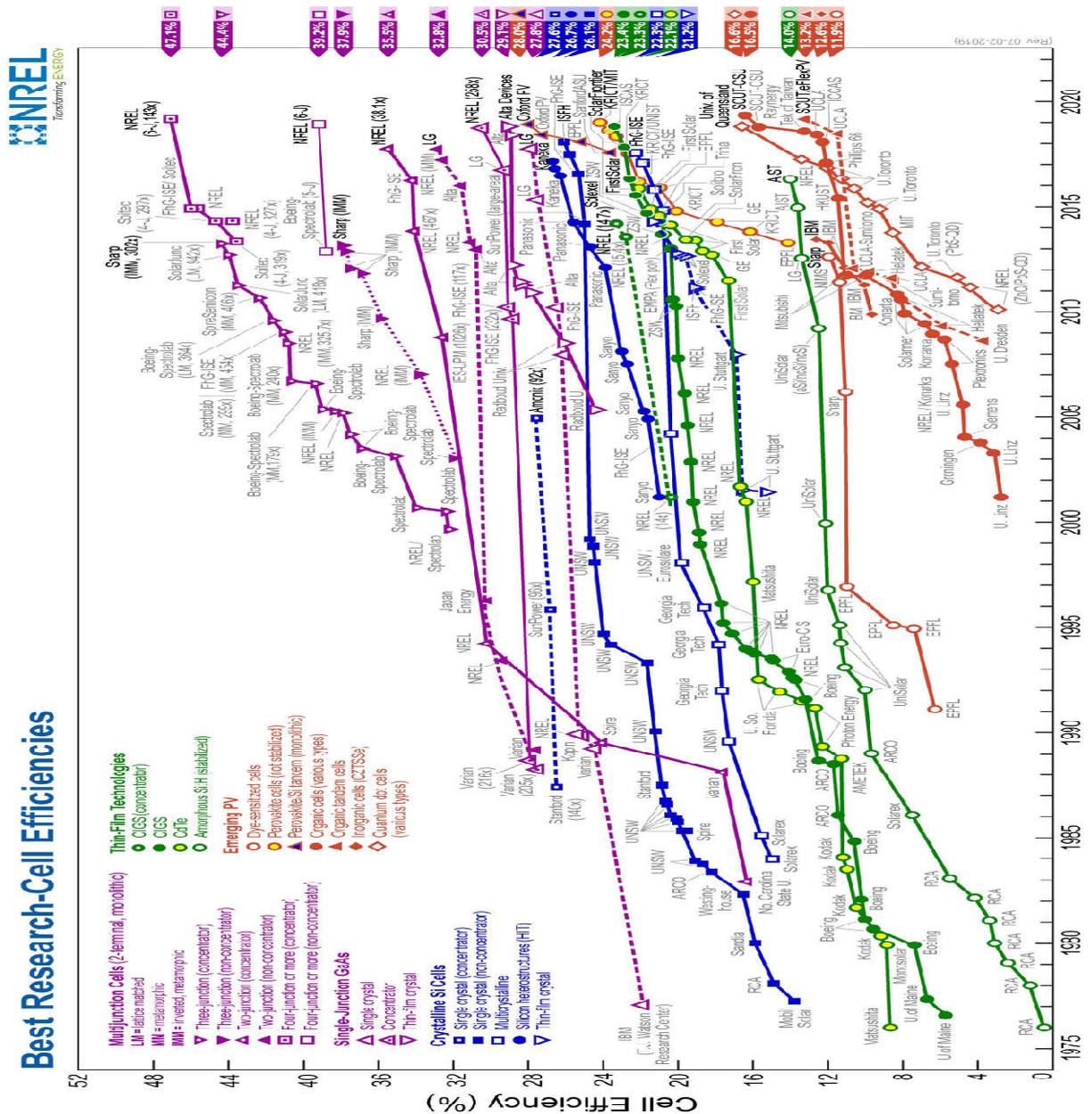


Figure I-1. Les records des rendements [5].

Sur la figure I-1 sont présentés les records des rendements en le premier trimestre 2019 des cellules solaires des différentes technologies de cellules photovoltaïques (PV) en laboratoire [5]. En ce qui concerne le silicium cristallin, le record actuel est de 27,6% pour les cellules les plus développées.

I.3 Effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque découle du phénomène physique de l'effet photoélectrique. Il est mis en œuvre dans les cellules photovoltaïques pour produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire [1]. L'effet photovoltaïque est obtenu par l'absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors des paires électrons-trous libres (excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction où il devient quasi-libre en laissant un trou pouvant se déplacer dans la bande de valence) [2].

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire.

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives. Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés on trouve le silicium, le germanium, le sulfure de Gallium et l'arséniure de Gallium [6].

I.4 Conversion photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière en transformant en électricité l'énergie des photons arrivant à la surface de la Terre. Les photons qui arrivent transmet son énergie aux électrons contenus dans une cellule photovoltaïque). Cette transformation s'appelle effet photovoltaïque [7].

I.5 Dopage :

C'est une technique utilisée dans les semi conducteurs pour augmenter le nombre de charges libres et ainsi améliorer la conductivité électrique du matériau.

I.5.1 Le mécanisme physique du dopage :

Le dopage permet d'augmenter des porteurs libres. Il existe deux types de dopage :

a) Type N :

Cela consiste à augmenter la densité en électrons dans le Silicium intrinsèque en y incluant certains atomes riches en électrons (plus de 4 électrons), comme le Phosphore (P). Cet atome qui présente 5 électrons sur sa couche périphérique se liera avec 4 électrons des 4 atomes de Silicium environnant et lui restera un de libre. Ce cinquième électron, qui n'est pas un électron de liaison, n'est que faiblement lié à l'atome et peut être facilement excité vers la bande de conduction. L'atome de Phosphore étant donc donneur d'électrons.

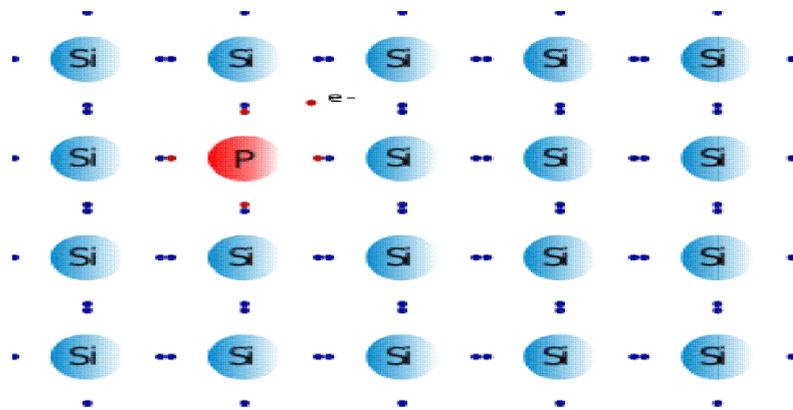


Figure I-2. Silicium dopé au Phosphore (P).

b) Type P :

Cela consiste à augmenter les densités des trous dans le Silicium intrinsèque en y incluant certains atomes riches des trous (moins de 4 électrons), comme le Bore (B). Cet atome qui présente 3 électrons sur sa couche périphérique se liera avec 3 électrons des 4 atomes de Silicium environnant et reste un trou mobile, qui pourra être rempli par un électron donné par l'atome de Silicium voisin, donc l'atome de Bore (B) étant donneur des trous.

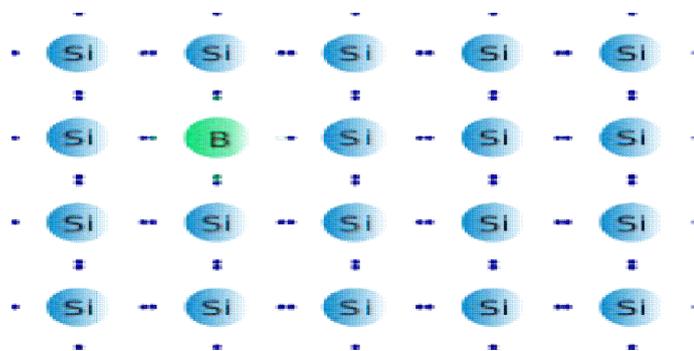


Figure I-3. Silicium dopé au Bore (B).

I.5.2 La technologie de dopage :

Il existe plusieurs technologies de dopage dont nous décrirons ici quelques unes :

a) La diffusion thermique :

Le dopage par diffusion est réalisé dans un four à partir d'une source liquide de l'impureté à diffuser, Le Tribromure de Bore (BBr_3) pour le dopage du Silicium au Bore (type P) et l'Oxychlorure de Phosphore (POCl_3) pour le dopage au phosphore (type N).

L'atome dopant est alors transporté jusqu'à l'échantillon par un gaz inerte (généralement de l'azote gazeux N_2). Le dopage dans le Silicium a lieu à une température comprise généralement entre 850°C et 1150°C durant un temps dont l'ordre de grandeur est de l'ordre de l'heure, afin de permettre la diffusion thermique des espèces dopantes dans le matériau.

Comme son nom l'indique, la diffusion s'effectue lorsqu'on a un gradient de concentration des dopants à la surface de l'échantillon (Silicium) par rapport à son volume. Le modèle mathématique est géré par les lois de Fick. Les conditions aux limites du matériau à doper ainsi que les conditions initiales du processus, nous permettent de prédire les solutions des profils de concentration des dopants dans le matériau qui sont sous la forme suivante, pour un dépôt de dose permanente à la surface:

$$C(x, t) = Cs \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (\text{I-1})$$

Où erfc est la fonction erreur complémentaire, Cs est la concentration des dopants à $x=0$, t , la durée de la diffusion et D , le coefficient de diffusion du dopant dans le matériau à la température T et qui est donné par la relation:

$$D = D_0 e^{-\frac{E_a}{k_B T}} \quad (\text{I-2})$$

Avec D_0 le coefficient de diffusion à la température infinie (en cm^2/s), E_a , l'énergie d'activation en eV, k_B , la constante de Boltzmann qui est égale à $8,614 \cdot 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{s}^{-1}$

Le profil de diffusion est présenté à la Figure ci-dessous, où nous avons tracé à la fois aux échelles linéaire (supérieure) et logarithmique (inférieure), la concentration normalisée en fonction de la profondeur pour trois valeurs de la longueur de diffusion (\sqrt{Dt}) correspondant à trois temps de diffusion consécutifs et à un D fixe pour une température de diffusion donnée. Notez que, à mesure que le temps avance, le dopant pénètre plus profondément dans le semi-conducteur.

La diffusion des impuretés se fait généralement en plaçant des plaquettes du semi-conducteur dans un four à tube de quartz à température élevée soigneusement contrôlée et en faisant passer un mélange de gaz contenant le dopant souhaité. La température varie

généralement entre 800 et 1200 ° C pour le Silicium [8]. La figure I-4 ci-dessous illustre le principe de diffusion thermique. Sur la figure I-5 en échelle linéaire (en haut) et la figure I-6 en échelle logarithmique (en bas), on a tracé quelques profils de concentration $C(x,t)$ normalisés à la concentration en surface C_s en fonction de la profondeur, pour la première, en fonction du temps et pour la seconde, en fonction de \sqrt{Dt} .

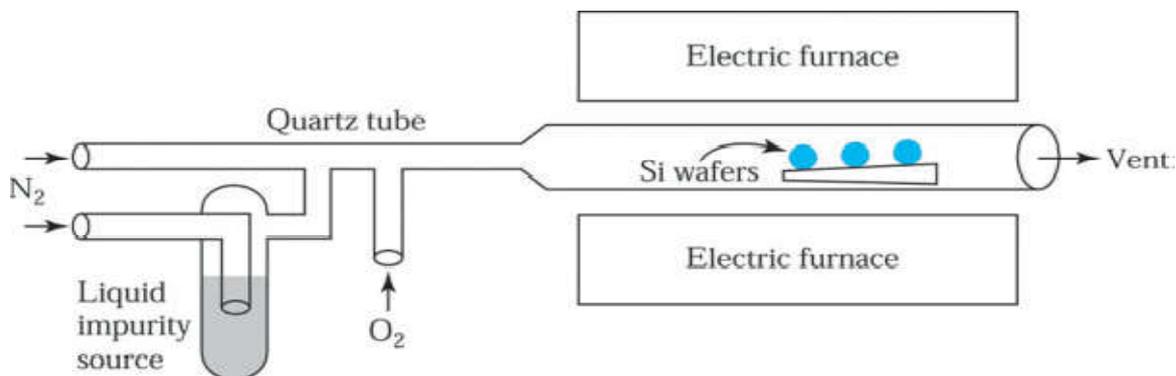


Figure I-4. Principe du système de diffusion à tube ouvert typique [8].

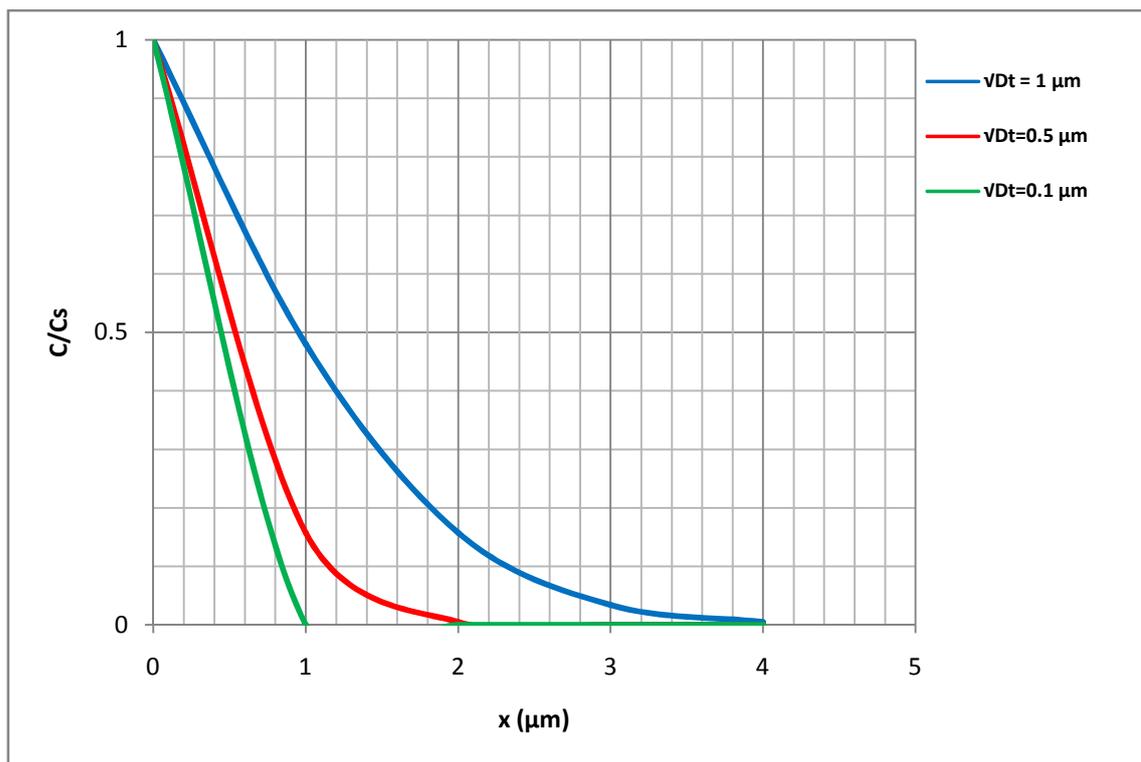


Figure I-5. Concentrations normalisés des dopants en fonction de la profondeur en échelle linéaire.

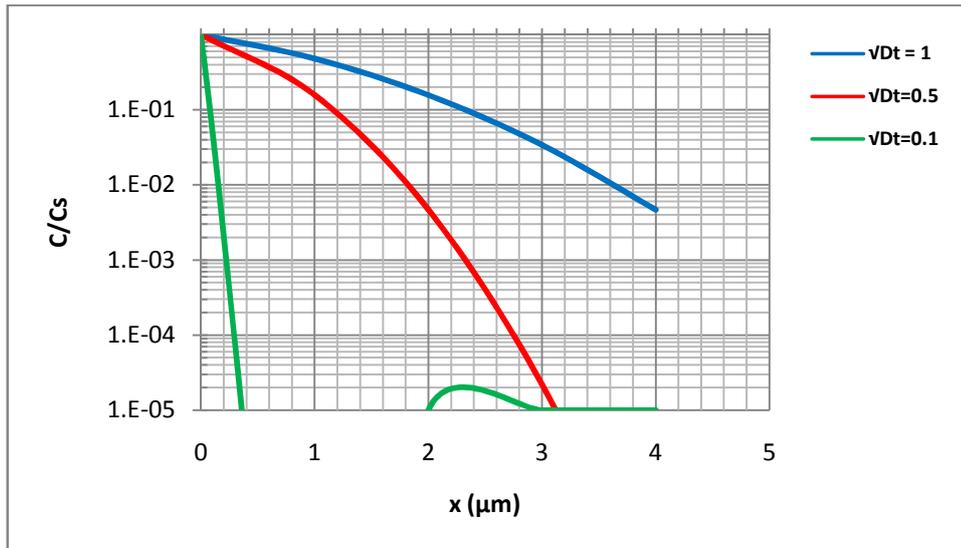


Figure I-6. Concentrations normalisés des dopants en fonction de la profondeur en échelle logarithmique.

b) L'implantation ionique :

Le dopage par implantation ionique consiste à accélérer des impuretés ionisées avec un champ électrique, afin de leur conférer l'énergie nécessaire pour pénétrer dans le matériau à doper. Cette méthode permet d'utiliser une grande variété d'éléments dopants. Plus un ion est accéléré, plus son énergie cinétique est grande, et donc plus il s'enfoncera profondément dans le réseau cristallin du substrat. Il faut noter que ce processus s'effectue à basses températures contrairement à la diffusion thermique.

Les principales parties de cette opération qui sont indiquées sur la figure I-7 :

- ✓ Une source d'ions : Dans laquelle des électrons émis par un filament chauffant ionisent un gaz, et à la sortie de la chambre d'ionisation, un champ électrostatique primaire est appliqué pour permettre l'extraction des ions du compartiment source et les pré-accelerés vers l'aimant d'analyse.
- ✓ Un dispositif d'analyse magnétique : Un champ magnétique est utilisé pour effectuer une analyse physique du faisceau d'ions émis. Une fente placée en sortie, permet de sélectionner une seule espèce d'ions avec une énergie déterminée.
- ✓ Un tube d'accélération : pour accélérer les ions et avec une énergie de 10 à quelques 1000 KeV.
- ✓ Un système de déflexion électrostatique : Des lentilles électromagnétiques permettent de balayer l'échantillon en refocalisant le faisceau divergé sortant avant son passage aux pastilles du scan électrostatique. A ce niveau, les ions subissent une déflexion horizontale 'x', suivie d'une autre verticale 'y' [9].

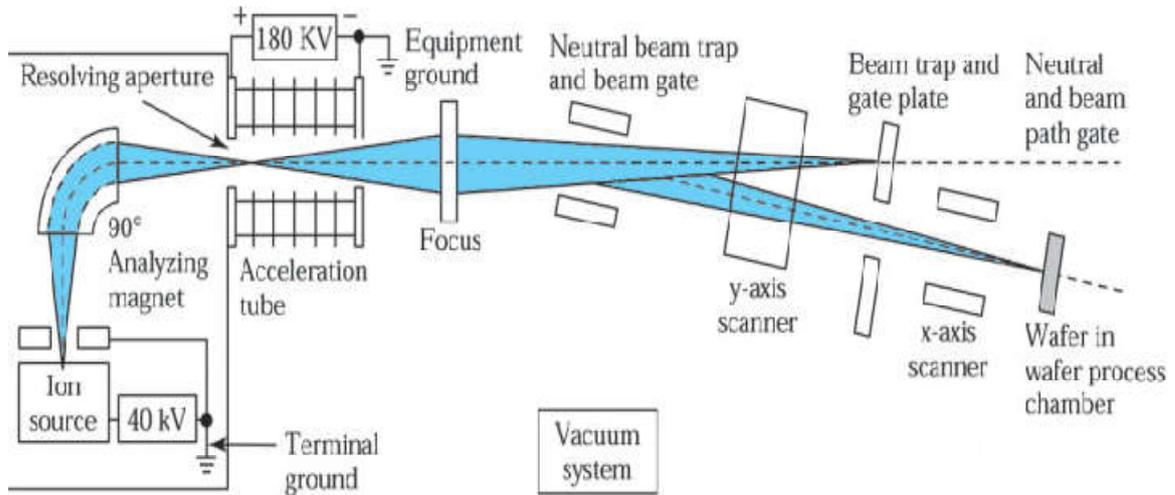


Figure I-7. Schéma de l'implanteur ionique.

Il y a deux paramètres importants dans ce processus :

- ✓ La dose S est le nombre des ions par unité de surface (ions/cm²) à planter dans le volume du matériau. c'est-à-dire, la quantité de matière implantée par unité de surface et dont le matériau est bombardé en permanence par l'implanteur durant la durée du processus.
- ✓ L'Énergie des ions arrivant à la surface du matériau étant le second paramètre. Plus on élève l'énergie des ions implantés, plus la pénétration dans la matière est très intense. Après avoir totalement perdu leurs énergies suite aux cascades de collisions contre les atomes du substrat, les ions s'immobilisent. Par ailleurs, si on augmente la dose d'implantation, le parcours projeté moyen R_p et l'écart type ΔR_p sont les mêmes pour les différentes doses [9].

La concentration finale des ions implantés est donnée par la relation gaussienne :

$$n(x) = \frac{S}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p} e^{-\frac{(x-R_p)^2}{2\Delta R_p^2}} \quad (\text{I-3})$$

$n(x)$, la concentration du dopant en fonction de la profondeur x (atome/cm³),

S , la dose d'implantation en ions/cm⁻²

R_p , le parcours moyen R , projeté sur l'axe x réel de l'ion dans le matériau jusqu'à sa position finale, (voir figure **I-8-a**)

ΔR_p , l'écart type du parcours R_p dans la direction x (voir figure **I-8-b**).

Ces deux derniers paramètres dépendent de l'énergie initiale de l'ion :

$$\text{Si } x = R_p \rightarrow n(R_p) = \frac{S}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p} e^{-\frac{(R_p - R_p)^2}{2\Delta R_p^2}} = \frac{S}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p} \quad (\text{I-4})$$

$$\text{Si } x - R_p = \mp \Delta R_p \rightarrow n(\mp \Delta R_p) = \frac{S}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p} e^{-\frac{\mp \Delta R_p^2}{2\Delta R_p^2}} = \frac{S}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p} e^{-\frac{1}{2}} = 0,6 * n(R_p) \quad (\text{I-5})$$

La figure ci-dessous montre les résultats qui sont obtenues.

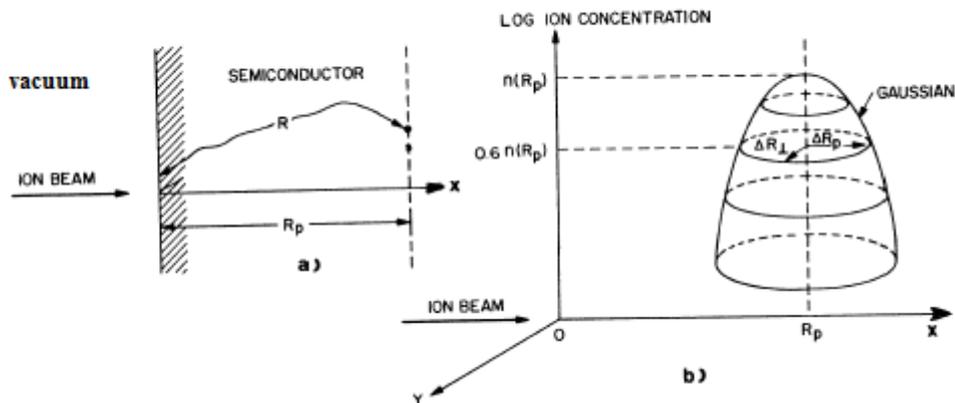


Figure I-8. (a) Distribution unidimensionnelle du parcours moyen R ,
 (b) Distribution bidimensionnelle de R_p et ΔR_p (μm).

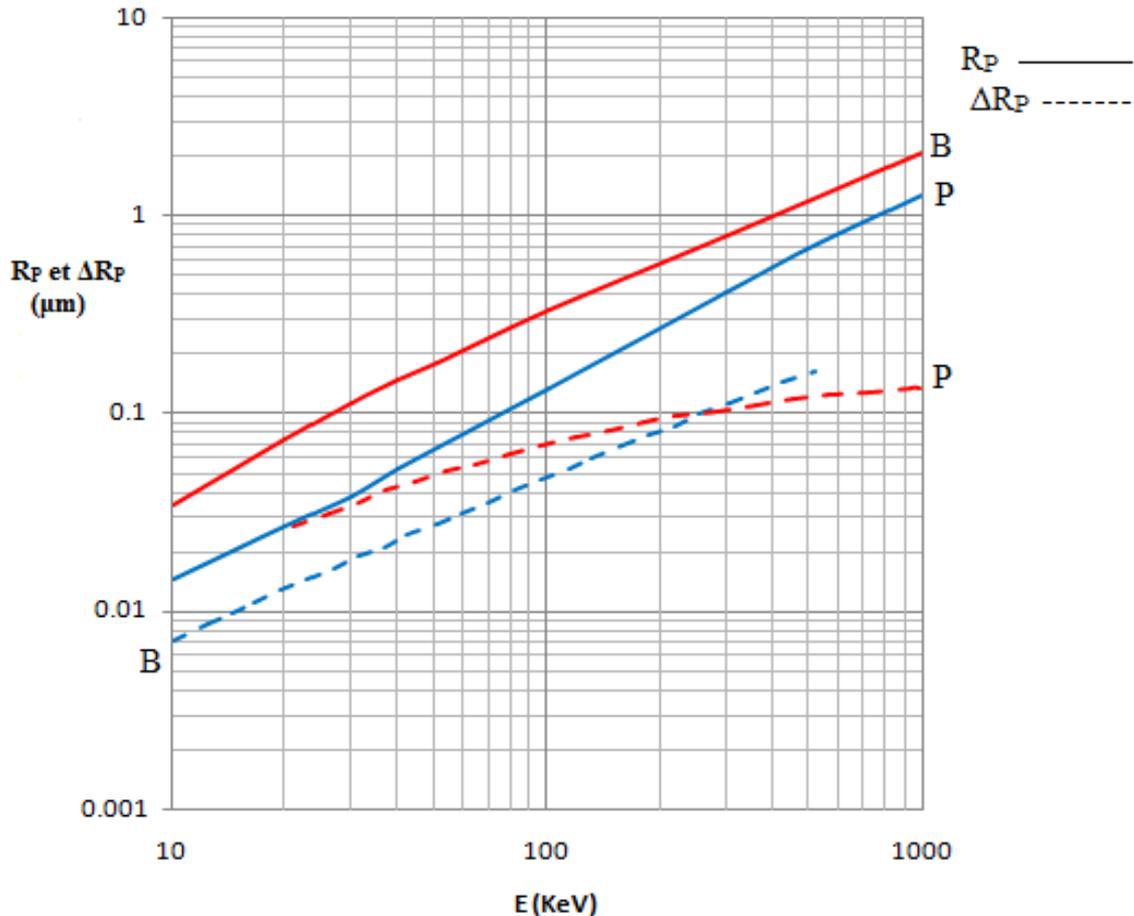


Figure I-9. Parcours moyen projeté R_P et l'écart type ΔR_P du Bore (B) et Phosphore (P) dans le Silicium en fonction de l'énergie.

Cette technique très pointue nécessite un recuit thermique après implantation, du fait des défauts engendrés par les ions implantés fortement énergétiques, afin de guérir ces défauts en positionnant les ions implantés dans des sites substitutionnels pour être activés électriquement et participer ainsi à la conduction électrique.

c) L'épitaxie :

Le mot « épi » en grec signifie « sur » et « taxis », « arrangement », est une technique de croissance orientée, l'un par rapport à l'autre, de deux cristaux possédant un certain nombre d'éléments de symétrie communs dans leurs réseaux cristallins. On distingue l'homo-épitaxie, qui consiste à faire croître un cristal sur un cristal de nature chimique identique, et l'hétéro-épitaxie, dans laquelle les deux cristaux sont de natures chimiques différentes.

Il ya plusieurs techniques de l'épitaxie, nous présentions ici que l'épitaxie en phase liquide (EPL) :

Cette technique consiste à faire croître le cristal par la mise en contact du substrat avec une source liquide. C'est le même principe que le tirage d'un lingot par la méthode Czochralski. Il faut bien contrôler les échanges thermiques pour éviter de liquéfier le cristal existant. Cette méthode présente l'avantage d'être très rapide, la vitesse de croissance peut être de l'ordre du micron par minute [10].

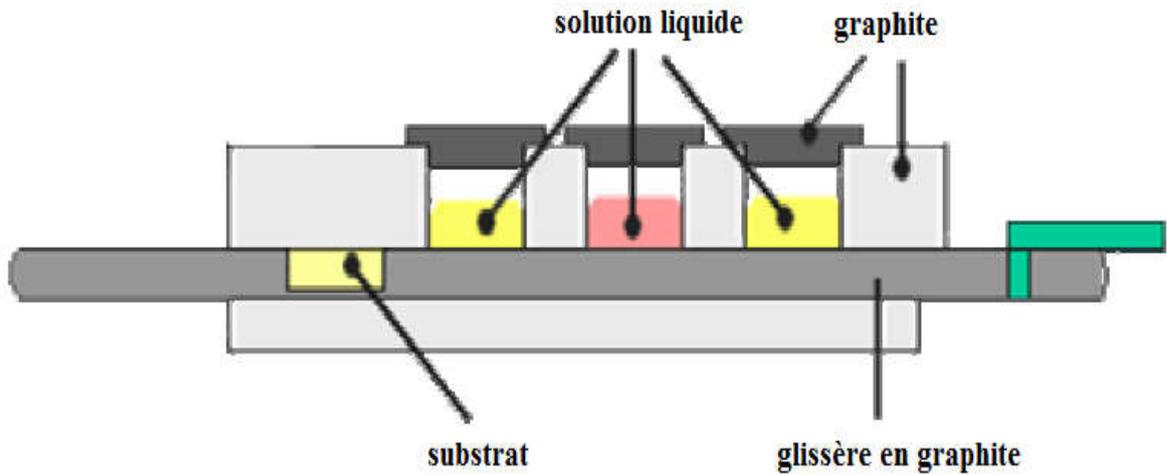


Figure I-10. Dispositif d'épitaxie en phase liquide.

I.6 Modèles physiques utilisés :

I.6.1 La mobilité :

Il existe plusieurs modèles physiques de la mobilité dont celui de Caughey-Thomas dans le Silicium utilisé par PC1D [11], et qui est exprimé par la relation suivante :

$$\mu(x, T) = \mu_{min} T_n^{\beta_1} + \frac{(\mu_{max} - \mu_{min}) T_n^{\beta_2}}{1 + \left(\frac{N_D(x) + N_A(x)}{N_{ref} T_n^{\beta_3}} \right)^{\alpha T_n^{\beta_4}}} \quad (I-6)$$

Avec :

N_D et N_A : les profils de densités des dopants lorsque le silicium est dopé à la fois par des donneurs et des accepteurs respectivement,

x : la profondeur dans le Silicium,

$$T_n = \frac{T(^{\circ}K)}{300},$$

T : la température en $^{\circ}K$,

N_{ref} : le niveau de référence du dopage en cm^{-3}

Les valeurs des paramètres utilisés dans ce modèle sont rassemblées dans le tableau suivant :

	paramètres	Pour les électrons	Pour les trous
Mobilité maximale (types N et P)	$\mu_{max} \left(\frac{cm^2}{V.s} \right)$	1417	470
Porteurs majoritaires : Electrons dans type N et Trous dans type P	$\mu_{min} \left(\frac{cm^2}{V.s} \right)$	60	37,4
	$N_{ref} (cm^{-3})$	$9,64 \cdot 10^{16}$	$2,82 \cdot 10^{17}$
	α	0,664	0,642
Porteurs minoritaires : Electrons dans type N et Trous dans type P	$\mu_{min} \left(\frac{cm^2}{V.s} \right)$	160	155
	$N_{ref} (cm^{-3})$	$5,6 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{17}$
	α	0,647	0,9
Coefficients du modèle thermique (types N et P)	β_1	-0,57	-0,57
	β_2	-2,33	-2,33
	β_3	+2,4	+2,4
	β_4	-0,146	-0,146

Tableau I-1. Les paramètres du modèle de la mobilité.

Dans la figure I-11 qui suit, nous avons tracé la courbe de mobilités des électrons et celle des trous en fonction de la densité des donneurs dans le substrat au Silicium de type n de résistivité $\rho=3 \Omega \cdot \text{cm}$ correspondant à la concentration des dopants donneurs au phosphore $N_D=1,559 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ et à la température ambiante $T=300 \text{ }^\circ\text{K}$.

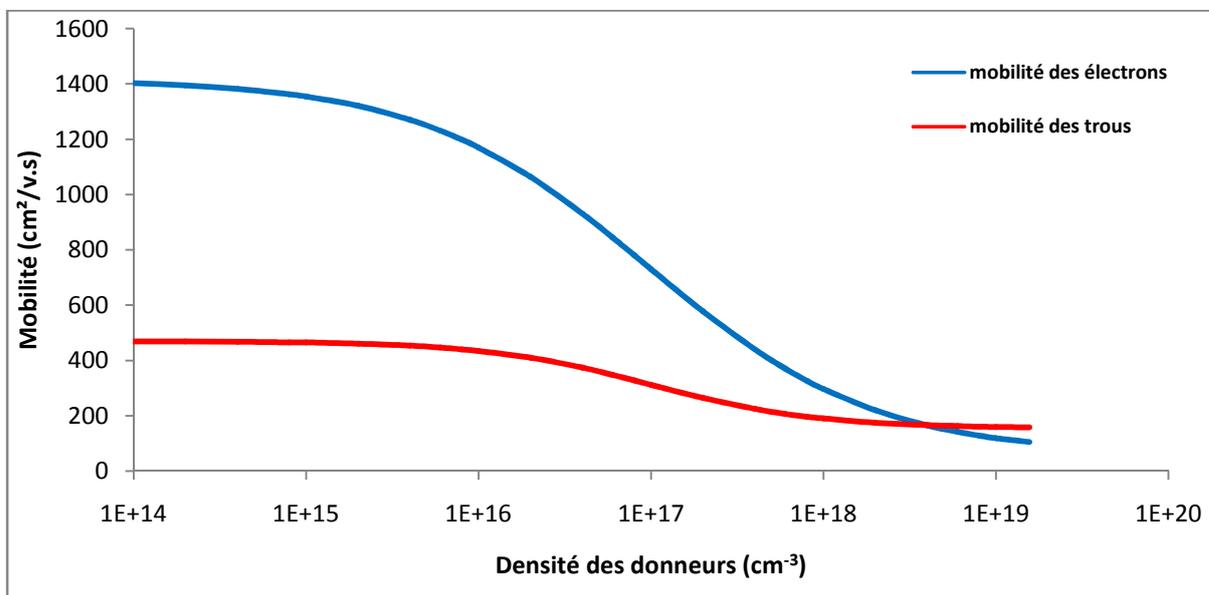


Figure I-11. Mobilité des électrons et des trous dans le substrat en fonction de la densité des donneurs.

I.6.2 L'absorption parasite (Free Carrier Absorption (FCA)) :

Parfois, ce sont des porteurs déjà libres qui absorbent des photons du spectre solaire. L'absorption parasite de photons par des porteurs déjà libres (en anglais : FCA) se trouve soit au bas de la BC pour les électrons et des trous se trouvant en haut de la BV. L'électron lui permet de sauter sur un niveau plus haut de la BC et un trou va aller dans un état énergétique plus bas de la BV.

Cette absorption néfaste et parasitaire entre donc en compétition avec l'absorption intrinsèque d'un électron de la BV vers la BC, ce qui réduit la fraction de photons, qui génèrent des paires électron-trou. L'absorption des porteurs libres à travers un dispositif ne dépend pas seulement de la longueur d'onde de lumière incidente mais dépend également du profil des concentrations de porteurs à travers le dispositif.

Cette absorption parasite (FCA) peut être spécifiée par le coefficient d'absorption des porteurs libres, qui pour les longueurs d'onde monochromes de la lumière incidente [11], est de la forme :

$$\alpha_{FC} = K_1 n \lambda^a + K_2 p \lambda^b \quad (\text{I-7})$$

Où k_1 , k_2 , a , b sont des constantes qui dépendent du matériau,

n et p : les concentration des électrons et des trous respectivement en cm^{-3} ,

α : le coefficient d'absorption en cm^{-1} ,

λ : longueur d'onde en nm.

Pour le silicium :

constante	k_1	k_2	a	b
valeur	$2,6.10^{-27}$	$2,7.10^{-24}$	3	2

Tableau I-2. Les paramètres de coefficients d'absorption des porteurs libres du Silicium.

I.7 Jonction PN à l'équilibre :

Une jonction PN est constituée par la juxtaposition de deux régions semi-conductrices de types différents (P et N). Lorsqu'ils sont mis en contact, les premières trous proches de la surface de contact, majoritaires dans la zone P, migrent par diffusion vers la zone de type N en laissant derrière eux des ions négatifs proches de la surface de séparation. D'autre part, les électrons proches de la surface de contact, majoritaires dans la zone de N, migrent par diffusion vers la zone de type P où ils seront minoritaires en laissant derrière eux des ions positifs proches de la surface de séparation. Cette première migration crée une zone de charges positives et négatives, ce qui génère un champ électrique dirigé vers de la zone des charges positives vers la zone des charges négatives. Lorsque la migration s'accroît, le champ électrique s'amplifie jusqu'à ce qu'ils bloquent la migration des porteurs. A la fin une Zone de Charge d'Espace (ZCE) (appelée aussi zone déserte) définitive est créée d'une certaine épaisseur déserte ($W=W_p+W_n$) des porteurs de charges (une épaisseur $W_p=x_p$ contenant les ions positives et une épaisseur $W_n=x_n$ contenant les ions négatives). Ainsi, la différence des densités des ions donneurs et des ions accepteurs passe d'une valeur négative dans la région de type P à une valeur positive dans la région de type N. La mise en contact de ces matériaux génère donc une barrière de potentiel à la base du champ électrique permanent.

La loi de variation de cette grandeur dépend essentiellement de la technique de fabrication (diffusion, implantation, épitaxie, ...) [12].

Sur la figure I-12 on a représenté les porteurs libres dans les zones neutres (P et N) ainsi que la création de la zone de charge d'espace après diffusion

Les niveaux d'énergie au voisinage de la jonction sont représentés sur la figure I-13

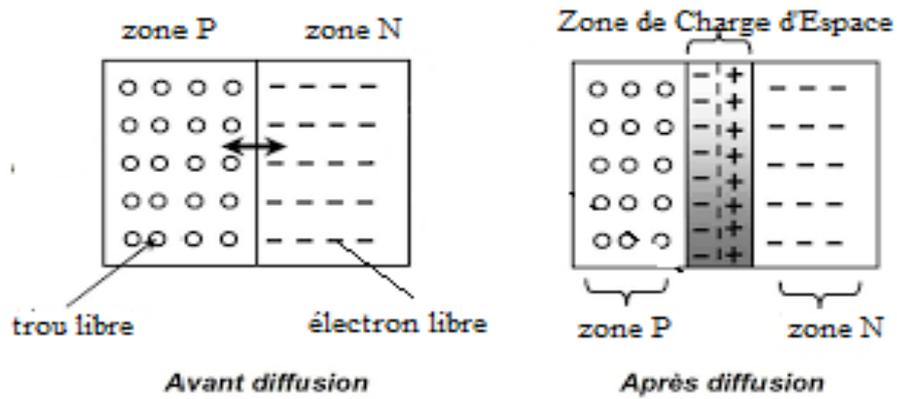


Figure I-12. Les porteurs libres avant et après la diffusion.

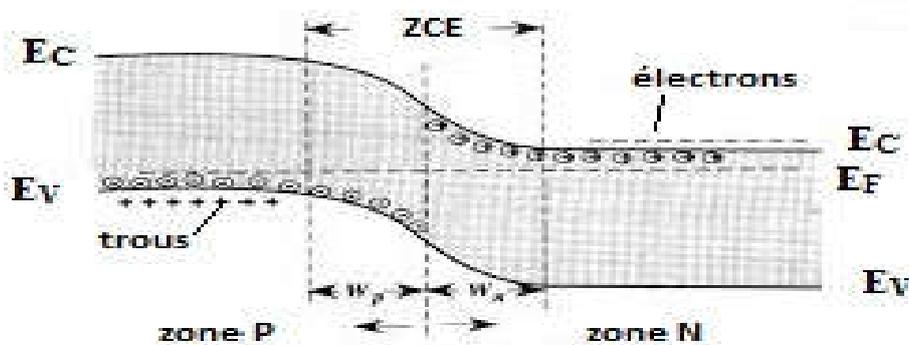


Figure I-13. La diffusion des porteurs majoritaires d'une région à l'autre (structure de bandes de la jonction PN).

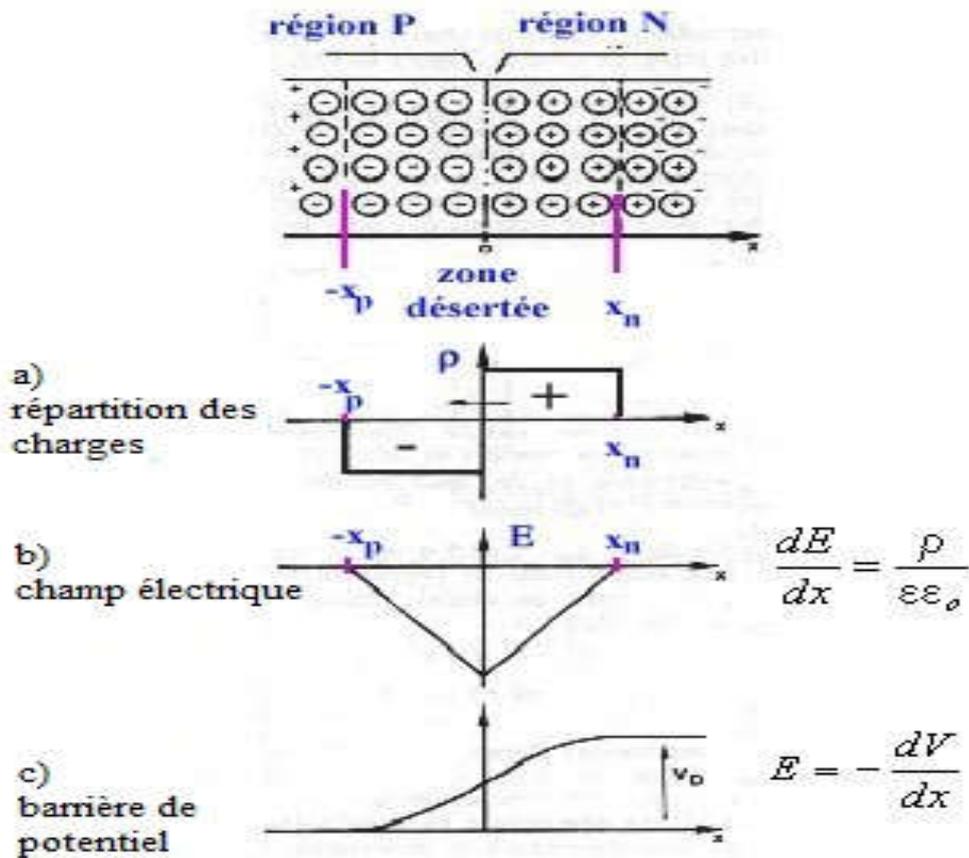


Figure I-14. Jonction PN :

- a) La répartition des charges libres,
- b) Le profil du champ électrique,
- c) Le largeur de la barrière de potentiel.

Pour obtenir le potentiel et le champ électriques, on intègre l'équation de Poisson tel que :

$$\text{div}\vec{E} = \frac{\rho(x)}{\epsilon} \quad (\text{I-8})$$

$$\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$$

ϵ : la constante diélectrique

ϵ_r : la constante diélectrique relative au matériau est égale 11,9

ϵ_0 : la permittivité dans le vide égale $8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ m}^{-3} \text{ kg}^{-1} \text{ s}^4 \text{ A}^2 (\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$

En supposant tous les donneurs et accepteurs ionisés, la densité de charge d'espace est donné par :

$$\rho(x) = e(p(x) - n(x) + N_a^+(x) - N_d^-(x)) \quad (\text{I-9})$$

$$\rho(x) = \begin{cases} -eN_a, & -x_p < x < 0 \\ +eN_d, & 0 < x < x_n \\ 0, & x \geq x_n \text{ et } x \leq -x_p \end{cases} \quad (\text{I-10})$$

Loin de la jonction, les densités des porteurs libres sont neutres, $\rho(x) = 0$.

L'expression du champ électrique qui traverse la jonction est donnée à partir de la relation de Poisson.

Selon l'axe ox :

$$\text{div} \vec{E} = \frac{\rho(x)}{\epsilon} \rightarrow \frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\rho(x)}{\epsilon}$$

$$\begin{aligned} \text{Pour } -x_p < x < 0 \rightarrow \int_{E(-x_p)}^{E(x)} dE &= \int_{-x_p}^x \frac{\rho(x)}{\epsilon} dx \rightarrow E(x) - E(-x_p) \\ &= \int_{-x_p}^x -\frac{eN_a}{\epsilon} dx \end{aligned}$$

De la même manière, on détermine l'expression du champ électrique entre $0 < x < x_n$

$$\int_{E(x)}^{E(x_n)} dE = \int_x^{x_n} \frac{\rho(x)}{\epsilon} dx \rightarrow E(x_n) - E(x) = \frac{eN_d}{\epsilon} (x_n - x)$$

D'après la continuité du champ électrique au point $x=0$, on a

$E(x_p) = E(x_n) = 0$, Le champ électrique dans les zones neutres est nul

$$\text{Finalement } E = \begin{cases} -\frac{eN_a}{\epsilon} (x + x_p), & -x_p < x < 0 \\ +\frac{eN_d}{\epsilon} (x - x_n), & 0 < x < x_n \end{cases} \quad (\text{I-11})$$

Le potentiel électrique s'écrit

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon} \quad (\text{I-12})$$

Pour $-x_p < x < 0$

$$\begin{aligned} E = -\frac{dV}{dx} \rightarrow \int_{V(-x_p)}^{V(x)} dV &= \int_{-x_p}^x E dx \rightarrow V(x) - V(-x_p) = \int_{-x_p}^x \frac{eN_a}{\epsilon} (x + x_p) dx \rightarrow \\ V(-x_p) &= V(x_p) = V_p \end{aligned}$$

$$V(x) = \frac{eN_a}{2\epsilon} (x + x_p)^2 + V_p \quad (\text{I-13})$$

De la même manière, on détermine l'expression du potentiel électrique entre $0 < x < x_n$

$$\int_{V(x)}^{V(x_n)} dV = -\int_x^{x_n} E dx \rightarrow V(x_n) - V(x) = -\int_x^{x_n} \frac{eN_d}{\epsilon} (x - x_n) dx$$

$$V(x_n) = V_n, \quad V_n - V(x) = -\frac{eN_d}{2\varepsilon} (x - x_n)^2 \quad \rightarrow$$

$$V(x) = -\frac{eN_d}{2\varepsilon} (x - x_n)^2 + V_n \quad (\text{I-13})$$

$$\text{Donc} \quad V = \begin{cases} \frac{eN_a}{2\varepsilon} (x + x_p)^2 + V_p, & -x_p < x < 0 \\ -\frac{eN_d}{2\varepsilon} (x_n - x)^2 + V_n, & 0 < x < x_n \end{cases} \quad (\text{I-14})$$

$$\text{La tension de diffusion est : } V_d = V_n - V_p \quad (\text{I-15})$$

à $x=0$ (continuité du potentiel électrique en ce point et ailleurs), on a

$$\frac{eN_a}{2\varepsilon} (x_p)^2 + V_p = -\frac{eN_d}{2\varepsilon} (x_n)^2 + V_n \quad (\text{I-16})$$

$$V_n - V_p = \frac{eN_a}{2\varepsilon} (x_p)^2 + \frac{eN_d}{2\varepsilon} (x_n)^2 \rightarrow V_d = V_n - V_p = \frac{q}{2\varepsilon} (N_d w_n^2 + N_a w_p^2) \quad (\text{I-17})$$

avec la condition suivante (du fait de la neutralité de la charge dans la ZCE) :

$$-x_p N_a = x_n N_d \rightarrow x_p = -x_n \frac{N_d}{N_a}, \quad V_d = e \frac{N_d}{2\varepsilon} x_n^2 \left(\frac{N_d}{N_a} + 1 \right)$$

$$\text{et } V_d = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \rightarrow \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) = \frac{eN_d}{2\varepsilon} x_n^2 \left(\frac{N_d}{N_a} + 1 \right) \quad (\text{I-18})$$

$$x_n = \left(\frac{2\varepsilon k_B T}{e^2 N_d} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{1 + \frac{N_d}{N_a}} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad x_p = - \left(\frac{2\varepsilon k_B T}{e^2 N_a} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{1 + \frac{N_a}{N_d}} \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I-19})$$

Largeur de la zone de charge d'espace ZCE est :

$$w = w_n + w_p \quad (\text{I-20})$$

$$w_n = |x_n| \text{ et } |w_p = +x_p|$$

$$w_n = \left[\frac{\varepsilon k_B T}{e N_d} \frac{N_a}{N_a + N_d} V_d \right]^{\frac{1}{2}}, \quad w_p = \left[\frac{\varepsilon k_B T}{e N_a} \frac{N_d}{N_a + N_d} V_d \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I-21})$$

$$w_n = 2L_{Dn} \left[\frac{1}{1 + \frac{N_d}{N_a}} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad w_p = 2L_{Dp} \left[\frac{1}{1 + \frac{N_a}{N_d}} \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I-22})$$

$$L_{Dn} = \left(\frac{\epsilon kT}{e^2 N_d} \right)^{\frac{1}{2}}, L_{Dp} = \left(\frac{\epsilon kT}{e^2 N_a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (I-23)$$

L_{Dn} et L_{Dp} sont les longueurs de Debye des régions n et p respectivement (Longueurs de diffusion).

Cette longueur mesure à peu-près la demi-profondeur de pénétration des électrons ou des trous de part et d'autre de la zone de charge d'espace.

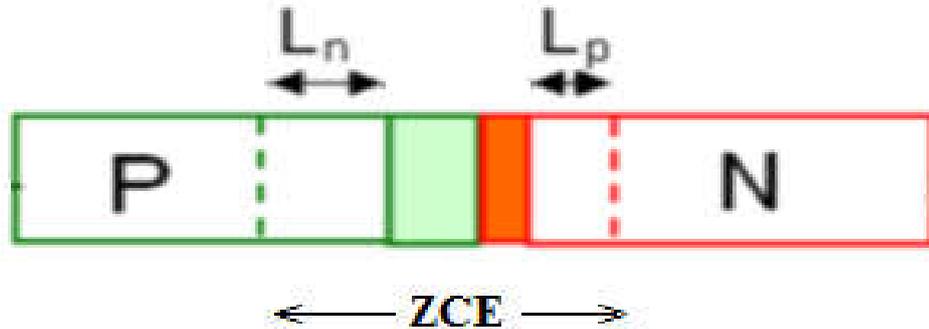


Figure I-15. Les longueurs de diffusion dans la jonction PN.

I.8 La polarisation de la jonction PN :

Lorsque l'on polarise la jonction, on modifie la barrière de potentiel et par suite la diffusion des porteurs d'une région vers l'autre.

I.8.1 Polarisation directe :

La polarisation directe a lieu lorsqu'on relie le pôle positif à la partie dopée P de la jonction et le pôle négatif à la partie dopée N.

$V_n - V_p < 0$: La barrière de potentiel n'étant plus suffisante pour arrêter la diffusion des porteurs: Les électrons diffusent de la région N vers la région P, et les trous de la région P vers la région N. ce qui signifie le courant direct circule de la région P vers la région N.

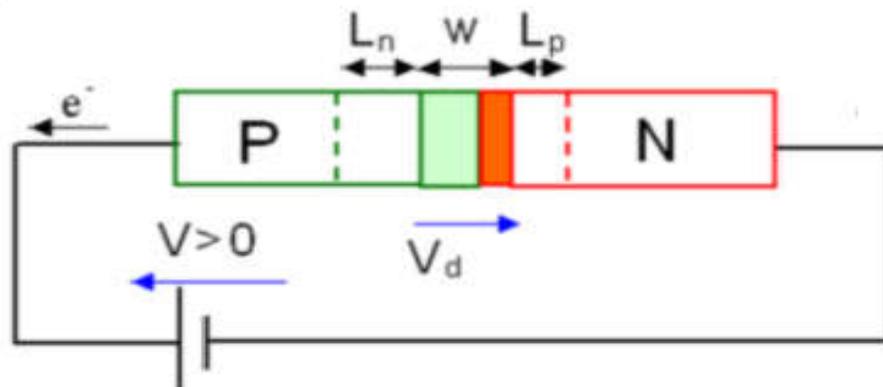


Figure I-16. Jonction PN polarisée en direct.

I.8.2 Polarisation inverse :

La polarisation inverse a lieu lorsqu'on relie le pôle négatif à la partie dopée P de la jonction et le pôle positif à la partie dopée N.

$V_n - V_p > 0$: La hauteur de la barrière de potentiel sans polarisation est maintenant plus grande. La diffusion des porteurs majoritaires est bloquée, seuls les porteurs minoritaires qui atteignent la ZCE passent dans la région opposée, propulsés par le champ électrique. En polarisation inverse le courant qui traverse la diode est alors très faible.

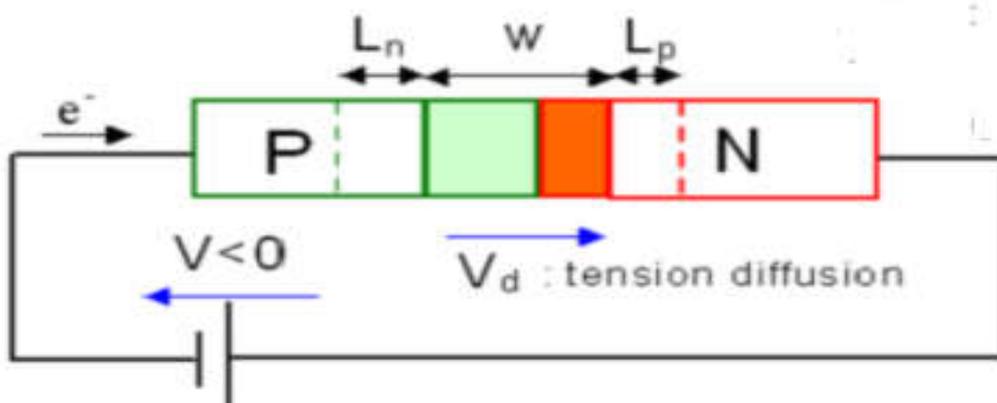


Figure I-17. Jonction PN polarisée en inverse.

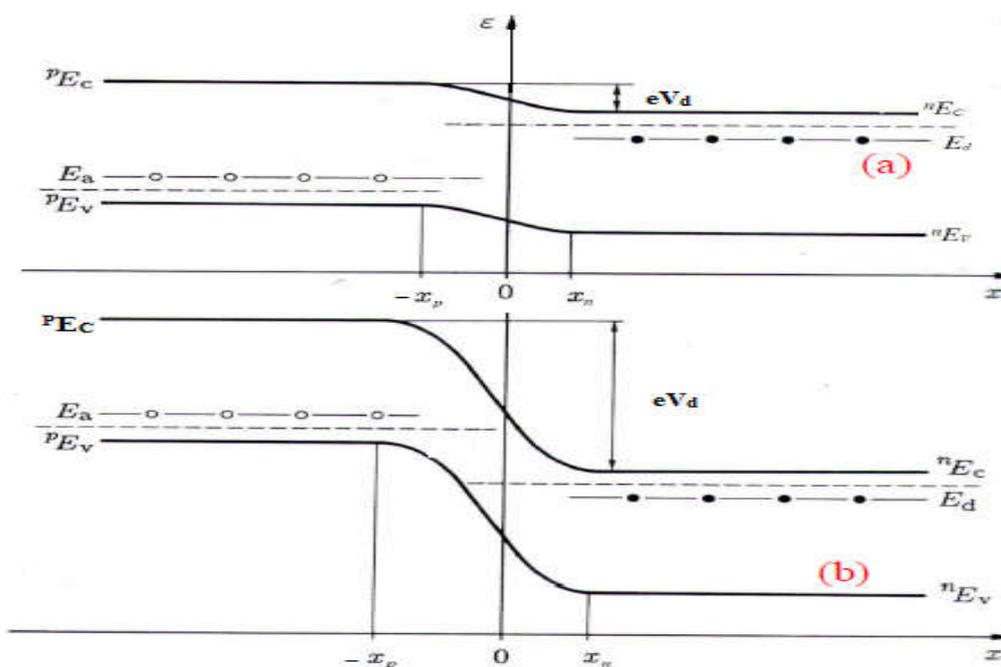


Figure I-18. Le diagramme d'énergie en :
 a) Polarisation directe,
 b) Polarisation inverse.

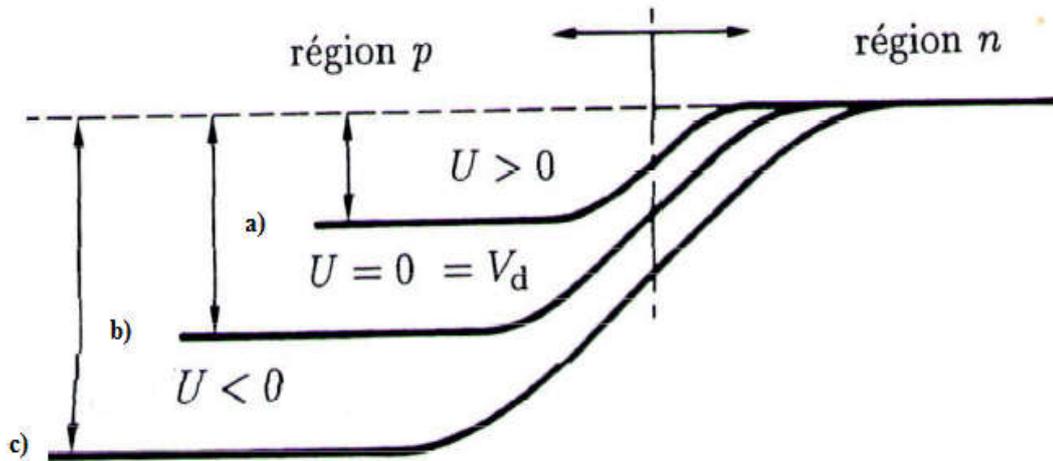


Figure I-19. Potentiel de diffusion en :
a) Polarisation directe,
b) Sans polarisation,
c) Polarisation inverse.

I.9 Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau Constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque [7].

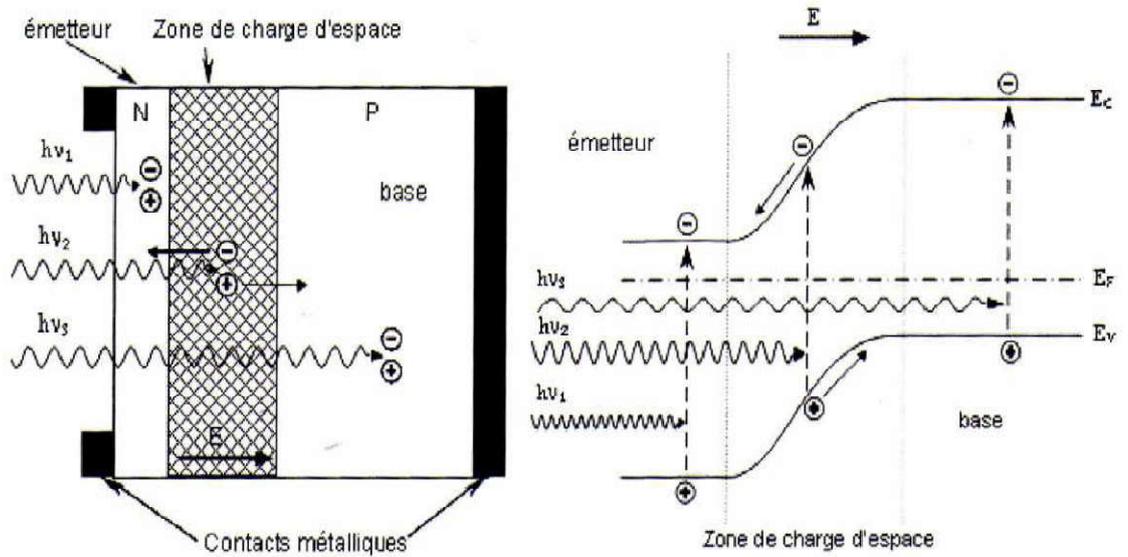


Figure I-20. Structure d'une cellule solaire (image de gauche), et diagramme de bandes d'énergie d'une cellule solaire (image de droite).

1.10 Caractéristique courant-tension $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est définie par sa courbe caractéristique électrique (courant tension). Elle indique la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule depuis le court-circuit jusqu'au circuit ouvert [2].

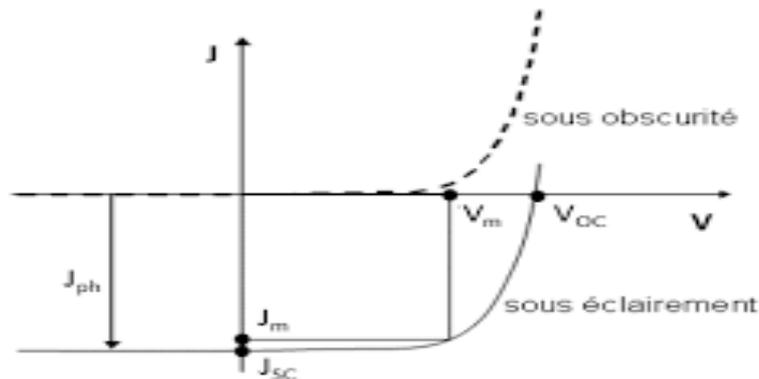


Figure I-21. Les caractéristiques $I(V)$ à l'obscurité et sous éclaircissement d'une cellule photovoltaïque.

La caractéristique densité de courant –tension sous éclaircissement est la principale technique utilisée pour caractériser une cellule solaire. Elle permet de calculer la puissance fournie par la cellule ainsi que son rendement de conversion.

I_{cc} : Courant de court-circuit (obtenu pour $V=0$)

V_{co} : Tension en circuit ouvert (obtenu pour $I=0$)

1.11 Spectre solaire:

L'énergie solaire exploitée ici par les cellules solaires présente un spectre d'émission comparable à celui d'un corps noir à 5800°K . Hors de l'atmosphère, le rayonnement solaire a une puissance moyenne de $1,37 \text{ kW/m}^2$. Cependant, en traversant l'atmosphère, une partie de cette énergie est absorbée par diverses molécules dans l'atmosphère telles que l'oxygène, l'ozone ou encore le dioxyde de carbone. Au niveau de la surface terrestre, le rayonnement solaire a une puissance maximale d'environ 1 kW/m^2 . Le spectre solaire obtenu à la surface de la terre est donc fonction de la composition de l'atmosphère et surtout de l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement [13].

Afin de caractériser les différents spectres solaires incidents, on a défini le paramètre AM (Air Masse) caractérisant la couche atmosphérique parcourue par le rayonnement. En dehors de

l'atmosphère, on a le spectre AM0, utilisé pour les applications spatiales. Au niveau de l'équateur, le rayonnement traverse une épaisseur d'atmosphère, on a le spectre AM1. Lorsque le rayonnement fait un angle de 60° par rapport au zénith, on a le spectre AM2. On définit le spectre AM1.5 pour un rayonnement faisant un angle de $48,2^\circ$ par rapport au zénith correspondant à un rayonnement traversant 1,5 fois l'épaisseur de la couche atmosphérique. Dans ces conditions, l'intensité du rayonnement est normalement inférieure à 1000W/m^2 (environ 827 W/m^2), un facteur de normalisation est donc appliqué afin de faire passer l'intensité du spectre à 1000 W/m^2 . Le spectre AM1.5.

Si le soleil est au zénith du lieu d'observation, $\theta=0^\circ$ on aura $AM=1$ (AM1). AM0 qui correspond à l'irradiance hors atmosphère est surtout utilisé pour prédire le comportement des cellules en vue d'applications spatiales.

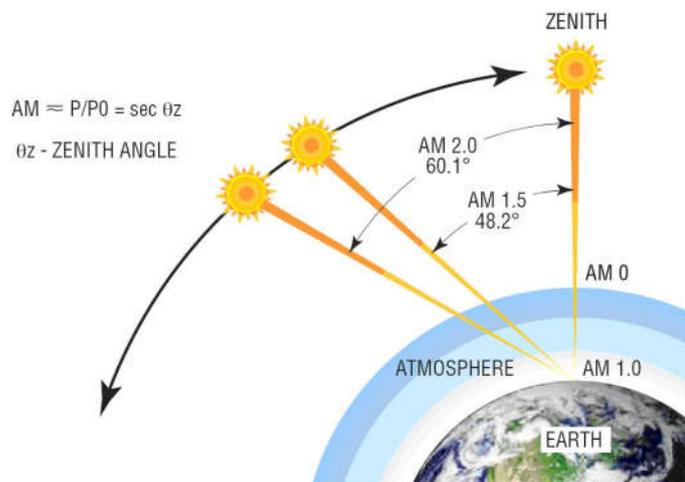


Figure I-22. Soleil au zénith (90° par rapport à l'horizon), niveau de la mer: AM 1,
Soleil à 41.8° par rapport à l'horizon: AM 1.5,
Soleil à 30° par rapport à l'horizon : AM 2.

Le spectre standard le plus étudié est le AM1.5G avec « G » signifiant « Global » car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses ; par opposition à AM1.5D qui ne tient compte que du direct. AM1.5G donne une irradiance de 970 W/m^2 mais a été arrondi à 1kW/m^2 . L'intensité I_b reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce à la formule empirique suivante pour une surface perpendiculaire aux rayons incidents :

La figure I-21 ci-dessous montre le spectre solaire à la surface de la Terre. La partie la plus importante concerne le domaine visible et le proche infrarouge [14].

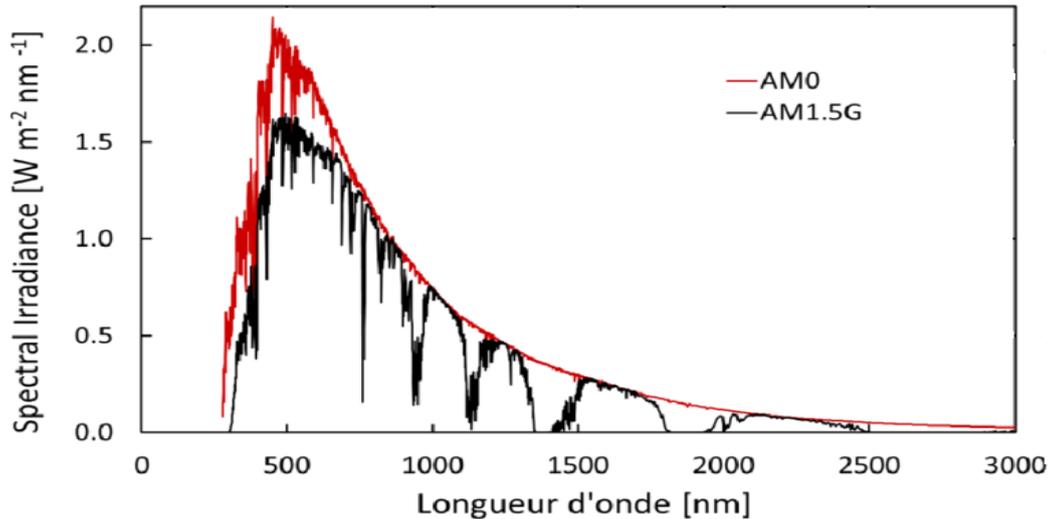


Figure I-23. Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5G.

I.12 Les paramètres photovoltaïques :

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique $I(V)$. La figure ci-dessous représente une caractéristique courant-tension $I(V)$ dans l'obscurité et sous éclairage typique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètres physiques caractéristiques du composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (FF) du composant [7].

I.12.1 Courant de court-circuit :

La densité de courant de court-circuit I_{cc} exprimé en mA/cm^2 , 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 [2].

I.12.2 Tension de circuit ouvert :

La tension exprimée en V mesurée aux bornes des électrodes quand le circuit est ouvert est appelée «tension de circuit ouvert» V_{CO} . Quand le courant qui traverse la cellule est nul [2],

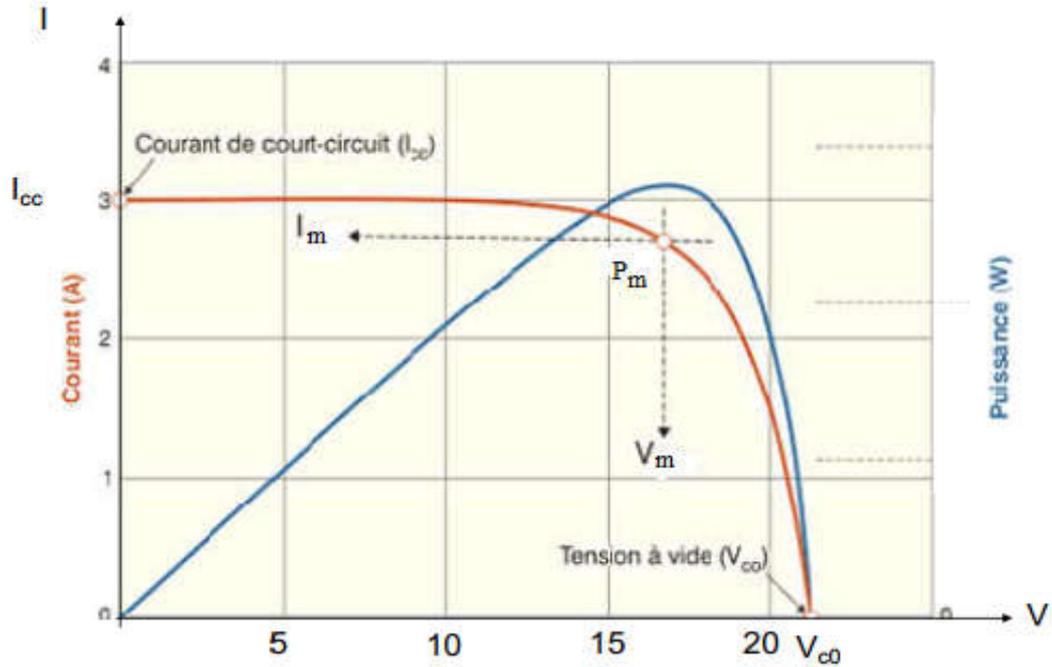


Figure I-24. Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule solaire.

I.12.3 Facteur de forme :

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée $P_m = P_{max}$) pour un point de fonctionnement $P_m (I_m = I_m, V_m = V_{max})$ de la courbe courant-tension (figure I-22) [2]. Le facteur de forme est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} I_{cc}} = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (I-24)$$

I.12.4 Rendement de conversion énergétique :

Le rendement η de la cellule solaire exprimé en pourcentage, 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_{inc} [2].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{FF I_{cc} V_{oc}}{P_{inc}} \quad (I-25)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

I.12.5 Rendement Quantique :

On définit le rendement quantique d'une cellule solaire $RQ(\lambda)$ comme le rapport entre le nombre d'électrons collectés et le nombre de photons incidents, pour chaque longueur d'onde si tous les photons d'une certaine énergie sont convertis en électrons et que ceux-ci sont collectés aux bornes de la cellule.

On distingue:

a) Rendement Quantique Externe :

Le Rendement Quantique Externe (RQE) est le pourcentage d'électrons collectés qui participant au photo-courant par rapport au nombre de photons incidents

$$RQE(\lambda) = \frac{hc}{q\lambda} R_S(\lambda) \quad (I-26)$$

Où

h : constante de Planck égale $6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s.

c : la vitesse de la lumière dans le vide est égale $3 \cdot 10^8$ m/s.

$RQE(\lambda)$: Rendement quantique externe (%).

$R_S(\lambda)$ est la réponse spectrale, exprimée en A/W et définie par :

$$R_S = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} \quad (I-27)$$

$P_{in}(\lambda)$ l'éclairement monochromatique global, exprimé en W/m^2 .

$I_{cc}(\lambda)$ est le courant de court-circuit, exprimé en A/cm^2 .

b) Rendement Quantique Interne :

Le rendement quantique interne RQI étudie les mécanismes internes de la cellule, il est nécessaire de prendre en considération uniquement les photons absorbés dans le dispositif. On sépare alors du calcul de rendement quantique les photons réfléchis ou transmis, ainsi que ceux absorbés dans les couches non actives comme la couche antireflet. Le rendement quantique interne donne ainsi le pourcentage d'électrons participant du photo courant par rapport au nombre de photons qui ont été réellement absorbés dans la cellule:

$$RQE(\lambda) = \frac{RQE(\lambda)}{[1 - R(\lambda) - A(\lambda) - T(\lambda)]} \quad (I-28)$$

Avec:

$RQI(\lambda)$: Rendement quantique interne (%).

$R(\lambda)$: Réflectivité de la cellule (%).

$A(\lambda)$: Absorption de la cellule (%).

$T(\lambda)$: Fraction du rayonnement transmis à travers la cellule (%).

I.13 Les recombinaisons des porteurs :

Le fonctionnement d'une cellule solaire est basé sur la création et la séparation des paires électron-trou par absorption de la lumière et sous l'action d'un champ électrique. Néanmoins, il existe toujours des recombinaisons de ces paires électron-trou limitant les performances de la cellule. Dans un matériau semi-conducteur, un mécanisme de recombinaison donné est caractérisé par un taux de recombinaison, représentant le nombre de recombinaisons par unité de temps et par unité de volume [13]. Il existe trois principaux mécanismes: les recombinaisons radiatives, les recombinaisons Shockley-Read-Hall (SRH) et les recombinaisons Auger.

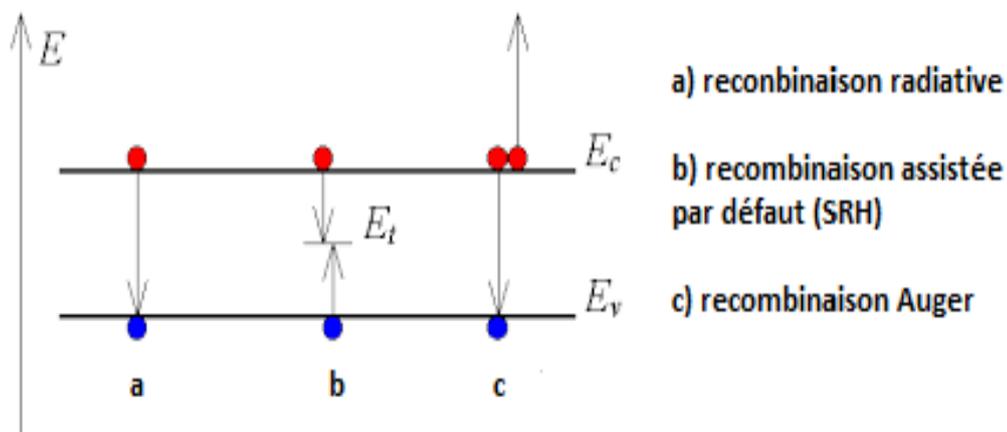


Figure I-25. Représentation des types de recombinaisons.

I.13.1 Recombinaison Radiative :

La recombinaison radiative ou bande à bande, correspond à la transition d'un électron de la bande de conduction vers la bande de valence. Elle s'accompagne de l'émission d'un photon d'énergie proche de celle du gap du matériau (processus inverse de la photo génération).

Ce type de recombinaisons est un processus fréquent dans les semi-conducteurs à gap direct tels que l'arséniure de gallium GaAs. A noter qu'il est à la base de la photoluminescence et des LED. Pour le silicium, cette recombinaison n'est pas essentielle puisque son gap est indirect et que la recombinaison d'un électron nécessite l'intervention d'un phonon [13].

I.13.2 Recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH):

Le mécanisme de recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH) est schématisé sur la figure ci-dessus. Ce mécanisme fait intervenir un défaut localisé dans la bande interdite du matériau qui peut être un centre recombinant pour les porteurs libres [13].

I.13.3 Recombinaison Auger :

Le mécanisme de recombinaison Auger est représenté sur la figure ci-dessus. Il s'agit aussi d'une recombinaison bande à bande, mais contrairement à la recombinaison radiative, l'énergie libérée est transmise à un troisième porteur qui se retrouve excité dans un niveau supérieur de la bande de conduction. Le troisième porteur peut ensuite se thermaliser en émettant un ou plusieurs phonons. A noter que ce phénomène existe aussi avec les trous dans la bande de valence [13].

I.14 L'équivalent électrique d'une cellule solaire :

I.14.1 Modèle à 1 diode :

La cellule photovoltaïque est généralement modélisée par un circuit électrique équivalent. Pour le modèle simple, ce circuit contient une seule diode. La source de courant idéale qui correspond au photo-courant généré I_{ph} (cellule sous éclairage) est mise en parallèle avec la diode qui reproduit les recombinaisons (modélise la jonction P-N) [15].

La résistance série R_s modélise les pertes résistives au sein de la cellule (due à la résistivité des différentes couches de la cellule : émetteur, base, contacts et de la métallisation des deux faces de la cellule

La résistance shunt R_{sh} (résistance parallèle R_p) correspond à une résistance de fuite entre les deux zones N et P de la jonction lorsqu'il y a surtout des défauts de fabrication comme par exemple le court-circuit de la jonction [16].

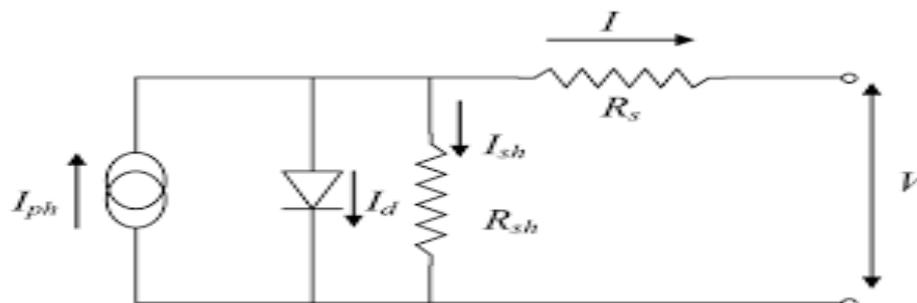


Figure I-26. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode.

En appliquant les lois de Kirchhoff, on obtient la relation :

$$I = I_{ph} - I_D - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (I-29)$$

$$I = I_{ph} - I_{S1} \left(e^{\frac{q(V + IR_s)}{nk_B T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (I-30)$$

$$\text{Avec } I_{S1} = \frac{qn_i^2 D_p}{N_d L_p \text{th}\left(\frac{d_n}{L_p}\right)} + \frac{qn_i^2 D_n}{N_a L_n \text{th}\left(\frac{d_p}{L_n}\right)} \quad (I-31)$$

Calcul pour notre cellule.

I_{S1} : La densité du courant de saturation de la jonction dans les zones neutres (A/cm^2)

I_{ph} : la densité de photo courant généré par l'éclairement A/cm^2

n_i : La concentration intrinsèque ($10^{10} cm^{-3}$) du silicium.

$$n_i^2 = N_c N_v e^{-\frac{E_g}{k_B T}} \quad (I-32)$$

E_g : l'énergie de gap

N_c et N_v , les densités effectives respectives (cm^{-3}) des électrons dans la BC et des trous dans la BV

T : La température en °K

N_d et N_a : Les densités des donneurs et des accepteurs respectivement en (cm^{-3}) dans les zones N et P.

L_n et L_p : Les longueurs de diffusion des électrons et des trous respectivement dans le types N et P.

D_n et D_p : Les coefficients de diffusion des électrons et des trous respectivement dans le types N et P.

d_n et d_p : L'épaisseur des régions N et P respectivement

q : La charge d'électrons est égale $1,6 \cdot 10^{-19}$ C

V : Le potentiel aux bornes de la cellule

n : Le facteur d'idéalité de la diode ($n=1$)

k_B : la constante de Boltzmann $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T : la température en degré kelvin (°K)

Où :

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \text{ et } L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (I-33)$$

$$D_p = \frac{k_B T}{q} \mu_p \text{ et } D_n = \frac{k_B T}{q} \mu_n \quad (\text{I-34})$$

τ_n et τ_p : les durées de vie des électrons et des trous.

I.14.2 Cas d'une cellule idéale :

Si on néglige la résistance série R_s , on obtient :

$$I = I_{ph} - I_{S1} \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nk_B T}} - 1 \right) - \frac{V}{R_{sh}} \quad (\text{I-35})$$

Comme la résistance shunt R_{sh} est beaucoup plus élevée que la résistance série, on peut encore négliger le courant dévié dans R_{sh} [5]. On obtient alors :

$$I = I_{ph} - I_{S1} \left(e^{\frac{qV}{n_1 k_B T}} - 1 \right) \quad (\text{I-36})$$

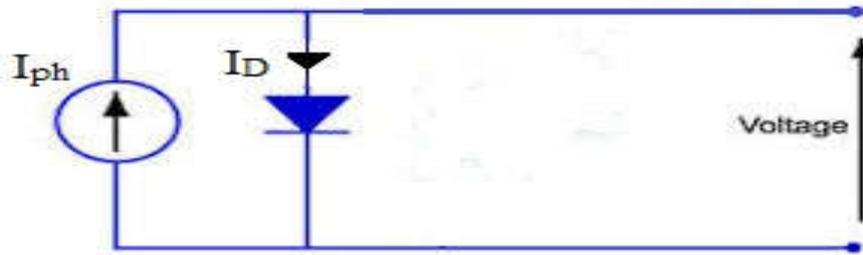


Figure I-27. Schéma équivalent d'une cellule idéale.

I_{CC} Est obtenue lorsque $V = 0$, on obtient alors :

$$I_{CC} = I_{ph} - I_{S1} (e^0 - 1), \rightarrow I_{CC} \approx I_{ph} \quad (\text{I-37})$$

Lorsque I est nul, on obtient l'expression de V_{co} :

$$\ln \left(\frac{I_{CC}}{I_{S1}} + 1 \right) = \frac{qV_{co}}{k_B T} \rightarrow V_{co} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{I_{CC}}{I_{S1}} + 1 \right) \quad (\text{I-38})$$

I.14.3 Modèle à deux diodes :

I_{ph} étant la photo courant due aux photons incidents, les deux termes exponentiels représentent le courant de saturation de diffusion (I_{S1}) et le courant de saturation de recombinaison (I_{S2}) [1].

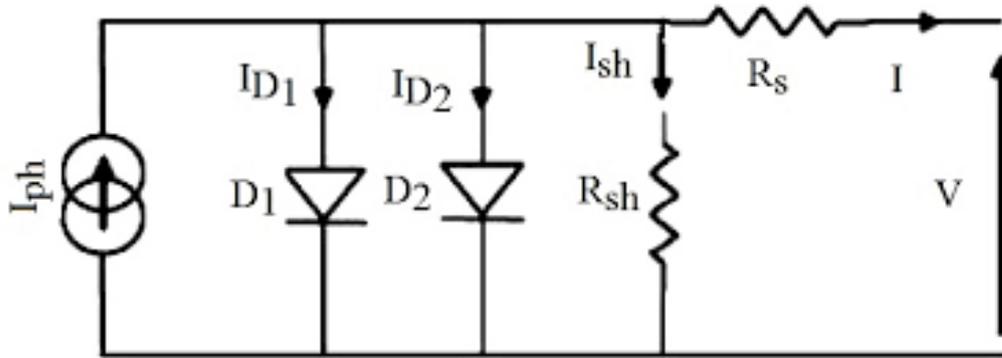


Figure I-28. Schéma équivalent du modèle à deux diodes.

$$I = I_{ph} - \left[I_{S1} \left(\exp \left(\frac{q(V-IR_s)}{k_B T} \right) - 1 \right) + I_{S2} \left(\exp \left(\frac{q(V-IR_s)}{2k_B T} \right) - 1 \right) \right] - \frac{V-IR_s}{R_{sh}} \quad (I-39)$$

Où :

Avec :

$$I_{S2} = \frac{qn_i}{2\tau} \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(V_d-V_a)}{q} \frac{N_a+N_d}{N_a N_d}} \quad (I-40)$$

I_{S2} : Le courant de saturation de la diode D_2 .

n_2 : Le coefficient d'idéalité de diode D_2 .

V_a : Tension de polarisation.

τ : Durée de vie des porteurs.

Et V_d : Le potentiel de diffusion

$$V_d = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (I-41)$$

Chapitre II

Les différentes filières

au silicium cristallin

des cellules

photovoltaïques

Chapitre II : Les différentes filières au silicium cristallin des cellules photovoltaïques

Puisque nous étudions une cellule au silicium, nous présentons ci-après quelques filières de ce type de cellules.

II.1 Les cellules au silicium mono-cristallin (C-Si) :

Le Silicium monocristallin (mono-Si), est un matériau composé d'un seul cristal parfaitement homogène obtenu par différentes méthodes de fabrication. Les pionnières sont celles de Czochralski (Cz) et de la Zone Flottante (FZ).

Les cellules solaires issues de ce Silicium ont une couleur caractéristique qui est généralement gris-noir métallique.

Les avantages de cette technologie sont :

- ✓ une production des panneaux solaires presque optimale. Les cellules monocristallines offrent les meilleurs rendements (16 à 25 %),
- ✓ en outre, les panneaux solaires à base de silicium monocristallin présentent une bonne durée de vie (30 ans).

Les inconvénients sont :

- ✓ un coût de production élevé,
- ✓ un rendement plus faible sous un faible éclaircissement,
- ✓ une baisse du rendement quand la température augmente, par conséquent, une production faible dans les régions chaudes [13].



Figure II-1. Cellules photovoltaïques à base de Silicium mono-cristallin.

II.2 Les cellules au silicium non mono-cristallin :

Pour des raisons économiques et industrielles, la fabrication des cellules photovoltaïques s'est orientée sur des cellules au silicium moins chères et qui ne sont monocristallines.

II.2.1 Cellule au Silicium multi-cristallin :

Contrairement au silicium monocristallin, le silicium multi-cristallin (mc-Si) est composé de plusieurs domaines cristallins de tailles variées et orientés de manière aléatoire dans le

Chapitre II : Les différentes filières au silicium cristallin des cellules photovoltaïques

matériau. Les cellules solaires multi-cristallines ont donc un aspect non uniforme et sont de couleur bleue.

Cette technologie a comme avantages :

- ✓ un coût de production moins élevé que pour les cellules monocristallines.
- ✓ Les panneaux ont également une bonne durée de vie.
- ✓ Le rendement est correct, même par temps nuageux.

Son principal inconvénient est justement son rendement de conversion qui est légèrement inférieur à celui des cellules au mono-cristallin. Il est compris entre 14 et 21% [13].

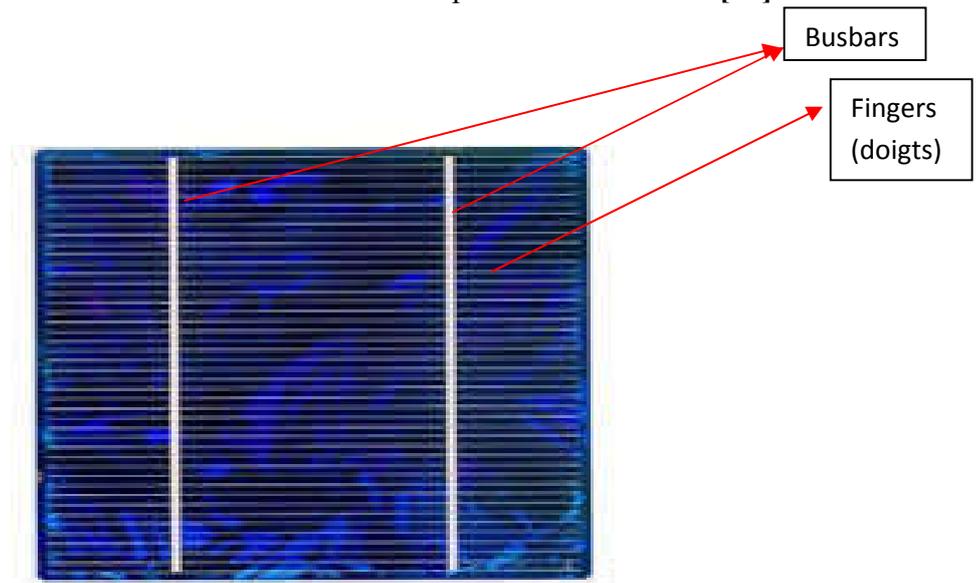


Figure II-2. Cellules photovoltaïques à base de Silicium multi-cristallin.

II.2.2 Autres types de cellules au silicium non mono-cristallin :

Toutefois, il existe d'autres types de cellules réparties en fonction de la taille des grains dont la performance est largement influencée par leurs tailles. La distinction entre matériau multi-cristallin et poly-cristallin n'est pas toujours bien définie. Ces deux termes ont déjà été utilisés de manière interchangeable dans la littérature. Le poly-cristallin est réservé aux matériaux dont les grains ont une taille inférieure à 1 mm et plus grande que 1 μm . Le multi-cristallin se réfère à un matériau avec grains plus gros que le poly-cristallin (entre 1 mm et 10 cm), Le terme «monocristallin» a parfois été utilisé dans la littérature pour les matériaux monocristallins, mais ce terme est défavorisé car "mc-Si" fait déjà référence à un matériau multi-cristallin. Alors que la lettre «c» est souvent utilisée pour représenter la syllabe «cristaux» et «c-Si» a souvent été utilisé pour le «silicium cristallin. Il existe aussi le silicium microcristallin presque proche de l'amorphe et donc la taille est de l'ordre du micron [17].

Le tableau qui suit résume toutes ces différences.

Chapitre II : Les différentes filières au silicium cristallin des cellules photovoltaïques

Description	Symbole	Taille du grain	Techniques de croissance communes
Mono-cristallin	c-si	>10cm	Czochralski (Cz) float zone (zone flottante) (FZ)
Multi-cristallin	mc-si	1mm-10cm	Cast, spheral, sheet, ribbon
Poly-cristallin	pc-si	1 μm -1mm	Chemical-vapor deposition
Micro-cristallin	μ -si	<1 μm	Plasma deposition

Tableau II-1. Les différents types du Silicium cristallin.

II.3 Technologies des cellules photovoltaïques :

L'élaboration des cellules solaires nécessite un état de l'art de fabrication pour arriver à la cellule finale. Dans ce qui suit, sont décrites les technologies les plus importantes utilisées dans le domaine des cellules photovoltaïques :

- ✓ Substrat : la production du substrat monocristallin est généralement produite par la méthode de Czochralski (CZ) et la fusion de zone (FZ).
- ✓ Emetteur et champ de la surface arrière (BSF) : ils sont élaborés par la diffusion thermique décrite au chapitre I.
- ✓ Texturation : son rôle est de minimiser la réflexion de la lumière incidente.
- ✓ Couche Anti Reflet (CAR) : on l'utilise généralement pour piéger les photons afin d'augmenter l'absorption des photons du spectre solaire.
- ✓ Passivation : les couches de passivation déposées aux surfaces servent à abaisser les recombinaisons en surface.

Seules les trois technologies sont succinctement détaillées dans ce qui suit.

II.3.1 La texturation :

La texturation est obtenue par attaque chimique par des solutions bien définies sur des surfaces selon des plans cristallographiques privilégiés.

Selon la nature des solutions chimiques utilisées. Il existe plusieurs types de texturation qui se forment surface de la cellule dont nous présentons certains exemples de géométries sur la figure II-3.

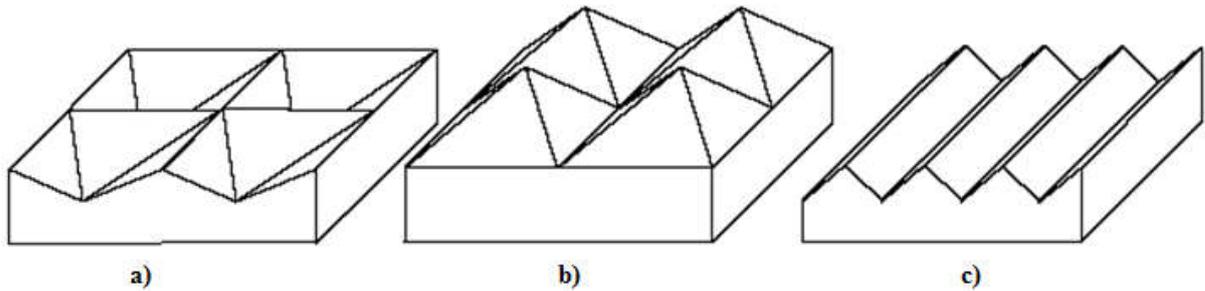


Figure II-3. Les différentes géométries de texturation :

- a) Pyramides inversées (inverted pyramids),
- b) Pyramides directes (upright pyramids),
- c) rainures (grooves).

Généralement, c'est le second type qui est utilisée à savoir celui des pyramides directes et dont nous décrirons sur la figure ci-dessous comment un rayon incident est deux fois réfléchi au lieu d'une seule réflexion pour une surface poli.

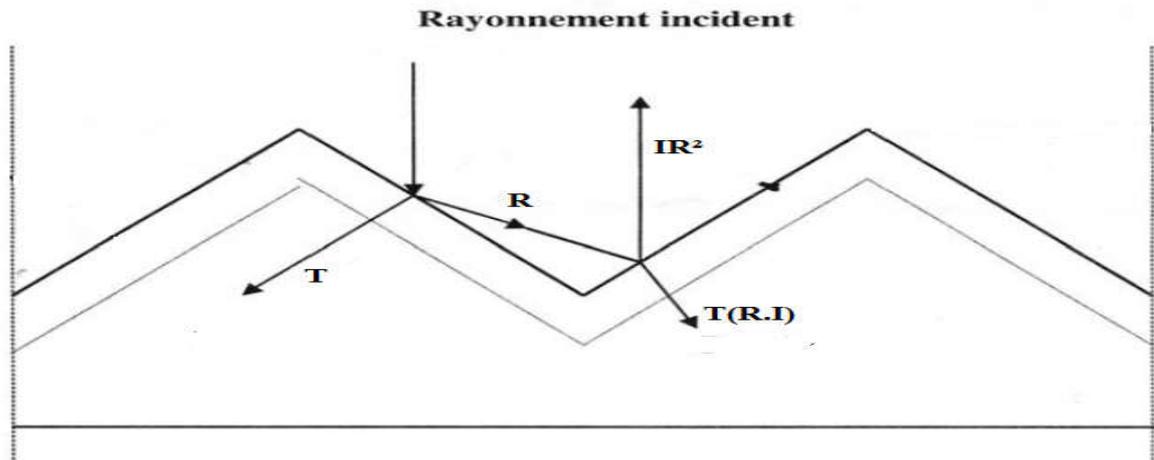


Figure II-4. La texturation de notre cellule solaire, sous forme de pyramides directes (upright pyramids).

Le rayon incident d'amplitude I est décomposé en deux rayons selon la loi de

Snell Descartes :

- Amplitude du Rayon transmis : $T \cdot I$
- Amplitude du Rayon réfléchi : $R \cdot I$

Ce dernier arrive sur la surface adjacente pour se décomposer à son tour en deux rayons :

- Amplitude du Rayon transmis : $(R \cdot I) \cdot T = T \cdot R \cdot I$
- Amplitude du Rayon réfléchi : $(R \cdot I) \cdot R = R^2 \cdot I$

Ainsi la réflexion devient R^2 au lieu de R . Si par exemple $R=30\%$, après double incidence, la réflexion devient 9% , soit une diminution de la réflexion de 21% en absolue. On a une multiplicité de l'incidence du photon, la réflexion est appelé à encore diminuer.

II.3.2 La Couche Anti Reflet (CAR) :

Pour encore minimiser la réflexion de la lumière en surface, nous utilisons une couche anti réfléchissante (Anti Reflective Coating : ARC). Le rôle de la couche anti réfléchissante est de réduire la réflectivité de la cellule au niveau de la face avant et/ou arrière. Si la surface est dépourvue de couche antireflet, la cellule solaire agit comme un miroir et reflète pour le silicium jusqu'à 33% de la lumière incidente sur la cellule. La couche antireflet réduit au minimum cette réflexion, en ramenant les pertes de réflexion à moins de 5% de sorte que la lumière du soleil va passer la surface de la cellule et diminuer ainsi les pertes optiques. Différentes couches anti réfléchissantes sont utilisées en photovoltaïque, elles peuvent être isolantes comme le TiO_2 , le SiO_2 et le SiN_x . Cette couche joue également le rôle de piégeage de la lumière où un photon surtout des grandes longueurs d'ondes qui possède de faibles coefficients d'absorption [2], (figure III-4, chapitre 3) nécessite le parcours d'une certaine distance également à $d = \frac{1}{\alpha}$ avant d'être absorbé.



Figure II-5. Le rôle de la Couche Anti Reflet (CAR).

II.3.3 La passivation :

On utilise les couches de passivation telles que dioxyde de Silicium (SiO_2), le nitrure de Silicium (SiN_x) et l'alumine (Al_2O_3) pour réduire la vitesse de recombinaison en surface [18]. Sur l'exemple de la figure ci-dessous, on montre les couches de passivations de la cellule n-PERT qui sera décrite plus loin et qui présente deux couches de passivation, l' Al_2O_3 sur la surface avant et le SiO_2 sur la face arrière. Ici les couches SiN_x jouent le rôle principal de couche antireflet.

Chapitre II : Les différentes filières au silicium cristallin des cellules photovoltaïques

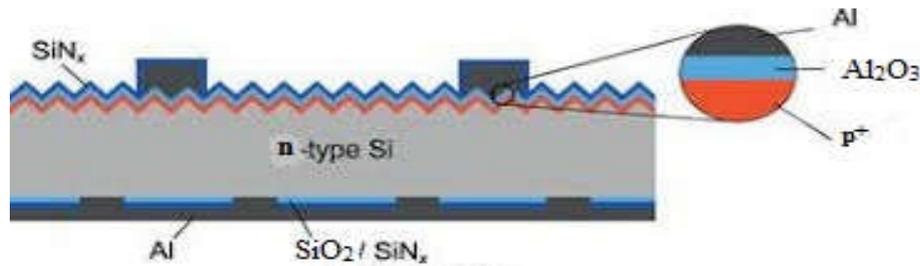


Figure II-6. Les couches de passivation (Al₂O₃ et SiO₂).

II.4 La cellule Al-BSF :

La cellule photovoltaïque Al-BSF est la cellule la plus répandue actuellement sur le marché industriel et dont la cellule PERC commence à la concurrencer. On décrit ci-dessous les étapes technologiques pour l'élaboration de cette cellule [19] :

- ✓ On part d'un substrat mono-cristallin de type p,
- ✓ Qu'on texture aux surfaces par une solution chimique,
- ✓ Ensuite on forme sur son front un émetteur fortement dopé de type n⁺ obtenu par diffusion thermique formant ainsi une jonction PN avec le substrat,
- ✓ Une couche supplémentaire (SiN_x) est rajoutée sur la surface avant qui joue le double rôle de Couche Anti Reflet (CAR) et de passivation (pour améliorer les performances de la cellule et diminuer la réflexion des photons incidents donc, une meilleure absorption de la lumière et une meilleure diffusion des porteurs de charges dans le matériau.
- ✓ Des contacts métalliques avant d'Argent ou d'Aluminium (grille laissant passer la lumière) et arrière (totalement métallisée d'Aluminium) constituant les électrodes positive et négative chargées de collecter le courant généré. Pour permettre une bonne adhésion du métal sur le semiconducteur, une cuisson double thermique est nécessaire.
- ✓ La couche BSF (Back Surface Field : champ de surface arrière) est obtenue lors de cette cuisson de l'Aluminium dont une infime partie pénètre par diffusion sur la face arrière donnant une couche fortement dopée p⁺. Cette zone a le même type de dopage que celui de la base, ce dernier consiste à créer une barrière de potentiel sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. Cette couche joue le rôle d'une passivation électrique et permet de repousser les électrons générés par la lumière vers la zone de charge d'espace pour être collectés et d'attirer les trous générés. La barrière de potentiel induite par la différence du niveau de dopage entre la base et le BSF tend

Chapitre II : Les différentes filières au silicium cristallin des cellules photovoltaïques

à confiner les porteurs minoritaires dans la base [2]. Donc le but du champ arrière est de diminuer la vitesse de recombinaison.

- ✓ Isolation des côtés : A la fin de l'opération, on procède par des coupes au laser à isoler les côtés qui ont été affecté par ces différentes étapes technologiques.

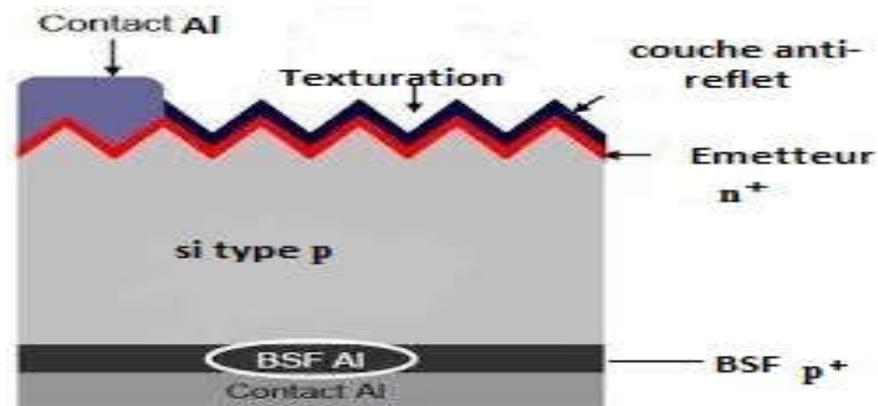


Figure II-7. Les constituants de la cellule solaire Al-BSF.

Chapitre II : Les différentes filières au silicium cristallin des cellules photovoltaïques

Nous présentons dans le tableau ci-dessous la technologie de fabrication d'une cellule standard à texturation sous forme pyramidale directe de face avant et arrière de la base [19].

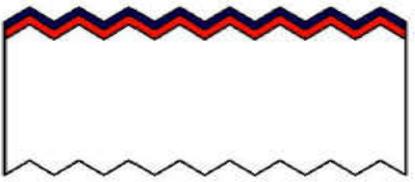
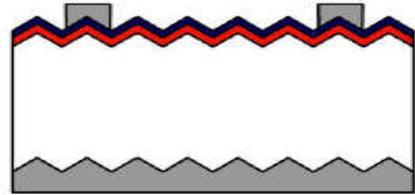
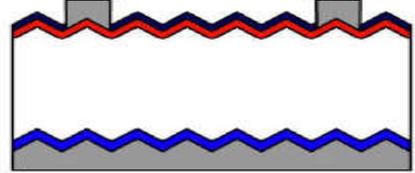
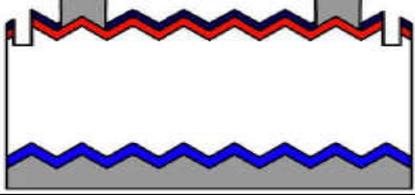
Etape	Procédé de fabrication	Résultat
1	La texturation des deux faces du substrat de type p	
2	Formation de l'émetteur n ⁺ sur la face avant par diffusion thermique formant ainsi la jonction PN (voir page 18)	
3	Revêtement de la couche antireflet sur la face avant par PECVD (SiNx) ou par oxydation thermique s'il s'agit du SiO ₂	
4	Impression de la pâte d'aluminium à l'arrière pour former la métallisation arrière et des pâtes argentées sur le front ou alternées avec l'aluminium sur la face arrière.	
5	La cuisson de l'aluminium de la face arrière permet de créer par diffusion thermique le BSF de type p ⁺ qui joue le rôle de la passivation électrique à l'arrière.	
6	Isolation de l'émetteur et la base en coupant au laser les bords de la cellule.	

Tableau II-2. Les technologies de fabrication d'une cellule solaire Al-BSF.

II.5 La cellule PERC :

Selon la source consultée [20], La cellule PERC (Passived Emitter and Rear Cell) signifie Cellule à Contact Arrière et à Emetteur Passivé ou même Émetteur passivé et Cellule arrière. Développé pour la première fois dans les années 1980 par le scientifique Martin Green et son équipe de l'Université de New South Wales à Sydney en Australie, Les fabricants ont passé de nombreuses années à se concentrer sur la face avant d'une cellule solaire et moins d'attention

Chapitre II : Les différentes filières au silicium cristallin des cellules photovoltaïques

a été portée pour tirer parti des possibilités de production de la face arrière. L'incorporation de la PERC dans une cellule solaire stimule la production.

En ajout d'une couche supplémentaire à l'arrière de la cellule PERC. Cette couche passive diélectrique a pour effet de renvoyer la lumière non absorbée vers la cellule solaire en vue d'une seconde tentative d'absorption augmentant le rendement de la cellule solaire [20].

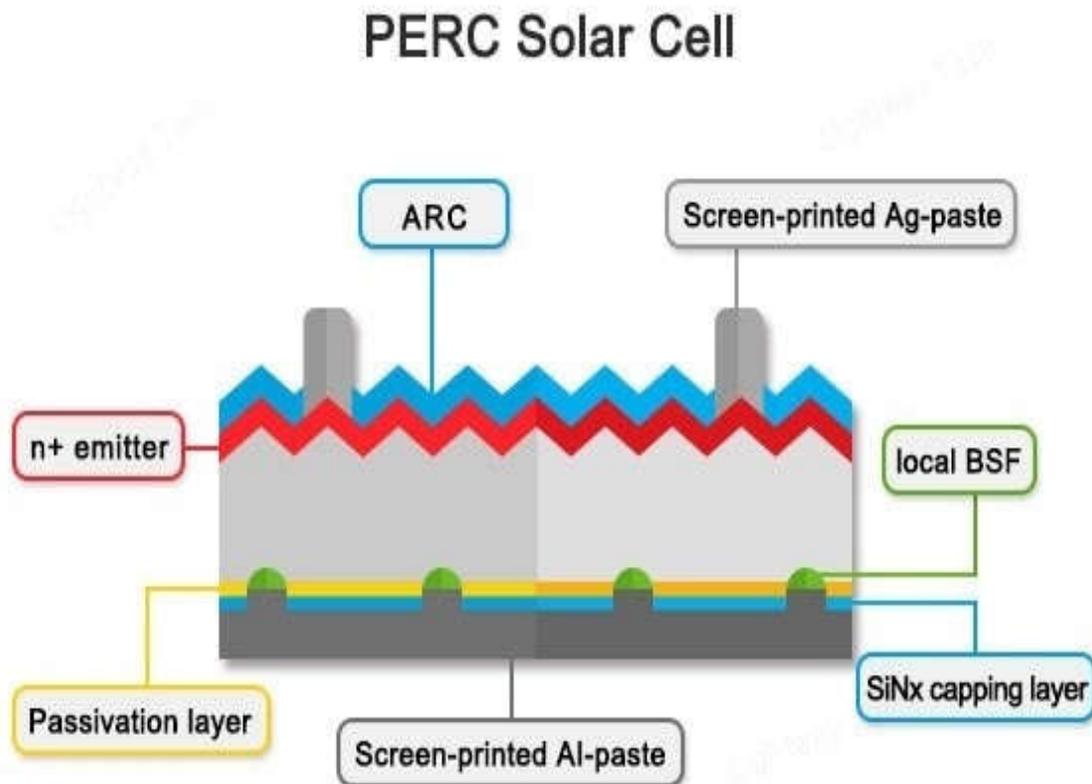


Figure II-8. Les constituants d'une cellule solaire PERC monocristalline.

On note que la face avant et le substrat de la cellule PERC reste identique à la cellule standard Al-BSF. Seule la face arrière subit des changements. Donc, afin de créer la cellule PERC, deux étapes supplémentaires sont utilisées pour le champ de surface arrière (BSF) standard pendant le processus de fabrication. Tout d'abord, deux couches de passivation (Al_2O_3) de surface arrière et de couche Anti-Reflet (SiN_x ou SiO_2) sont élaborées. Ensuite, des lasers ou des produits chimiques sont utilisés pour ouvrir localement ces deux couches afin que le métal puisse arriver jusqu'au substrat. La cuisson de la métallisation permet alors à créer des BSF locaux fortement dopé p+ [2], (figure II-8).

En raison de son prix élevé et de son efficacité optimisée, la majorité de la demande à court terme continuera probablement de se trouver dans les marchés japonais, britannique, chinois et allemand.

Chapitre II : Les différentes filières au silicium cristallin des cellules photovoltaïques

À l'avenir, le principal défi de cette technologie de cellule consistera à réduire les coûts de production. Cependant, les cellules PERC offrent actuellement un gain d'efficacité plus élevé, la cellule PERC mono sera bien en mesure de concurrencer la technologie mono standard (Al-BSF) [20].

II.6 Les cellules n-PERT monofaciale et bifaciale :

Une cellule solaire de type n-PERT à base du silicium cristallin (figure II-9), signifie en anglais : Passivated Emitter and Rear Totally diffused (Passivation de l'émetteur et de l'arrière totalement diffusé). Elle est constituée par :

- Un substrat (base de la cellule) de type n,
- Une texturation utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule généralement de forme Pyramidale directe.
- Un émetteur est de type p^+ ,
- Une couche antireflet SiN_x ,
- Comme passivation, nous avons utilisé l'alumine (Al_2O_3) sur la face avant et le dioxyde de silicium SiO_2 sur la face arrière.
- La zone arrière de type n^+ appelé BSF (Back Surface Field : Champ de surface arrière) obtenue par diffusion thermique, généralement un dopage par des atomes de Phosphore dans le Silicium
- Des contacts métalliques sont déposés sur les faces. La différence entre les cellules monofaciale et bifaciale réside sur la métallisation de la face arrière. La première est totalement métallisée à l'arrière tandis que la seconde est partiellement métallisée constituant donc grille comme sur le front et qui est montrée sur la figure II-9.

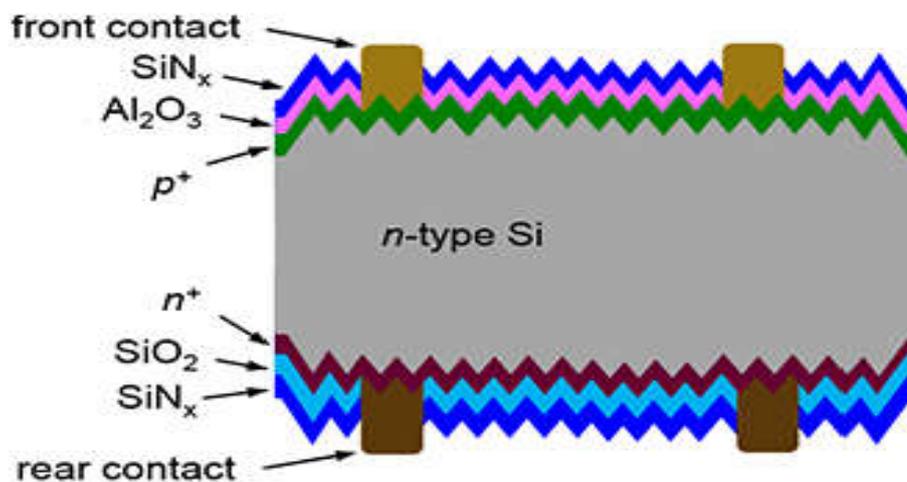


Figure II-9. La structure de la cellule solaire n-PERT bifaciale.

Chapitre III

Etude d'une cellule solaire n-PERT

III.1 Le logiciel PC1D-mod :

Afin d'étudier notre cellule n-PERT, nous avons cherché un outil simple nécessaire pour déterminer ses paramètres importants, ainsi que de prédire son comportement.

Parmi les logiciels les plus utilisés pour la simulation de cellule solaire, notre choix s'est porté sur l'un des pionniers du domaine à savoir PC1D (Personal Computer One Dimensional) qui a été développé en Australie à l'université de Sydney. Il permet particulièrement de simuler le comportement de structures photovoltaïques à base de semi-conducteurs à une dimension [21].

PC1D est un logiciel de simulation électrique commercialisé qui résout les équations décrivant le transport des électrons et des trous dans une dimension dans les dispositifs à matériaux semi-conducteurs.

PC1D a démontré par son utilisation fréquente dans le domaine du photovoltaïque que les résultats de la simulation, sont très proches des résultats expérimentaux, ce qui constitue un gain de temps et d'argent avant de réaliser la cellule [22].

Les statistiques de l'opérateur dans PC1D 5.9 sont basées sur l'approximation de la statistique de Boltzmann et plusieurs modèles spécifiques au PV ont été développés pour être utilisés dans ce cadre.

Cependant, les statistiques de Fermi-Dirac doivent généralement être utilisées avec un modèle correct pour la structure de bandes et la densité d'états pour obtenir des résultats de simulation fiables, en particulier dans les régions fortement dopées telles que les émetteurs des cellules solaires et les BSF.

Il y a seulement quelques années et précisément à partir de 2013 [23], la nouvelle physique a également été implémentée dans une version de mise à jour de l'interface utilisateur d'origine, nommée PC1D-mod 6.2 [24] basé sur la statistique de Fermi-Dirac qui est plus générale et plus affinée que le modèle physique de la statistique de Boltzmann [25].

Ce logiciel est composé de cinq parties.

Dans la figure III-1 qui suit, nous avons représenté les paramètres de la simulation dans ces cinq parties.

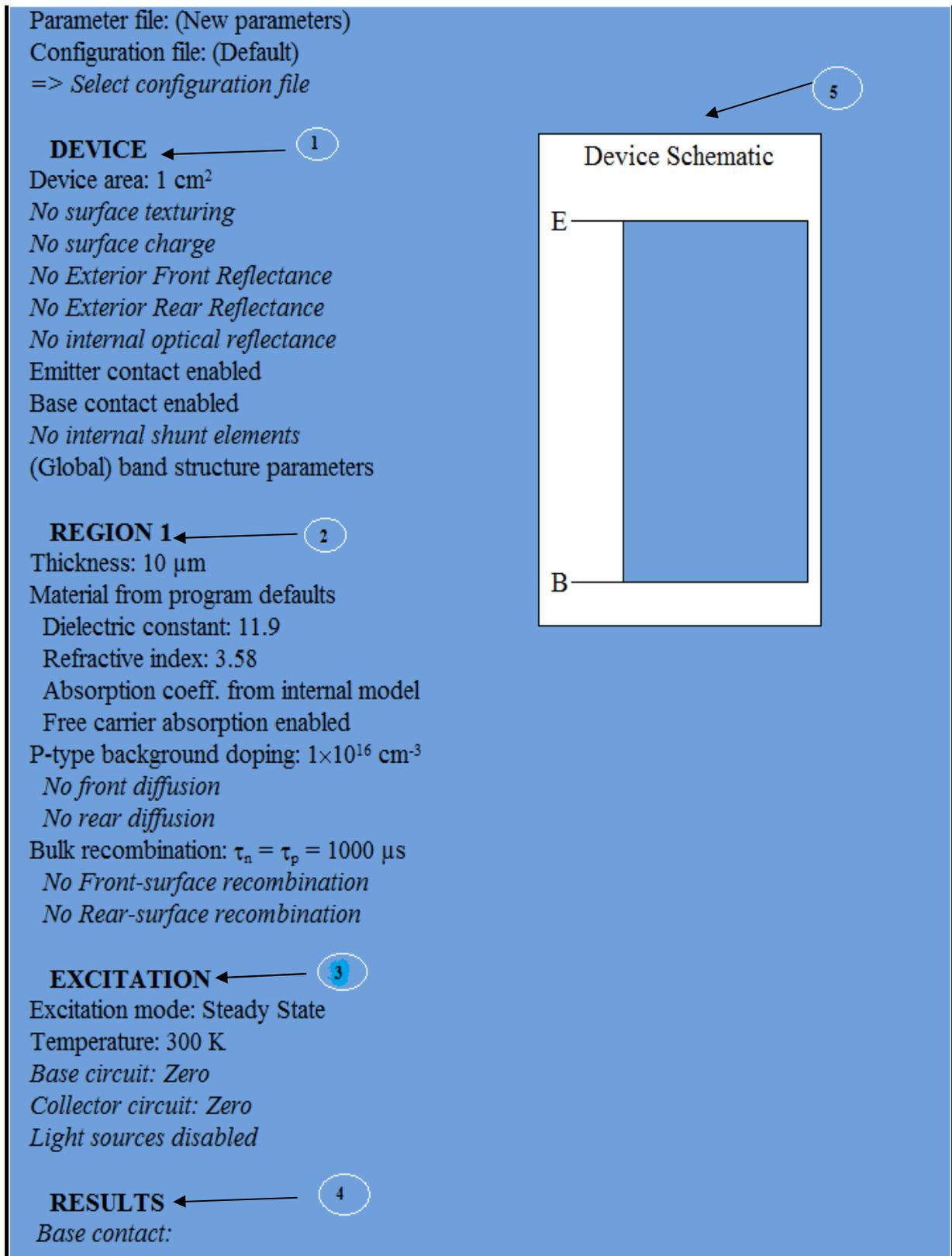


Figure III-1. Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique.

1-La partie «**DEVICE**» (Dispositif) : cette partie contient ici les informations générales sur la cellule solaire que nous voulons simuler.

2-la parties «**REGION1**» en: c'est dans cette partie que sont introduits les paramètres essentiels liés à la région du composant (type de matériaux utilisés, épaisseur, type de dopage, etc...). Dans la figure ci-dessus, il y a un seul domaine mais vous pouvez en ajouter un autre (on peut en avoir 5 au maximum), comme on peut le supprimer (avoir au moins une seule région).

3-La partie «**EXCITATION**»: c'est dans cette partie que nous introduisons les paramètres d'excitation de notre dispositif et qui nous serviront à simuler le comportement de ce dernier. Par exemple, dans le cas des cellules solaires, c'est dans cette partie que nous allons résoudre l'irradiation ainsi que la température de fonctionnement et d'autres paramètres.

4-La partie «**RESULTS**»: c'est dans cette partie que nous aurons notamment, après le lancement de la simulation, les valeurs de I_{CC} , V_{CO} et la puissance maximale P_M pour la simulation de cellules solaires.

5-La partie «**Device schematic**»: Il peut changer instantanément dès que l'on touche aux paramètres des régions [21].

Dans la figure III-2 qui suit, nous avons représenté les paramètres relatifs à la simulation de notre cellule n-PERT.

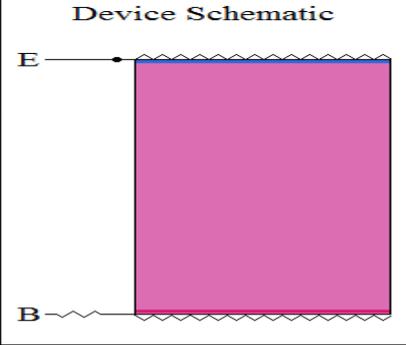
DEVICE
 Device area: 241 cm²
 Front surface texture depth: 3 μm
 Rear surface texture depth: 3 μm
No surface charge
 Front reflectance from c:\users\pc\desktop\master 2\
 Rear reflectance from c:\users\pc\desktop\master 2\
 Internal optical reflectance enabled
 Front surface optically rough
 Emitter contact enabled
 Base contact: 3×10⁻³ Ω
 Internal conductor: 1×10⁻⁴ S
 (Global) band structure parameters

REGION 1
 Thickness: 150 μm
 Material modified from si_updated.mat
 Dielectric constant: 11.9
 Refractive index from si.inr
 Absorption coeff. from si300.abs
 Free carrier absorption enabled
 N-type background doping: 1.559×10¹⁵ cm⁻³
 1st front diff.: P-type, 1.879×10¹⁹ cm⁻³ peak
No 2nd front diffusion
 1st rear diff.: N-type, 1.545×10¹⁹ cm⁻³ peak
No 2nd rear diffusion
 Bulk recombination: τ_n = τ_p = 1500 μs
 Front-surface recom.: S model, S_n = S_p = 5000 cm/s
 Rear-surface recom.: S model, S_n = S_p = 5000 cm/s

EXCITATION
 Excitation modified from one-sun_updated.exc
 Excitation mode: Transient, 100 timesteps
 Temperature: 25°C
 Base circuit: Sweep from -0.8 to 0.8 V
 Collector circuit: Zero
 Primary light source enabled
 Constant intensity: 0.094 W cm⁻²
 Spectrum from am15g_original.spc
 Secondary light source disabled

RESULTS
Base contact:
 J_{SC} = -37.32 mA/cm²
 V_{OC} = -0.6736 V
 FF = 79.69 %
 P_{MAX} = 20.03 mW/cm²
 J_{MPP} = -35.45 mA/cm²
 V_{MPP} = -0.5651 V

 I_{SC,TOT} = : 8.995 A
 P_{MAX,TOT} = 4.828 W



Device Schematic

Figure III-2. Fenêtre du logiciel PC1D utilisé pour notre simulation numérique.

III.2 Le choix des paramètres de la cellule :

Le tableau III-1 représente les paramètres de notre cellule

Paramètres	Valeurs
Surface (156 mm x 156 mm) (cellule semi-carrée)	241cm ²
Texturation de la surface du Front	Type : Pyramides directes Angle des facettes : 54,74° Hauteur : 3µm
Texturation de la surface arrière	Type : Pyramides directes Angle des facettes : 54,74° Hauteur : 3µm
Couche Anti Reflet (CAR) du front	Matériau : SiN _x Epaisseur : 65 nm Indice de réfraction (voir figure III-3)
Couche Anti Reflet (CAR) de l'arrière	Matériau : SiN _x Epaisseur : 65 nm Indice de réfraction (voir figure III-3)
Passivation avant	Matériau : Al ₂ O ₃ Epaisseur : 10 nm Indice de réfraction (voir figure III-3)
Passivation arrière	Matériau : SiO ₂ Epaisseur : 20 nm Indice de réfraction (voir figure III-3)
Resistance série	3 mΩ (0.723 Ω.cm ²)
Resistance parallèle	10 kΩ
Température de la cellule	25 °C (298,15 °K)
Résistivité du substrat (base type N)	3 Ωcm (N _D =1,559.10 ¹⁵ cm ⁻³)
Durée de vie des porteurs (e-h) dans la base	1500 µs
Dopage émetteur (type p)	1,879.10 ¹⁹ cm ⁻³
Resistance carrée de l'émetteur	70 Ω/□
Dopage du champ de la surface arrière (BSF) (type n)	1,545.10 ¹⁹ cm ⁻³
Résistance carrée du BSF	50 Ω/□
Vitesse de Recombinaison Surface (SRV) du Front et de l'Arrière	5000 cm/s
Ombrage du Métal du front et de l'arrière	6 %
Epaisseur de la cellule	150 µm
La puissance du spectre solaire sous AM1.5g	0,1 W/cm ²
Spectre solaire	AM1.5G

Tableau III-1. Les paramètres initiaux de la cellule bifaciale n-PERT.

III.3 Les paramètres optiques :

III-3-1 Indices de réfraction et coefficients d'absorption :

Nous avons représenté sur les figures **III-3** et **III-4** les indices de réfraction du Si, des couches Anti Reflet SiN_x et de passivation (Al_2O_3 , SiO_2) et leurs coefficients d'absorption que nous avons utilisés par la suite dans notre étude. Ces données ont été prises de la littérature très récente : Si monocristallin de la référence [26], SiN_x de [27], Al_2O_3 de [28] et SiO_2 de [29].

Dans la figure **III-3** nous observons que l'indice de réfraction du Si est plus grand que les autres indices, il varie entre 1,6 à 6,8, mais l'indice de réfraction de SiN_x varie entre 1,8 à 2,1 et qui est supérieure à les indices de Al_2O_3 et SiO_2 respectivement, et ces derniers presque restent constants quelque soit la longueur d'onde.

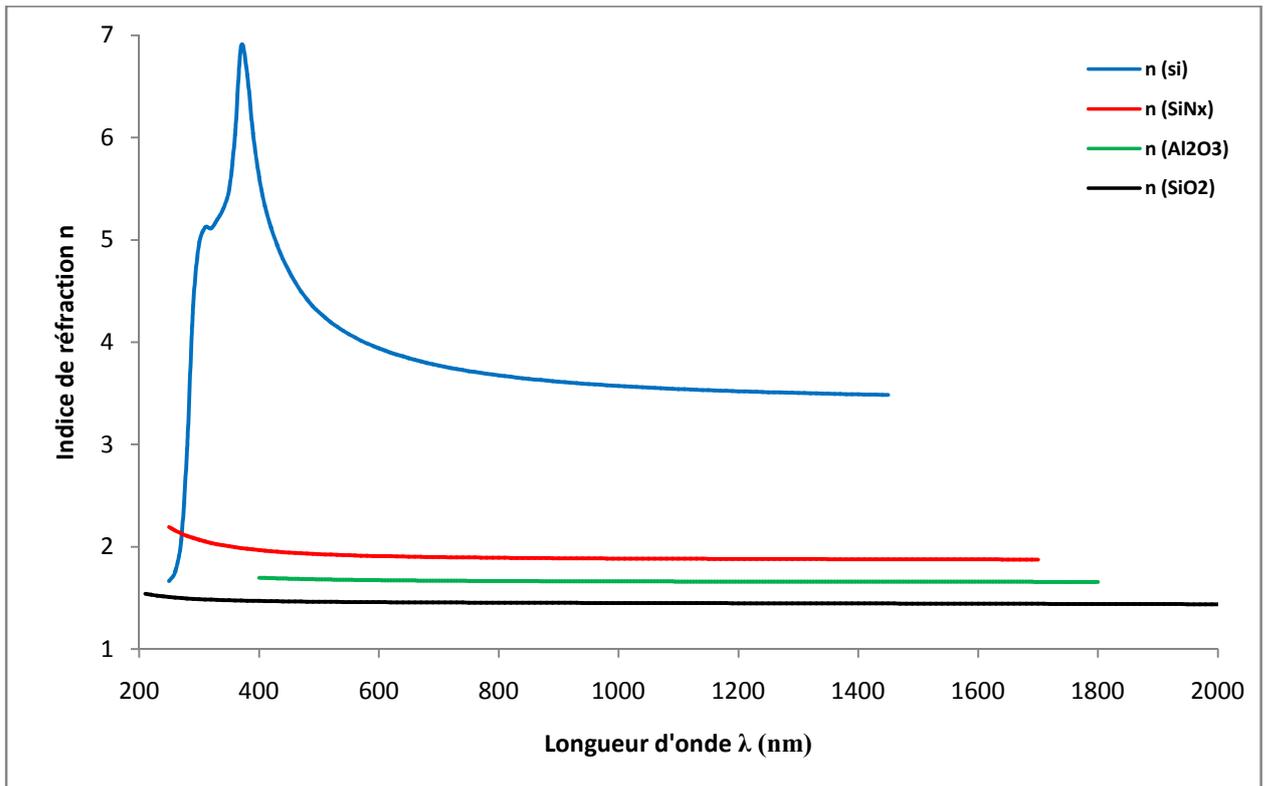


Figure III-3. Variation des indices de réfraction de Si, SiN_x , Al_2O_3 , SiO_2 en fonction de la longueur d'onde du rayonnement.

La figure **III-4** représente la variance du coefficient d'absorption de Si et SiN_x en fonction de la longueur d'onde du rayonnement, on observe une diminution des deux coefficients d'absorption avec l'augmentation de la longueur d'onde du rayonnement, mais de manière différente avec une gamme d'absorption du Si est plus grande que le SiN_x . Le Si absorbe plus des photons que SiN_x .

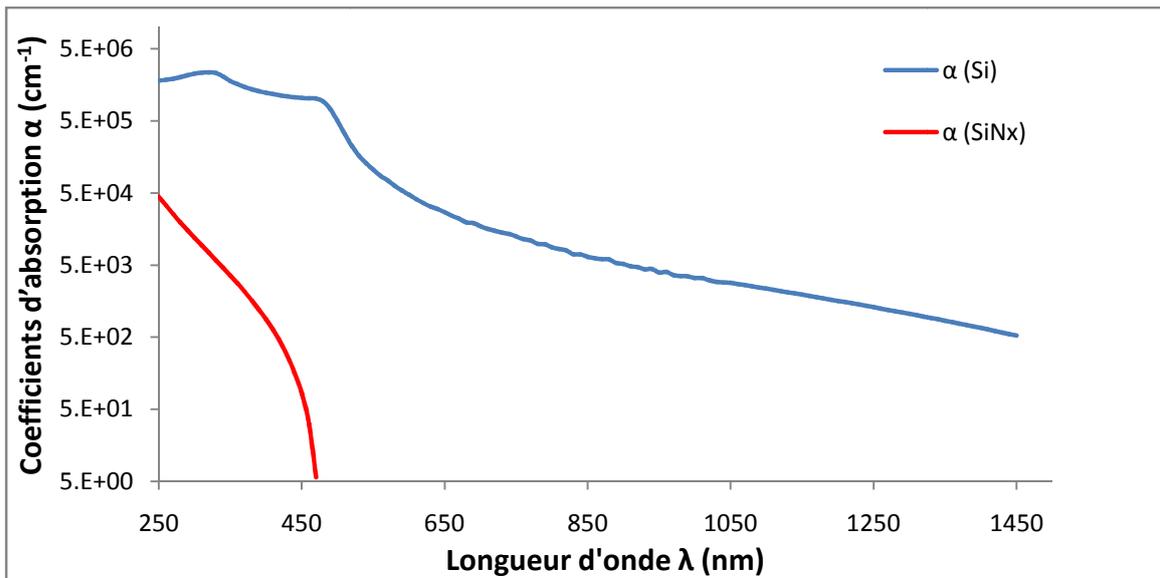


Figure III-4. Variation des coefficients d'absorption de Si et SiN_x en fonction de la longueur d'onde du rayonnement.

III-3-2 Réflexions sur les deux faces de la cellule :

Dans notre étude, il est déposé au front sur l'émetteur de type p^+ , une couche d' Al_2O_3 de 10 nm suivie d'une couche de SiN_x de 65 nm et vient ensuite l'air (d'indice $n=1$ et de coefficient d'absorption $\alpha=0$) (voir figure III-5).

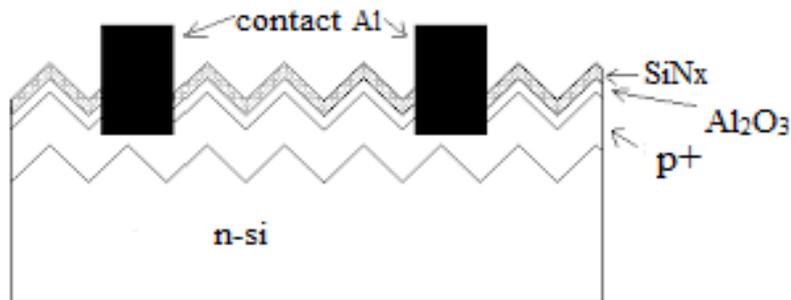


Figure III-5. Texturation et passivation au front de la cellule.

Quant à l'arrière, il est déposé sur le BSF de type n^+ une couche de SiO_2 de 20 nm pour la passivation et une couche de SiN_x de 65 nm pour la Couche Anti Reflet.

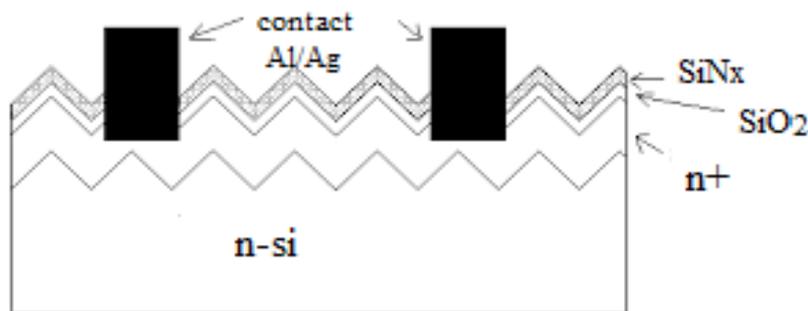


Figure III-6. Texturation et passivation à l'arrière de la cellule.

Pour calculer la réflexion du spectre solaire AM1.5G au front et à l'arrière puisque la cellule étudiée est bifaciale dont la lumière peut arriver sur les faces, nous avons utilisé le site de www.pvlighthouse.com.au dont les calculs sont basés sur les lois d'optique avec de multiples réflexions et réfractions, de transmissions et d'absorptions. Notons que ces couches présentent une texturation à pyramides directes. Le résultat des réflexions sur les deux faces est présenté sur la figure III-7 et qui sera intégré dans le logiciel PC1D-mod.

On observe une augmentation similaire de la réflexion extérieure des deux faces avant et arrière de 250 jusqu'à 300 nm d'une valeur 38%, puis une diminution entre 300 et 600 nm, où nous observons la réflexion de la face avant est moins importante que celle de l'arrière, jusqu'à son l'annulation des deux autour de 600 nm, et vice-versa au-delà des valeurs supérieures à 600 nm.

Par ailleurs, la cellule bifaciale dispose d'une grille au front et une autre à l'arrière. L'ombrage de ces grilles réfléchit totalement la lumière arrive sur le métal. Suivant la géométrie des doigts et des busbars, nous avons estimé cet ombrage égal à 6% tant qu'au front qu'à l'arrière et qui seront pris en considération dans la simulation en faisant passant la du spectre solaire de 1 soleil (1 Sun) à 0,94 soleil [30].

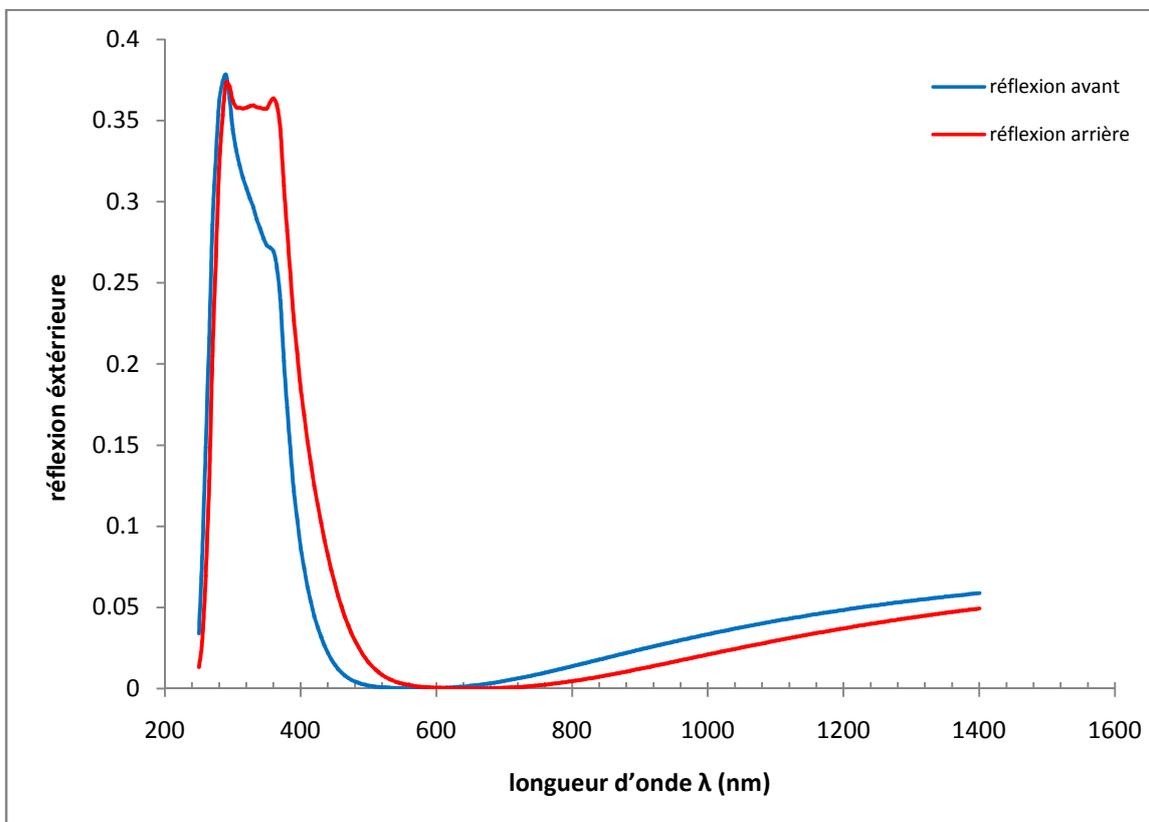


Figure III-7. La réflexion extérieure des deux faces avant et arrière de la cellule.

III.4 Les résultats de l'étude :

Dans cette étude, nous avons souhaité optimiser quelques paramètres de la cellule, à savoir les effets:

- ✓ De la température,
- ✓ De la résistivité du substrat,
- ✓ De la durée de vie du substrat,
- ✓ Des vitesses de recombinaison sur les surfaces avant et arrière,
- ✓ De l'épaisseur de la cellule.

La démarche qui a été suivie est de faire varier l'effet du paramètre souhaité sur les paramètres de la cellule (I_{cc} , V_{co} , FF et η) ainsi que sur ses caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ tout en gardant tous les autres paramètres à leurs valeurs initiales su tableau **III-1**.

A la fin, nous avons remplacé simultanément les valeurs optimisées de la température, de la résistivité du substrat, de la durée de vie du substrat, des vitesses de recombinaison sur les surfaces avant et arrière et de l'épaisseur de la cellule pour constater leur effet d'ensemble sur les paramètres de la cellule et sur ses caractéristiques.

III.4.1 Effet de la température :

En variant la température T entre $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, avec le pas de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ et nous obtiendrons les résultats de la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$

a) Effet de la température sur le rendement de la cellule :

La figure **III-8** montre le rendement de la cellule en fonction de la variation de température, nous observons une diminution de rendement des deux faces avant et arrière de la cellule pour SRV égale 0 et 5000cm/s, le rendement pour la vitesse de recombinaison en surface $SRV = 0\text{cm/s}$ est plus important que $SRV=5000\text{cm/s}$ et aussi la face avant de la cellule donne des bonne résultats que l'arrière pou chaque SRV.

c) Effet de la température sur la caractéristique P(V) de l'éclairement de la face avant :

La figure III-10 montre des caractéristiques P(V) calculées à différentes.

On observe une diminution de la puissance maximale avec l'augmentation de la température, en même temps on assiste à une diminution de la tension en circuit ouvert V_{CO} .

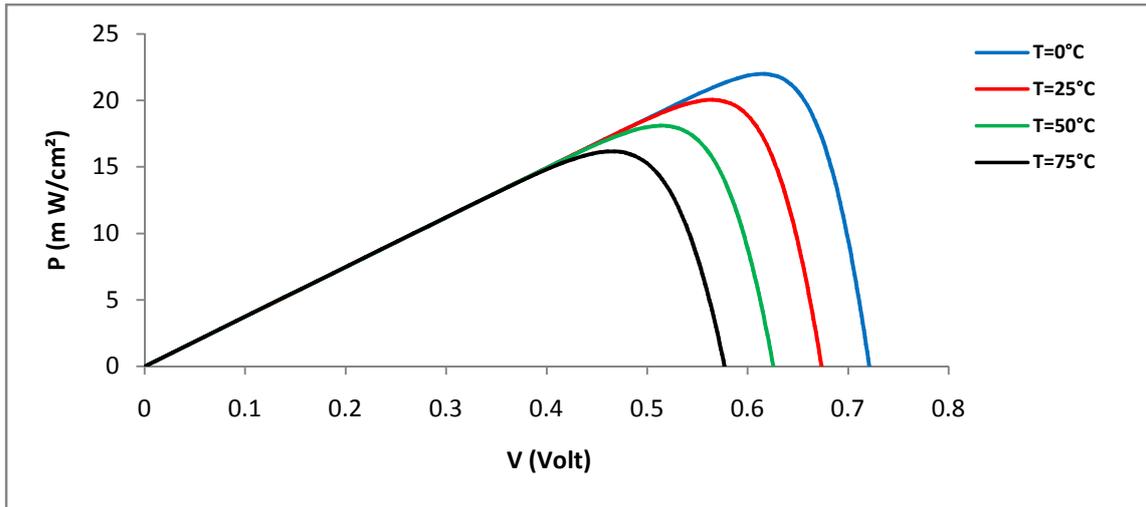


Figure III-10. Influence de la température sur la puissance de sortie.

III.4.2 Effet de la résistivité du substrat :

La figure III-11 montre la variation du rendement en fonction de la résistivité.

Pour l'avant: on observe que l'augmentation de la résistivité fait diminuer le rendement de la cellule pour deux SRV 0 et 5000 cm/s.

Mais pour l'arrière on observe une augmentation du rendement avec l'augmentation de la résistivité, mais pour SRV=0 cm/s le rendement reste constant quelque soit la résistivité.

Où il est clair que la valeur optimale de la résistivité est déterminée à 1 Ω .cm.

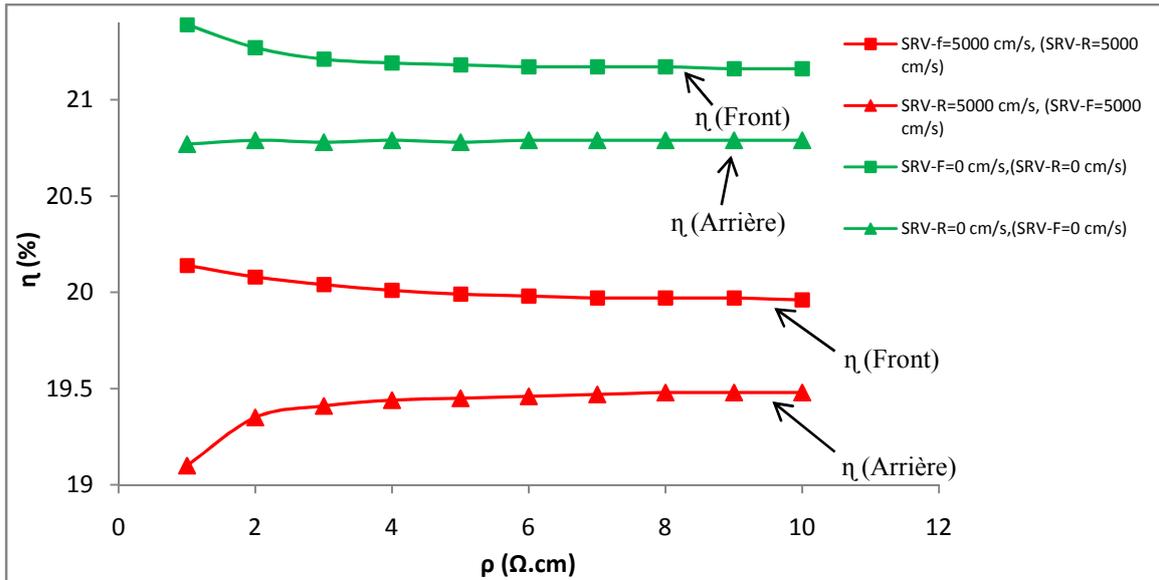
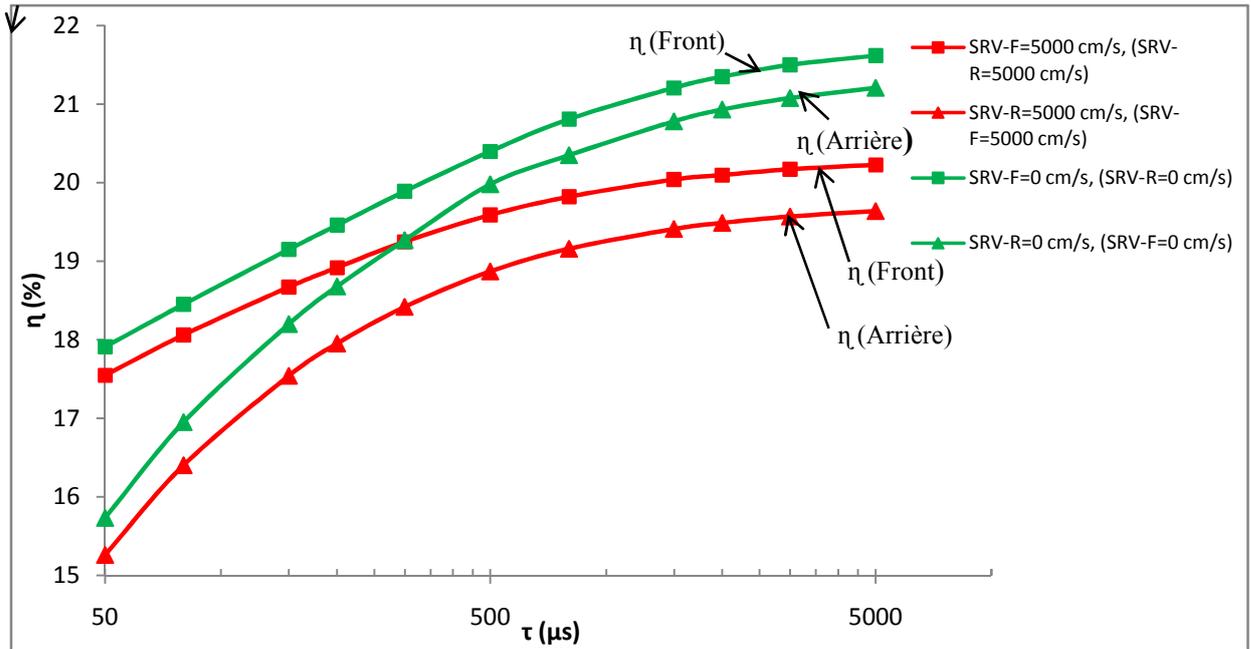


Figure III-11. La variation de rendement en fonction de la résistivité.

III.4.3 Effet de la durée de vie du substrat (bulk lifetime) :

La figure III-12 montre la variation de rendement en fonction de la durée de vie des porteurs τ dans le substrat qui varie de 50 à 5000 μs .

Nous observons une augmentation de rendement des deux faces avant et arrière de la cellule pour SRV égale 0 et 5000cm/s avec l'augmentation de la durée de vie, le rendement pour la vitesse de recombinaison en surface SRV = 0cm/s est plus important que SRV=5000cm/s et aussi la face avant de la cellule donne des bons résultats que l'arrière pour chaque SRV.



La figure III-12. La variation de rendement en fonction de la durée de vie du substrat.

III.4.4 Effet de la vitesse de recombinaison en surface (SRV) :

La figure III-13 ci-dessous illustre le rendement de la cellule en fonction de la vitesse de recombinaison en surface (SRV-F et SRV-R), on observe la diminution du rendement des faces avant et arrière avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison en surface (SRV).

Premièrement : nous fixons la vitesse de recombinaison en surface (SRV-R) de la face arrière à la valeur de 5000 cm/s, et on varie (SRV-F) de la face avant de 200 à 100000 cm/s. On observe une décroissance du rendement avec l'augmentation de (SRV-F).

Deuxièmement : nous fixons la vitesse de recombinaison en surface (SRV-F) de la face avant à la valeur 5000cm/s, et on varier (SRV-R) de la face arrière, on observe une décroissance du rendement avec l'augmentation de la (SRV-R).

La valeur optimale du rendement à été déterminé à 200 cm/s.

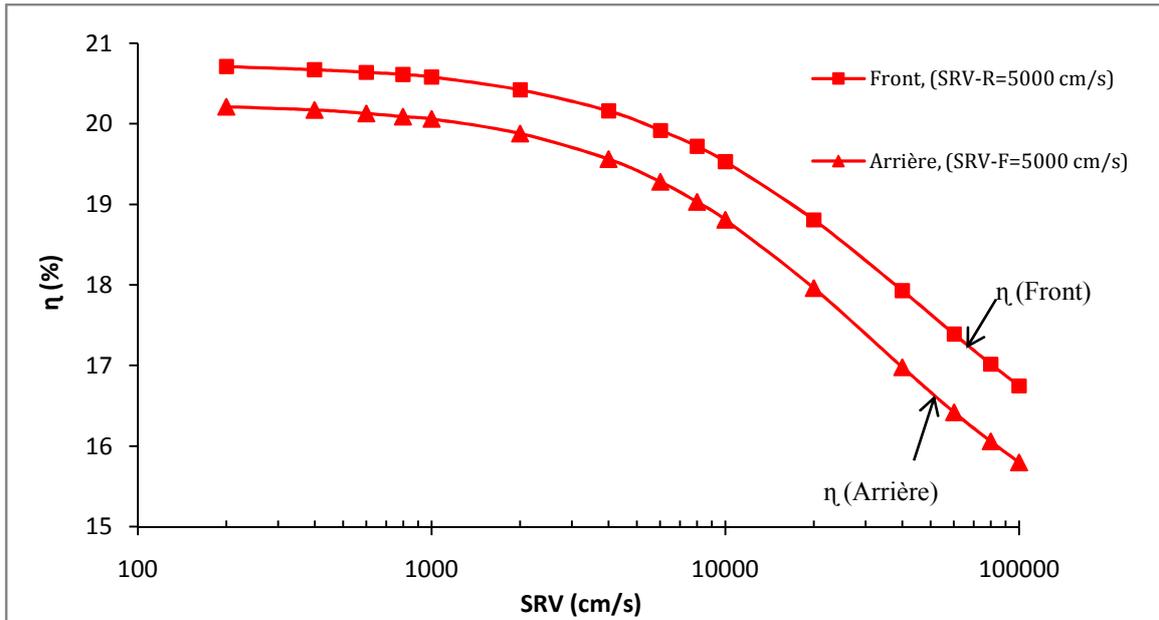


Figure III-13. Le rendement en fonction de la vitesse de recombinaison en surface SRV.

III.4.5 Effet de l'épaisseur de la cellule :

Nous avons étudié l'effet de l'épaisseur sur le rendement de la cellule pour deux vitesses de recombinaisons 0 et 5000 cm/s du front et l'arrière. On varie l'épaisseur de la base et tout en laissant les autres paramètres initiaux de la cellule du tableau III-1 de la cellule. La figure III-14 montre cet effet.

On observe une augmentation de rendement pour les faces avant et arrière pour les deux vitesses de recombinaisons (SRV) 0 et 5000cm/s avec l'augmentation de l'épaisseur, puis nous remarquons que une diminution de rendement à partir de l'épaisseur $x=150 \mu\text{m}$ pour (SRV-F et SRV-R) de 0cm/s et (SRV-R) égale 5000cm/s, sauf le rendement de (SRV-F) de 5000cm/s reste augmenté avec l'augmentation de l'épaisseur de la base.

Clairement, la valeur optimale de l'épaisseur déterminée à $150\mu\text{m}$.

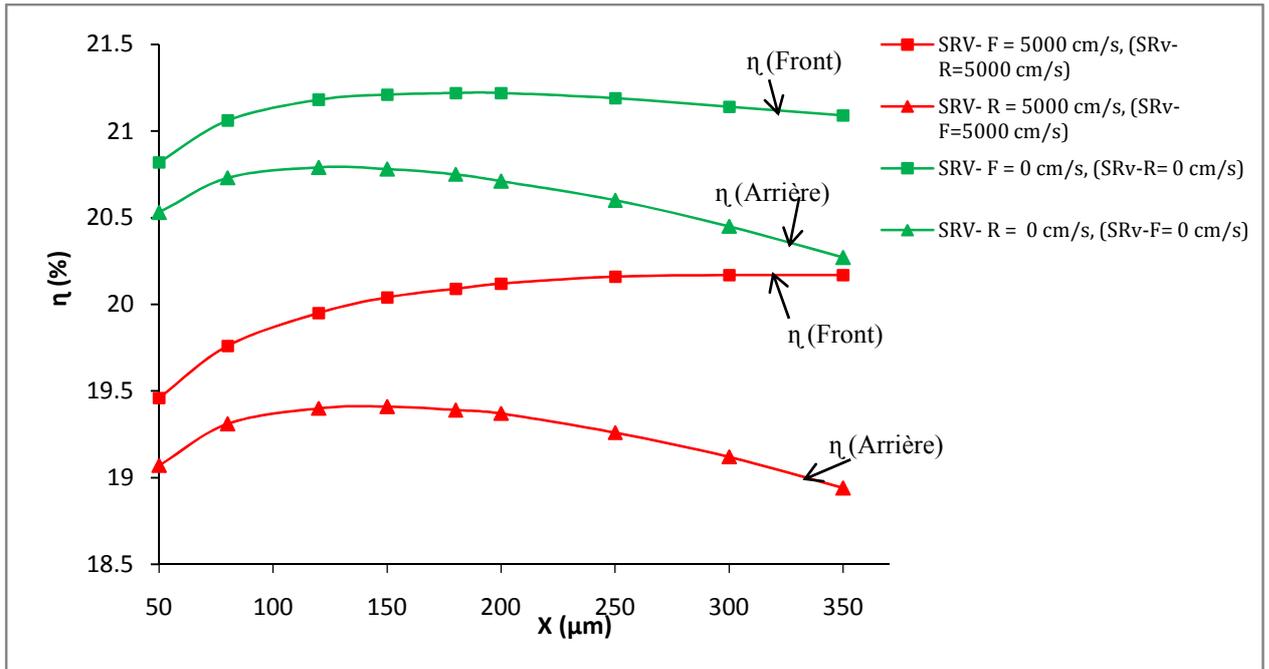


Figure III-14. Le rendement en fonction de l'épaisseur de la base de la cellule.

Nous avons également voulu étudier l'optimisation des résistances carrées de l'émetteur et du BSF mais faute de temps, nous n'avons pu les faire.

III.5 Les paramètres optimisés

Paramètres optimisés	Valeurs
Température	0°C (273,15°K)
Résistivité du substrat	1 Ω .cm
Durée de vie des porteurs dans la base	5000 μs
Vitesse de recombinaison en surface des porteurs SRV du front et arrière	200 cm/s
Epaisseur de la cellule	150 μm

Tableau III-2. Les paramètres optimisés pour notre étude.

A la fin, nous avons simulé la cellule n-PERT avec les paramètres optimisés et consignés dans le tableau ci-dessus.

Les paramètres obtenus ont été reportés sur le tableau **III-4** :

Chapitre III : Etude d'une cellule solaire n-PERT

Face	I_{CC} (mA/cm ²)	V_{CO} (mV)	FF (%)	η (%)
Front	37,97	748,2	81,54	23,17
Arrière	37,18	747,4	81,68	22,7

Tableau III-3. Les paramètres optimisés de la cellule.

On constate que la température joue un rôle plus important par rapport aux autres paramètres tels que : la résistivité, la durée de vie des porteurs dans la base, la vitesse de recombinaison en surface (SRV) du front et de l'arrière des porteurs et l'épaisseur de la cellule.

Il faut noter que ces résultats sont déterminés à la température de 0°C. Il faut s'attendre à une baisse des rendements pour la température ambiante de la cellule.

A cette température, ces résultats sont en accord avec la littérature qui se situe dans ces fourchettes (22-23 %) [15].

Conclusion générale :

Le but de cette étude est de déterminer les paramètres optimaux d'une cellule n-PERT que sont :

La température du dispositif, la résistivité du substrat, la durée de vie des porteurs dans le substrat, la vitesse de recombinaison en surface (SRV) du front et de l'arrière des porteurs et enfin l'épaisseur de la cellule.

Pour cela, nous avons commencé ce manuscrit de master par une introduction générale dans laquelle nous avons situé de manière générale le sujet.

Le premier chapitre de ce travail a concerné les notions de base de la cellule solaire et l'utilisation du Silicium dans le domaine photovoltaïque et le fonctionnement de la cellule à partir d'une jonction PN absorbant les photons du spectre solaire, convertissant l'énergie du photon en énergie électrique et collectant les particules générées, sous influence du spectre solaire AM1.5G.

Dans le deuxième chapitre, nous avons rappelé les différentes filières des cellules solaires au silicium cristallin : mono, multi, poly, micro cristallins. Nous avons également présenté dans cette seconde partie de ce chapitre, la cellule Al-BSF et la cellule PERC et enfin l'une de ses variantes, la cellule qui a été étudiée dans ce travail, à savoir la cellule n-PERT.

Dans le 3^{ème} et dernier chapitre, nous avons dans un premier temps présenté le logiciel de simulation PC1D-mod qui est l'outil de simulation que nous avons choisi pour étudier notre cellule n-PERT.

Nous avons ensuite présenté les modèles optiques très récents que sont indices de réfraction du Si, des Couches Anti Reflet SiN_x et de passivation (Al_2O_3 , SiO_2) ainsi que leurs coefficients d'absorption que nous avons utilisés dans notre étude.

Enfin, nous avons étudié l'effet des différents paramètres de la cellule et ses caractéristiques que sont son courant de court-circuit, sa tension de circuit ouvert, son facteur de forme et son rendement.

Nous sommes partis du choix de paramètres initiaux d'une cellule n-PERT prise de la littérature et nous avons optimisé quelques paramètres qui ont décrits ci-haut. Les résultats finaux ont donné : Une température optimale de 0°C, une résistivité de 1 Ω .cm, des durées des porteurs du substrat de 5000 μs , des vitesses de recombinaison de 0 cm/s pour les deux faces

Conclusion générale

avant et arrière mais prise égale à 200 cm/s pour approcher l'expérimental car il y a toujours présence des défauts structurels en surface, enfin l'épaisseur de la cellule à 150 μm .

Ces valeurs ont donné :

- pour la face avant : Un courant de court-circuit de 37,97 mA/cm², une tension de 748.2 mV, un facteur de forme de 81,54 % et un rendement de 23,17 %.
- Pour la face arrière : Un courant de court-circuit de 37,18 mA/cm², une tension de 747.4 mV, un facteur de forme de 81,68 % et un rendement de 22,70 %.

Il faut noter que ces résultats sont déterminés à la température de 0°C. Il faut s'attendre à une baisse des rendements pour la température ambiante de la cellule.

A cette température, ces résultats sont en accord avec la littérature qui se situe dans ces fourchettes (22-23 %).

Enfin, nous estimons que ce travail ferait l'objet à l'avenir d'une poursuite de cette étude afin d'explorer au maximum les possibilités de la cellule.

Références :

- [1] A. Maoucha, « *Etude et identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque organique* », Université de Batna Algérie, mémoire de magister, soutenu en 2011.
- [2] H. Hasni , « *Caractérisation Automatisée d'une cellule solaire* », Université Med Khider Biskra (Algérie), mémoire de master, soutenu en 2014.
- [3] J. C. Muller, « *photovoltaïque* », <http://www.universalis.fr/encyclopedie/photovoltaique>, (consulté le 01/05/ 2019).
- [4] M. Rahmouni, « *Etude des cellules photovoltaïque 'HIT' en vue d'améliorer leur rendement* », Université des sciences et technologie Mohamed Boudiaf Oran (Algérie), thèse de doctorat, soutenue en 2010.
- [5] Site web : <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.20190411.pdf>, (consulté le 14/04/2019).
- [6] F. Ghaleb, K. E . Bendjbar et S. Haouari, « *Lumière et Cellule Solaire* », Université des sciences et technologie Mohamed Boudiaf, Oran (Algérie), mémoire de licence, soutenu en 2015.
- [7] K.Helali, « *Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque* », Université mouloud Mammeri de Tizi-ouzou (Algérie), mémoire de magister, soutenu le 25/06/2012.
- [8] S. M. Sze & M. K. Lee, « *Semiconductor Devices Physics and Technology* », 3rd edition J Wiley & S, Inc, 2010.
- [9] A. Bouguerra, « *Contribution à l'étude de l'implantation des ions de carbone dans le silicium* », Université des frères Mentouri Constantine 1 (Algérie), thèse de doctorat, Soutenue le 17/11/2016.
- [10] F. Bernard, « *Méthodes d'élaboration de cristaux massifs pour l'optique* », <http://sfo.edpsciences.org>, (consulté le 12/06/2019).
- [11] Help PC1D-mod, <https://www2.pvlighthouse.com.au/resources/PC1D/PC1Dmod6/PC1Dmod206-2%20help.pdf>, (consulté le 09/06/2019).
- [12] H. Mathieu & Hervé Fanet, « *Physique des semiconducteurs et des composants électroniques, Cours et exercices* », 6ème édition, Dunod, 2009.
- [13] A. Adaine, « *Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN* », Université de Lorraine et Centrale Supélec (France), thèse de doctorat, soutenu le 06/07/2018.
- [14] A. Ricaud, « *Convertisseurs photovoltaïques* », http://www.cythelia.fr/images/file/Convertisseurs_20photovoltaïques_Alain_20Ricaud_Nov-07.pdf, (consulté le 10/02/2019).

- [15] R. Doumane, « *Modélisation du vieillissement d'une cellule photovoltaïque au silicium et de ses matériaux d'encapsulation* », Université M'hamed Bougara, Boumerdes (Algérie), thèse de doctorat, soutenue en 2018.
- [16] H. Berrezzoug, « *Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque* », Université Dr Moulay Tahar de Saida (Algérie), mémoire de master, Soutenu le 09/06/2016.
- [17] P. A. Basore, « *Defining Terms for Crystalline Silicon Solar Cells* », progress in photovoltaics: research and applications, vol 2, 177-179 (1994).
- [18] A. Mouhoub, « *Procédés Technologiques Alternatifs de Réalisation des Photopiles Solaires au Silicium Cristallin* ». Rev. Energ. Ren. Vol 4, 11-22(2001).
- [19] J. Chen, « *Recent Developments on Silicon Based Solar Cell Technologies and their Industrial Applications* », P.R. China, 272-292,(2015).
- [20] J. Jones, « *Passivated emitter rear contact solar cells are at 20% efficiency today—but price premiums are steep* », <https://www.greentechmedia.com/articles/read/perc-solar-cell-technology-gaining-ground-in-2014>, (consulté le (25/05/2019)).
- [21] M. Belarbi, A. Benyoucef, B. Benyoucef, « *simulation of the solar cells with pc1d, application to cells based on silicon* », University of Abou Bekr Belkaid, Tlemcen (Algérie), soutenu 03/07/2014.
- [22] S. Ghenou & M. N. Tandjaoui « *Etude et simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de silicium polycristallin* », 5ème Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER– 2017) Proceeding of Engineering and Technology –PET Vol.31 pp.7 - 12.
- [23] Haug, B. R. Olaisen, Ø. Nordseth & E. S. Marstein, « *A graphical user interface for multivariable analysis of silicon solar cells using scripted PC1D simulations* », Energy Procedia, V 38, pp. 72–79, 2013.
- [24] H. Haug and J. Greulich, « *PC1Dmod 6.2 – Improved simulation of c-Si devices with updates on device physics and user interface* », Energy Procedia, V 92, pp. 60–68, (2016).
- [25] H. Halvard, G. Johannes, « *Improved simulation of c-Si devices with updates on device physics and user interface* », Institute for Energy Technology (IFE), Instituttveien 18, 2007 Kjeller, Norway, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE), Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Germany.
- [26] Martin A. Green, « *Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300 K including temperature coefficients* », Solar Energy Materials and Solar Cells 92 (11), pp.1305-1310, (2008).
- [27] Malte Ruben Vogt, « *Development of physical models for the simulation of optical properties of solar cell modules* », PhD Thesis, Technische Informationsbibliothek (TIB), pp.21-42, (2015).

[28] Pradeep Kumar, Monika K. Wiedmann, Charles H. Winter and Ivan Avrutsky, « *Optical properties of Al₂O₃ thin films grown by atomic layer deposition* », *Applied Optics* , Vol 48(28), pp.5407-5412, (2009).

[29] E. Palik, « *Handbook of Optical Constants of Solids* » Vol I , pp.759-0, (1985).

[30] K.Cabanas-Holmen and P. A. Basore, « *Comparison of 1d and 2d model results for selective emitter and interdigitated back contact cells* », Presented at the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Frankfurt, (allemand), 25/09/2012.