

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



Mémoire

Présenté à

L'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem
Faculté des Sciences Exactes et Informatique
Département de Physique

Pour obtenir le Diplôme de
Magister en Physique

Option : Conversions Photovoltaïques.

Par

BENYETTOU Fethi

Sujet

**Etude et Modélisation d'une cellule photovoltaïque au
silicium polycristallin à l'aide de PSpice**

Soutenu le 01 /07 /2013

Devant le jury composé de

Dr. TERKI HASSAÏNE Mounir	MCA, Université de Mostaganem	Président
Pr BASSOU Ghaouti	Professeur, Université de Sidi Bel Abbès	Examineur
Pr. HADRI Baghdad	Professeur, Université de Mostaganem	Examineur
Dr .AHMADOUCHE Abdelkader	MCA, Université de Mostaganem	Examineur
Dr. BEGHADAD Mohammed	M.C.A, Université de Mostaganem	Encadreur

Remerciements

Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Je tiens à adresser mon sincère remerciement à mon encadreur :

Monsieur **BEGHDAD Mohammed**, Maitre de conférences à l'université de Mostaganem pour avoir accepté de m'encadrer ainsi que pour son aide, son suivi et ses conseils éclaircissants le long de cette étude.

Je tiens également à exprimer ma respectueuse gratitude à **Monsieur SEMMACHE Bachir**, ingénieur de recherche dans la société de fabrication des cellules solaires **Irysolar** de Montpellier (France) pour d'avoir mis à ma disposition les outils nécessaires pour l'étude.

J'exprime mes sincères remerciements à monsieur **TERKI HASSAÏNE Mounir**, Maitre de conférence à l'université de Mostaganem d'avoir accepté de présider le Jury de cette thèse.

Mes vifs remerciements vont aussi à Monsieur **BASSOU Ghaouti**, Professeur à l'université de Sidi Bel Abbés, et monsieur **HADRI Baghdad**, Professeur à l'université de Mostaganem et **AHMADOUCHE Abdelkader**, Maitre de conférences à l'université de Mostaganem d'avoir accepter de faire partie du Jury.

Enfin, j'adresse mes vives salutations à mes enseignants de magister, mes amis les étudiants de magister, et à tous ceux qui m'aidés de loin et de près sans exception.

www.oxpdf.com

Symboles et Désignations

<u><i>Symboles</i></u>	<u><i>Désignations</i></u>	<u><i>Unité</i></u>
C_{t-s}	La correction de la distance entre la terre et le soleil	%
I	La constante solaire corrigée	W
λ	La longueur d'onde de la lumière incidente	μm
I_{λ}	L'irradiance solaire spectrale	$\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}$
β	Coefficient de diffusion de Rayleigh	%
n	Indice de réfraction	%
δ	Déclinaison de soleil	°
w	Angle horaire du soleil	°
a	Azimut du soleil	°
h	Hauteur de soleil	°
N_D	Densité des atomes donneurs	Atome/ cm^3
N_A	Densité des atomes accepteurs	Atome/ cm^3
n_0	Densité des électrons à l'équilibre thermodynamique	Atome/ cm^3
p_0	Densité des trous à l'équilibre thermodynamique	Atome/ cm^3
n	Densité des électrons hors équilibre	Atome/ cm^3
p	Densité des trous hors équilibre	Atome/ cm^3
D_n	Coefficient de diffusion des électrons	cm^2/s
D_p	Coefficient de diffusion des trous	cm^2/s
τ_n	Durée de vie des électrons	s
τ_p	Durée de vie des trous	s
L_p	Longueur de diffusion des trous	μm
L_n	Longueur de diffusion des électrons	μm
α	Coefficient d'absorption	cm^{-1}
\hat{G}	Taux de génération optique	$\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
k	Coefficient d'extinction	%
R	Coefficient de réflexion	%
Φ_0	Flux de photons incidents	Photon/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}$
S_n	Vitesse de recombinaison des électrons	cm/s
S_p	Vitesse de recombinaison des trous	cm/s
I_{obs}	Courant d'obscurité	A
I_{ph}	Photo-courant	A
J_e	Densité de photo-courant de l'émetteur	A/cm^2
J_b	Densité de photo-courant de la base	A/cm^2
J_{ZCE}	Densité de photo-courant de la ZCE	A/cm^2
x_j	Profondeur de jonction	μm
W	Largeur de la ZCE	μm
H'	Largeur de la base	μm
H	Epaisseur de la cellule photovoltaïque	μm
n_i	Concentration intrinsèque	atome/ cm^3
I_0	Courant de saturation de la diode	A
A	Surface de la cellule photovoltaïque	cm^2
R_s	La résistance série	Ω
R_p	La résistance de shunt	Ω

n_1	Facteur d'idéalité de la diode 1	
n_2	Facteur d'idéalité de la diode 2	
I_{cc}	Le courant de court-circuit	A
V_{oc}	La tension de circuit-ouvert	V
FF	Facteur de forme	%
FF ₀	Facteur de forme à résistance série nulle	%
η	Rendement d'une cellule solaire	%
P_{max}	Puissance maximale délivrée par une cellule	W
I_{max}	Le courant maximal	A
V_{max}	La tension maximale	V
V_T	Le potentiel thermodynamique	V
G	L'irradiance totale	W/m ²
IQE	Rendement quantique interne	%
EQE	Rendement quantique externe	%
ISR	Réponse spectrale interne	%
ESR	Réponse spectrale externe	%
E	Champ électrique	V/cm
μ	Mobilité des porteurs	cm ² /V.s
E_{ph}	Energie de photons incidents	eV
N_i	Concentration des atomes donneurs ou accepteurs	atome/cm ³
τ_{max}, τ_{min}	Les valeurs maximale et minimale de la durée de vie des porteurs	s
r_s	La valeur normalisée de la résistance série	
N_{ref}	Niveau de référence du dopage pour lequel	atome/cm ³

$$\tau(N_{ref}) = \frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2}$$

WWW.ORGANON.COM

Introduction Générale	1
Chapitre I : Rappels sur le gisement solaire et l'enseillement	
I-1. Introduction	3
I-2. Le gisement solaire	3
I-2-1. Généralités sur le soleil.....	3
I-2-2. La constante solaire	4
I-3. Le rayonnement au sol	5
I-3-1. Le nombre d' Air-Masse.....	5
I-3-2. Absorptions Atmosphériques.....	6
I-3-3. Diffusions par l'atmosphère.....	7
I-4. Le rayonnement solaire	10
I-4-1. Estimation du rayonnement solaire instantané sur une surface horizontale.....	11
I-4-2. Estimation du rayonnement solaire instantané reçu par une surface inclinée.....	13
I-4-3. Albédo.....	14
I-5. Position de soleil	15
I-5-1. Coordonnées équatoriales.....	15
I-5-1-1. Déclinaison du soleil.....	15
I-5-1-2. Angle horaire.....	16
I-5-2. Les coordonnées horizontales.....	17
I-5-2-1. Azimut a	17
I-5-2-2. Hauteur du soleil h.....	17
I-6. Angle d'incidence des rayonnements solaires	18
I-7. Angle d'inclinaison et l'orientation optimale	19
I-8. Rayonnement solaire en Algérie	20
I-9. Conclusion	20
Bibliographie du chapitre I	20

Chapitre II : La physique de la cellule photovoltaïque

II-1. Introduction	22
II-2. Historique du Photovoltaïque	22
II-3. L'effet Photovoltaïque	23
II-3-1. Jonction PN	23
II-3-1-1. Semi-conducteur Intrinsèque.....	23
II-3-1-2. Semi-conducteurs Extrinsèque.....	24
II-3-2. Interaction rayonnement-matière.....	28
II-3-3. Zone utile du spectre solaire.....	29
II-3-4. Pénétration du rayonnement solaire dans le semiconducteur.....	30
II-3-4-1. Réflexion sur la surface.....	30
II-3-5. Absorption du rayonnement solaire dans les semi-conducteurs	34
II-3-5-1. Les transitions directes et indirectes	36
II-4. Recombinaison de porteurs en excès	37
II-4-1. Mécanismes de recombinaison.....	37
II-4-1-1. Recombinaison SRH.....	37
II-4-1-2. Recombinaison Auger.....	37
II-4-1-3. Recombinaison radiative.....	38
II-5. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque à base de Silicium	38
II-6. Le calcul de photo-courant	40
II-6-1. Le photo-courant du front (émetteur).....	40
II-6-2. Le photo-courant de la base.....	42
II-6-3. Le photo-courant de la zone de charge espace (courant de génération).....	44
II-6-4. Le photo-courant total.....	44
II-7. Le courant d'obscurité	44
II-8. Le modèle électrique d'une cellule photovoltaïque	45
II-8-1. Le schéma équivalent idéal d'une cellule photovoltaïque	45
II-8-2. Le schéma équivalent réel d'une cellule photovoltaïque.....	46

II-8-3. La caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque et ses paramètres caractéristiques.....	47
II-9. Les différentes filières photovoltaïques.....	50
II-9-1. La filière Silicium.....	50
II-9-1-1. Les états du silicium.....	51
II-9-2. Les filières hors Silicium : CIGS et CdTe.....	56
II-9-3. Les cellules multi-jonctions à haut rendement	57
II-10. Influence des pertes physiques et technologiques sur le rendement de la cellule.....	58
II-10-1. Les pertes physiques	58
II-10-2. Les pertes technologiques.....	59
II-11. Le rendement quantique et la réponse spectrale.....	60
II-12. Influence d'un champ électrique supplémentaire.....	61
II-13. Les photopiles à champ électrique arrière.....	63
II-14. Conclusion.....	63
Bibliothèque du Chapitre II.....	64

Chapitre III : Le logiciel PSpice

III-1. Introduction.....	67
III-2. Pourquoi simuler une cellule photovoltaïque?.....	67
III-3. Présentation du logiciel PSpice.....	68
III-4. Les composantes de PSpice	69
III-5. Piecewise Linear Source (PWL) de PSpice.....	72
III-6. Modèle PSpice du spectre solaire Air-Mass 1.5 Global (AM1.5G).....	72
III-7. Modèle PSpice du spectre solaire Air-Masse Hors-Atmosphère AM0.....	73
III-8. Conclusion.....	74
Bibliographie du chapitre III.....	74

Chapitre IV : Simulation par PSpice d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin

IV-1. Introduction	76
IV-2. La cellule photovoltaïque simulée	76
IV-2-1. Les paramètres de la simulation.....	76
IV-3. Le modèle PSpice de la densité du courant de court-circuit J_{cc}	84
IV-4. Le rendement quantique de la cellule solaire simulée	85
IV-5. La réponse spectrale de la cellule solaire simulée	87
IV-6. Le modèle PSpice de la cellule solaire	89
IV-7. L'influence de l'épaisseur de l'émetteur	91
IV-8. L'influence de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la base	93
IV-9. L'influence de l'épaisseur de la cellule solaire	94
IV-10. L'influence de la vitesse de recombinaison en surface de la base et l'émetteur de la cellule solaire	95
IV-11. L'influence de la résistance série	97
IV-12. L'influence de la résistance shunt	100
IV-13. Influence de la température sur la performance de la cellule solaire	101
IV-14. Conclusion	104
Bibliographie du chapitre IV	104
Conclusion générale	106

www.oxpdf.com

www.oxpdf.com

www.oxpdf.com

Introduction

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

La plus forte croissance parmi les énergies renouvelables, 30% en moyenne par an sur les dix dernières années, est le fait de l'énergie solaire photovoltaïque. La conversion directe du rayonnement solaire en électricité est son principal avantage. Le principal inconvénient de cette source d'énergie est son coût. Actuellement, cette industrie est donc soutenue par des politiques nationales comme en Allemagne, en Chine, au Japon et aux USA qui permettent à ces pays de réduire leur dépendance énergétique et de respecter plus ou moins leurs engagements concernant les émissions de gaz à effet de serre.

Le matériau principal des cellules photovoltaïques est le silicium. Il est abondant dans la nature, combiné à l'oxygène sous forme d'oxydes (silice, silicates). La réduction de la silice (minerais de quartz) par le carbone (bois, charbon, houille, pétrole) produit un silicium bon marché (22 \$/kg à la fin de 2012 [1]) mais de faible pureté (99%).

La conversion photovoltaïque utilise le principe de la conversion directe de l'énergie lumineuse en une énergie électrique, les cellules solaires sont capables d'effectuer cette transformation. La première cellule solaire à homojonction en silicium a été fabriquée en 1954 dans les laboratoires BELL (USA) avec un rendement voisin de 6%. En 1960, ce rendement a été porté à une valeur supérieure à 10% pour les cellules solaires à base de silicium monocristallin. De nombreux travaux de recherche sur l'amélioration du rendement de conversion ont alors été publiés. Jusqu'à 1972, les applications des cellules solaires étaient réservées au seul usage spatial à cause de leurs prix de revient très élevé et leurs faibles rendements terrestres.

Cependant, il est à noter que l'augmentation du rendement a été considérée plus déterminante que la réduction du coût, car toute amélioration des performances et l'optimisation des paramètres, se répercutent directement en pourcentage sur le prix de l'énergie produite. Dans ce cas, l'objectif essentiel est l'accroissement du rendement. Ceci explique et justifie les recherches concernant l'étude des programmes numériques de conception, de modélisation et de simulation. Dans cet objectif, ce travail est abordé selon les chapitres suivants :

Dans le premier chapitre, nous donnerons quelques rappels sur le rayonnement solaire car le développement, l'optimisation et la caractérisation des cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée qu'est le soleil.

Le deuxième chapitre est consacré à la physique de la cellule photovoltaïque à base de silicium cristallin par l'étude de la jonction PN et l'interaction du rayonnement/semi-conducteur. Ensuite, nous présentons le principe de fonctionnement et les modèles électriques idéal et réel d'une cellule solaire. Ainsi, nous décrirons les caractéristiques électriques principales d'une cellule photovoltaïque et les pertes physiques et technologiques qui limitent le rendement de la photopile. Pour finir, on étudie l'influence d'un champ électrique supplémentaire en avant et en arrière de la cellule sur les performances.

Dans le troisième chapitre, nous présentons le logiciel PSpice, utilisé dans ce travail en simulation numérique de la cellule étudiée dans lequel nous donnerons deux exemples de simulation des spectres solaires AM1,5G et AM0 qui sont transformés en tensions extérieures et qui seront par la suite appliquées à un circuit électrique que constitue la cellule solaire.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous abordons la simulation PSpice par la présentation en premier temps de la cellule simulée, qui est une cellule solaire polycristalline au silicium fabriquée par l'entreprise Irysolar de Montpellier (France). Les résultats ainsi obtenus sont commentés et comparés avec les résultats expérimentaux qui nous ont été fournis par le fabricant. La maîtrise du logiciel PSpice et des techniques de simulation, nous permettra d'étudier l'influence de n'importe quel paramètre de la cellule solaire sur ses performances ; comme l'épaisseur de l'émetteur de la cellule solaire x_j , la longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la base de la cellule solaire L_n , la vitesse de recombinaison de l'émetteur S_e , la vitesse de recombinaison de la base S_b , l'épaisseur de la cellule solaire H , la résistance série R_s , la résistance shunt R_{sh} , et finalement l'effet de la température.

Bibliographie de l'introduction :

[1] : http://www.electroniques.biz/mobile/article.php?id_article=417190&rub=actus (consulté le 15/05/2013).

Chapitre I :
Rappel sur le gisement solaire
Et l'ensoleillement

www.oxpot.com

I-1. Introduction :

L'étude du rayonnement solaire est le point de départ de tout investissement dans le domaine de l'énergie solaire. Pour évaluer les performances des cellules photovoltaïques, il est nécessaire de connaître quelques notions sur l'ensoleillement et les données climatiques de site où les panneaux photovoltaïques sont installés. Pour cette raison, nous avons jugé nécessaire de présenter dans ce chapitre les rappels sur le rayonnement solaire.

Le rayonnement solaire est considéré comme la ressource énergétique la plus abondante et la mieux répartie sur notre planète. La quantité d'énergie solaire reçue au niveau de la terre toutes les heures (environ $4,38 \cdot 10^{20}$ joules), pourrait couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant une année (environ $4,417 \cdot 10^{20}$ joules en 2006), si l'on sait bien exploiter cette énergie [1].

I-2. Le gisement solaire :

I-2-1. Généralités sur le soleil :

Le soleil est une sphère gazeuse extrêmement chaude. Son diamètre est de $1,39 \cdot 10^9$ m et a une distance moyenne de $1,5 \cdot 10^{11}$ m de la terre (=1 unité astronomique (1UA)). Vu de la terre, le soleil tourne autour de son axe une fois toutes les quatre semaines, cependant une rotation est faite en 27 jours à l'équateur et en 30 aux régions polaires. Le soleil est considéré comme un corps noir avec une température effective de 5777 °K. La température des régions intérieures centrales est de l'ordre de $8 \cdot 10^6$ à $40 \cdot 10^6$ °K et sa densité est estimée à 100 fois celle de l'eau.

Le soleil est en effet, un réacteur de fusion continu avec ses constituants sous forme gazeuse retenus par des forces gravitationnelles. Plusieurs réactions de fusion sont déclenchées pour intensifier l'énergie rayonnée par le soleil. Le processus le plus important est la transformation de l'hydrogène en hélium par une réaction thermonucléaire.

Cependant, comme la masse du noyau de l'hélium est moins lourde que celle de quatre protons d'hydrogène, la masse perdue dans la réaction thermonucléaire est convertie en énergie.

L'énergie produite à l'intérieur de la sphère solaire à une température de l'ordre de plusieurs millions de degrés est transférée à la surface extérieure puis transférée par rayonnement dans l'espace. Les processus radiatifs et convectifs sont le résultat des états

successifs d'émission, d'absorption et de radiation; la gamme du spectre du rayonnement dans le noyau du soleil est comprise entre la longueur d'onde des rayons X et celle des rayons gamma, avec une longueur d'onde de radiation qui augmente suivant la diminution de la température à des grandes distances.

I-2-2. La constante solaire :

Le soleil libère de façon continue une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, environ $4,5 \cdot 10^{26} J$ chaque seconde [2]. La terre intercepte une toute petite portion de cette énergie rayonnée dans l'espace. On appelle le flux énergétique total reçue par une surface d'unité située au bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne terre-soleil de 150 millions de kilomètres), la constante solaire, elle est égale à $1367 W/m^2$ [3].

La constante solaire est variable autour de l'année puisque la distance terre-soleil est elle-même variable. La correction de la distance terre-soleil est sans unité, elle est donnée par la relation suivante [7] :

$$C_{t-s} = 1 + 0,034 \cdot \cos\left(\frac{360}{365} \cdot (J - 2)\right) \quad (I-1)$$

Avec :

J : Le nombre de jour de l'année.

La constante solaire corrigée est donc :

$$I = I_0 \cdot C_{t-s} \quad (W/m^2) \quad (I-2)$$

Avec :

I : La constante solaire corrigée.

I_0 : La valeur moyenne de la constante solaire ($I_0 = 1367 W/m^2$).

I-3. Le rayonnement au sol :

La partie de rayonnement reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser.

Puisque ce travail s'intéresse à la photopile à usage terrestre, il est nécessaire de connaître le spectre de rayonnement reçu au sol. Le spectre énergétique de rayonnement solaire est modifié par l'atmosphère à travers trois mécanismes principaux :

- L'absorption par différents gaz.
- La diffusion moléculaire de Rayleigh.
- La diffusion par les aérosols, la poussière et les nuages.

I-3-1. Le nombre d'Air-Masse :

Pour tenir compte de la position relative du soleil qui modifie l'épaisseur d'atmosphère traversée, on induit le nombre d'Air-Masse définie par :

$$m = \frac{p_m}{1013} \cdot \frac{1}{\sin(A)} \cdot \exp\left(\frac{Z}{7,8}\right) \quad (I-3)$$

Avec :

A : Élévation de soleil sur l'horizon (90° au zénith) (voir Figure (I-1)).

$Z(Km)$: Altitude de lieu.

$p_m(mbar)$: La pression atmosphérique au niveau de la mer.

Dans les conditions normales (épaisseur verticale de l'atmosphère réduite à 7,8 km) et au niveau de la mer ($p_m = 1013 mbar$), l'expression simplifiée suivante est utilisée :

$$m = \frac{1}{\sin(A)} \quad (I-4)$$

Exemple :

- Si le Soleil est au zénith, et au niveau de la mer : $m=1$, on dit qu'on a le spectre solaire AM1 car les rayons solaires traversent une épaisseur d'atmosphère d'unité (7,8 km).

- Si le Soleil est à 42° sur l'horizon : $m=1,5$, on dit qu'on a le spectre solaire $AM1,5$ car les rayons traversent une épaisseur atmosphérique plus grande que le premier.
- En hors atmosphère, plus haute altitude : $m=0$. On dit qu'on a les conditions $AM0$.

Les conditions standards de qualification des panneaux photovoltaïques sont :

- Spectre solaire : $AM1,5G$
- Irradiance total de 1000 W/m^2 et température à 25°C .

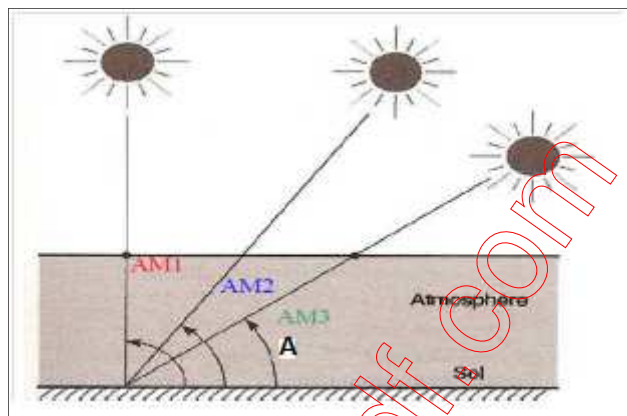


Figure I-1 : Schéma représentant les différents Air-Masse pour quelques angles d'élevation (A) du soleil.

I-3-2. Absorption Atmosphérique :

Les gaz de l'atmosphère qui sont principalement le gaz carbonique, l'ozone et la vapeur d'eau ont des raies ou des bandes d'absorptions dans le spectre solaire, de ce fait, ils absorbent des radiations, donc de l'énergie.

Le tableau suivant donne en valeurs relatives les principales bandes d'absorption de l'atmosphère au niveau du sol pour une hauteur d'eau condensable (de 2cm). Il montre clairement que la partie visible du spectre solaire incident est peu affectée par l'absorption.

$\lambda(\mu m)$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,4	1,6	1,9	2,6
O ₃	1	0,5	0,4	0,3	0,1	0,1								
O ₂						0,2	0,2							
CO ₂												0,15	0,35	1
H ₂ O						0,2	0,2	0,5	0,6		1			1

Tableau I-1 : Valeurs relatives des principales bandes d'absorption de l'atmosphère au niveau de sol (hauteur d'eau condensable 2cm) [4].

L'ozone absorbe l'Ultra-Violet (UV) moyen (sur une large bande de 0,2 à 0,7 μm).

L'oxygène a deux bandes étroites de faible atténuation dans le visible. La vapeur d'eau a sept bandes d'absorption dont trois fortes dans l'infrarouge moyen. Tandis que le gaz carbonique absorbe suivant trois raies étroites dans l'Infrarouge au-delà de 1,5 μm voir la Figure (I-2).

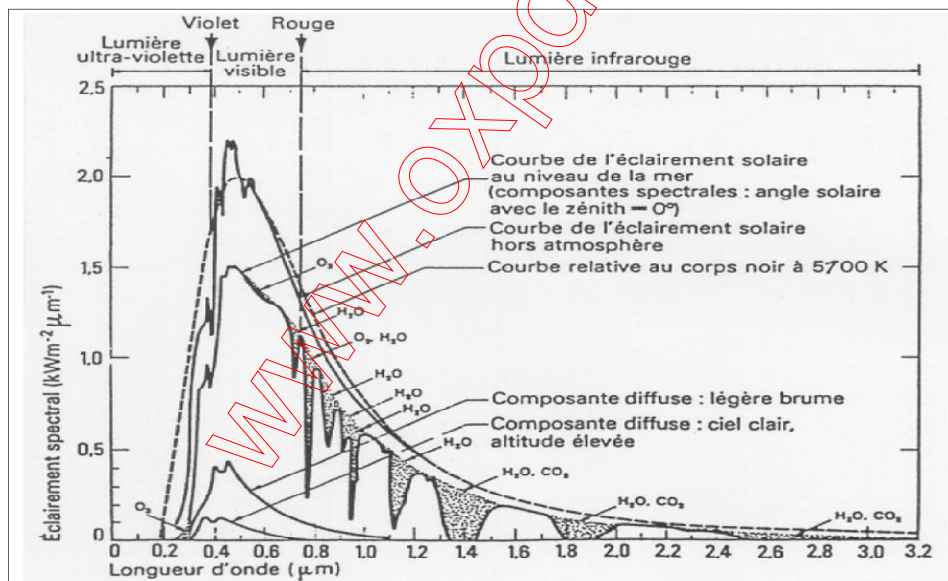


Figure I-2 : Absorption atmosphérique dans les spectres solaires AM0 et AM1 [8].

I-3-3. Diffusions par l'atmosphère :

La diffusion de la lumière est une redistribution spatiale du rayonnement par des particules matérielles. L'indice de réfraction des particules diffusantes et leur dimension par rapport à la longueur d'onde sont les principales causes qui modifient la répartition spectrale et l'intensité lumineuse comme montre la Figure I-2.

- Les molécules d'air dont la taille est inférieure à la longueur d'onde sont responsables de la diffusion dit de Rayleigh où le coefficient de diffusion β peut s'écrire :

$$\beta = \frac{32\pi^3}{3N} \cdot \frac{(n-1)^2}{\lambda^4} \quad (I-5)$$

N : Nombre de molécules par unité de volume.

n : Indice de réfraction des molécules d'air.

- Les aérosols ont en général des dimensions semblables aux longueurs d'ondes de la lumière. Ils peuvent être des poussières, des cendres, des microcristaux, des microgouttelettes, des fumées de pollution industrielle.... La variation spectrale de la densité optique reste liée aux longueurs d'onde suivant une loi du type :

$$\beta = \beta_a \cdot \lambda^{-p} \quad (I-6)$$

β_a : Coefficient de trouble d'Angström, varie entre 0,02 pour un ciel bleu, 0,10 pour un ciel moyen, 0,20 pour les zones urbains pollués et 0,8 pour un ciel laiteux.

- Les nuages sont constitués de gouttelettes d'eau dont la taille est nettement supérieure à la longueur d'onde. La diffusion est donc neutre et provient de l'ensemble des phénomènes de réflexion, réfraction et diffraction.

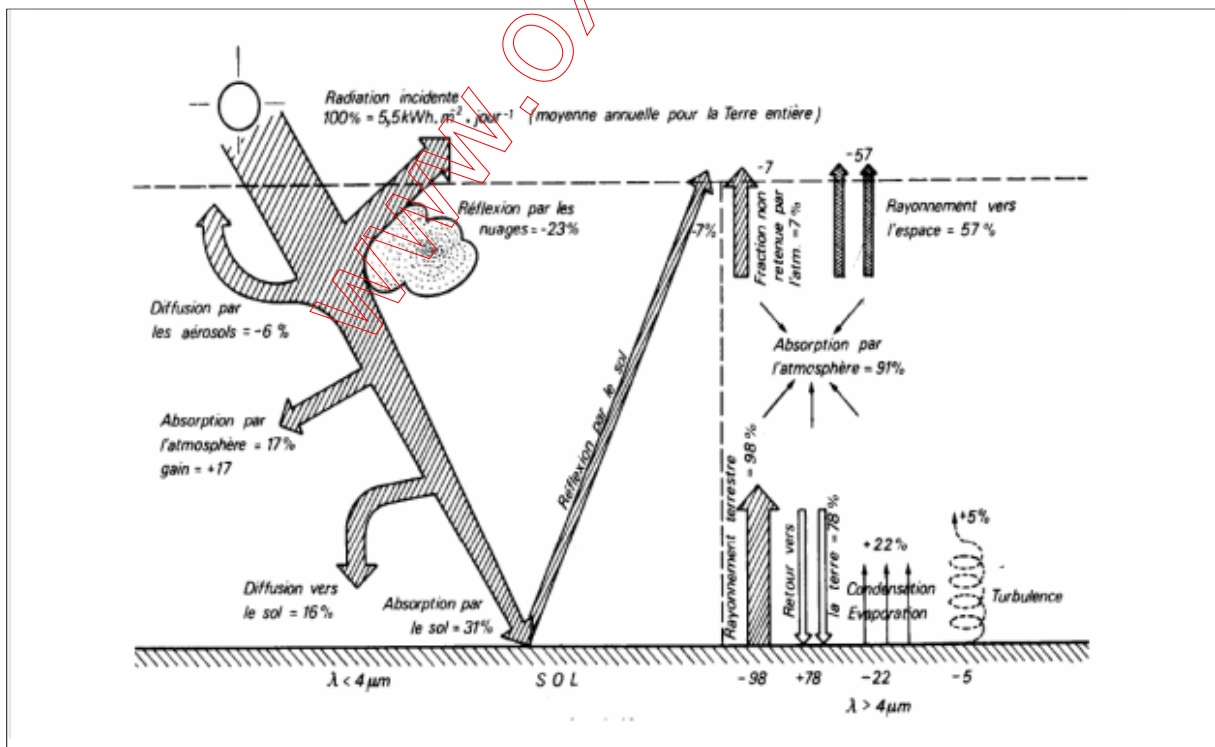


Figure I-3 : Bilan du rayonnement solaire et du rayonnement terrestre.

L'irradiance solaire spectrale I_λ ($W / m^2 / \mu m$) est modélisée à ces derniers paramètres par une loi du type de Beer et Bouguer :

$$I_\lambda = I_{\lambda 0} * \prod_{i=1}^6 T_i \cdot \exp(-C_i(\lambda) \cdot m) \quad (I-7)$$

Avec :

$$T_1 = T_2 = T_3$$

$$\begin{aligned} T_4 &= \exp(-C_4 \cdot \sqrt{m \cdot w'}) \\ T_5 &= \exp(-C_5 \cdot m \cdot w') \\ T_6 &= 1 - \exp(-C_6 \cdot \sqrt{m}) \end{aligned} \quad (I-8)$$

C_1 : Coefficient de la diffusion de Rayleigh ; C_2 : Coefficient tenant compte de l'absorption et la diffusion par l'ozone ; C_3 : Coefficient dû à la diffusion par les aérosols et les particules ; C_4 et C_5 et C_6 : Coefficients se rapportant à l'absorption moléculaire ; T_i : Les coefficients de transmission caractérisant l'absorption moléculaires ; w' : La hauteur d'eau condensable décrite plus haut.

La Figure (I-4) représente le spectre solaire $AM0$ et $AM1,5G$ pour un ciel très pur et pour une hauteur d'eau condensable $w' = 4mm$.

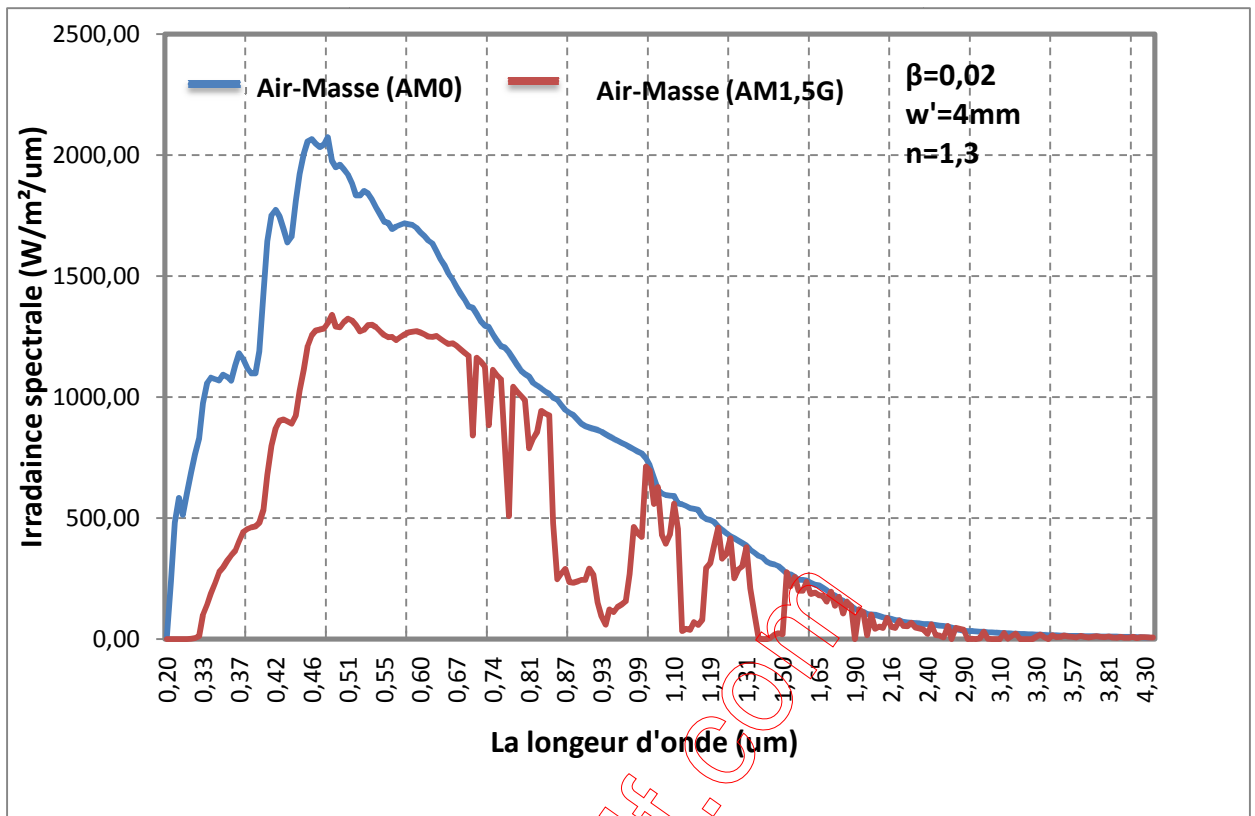


Figure I-4 : Irradiances spectrales AM0 et AM1,5G pour une atmosphère pure

($n = 1,3$; $\beta = 0,02$; $w' = 4 \text{ mm}$).

I-4. Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est un rayonnement thermique qui se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques. Donc, c'est un apport énergétique disponible quotidiennement, dont l'intensité varie selon le lieu, l'heure du jour et la saison.

Le rayonnement solaire arrivant au sol est formé de rayonnement direct « D » et de rayonnement diffus « S », l'ensemble forme le rayonnement global « G ».

Le rayonnement solaire direct se définit comme étant le rayonnement provenant directement du soleil. Il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages.

Le rayonnement solaire diffus résulte de la diffraction du rayonnement solaire par les nuages et les particules en suspension dans l'atmosphère. Il n'est donc nul que la nuit.

La composante diffuse provient de la voûte céleste ce qui explique qu'elle est riche en bleu, elle n'a pas une orientation privilégiée, elle ne peut donc être concentrée par des

instruments optiques. En hiver où le ciel est souvent couvert, il est inutile d'orienter les panneaux solaires dans la direction du soleil, car la composante diffuse est importante (80%) qu'il est préférable de monter les panneaux solaires à l'horizontal, comme montre la Figure (I-5).

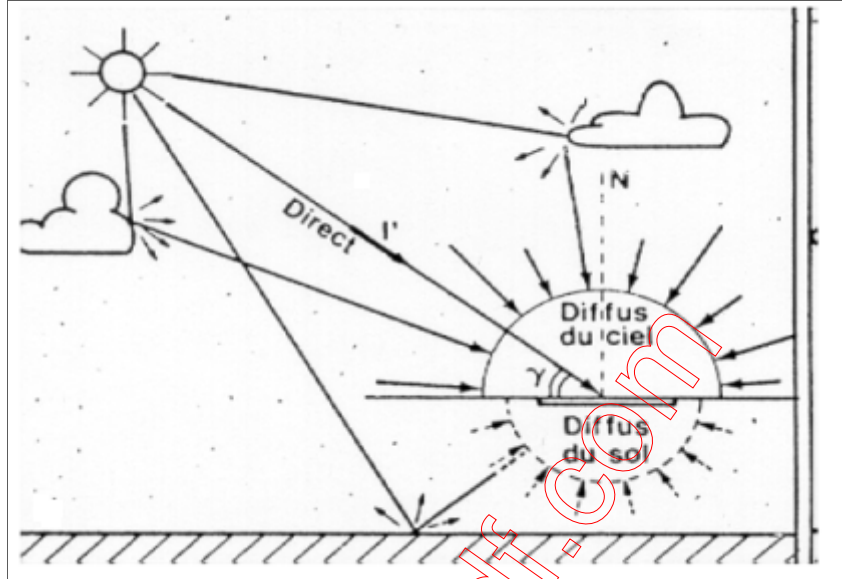


Figure I-5 : Composante de l'éclairement global d'une surface horizontale.

I-4-1. Estimation du rayonnement solaire instantané sur une surface horizontale

- Relations entre les moyennes mensuelles :

Le rayonnement moyen, mensuel diffus sur une surface horizontale est donné par la relation de Collares-Pereira et Rabl (1979) [5] :

$$\frac{\bar{H}_d}{H} = 0,775 + 0,347 \left(w_s - \frac{\pi}{2} \right) \cdot \frac{\pi}{180} - \left[0,505 + 0,261 \left(w_s - \frac{\pi}{2} \right) \cdot \frac{\pi}{150} \right] \cos(2\bar{k}_t - 1,8) \quad (I-9)$$

Avec :

w_s : Angle horaire de lever du soleil de la journée représentative du mois considéré.

\bar{k}_t : Moyenne mensuelle par jour de l'indice de clarté, il est donné par la relation suivante :

$$\bar{k}_t = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0}$$

Avec :

\bar{H} : La moyenne de l'irradiation solaire globale, mensuel mesuré sur une surface horizontale.

\bar{H}_0 : La moyenne de l'irradiation solaire globale quotidien, mensuel hors de l'atmosphère.

• **Passage des rayonnements journaliers aux valeurs instantanées :**

Dans certaines applications, il est nécessaire de connaître les flux instantanés ou les irradiances pendant des durées courtes. Cela est réalisé grâce aux formules de Collares-Pereira et Rabl pour le rayonnement global:

Le rapport r_t entre les valeurs horaires et journalières de l'irradiation globale est donné par:

$$r_t = \frac{H}{\bar{H}} = \frac{\pi}{24} (\alpha + b \cos(w)) \cdot \frac{\cos(w) - \cos(w_s)}{\sin(w_s) - \frac{2\pi}{360} \cdot w_s \cdot \cos(w_s)} \quad (I-10)$$

Où
$$\alpha = 0,409 + 0,501 \cdot \sin\left(w_s - \frac{\pi}{3}\right)$$

Et
$$b = 0,669 - 0,4767 \cdot \sin\left(w_s - \frac{\pi}{3}\right)$$

w : Angle horaire relatif à l'heure en temps solaire vrai.

Pour le rayonnement diffus, le rapport r_d de la valeur moyenne horaire sur la valeur moyenne quotidienne du rayonnement diffus est donné par la corrélation de Liu et Jordan [6] :

$$r_t = \frac{H_d}{\bar{H}_d} = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{\cos(w) - \cos(w_s)}{\sin(w_s) - \frac{2\pi}{360} w_s \cos(w_s)} \quad (I-11)$$

Le rayonnement direct instantané sur une surface horizontal est donné par :

$$H_b = H - H_d \quad (I-12)$$

I-4-2. Estimation du rayonnement solaire instantané reçu par une surface inclinée :

Dans la majorité des cas d'applications, il est nécessaire de calculer le rayonnement solaire sur une surface d'orientation quelconque. Une telle surface reçoit:

- ✓ un rayonnement direct.
- ✓ un rayonnement diffus provenant de la voûte céleste.
- ✓ un rayonnement diffus réfléchi ayant pour origine la réflexion du rayonnement global sur le sol avoisinant. (Voir la Figure (I.6), où β représente l'angle d'inclinaison).

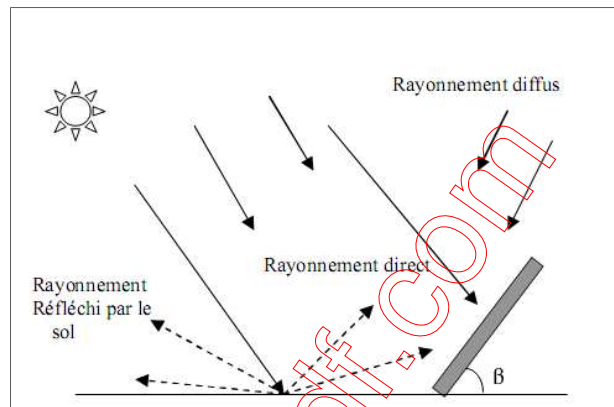


Figure I-6 : Composante de rayonnement globale sur une surface inclinée.

• **Rayonnement direct sur une surface inclinée :**

Connaissant le flux direct sur une surface horizontale H_b , le flux direct sur une surface inclinée H_{bi} est donné par la formule suivante:

$$H_{bi} = R_b H_b \tag{I-13}$$

H_{bi} : Le flux direct sur une surface inclinée.

R_b : Le rapport entre le rayonnement direct journalier sur une surface horizontale à celui sur une surface inclinée, il est donné par la relation suivante :

$$R_b = \frac{\cos(\theta_i)}{\cos(\theta_z)} \tag{I-14}$$

θ_i : C'est l'angle d'incidence, elle est donnée pour une surface inclinée vers le sud par:

$$\cos(\theta_i) = \cos(\phi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(w) + \sin(\phi - \beta) \cdot \sin(\delta) \tag{I-15}$$

θ_z : C'est l'angle de zénith.

- **Rayonnement diffus sur une surface inclinée :**

En admettant que le rayonnement diffus est isotrope, c'est-à-dire il est uniformément réparti sur la voûte céleste, la valeur de rayonnement diffus est donné par :

$$H_{di} = H_d \cdot F_p \quad (I-16)$$

H_{di} : Flux diffus sur une surface inclinée.

F_p : Facteur d'angle ciel-plan incliné, il est donné :

$$F_p = \frac{1}{2}(1 + \cos(\beta)) \quad (I-17)$$

- **Rayonnement provenant de la réflexion :**

De même, on a la réflexion est supposé isotrope, leur valeur est donné par :

$$H_r = \rho_s \cdot H \cdot \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (I-18)$$

ρ_s : Coefficient de réflexion de rayonnement réfléchi sur une surface inclinée (aussi appelé albédo de sol, valeur fixé sur 0,2).

- **Rayonnement global sur une surface inclinée :**

Connaissant les trois composantes de flux et irradiations on a finalement :

$$H_t = H_{bi} + H_{di} + H_r \quad (I-19)$$

Donc :

$$H_t = R_b \cdot H_b + \rho_s \cdot H \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + \frac{H_d}{2} \cdot (1 + \cos(\beta)) \quad (I-20)$$

I-4-3. Albédo :

Nom masculin originaire du bas latin "Albédo", qui veut signifie blancheur. C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol ou aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur reflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidence possibles. Par définition, le corps noir possède un albédo nul.

Voilà quelques valeurs d'albédo :

- Glace : 0,6.

- Neige tassé : 0,4-0,7.
- Surface de la mer : 0,05-0,15.
- Sol sombre : 0,05-0,15.
- Miroir : 1.

I-5. Position de soleil :

La position de soleil est repérée à chaque instant de la journée par deux coordonnées fondamentales variables au cours de l'année : les coordonnées équatoriales et les coordonnées horizontales.

I-5-1. Coordonnées équatoriales :

La position de soleil est repérée par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles : la déclinaison « δ » et l'angle horaire de soleil « ω ».

I-5-1-1. Déclinaison du soleil :

C'est l'angle que fait la direction de soleil avec le plan céleste équatorial qui est parallèle au plan équatorial terrestre.

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (J + 284)\right) \quad (I-21)$$

Avec :

J : Le nombre de jour de l'année compté à partir du 1^{er} janvier.

La Figure (I-7), montre la déclinaison de soleil en fonction des jours de l'année. Comme on peut l'observer, la déclinaison est nulle aux équinoxes et égale à $-23,27^\circ$ au solstice d'hiver et $+23,27^\circ$ au solstice d'été.

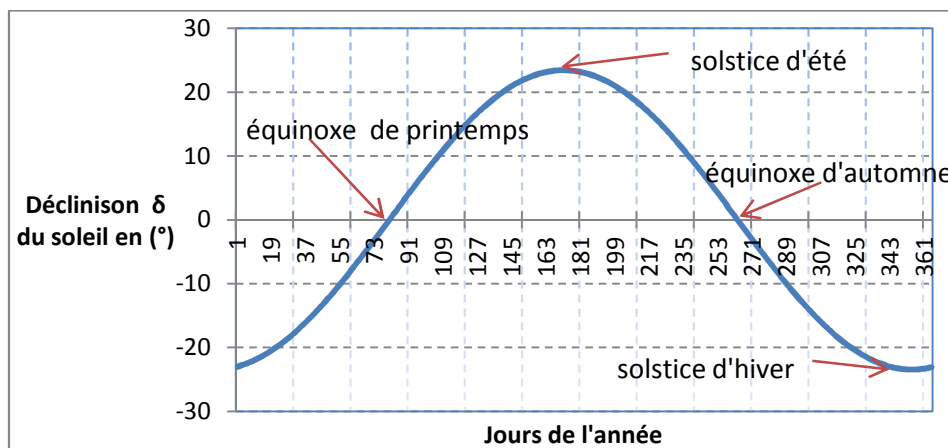


Figure I-7 : La variation de la déclinaison du soleil le long de l'année.

I-5-1-2. Angle horaire :

C'est la mesure de l'arc de la trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu, il mesure la course de soleil dans le ciel. Elle est comptée positivement après le midi solaire et négativement avant le midi solaire.

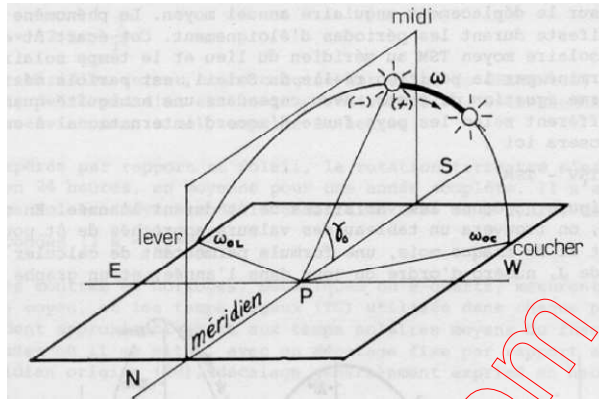


Figure I-8 : l'angle horaire w du soleil.

L'angle horaire exprimé en (°) et elle est donnée par :

$$w = 15 \cdot (TSV - 12) \tag{I - 22}$$

Avec :

TSV : Le temps solaire vrai et il est défini à partir la rotation de la terre sur elle même.

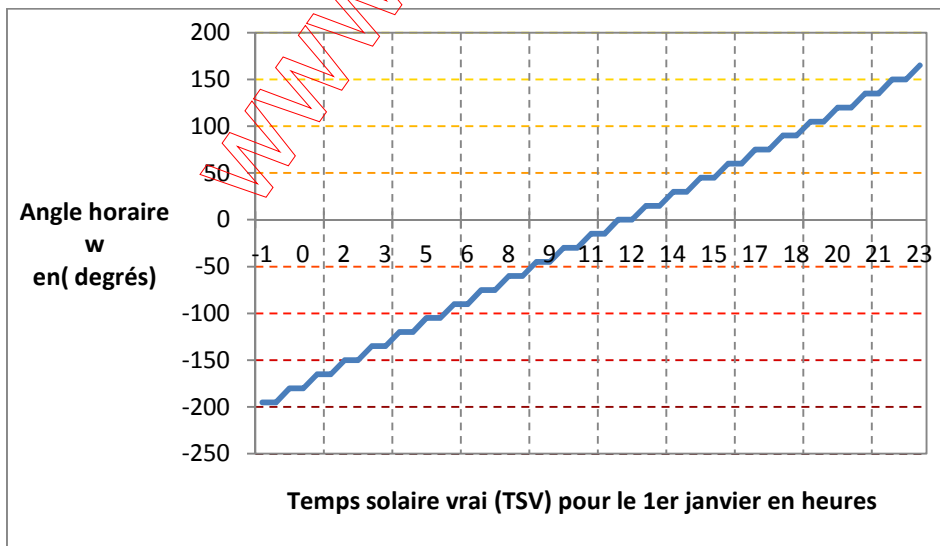


Figure I-9: La variation de l'angle horaire du soleil le 1er janvier dans la ville de Mostaganem.

I-5-2. Les coordonnées horizontales :

Le repère horizontal est formé par le plan d'horizon astronomique et le vertical du lieu. Dans ce repère, les coordonnées sont la hauteur h et l'azimut a .

I-5-2-1. Azimut a :

C'est l'angle que fait la direction de la projection du soleil sur le plan méridien de lieu avec la direction sud, cet angle est orienté positivement vers l'ouest. Son expression est :

$$\sin(a) = \cos(\vartheta) \cdot \sin(w) / \cos(h) \quad (I - 23)$$

I-5-2-2. Hauteur du soleil h :

C'est l'angle que fait la direction de soleil avec sa projection sur le plan horizontal, et elle est donnée par la relation suivante :

$$\sin(h) = \sin(L) \cdot \sin(\delta) + \cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(w) \quad (I - 24)$$

Avec :

L : Latitude de lieu (en degrés).

L'azimut a et la hauteur h permettent de donner et déterminer à chaque instant la position du soleil dans le ciel.

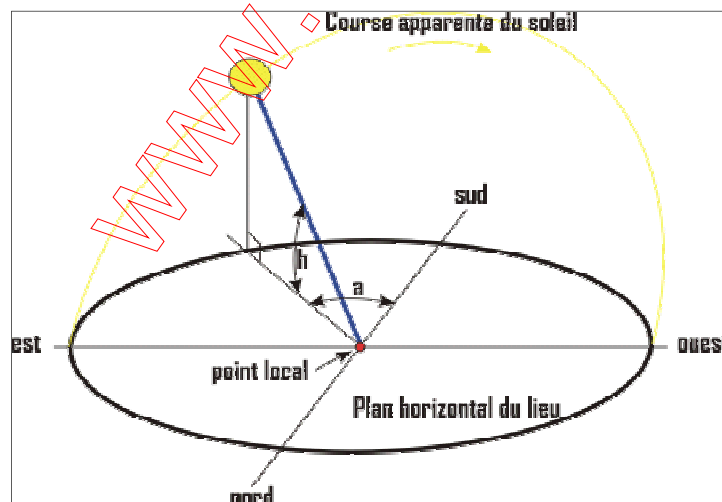


Figure I-10 : Schéma représentant l'angle de la hauteur et l'azimute du soleil.

La Figure (I-11) représente la variation de la hauteur du soleil h durant une année pour la ville de Mostaganem (longitude $\pm 0,083^\circ$ et latitude $+35,9^\circ$) et pour un temps légale $TL=10 :37$.

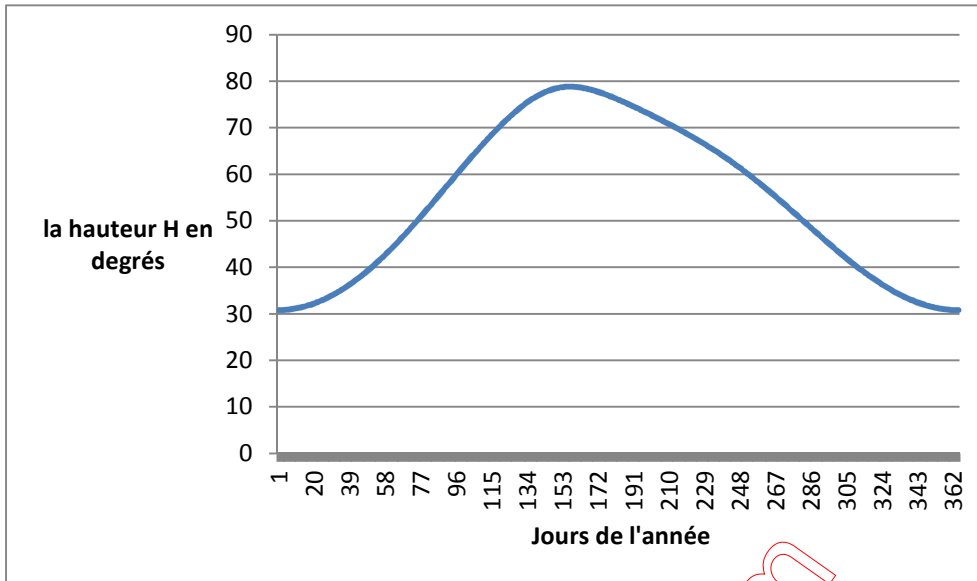


Figure I-11 : La variation de la hauteur de soleil le long de l'année dans la ville de Mostaganem (Longitude $l=0,083^\circ$ et latitude $L=35,9^\circ$).

Elle présente un maximum dans le 165^{ème} jour de l'année.

I-6. Angle d'incidence des rayonnements solaires :

C'est l'angle formé par les rayons incidents du soleil et le plan des panneaux solaires

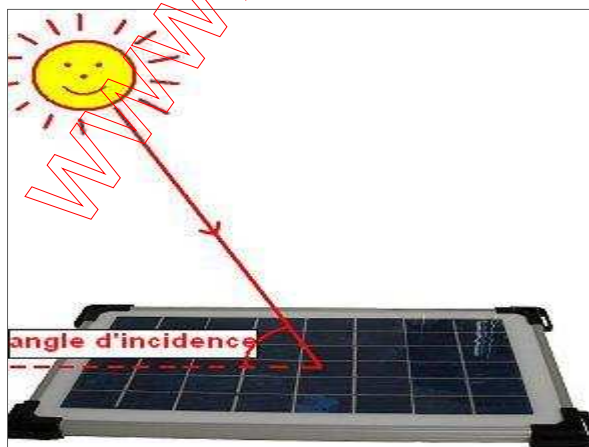


Figure I-12 : L'angle d'incidence des rayons solaires sur un panneau photovoltaïque.

Cet angle joue un rôle important sur le rendement d'un panneau solaire. Il peut être défini selon l'équation suivante :

$$R = 100 * \sin \theta \tag{I-25}$$

θ : Angle d'incidence des rayons solaires.

R : le rendement du panneau photovoltaïque.

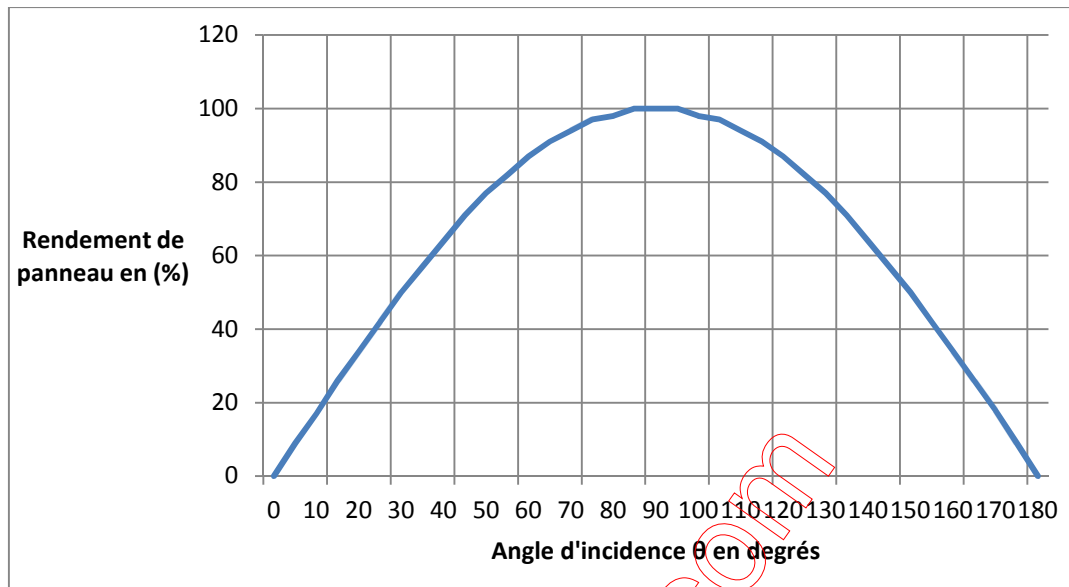


Figure I-13 : Le rendement d'un panneau photovoltaïque sous plusieurs angles d'incidence des rayons solaires.

Comme on peut le voir sur la figure (I-13), le rendement d'un panneau prend une valeur optimale quand les rayons solaires arrivent perpendiculairement au panneau ($\theta=90^\circ$).

Il est important de noter que le rendement dont il est question ici, est un rendement dû à l'orientation du panneau solaire et non pas dû à la qualité du produit.

I-7. Angle d'inclinaison et l'orientation optimale :

L'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires influencent beaucoup sur le rendement final puisque c'est de ces deux facteurs que va dépendre la réception des rayons du Soleil.

Le Soleil se lève à l'Est et se couche à l'Ouest. Algérie est située à une latitude d'environ $36^\circ 42'$ Nord. Ce qui fait que les rayons du soleil sont orientés principalement vers le Sud. De plus, au zénith, le Soleil est plein Sud et c'est à ce moment que le rayonnement est le plus intense. C'est pour cela que l'orientation qui donnera le meilleur rendement est le Sud.

L'angle d'inclinaison est l'angle formé entre le plan du sol et le plan du panneau solaire. Nous avons vu que l'angle d'incidence doit être de 90° pour un meilleur rendement. L'Algérie étant située à une latitude d'environ $36^\circ 42'$ Nord, il est nécessaire de positionner les modules photovoltaïques à 36° .

I-8. Rayonnement solaire en Algérie :

L'Algérie possédant un gisement solaire important, de part son climat, la puissance solaire maximale en tout point de notre pays est d'environ 1kW/m^2 . L'énergie journalière maximale moyenne (ciel clair, mois de juillet) dépasse les 6 kWh/m^2 et l'énergie annuelle maximale en Algérie est de l'ordre de 2500 kWh/m^2 .

La carte ci-dessous représente les différentes zones énergétiques de l'Algérie.

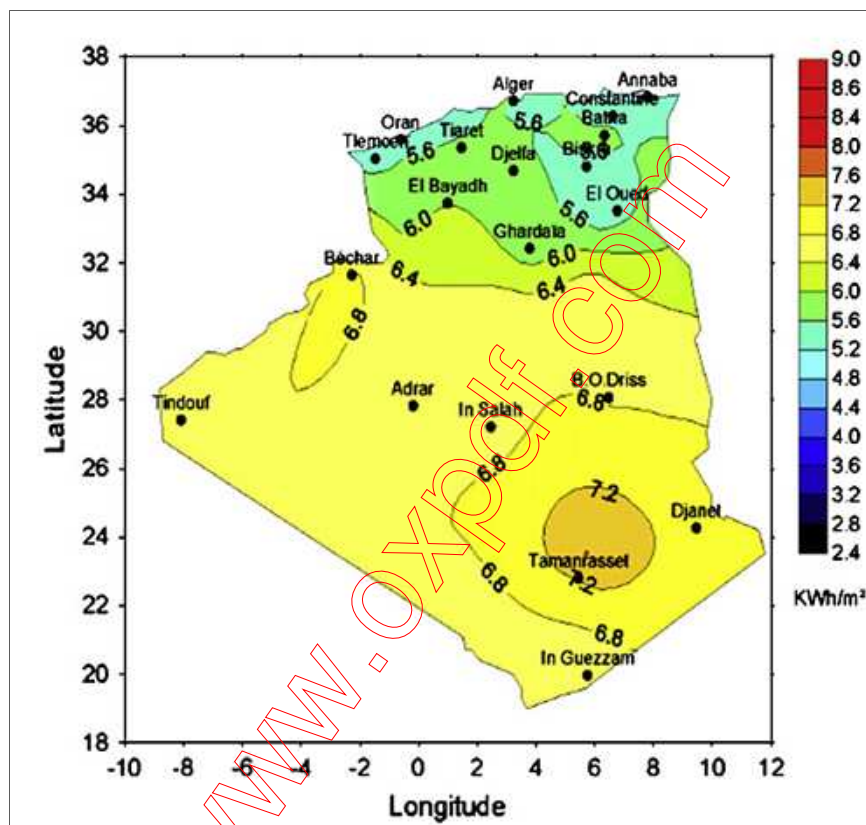


Figure I-14 : Rayonnement solaire en Algérie [9].

I-9. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré pour présenter succinctement les notions générales relatives au rayonnement solaire et la position de soleil, nécessaires pour un bon captage de rayonnement par les panneaux photovoltaïques. Dans le chapitre suivant on va entamer la physique de la cellule solaire.

Bibliographie du chapitre I :

[1] : <http://fr.wikipedia.org/wiki/irradiation-solaire> (consulté le 15/05/2013).

[2] : [http : villemin.gerard.free.fr/science/soltoil.htm](http://villemin.gerard.free.fr/science/soltoil.htm) (consulté le 15/05/2013).

[3] : Jean-Charles Dupont, *Thèse de Doctorat « Impact des nuages de haute altitude sur le bilan radiatif a la surface de la terre : quantification expérimentale et analyse »* octobre 2008, école polytechnique de France.

[4] : *Master Energies Renouvelables « Gisement-solaire et transfert énergétiques »* Alain Ricaud_Jan-2011, Université de CERGY-PONTOISE, p.18.

[5]: Manuel collares-pereira and rabl “The average distribution of solar radiation correlation between diffuse en hemispherical and between daily and hourly insolation values” solar energy vol 22, pp.155-164, 1978.

[6]: B.Y.H liu and R.C.jordan “the interrelationship and characteristic distribution of direct diffusion and total solar radiation” solar energy, vol, 4, N° 1, 1960.

[7]:http://books.google.dz/books?id=aBLLQ0I00HwC&pg=PA38&lpg=PA38&dq=correction+de+la+distance+terre+soleil&source=bl&ots=IEsNRybw9l&sig=7qRP9INRt_jcPcP2VvkSbLA3-e4&hl=fr#v=onepage&q=correction%20de%20la%20distance%20terre%20soleil&f=false.(consulté le 15/05/2013)

[8] : W.palz, *solar électricité*, UNESCO, Butterworths, 1978.

[9] : *Thèse de doctorat en science « Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables »* par Sultane Belakehal, département d'électrotechnique, université de Constantine, le 10-06-2012.

Chapitre II :
Physique de la cellule
Photovoltaïque

www.oxford.com

II-1. Introduction :

La conversion photovoltaïque est la transformation directe de l'énergie solaire (des photons) en énergie électrique exploitable. Les cellules photovoltaïques sont les dispositifs qui permettent ce processus.

Ce chapitre présente les bases indispensables de la physique de cellule photovoltaïque pour comprendre son fonctionnement. Nous abordons en premier lieu quelques dates historiques sur le photovoltaïque. Ensuite, nous décrivons le principe du fonctionnement, le schéma électrique idéal et réel d'une cellule photovoltaïque et ses caractéristiques principales ainsi que les pertes physiques et technologiques qui limitent le rendement de la photopile, pour finir par l'étude de l'influence d'un champ électrique supplémentaire sur son rendement.

II-2. Historique du Photovoltaïque :

L'utilisation de système photovoltaïque est entamée depuis environ 40 années. Les applications ont commencés avec le programme spatial pour la transmission des signaux radio par les satellites, ensuite avec les balises en mer et l'équipement des sites isolés à travers certains pays du monde.

Voici quelques dates charnières du développement de ce domaine :

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs, mais le phénomène reste encore jusqu'à la seconde guerre mondiale, une découverte anecdotique.

1954 : Trois chercheurs américains, Chaplin, Pearon et Prince mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9% est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont alors envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules solaires photovoltaïques est construite pour alimenter l'université de Delaware aux États-Unis.

1995 : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés aux réseaux ont été lancés au Japon et en Allemagne et qui se sont ainsi généralisés depuis 2001.

II-3. L'effet Photovoltaïque :

Comme il a été défini plus haut, la conversion photovoltaïque est la transformation de l'énergie des photons provenant du soleil en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière semi-conductrice. Lorsqu'un photon est absorbé, il éjecte un électron d'un niveau d'énergie inférieure vers un niveau d'énergie supérieure, créant ainsi une paire électron-trou. Généralement, cette paire électron-trou revient à l'équilibre (état initial) en transformant son énergie électrique en énergie thermique, alors le matériau chauffe.

Récupérer toute ou une portion de cette énergie sous forme électrique est justement l'objectif de la conversion photovoltaïque. Comment en faire ? Tout simplement en séparant ces paires électrons-trous et en les forçant à passer dans un circuit extérieur. Cela est possible grâce au champ électrique qui présente dans les jonctions PN, réalisées en associant un semi-conducteur de type N avec un semi-conducteur de type P. Pour bien comprendre le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques, il est indispensable de définir d'abord la jonction PN ainsi que des notions sur l'interaction rayonnement-matière (semi-conducteur).

II-3-1. La Jonction PN :

II-3-1-1. Semi-conducteur Intrinsèque :

Un semi-conducteur intrinsèque est un matériau idéal ne possédant ni défaut physique ni défaut chimique, c-a-d, un matériau dépourvu de toute impureté susceptible de modifier la densité des porteurs. Les électrons de la bande de conduction ne peuvent résulter que par l'excitation thermique des électrons de la bande de valence. Les électrons et les trous existent nécessairement par paires ($n = p = n_i$). La densité intrinsèque des porteurs et le niveau de Fermi intrinsèque sont donnés par les expressions suivantes:

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2KT}\right) \quad (II-1)$$

$$E_F = \frac{1}{2}(E_c + E_v) + \frac{3}{4}KT \cdot \log\left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right) \quad (II-2)$$

Avec :

N_c : La densité effective d'état des électrons.

N_v : La densité effective d'état des trous.

E_c : L'énergie de la bande de conduction.

E_v : L'énergie de la bande de valence.

E_g : L'énergie de la bande interdite (le Gap).

m_e^* , m_h^* : Les masses effectives respectives des électrons et des trous.

K : La constante de Boltzmann.

T : La température en ($^{\circ}K$).

II-3-1-2. Semi-conducteur Extrinsèque :

Les semi-conducteurs intrinsèques n'ont pas d'une grande utilité en tant que tels ; ils servent de base aux semi-conducteurs dopés : on y rajoute des impuretés (dopants) pour changer leurs comportements, particulièrement leurs propriétés électriques. Il existe deux types de semi-conducteurs extrinsèques :

A- Semi-conducteur dopé de type N :

Un semi-conducteur dopé de type N est un semi-conducteur dont la densité des électrons est supérieure à celle des trous. On y introduit généralement du Phosphore, de l'Arsenic ou de l'Antimoine. Prenons l'exemple de Silicium (4 électrons dans la couche extérieure) dans lequel on introduit l'Arsenic (5 électrons dans la couche externe). L'intérêt est que pour des températures supérieures à $0^{\circ}K$, les atomes d'Arsenic sont ionisés, ce qui revient de faire passer l'électron de niveau donneur vers la bande de conduction. Donc, cet élément joue le rôle d'un générateur d'électrons, et la densité des porteurs libres du semi-conducteur lorsque tous les donneurs sont ionisés, devient alors:

$$n = n_0 + N_D \quad (II-3)$$

Avec :

N_D : La concentration des atomes donneurs.

n_0 : La densité intrinsèque des électrons à l'équilibre thermodynamique.

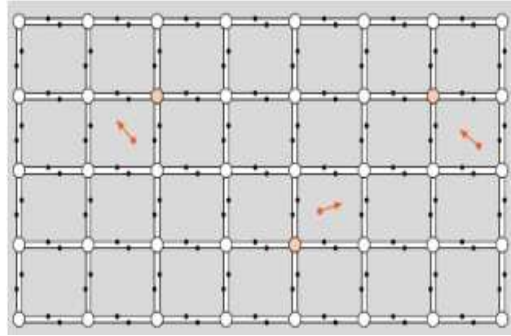


Figure II-1: Cristal de Silicium de type N dopé par les atomes d'Arsenic.

B- Semi-conducteur dopé de type P :

Un semi-conducteur dopé de type P est un semi-conducteur dont la densité des trous est supérieure à celle des électrons. On y introduit généralement du Bore, de l'Aluminium ou du Gallium. Prenons l'exemple de Silicium (4 électrons dans la couche extérieure) dans lequel on introduit le Bore (3 électrons dans la couche externe). L'intérêt est que pour des températures supérieures à 0°K, les atomes de Bore sont ionisés ce qui revient de faire passer l'électron de la bande de valence vers le niveau accepteur. Donc, le Bore joue le rôle d'un générateur des trous, et la densité des porteurs libres du semi-conducteur devient lorsque tous les atomes accepteurs sont ionisés:

$$p = p_0 + N_A \quad (II-4)$$

N_A : La Concentrations des atomes accepteurs.

p_0 : La densité intrinsèque des trous à l'équilibre thermodynamique.

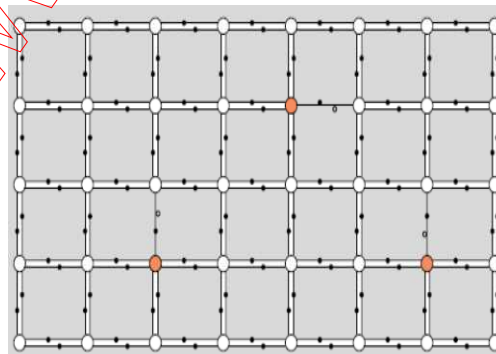


Figure II-2 : Cristal de Silicium de type P dopé par les atomes de Bore.

Le plan qui sépare deux matériaux semi-conducteurs en contact et de dopages différents s'appelle une jonction PN. Si le gap de ces deux matériaux est le même, la jonction est dite homojonction, si c'est le cas contraire, la jonction est dite hétérojonction.

Avant le contact, un semi-conducteur de type N est caractérisé par des électrons majoritaires (Dopé par le Phosphore "P" par exemple) et un semi-conducteur de type P est caractérisé par des trous majoritaires (Dopé par le Bore "B" par exemple) comme le montre ainsi la Figure II-3.

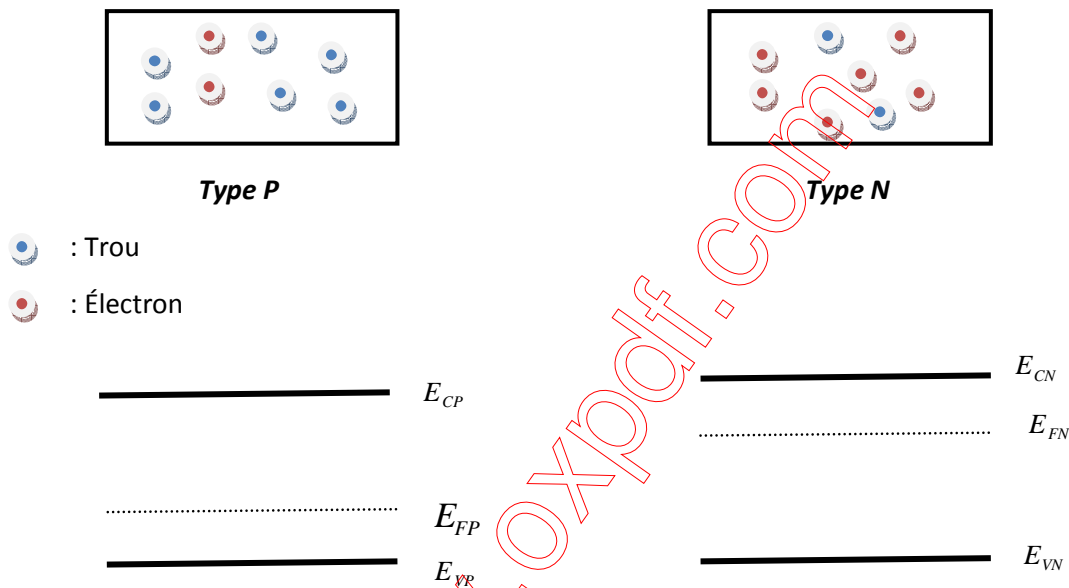


Figure II-3 : Les semi-conducteurs de type P et N avant contact.

Mettre en contact ces deux matériaux, provoque la diffusion des électrons du semi-conducteur de type N vers celui du type P créant derrière eux des atomes donneurs ionisés positivement N_D^+ . Quant à la diffusion des trous du semi-conducteur du type P vers le type N, ils laissent derrière eux des atomes accepteurs ionisés négativement N_A^- . Ce processus se poursuit jusqu'à l'alignement final des niveaux de Fermi des deux types de semi-conducteurs. La diffusion des porteurs des charges dans les deux sens va donc créer une zone dépeuplée à côté de la jonction, c'est la Zone de Charge d'Espace (ZCE) qui est constituée d'ions positifs d'une part et d'ions négatifs d'autre part. Par conséquent, il apparaît finalement un champ électrique dans cette zone dirigée de la zone de charge positive vers celle de charge négative et qui est lié à la tension de diffusion V_d par la relation de type gradient.

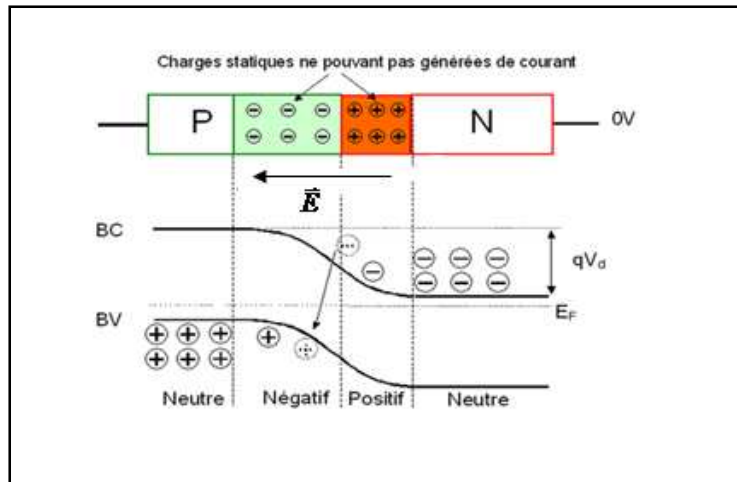


Figure II-4 : Diagramme énergétique d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique.

En polarisation directe $V > 0$ (où la zone P est polarisée positivement). La barrière de potentiel constituée par la zone de déplétion va être diminuée en devenant $q \cdot (V_d - V)$, et l'épaisseur de la zone de charge espace va être réduite, ce qui facilite la diffusion des porteurs de charges (électrons et trous) dans les deux sens. Dans ce cas, le courant est un courant des porteurs majoritaires. Il est sous la forme exponentielle :

$$J_d = J_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{q(V - V_d)}{KT}\right) - 1 \right) \quad (II - 5)$$

J_0 : La densité de courant de saturation de la jonction PN.

J_d : La densité de courant directe des porteurs de charge majoritaires.

V_d : La tension de diffusion des porteurs de charge.

K : La constante de Boltzmann.

En polarisation inverse ($V < 0$) (où la zone P est polarisée négativement). La barrière de potentiel constituée par la zone de charge espace va être augmentée, elle devient $q \cdot (V + V_d)$ ainsi que la longueur de la zone de déplétion, ce qui augmente la résistance de la jonction. Par conséquent, la diffusion des porteurs de charge majoritaires devient difficile. Dans ce cas-là, le courant est un courant des porteurs minoritaires, il est très faible et est donné par l'expression suivante:

$$J_i \approx -J_0 \quad (II - 6)$$

J_i : La densité de courant inverse des porteurs de charge minoritaires.

II-3-2. Interaction rayonnement-matière :

Lorsqu'un photon interagit avec un électron, il transfère intégralement son énergie à ce dernier, à condition que le niveau énergétique final de l'électron soit autorisé et libre.

Dans un métal, tous les niveaux supérieurs au niveau de Fermi sont autorisés et la quasi-totalité de ces niveaux étant inoccupés à la température ambiante. La bande de conduction est chevauchée avec la bande de valence dans le métal. Toutes les longueurs d'ondes peuvent être ainsi absorbées (transition 1, Figure II-5-a). L'électron excité revient immédiatement à l'énergie initiale (transition th, Figure II-5-a) au bout d'un temps très bref ($\tau \cong 10^{-12} s$) et va perdre son énergie sous forme thermique (Phonons). Le métal absorbe les photons, mais ne sera pas possible d'utiliser l'énergie reçue par les électrons que sous forme thermique. Dans un isolant, il faut que l'énergie du photon soit supérieure à la largeur de la bande interdite afin d'atteindre les premiers niveaux autorisés. Il faudrait donc des photons d'énergie $E_{ph} \geq 8 eV$ (transition 2, Figure II-5-b) qui soient des photons plus énergétiques, de longueur d'onde $\lambda \leq 0,15 \mu m$ [1]. Comme la quasi-totalité du spectre solaire est de longueur d'onde supérieure à $0,3 \mu m$, le rayonnement solaire ne peut pas être ainsi absorbé par les isolants.

Dans les semi-conducteurs, la largeur de la bande interdite est inférieure à celle des isolants et varie avec le type du semi-conducteur. Elle est comprise d'environ 0,6 à 2 ou 3 eV, elle est de 1,12 eV pour le Silicium à la température de 300 °K. Donc, tous les photons du spectre solaire d'énergie $E_{ph} \geq 1,12 eV$ pourront être absorbés en fournissant de l'énergie à l'électron situé dans la bande de valence (correspond aux électrons des liaisons chimiques) pour le faire passer vers la bande de conduction (transition 3, Figure II-5-c). L'excès d'énergie $E_{ph} - E_g$ est perdu immédiatement sous forme de chaleur (transition the, Figure II-5-c). Si la transition électronique concerne un électron de l'intérieur de la bande de valence (transition 4, Figure II-5-c), la thermalisation aura lieu pour les deux types de porteurs th_e et th_i .

Contrairement à ce qui se passe dans le métal, les électrons et les trous peuvent participer au courant électrique avant de disparaître par le processus de recombinaison. Ceci est dû au fait que, avant de se recombiner, les porteurs ont une certaine durée de vie dans les bandes permises (de conduction et de valence). Il est donc possible de dissocier ces paires électrons-trous pour utiliser l'énergie restante. On constate bien que seuls les semi-conducteurs possèdent la

structure électronique permettant de générer, à partir du rayonnement solaire des paires électrons-trous utilisables dans le processus électrique.

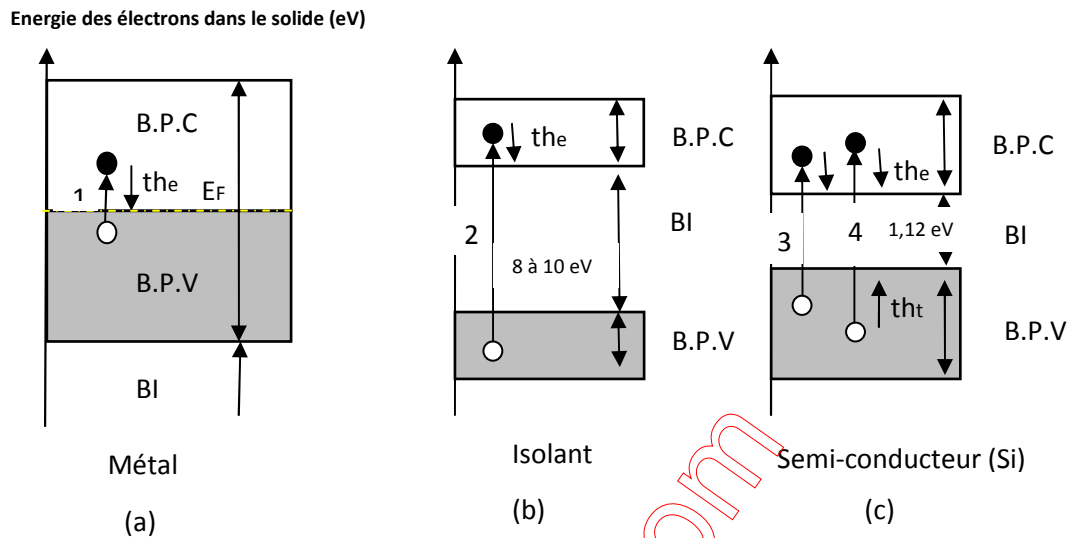


Figure II-5: Structure électronique des trois grands types de solide.

II-3-3. Zone utile du spectre solaire :

Les photons du spectre solaire ne vont pas être tous utilisables pour la génération des paires électrons-trous. Les photons qui ont d'une énergie inférieure au gap du semi-conducteur comme celui du Silicium $E_{ph} < E_g$ ne seront pas absorbés, qui est donc transparent pour ces photons. Si $E_{ph} > E_g$, le photon est absorbé, mais une partie de l'énergie va disparaître par le phénomène de la thermalisation. La Figure (II-6) résume ceci sur le spectre de référence (AM1,5 Global) sous formes d'aires, le type du semi-conducteur étant ici le Silicium.

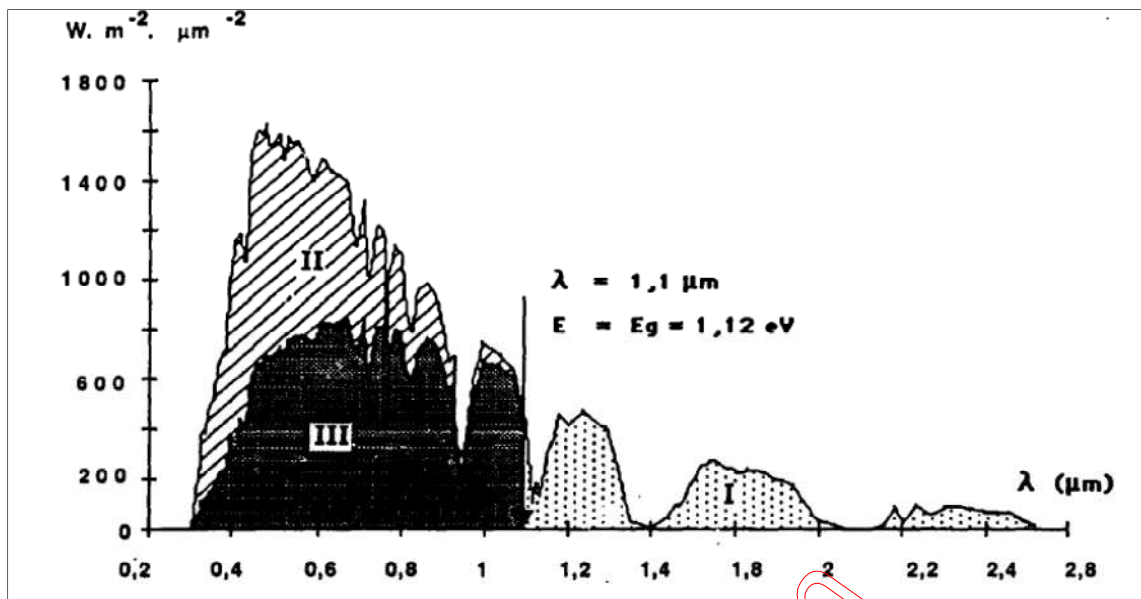


Figure II-6: Zone I : (20%) représente les photons non absorbés, zone II : due à la perte par thermalisation (32%), Zone III : les photons absorbés (48%) [2].

A partir de cette figure, on constate que la zone utile du spectre solaire pour le Silicium est la zone III. Ainsi, la cellule photovoltaïque au silicium industriel ne répond donc que dans un intervalle limité du spectre solaire de 0,3 à 1,1 μm en soustrayant la thermalisation.

II-3-4. Pénétration du rayonnement solaire dans le semiconducteur:

La cellule photovoltaïque est une plaquette de semiconducteur soumise à un rayonnement solaire incident. Il convient donc d'analyser comment ce rayonnement pénètre dans le semiconducteur et comment il est absorbé dans la surface du semiconducteur en fonction des longueurs d'ondes du spectre solaire incident.

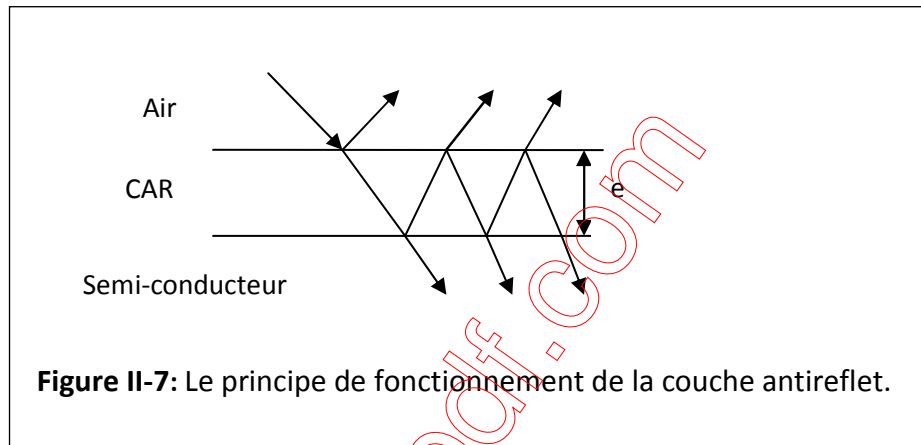
II-3-4-1. réflexion sur la surface :

Si on expose une surface polie du silicium à un rayonnement solaire se situant dans la gamme des longueurs d'ondes utiles pour le silicium (0,3-1,1 μm), près de 40% de ce rayonnement incident seront réfléchis. Il faut donc trouver des solutions pour absorber le maximum de ce rayonnement. Parmi ces solutions, il y a la technique de réalisation d'une Couche AntiReflet (CAR) qui est obtenue par déposition d'une couche d'oxyde (en général TiO_2 , SiO_x ou un nitrure de silicium SiN_x , des épaisseurs de l'ordre de quelques Angströms sur le silicium). La couche antireflet doit être transparente, non absorbante et diélectrique [9], avec un indice de réfraction n_c adapté à celui de silicium pour la longueur d'onde à laquelle on

désire d'obtenir une réflexion minimale et dont l'épaisseur adéquate « d » est déterminée par la relation suivante :

$$d = \frac{\lambda_{\min}}{n_c} \quad (II - 7)$$

Cette technique repose sur le processus de l'interférence des rayons incidents pour augmenter la luminosité, et elle n'est maximale que pour certaines longueurs d'ondes (possédant une irradiance maximale du spectre solaire).



Considérons une couche antireflet d'indice de réfraction n_c est placée entre le milieu avironnant d'indice n_0 et le substrat d'indice n_s . Sous une incidence normale, l'amplitude réfléchie est donnée par :

$$R = \frac{r_1 + r_2 \exp(-2i\Phi)}{1 + r_1 r_2 \exp(-2i\Phi)} \quad (II - 8)$$

Avec

$$\Phi = 2\pi \frac{d \cdot n_c}{\lambda} \quad (II - 9)$$

$$r_1 = \frac{n_c - n_0}{n_c + n_0} \quad (II - 10)$$

$$r_2 = \frac{n_s - n_c}{n_s + n_c} \quad (II - 11)$$

Tel que r_1, r_2 sont les amplitudes de réflexion individuelle à l'interface environnement-couche antireflet et couche antireflet- substrat (semi-conducteur) respectivement, d est l'épaisseur géométrique de la couche et λ la longueur d'onde exprimé dans les mêmes unités que d (μm). La réflexion s'annule si le numérateur égale à zéro :

$$\begin{aligned} r_1 + r_2 \cos(2\Phi) &= 0 \\ r_2 \sin(2\Phi) &= 0 \end{aligned} \quad (II - 12)$$

La résolution de cette équation admet deux solutions :

La première ; 2Φ est égale à un multiple pair de π alors :

$$r_1 = -r_2 \quad \text{on obtient } n_0 = n_s$$

La deuxième qui est la plus importante est obtenue lorsque 2Φ est égale à un multiple impair de π alors :

$$r_1 = r_2. \quad \text{On obtient } n_c^2 = n_0 \times n_s$$

Les conditions nécessaires et suffisantes pour qu'une couche antireflet produise une réflexion nulle sont : $n_c = \sqrt{n_0 \times n_s}$ et $\Phi = \frac{(2m-1)\pi}{2}$ avec $m=1, 2, 3, 4, \dots$

En pratique, on choisit $m=1$, donc $n_c d = \lambda/4$; la couche antireflet possède l'épaisseur de quart d'onde. La couche antireflet peut donc être vue comme une lame quarte d'onde qui va permettre d'éliminer la réflexion pour une longueur d'onde donnée. Pour les applications photovoltaïques, l'indice de réfraction et l'épaisseur de la couche antireflet sont choisis de manière à minimiser la réflexion à la longueur d'onde de 600nm. L'indice de réfraction optimal pour une couche antireflet est donné alors par l'équation :

$$n_c = \frac{\lambda_{\min}}{d} \quad (II - 13)$$

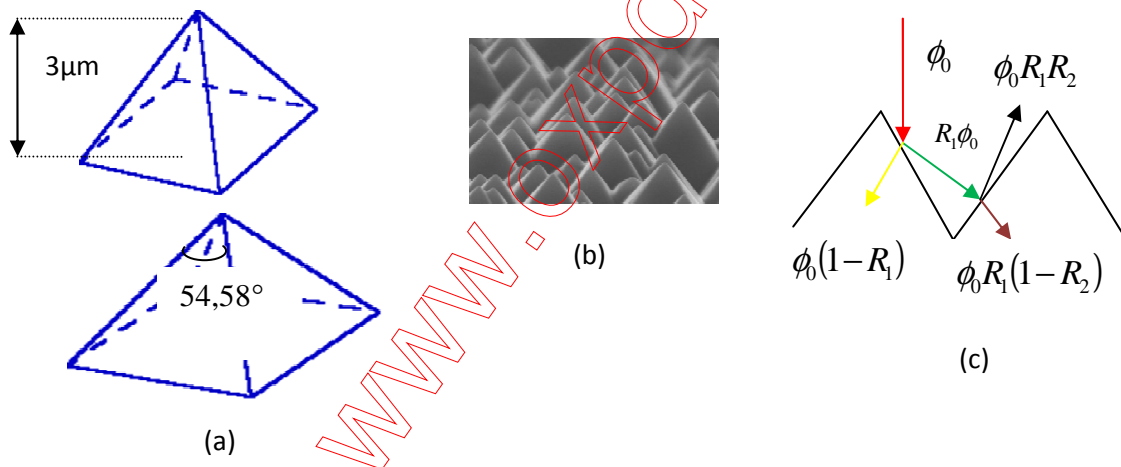
λ_{\min} est la longueur d'onde pour laquelle une réflexion est minimale. Le coefficient de réflexion en fonction des indices de réfraction n_0, n_c, n_s pour $\Phi = \pi/2$ est donné par :

$$R_{\frac{\lambda}{4}} = \frac{n_c^2 - n_0 n_s}{n_c^2 + n_0 n_s} \quad (II-14)$$

$R_{\frac{\lambda}{4}}$ est égale à zéro si $n_c^2 = n_0 \times n_s$.

Par exemple, pour une cellule solaire encapsulée par le verre et par une couche antireflet d'indice de réfraction égal à 2,3, la valeur de réflectance est réduite jusqu'à la longueur d'onde 0,6 μm comme le montre la Figure (II-9) [3].

La seconde solution pour minimiser la réflexion des rayonnements est la texturisation, qui consiste à attaquer chimiquement les plans cristallographiques du semi-conducteur par des solutions chimiques par exemple à base d'Hydroxyde de Potassium ou de Sodium (KOH, NaOH [10]), des micro-pyramides sont formées et piègent les rayons lumineux incidents en leurs faisant parcourir un trajet plus long conduisant à la génération d'un courant de court-circuit pouvant atteindre l'ordre de 46 mA/cm² [10].



R_1 : Le coefficient de réflexion de 1^{er} plan cristallographique.

R_2 : Le coefficient de réflexion de 2^{ème} plan cristallographique.

ϕ_0 : Le flux de rayonnement solaire incident.

Figure II-8 : (a): Une pyramide à base carrée formant la surface d'une cellule solaire en silicium cristallin appropriée texturé avec un angle de face égal à 54,58° et une profondeur de 3 μm . (b) : Photographie au Microscope Electronique à Balayage (MEB) d'une surface de Silicium texturé. (c) : Principe de captage de rayonnement incident

L'effet de piégeage du rayonnement solaire par la couche texturisée est illustré sur la Figure (II-8). Il est évident de rappeler que ce traitement est mal adapté à des substrats semi cristallins à cause de l'orientation aléatoire des grains [11].

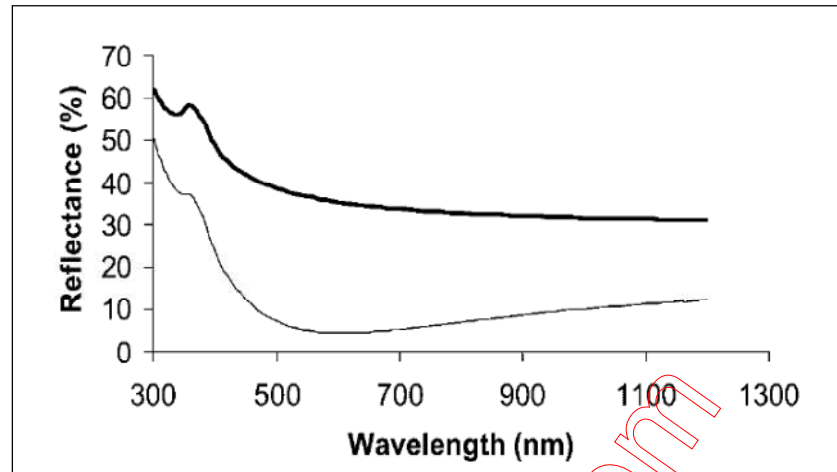


Figure II-9 : Réflectance d'un barreau du Silicium couvert par une couche d'antireflet d'indice de réfraction 2,3 μm et par le verre d'épaisseur de 1mm et une surface texturisée de 3 μm de profondeur (line fine).

Comme on peut le voir sur l'exemple de la Figure II-9, une grande amélioration est obtenue avec plus de photons absorbés, ce qui augmenterait le photo-courant généré.

II-3-5. Absorption du rayonnement solaire dans les semi-conducteurs :

Soit ϕ_0 le flux du rayonnement solaire incident, le flux à une profondeur x à l'intérieur du semi-conducteur est donné par la loi Beer-Lambert:

$$\phi(x) = \phi_0 \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot x) \quad (II-15)$$

Avec $\alpha(\lambda)$ le coefficient d'absorption qui traduit le nombre des photons absorbés par unité de profondeur du matériau en fonction des longueurs d'ondes du rayonnement.

L'absorption des photons diminue avec l'accroissement des longueurs d'ondes. Elle est nulle pour des énergies des photons inférieures au gap du semi-conducteur. Nous retiendrons que les longueurs d'ondes plus faibles seront absorbées en créant des paires électrons-trous près de la surface du matériau, mais en général ces paires vont se recombiner rapidement grâce aux défauts dans la surface, limitant la réponse spectrale des photopiles pour la partie bleue du spectre. Les plus grandes longueurs d'ondes vont être absorbées plus profondément dans le matériau (dans la base, dans le cas des photopiles) en créant des paires électrons-trous à cette profondeur.

λ (μm)	% ($2.7 \cdot 10^{17}$ photons $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)	/	$\alpha(\lambda)$ (cm^{-1})	x_0 (μm)
0.40		4	50 000	0.4
0.50		13	10 000	2
0.53		16	7 500	3
0.60		25	4 500	5
0.70		42	2 000	11
0.80		58	900	26
0.90		72	300	76
1.00		82	100	230
1.06		90	15	1535
1.15		96	0.4	57500

Tableau II-1 : Coefficient d'absorption du silicium monocristallin en fonction de la profondeur sous un éclairage AM1,5G de $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ [1].

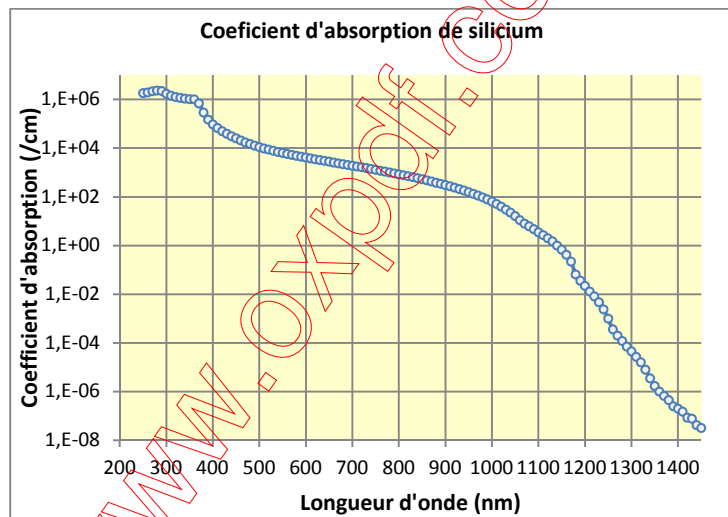


Figure II-10: Le coefficient d'absorption du silicium en fonction de la longueur d'onde [4].

La Figure (II-10) montre la diminution du coefficient d'absorption du silicium avec l'accroissement de la longueur d'onde.

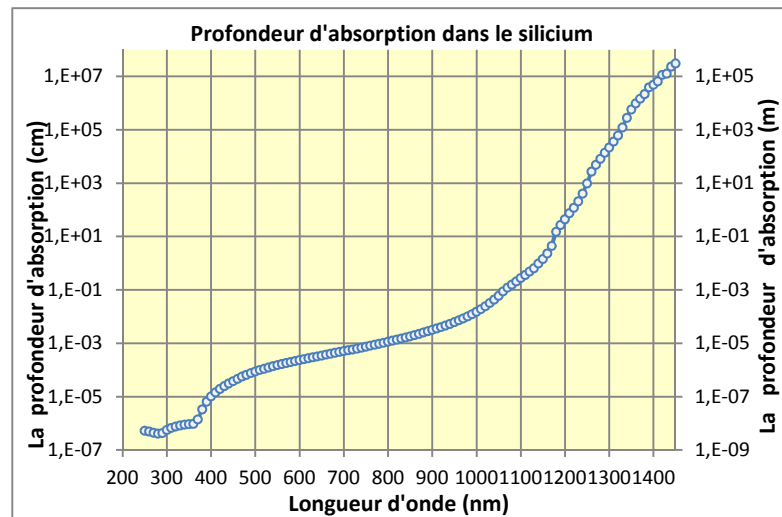


Figure II-11 : La profondeur d'absorption dans le silicium en fonction de la longueur d'onde [4].

Cette figure montre que les grandes longueurs d'ondes peuvent pénétrer plus profondément dans les semi-conducteurs et créent des paires électrons-trous et les petites longueurs d'ondes sont absorbées juste à la surface du semi-conducteur.

Le coefficient d'absorption dépend aussi de la structure des bandes de semi-conducteurs selon les types de transitions (directe ou indirecte).

II-3-5-1. Les transitions directes et indirectes :

Si le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction de semi-conducteur se trouvent dans le même espace \vec{K} (vecteur d'onde), il s'agit d'un gap direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement et sont radiatives, un exemple pour ce cas : le semi-conducteur GaAs utilisé surtout dans l'optoélectronique. En revanche, si le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction ne se trouvent pas dans le même espace \vec{K} , il s'agit alors d'un gap indirect comme le Silicium. Les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non-radiatives parce qu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du maximum de la bande de valence peuvent toute fois être excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction par l'absorption d'un photon de haute énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit absorbé ou émis par l'électron afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence pour absorber un photon (Figure II-12).

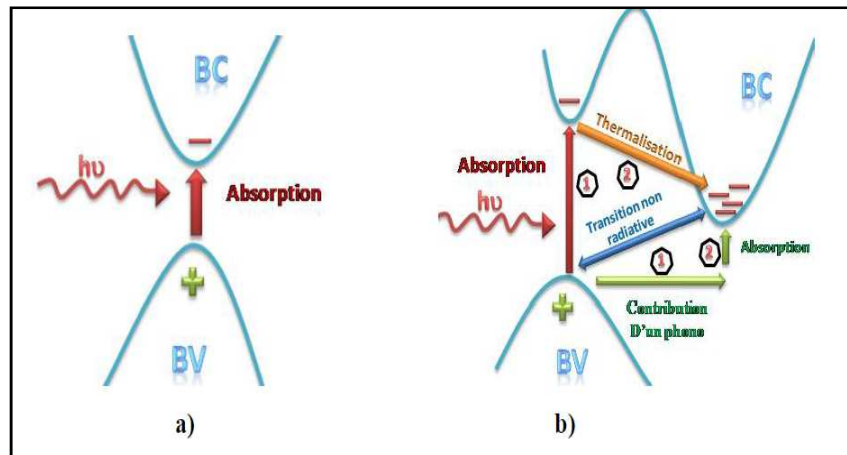


Figure II-12 : Les transitions électroniques inter bandes dans les semi-conducteurs. a) correspondant à un semi-conducteur à gap direct .b) semi-conducteur à gap indirect.

II-4. Recombinaison de porteurs en excès :

Les porteurs minoritaires (électrons dans un matériau type P et trous dans un matériau type N) n'existeront en moyenne que pour un temps égal à la durée de vie qui correspond au temps moyen entre la création d'une paire électron-trou et sa recombinaison.

II-4-1. Mécanismes de recombinaison :

Dans les semi-conducteurs les porteurs de charge libre se recombinent par des mécanismes principaux, tels que la recombinaison SRH : Shockley-Read Hall [19] introduite par les défauts cristallin dus aux atomes d'impuretés (piège pour les électrons), la recombinaison radiative des photons et enfin la recombinaison d'Auger ou l'excès d'énergie peut être transféré à un électron ou un trou (Figure II.13).

II-4-1-1. Recombinaison SRH :

L'apparition des états électroniques dans le gap (défauts) par la présence d'impuretés et d'imperfections cristallines dans les semi-conducteurs, conduit au piégeage des électrons ou des trous pour les transférer ensuite vers la bande de conduction ou de valence [20], ce qui influe sur la conductivité des semi-conducteurs. Ces défauts peuvent être des centres de recombinaisons des paires électrons-trous par la capture d'un électron de la bande de conduction et un trou de la bande de valence provoquant ensuite leur recombinaison.

II-4-1-2. Recombinaison Auger :

Aux niveaux de dopage ou d'injection élevés, la recombinaison d'Auger peut être effectuée, [21], c'est une recombinaison à trois particules où l'énergie libérée lors de la recombinaison d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence

est transférée à un autre électron ou un autre trou [22]. Le processus de recombinaison d'Auger est non radiatif, il est spécifique aux semi-conducteurs à gap indirect.

II-4-1-3. Recombinaison radiative :

Les recombinaisons radiatives à la température ambiante dans le silicium sont directes, ou bande-à-bande [23], impliquant un électron de la bande de conduction et un trou de la bande de valence, l'excès d'énergie est libéré sous forme d'un photon d'énergie proche du gap. L'émission de photons résulte de la recombinaison radiative de porteurs, ainsi le taux global d'émission de photons correspond au taux de recombinaisons radiatives de porteurs.

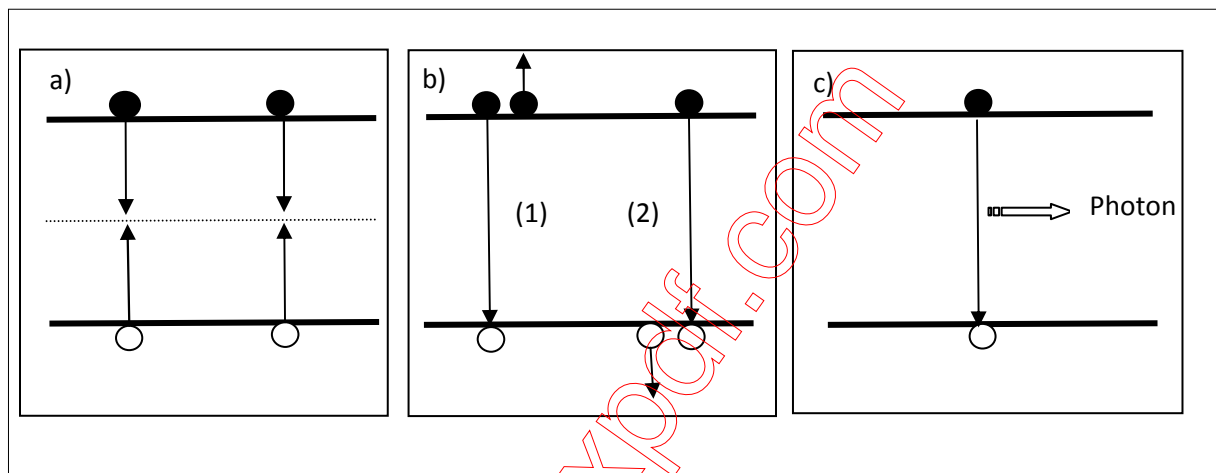


Figure II-13: Mécanismes de recombinaison

a) Recombinaison SRH, b) recombinaison Auger, c) Recombinaison radiative

II-5. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque conventionnelle :

La cellule photovoltaïque est composée par une jonction PN qui permet de séparer spatialement les électrons et les trous photo générés grâce à la variation du potentiel électrochimique au sein de cette structure. Les paires électrons-trous photo générés dans la zone de charge espace sont dissociées grâce au champ électrique interne: les trous sont accélérés vers la zone P et les électrons sont accélérés vers la zone N, créant ainsi un courant de génération. Dans les zones N ou P, les photos porteurs minoritaires générés diffusent et ceux qui atteignent la ZCE (dépendent de la longueur de diffusion L_D), sont propulsés par le champ électrique vers les zones où elles sont majoritaires et ils peuvent être collectés par les contacts ohmiques, créant d'un courant de diffusion. Ces deux contributions du courant s'ajoutent pour donner un photo-courant résultant I_{ph} . Le courant qui s'oppose au courant de

la diode s'appelle courant d'obscurité I_{obs} , résulte de la polarisation directe de la cellule. Le courant total I est :

$$I = I_{obs} - I_{ph} \quad (II-16)$$

Avec :

$$I_{obs} = I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right) \quad (II-17)$$

Où :

V : Le potentiel aux bornes de la jonction.

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode, il dépend de la concentration intrinsèque.

q : La charge des électrons ($q = 1,6 \cdot 10^{-19} C$).

K : La constante de Boltzmann ($K = 1,38 \cdot 10^{-23} J \cdot ^\circ K^{-1}$).

T : La température ($^\circ K$).

n : Le facteur d'idéalité de la diode (égale à 1 si la diode est idéale et égale à 2 si la diode est entièrement gouvernée par le phénomène de la génération/recombinaison).

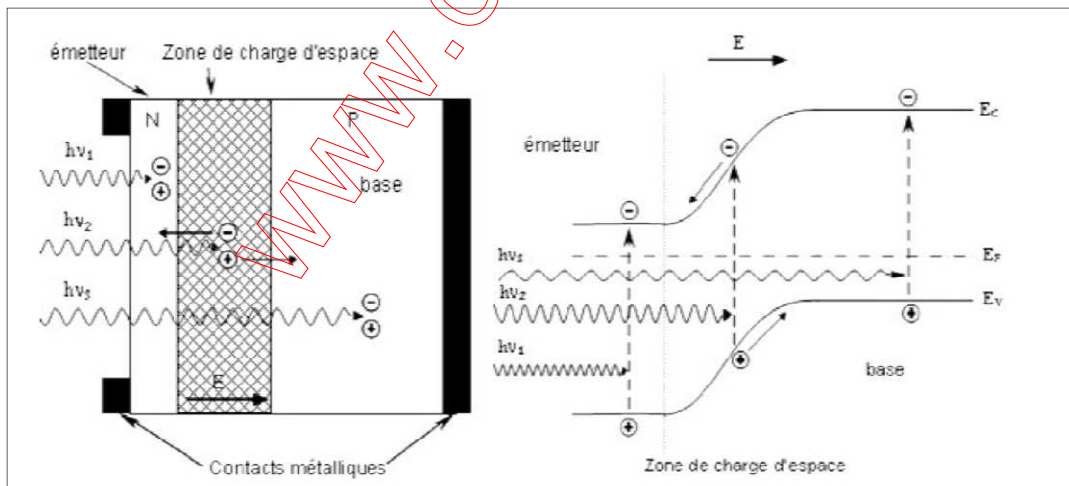


Figure II-14 : Structure et diagramme de bandes d'une cellule photovoltaïque.

La base présente une épaisseur assez grande ($\approx 250-300\mu m$) et elle est en général de type P : elle va fournir plus de porteurs. Afin d'éviter la recombinaison avec les porteurs majoritaires, la base est moins dopée (environ $10^{16} cm^{-3}$). En ce qui concernant l'émetteur, il présente une plus petite épaisseur ($\approx 0,2\mu m$) fortement dopée ($\approx 10^{20} cm^{-3}$) afin d'obtenir un

grand champ électrique dans la ZCE. L'épaisseur de la cellule photovoltaïque est choisie de manière à ce qu'un maximum des photons soit absorbé par le semi-conducteur.

II-6. Le calcul de photo-courant :

Soient les dimensions de la cellule photovoltaïque suivante :

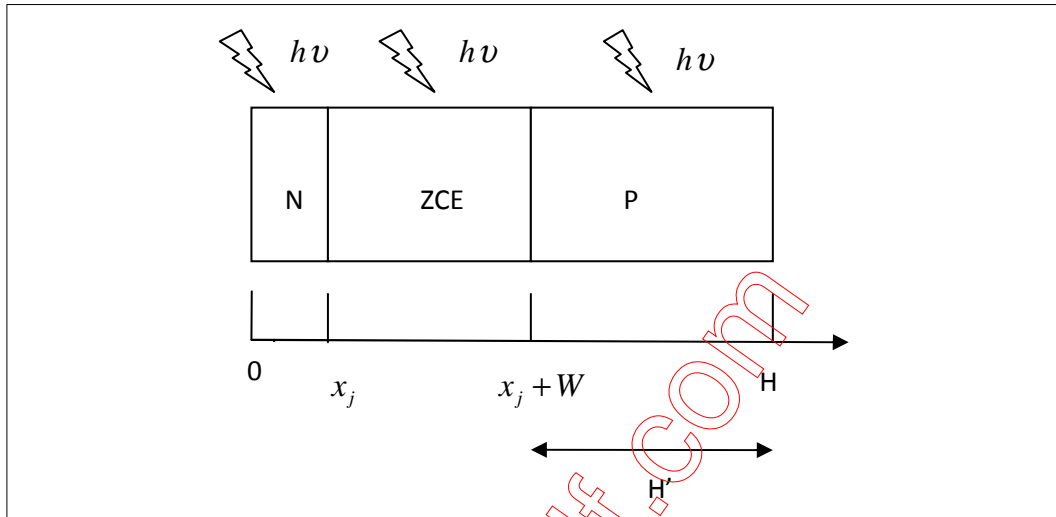


Figure II-15 : Schéma général d'une cellule photovoltaïque.

II-6-1. Le photo-courant du front (émetteur) :

Dans le cas général, le front ou l'émetteur est de type N, (à cause du bon contrôle de la diffusion du phosphore lors le dopage et le bon courant délivré par les cellules de type (n/p) à celle des cellules de types (p/n), les photos porteurs minoritaires sont donc les trous. On suppose qu'on est dans le cas de la faible injection, et que le champ électrique extérieur \$E\$ est nul et qu'on est dans le régime stationnaire ; L'équation de continuité s'écrit alors sous la forme:

$$D_p \frac{d^2}{dx^2} (p_n - p_{n_0}) + \hat{G} - \frac{(p_n - p_{n_0})}{\tau_p} = 0 \tag{II-18}$$

Avec \$\hat{G}\$, le taux de génération des photos porteurs, il est donné par la relation suivante:

$$\hat{G} = \alpha(\lambda) \cdot \phi_0 \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot x) \tag{II-19}$$

Avec :

\$\alpha(\lambda)\$: Le coefficient d'absorption du semi-conducteur en fonction de la longueur d'onde.

\$\phi_0\$: Le flux de photons incidents non réfléchis (transmis ou absorbés).

$R(\lambda)$: Le coefficient de réflexion en fonction de la longueur d'onde.

Le flux spectral des photons, ϕ_0 , parvenu à la surface frontale de l'émetteur d'une cellule solaire est facilement lié à l'éclairement énergétique spectral et à la longueur d'onde en tenant compte du fait que l'éclairement énergétique spectral est la puissance lumineuse par unité de surface et par unité de longueur d'onde.

$$\phi_0 = 10^{16} \cdot \frac{I_\lambda \cdot \lambda}{19,8} \left[\text{photon} / \text{cm}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{s} \right] \quad (II-20)$$

Avec :

I_λ : L'irradiance spectrale, il est en $(W \cdot m^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1})$.

λ : Longueur d'onde en (μm) .

$\frac{10^{16}}{19,8}$: Rapport provenu par l'énergie du photon incident $E_{ph} = h \cdot \frac{c}{\lambda}$.

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

c : La vitesse de la lumière, elle est égale à : $3 \cdot 10^8 m/s$.

L'équation (II-20) est très utile, car elle relie directement le flux spectral de photons par unité de surface et par unité de temps avec l'éclairement énergétique spectral.

Les conditions aux limites sont :

- à $x=0$, $D_p \cdot \frac{d}{dx}(p_n - p_{n_0}) = S_p (p_n - p_{n_0})$
- à $x=x_j$, $p_n = p_{n_0}$; dans la limite de la zone de charge espace, le champ intense collecte tous les photos porteurs créés de sorte $p_n = p_{n_0}$.

Après la résolution de l'équation (II-18), on trouve la densité de trous minoritaires créés comme suivant :

$$p_n - p_{n_0} = \frac{\alpha \phi_0 (1-R) \tau_p}{\alpha^2 L_p^2 - 1} \left\{ \frac{\exp(-\alpha x) + \frac{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) \cdot \text{sh} \left(\frac{x_j - x}{L_p} \right) + \exp(-\alpha x_j) \cdot \left[\frac{S_p L_p}{D_p} \cdot \text{sh} \left(\frac{x}{L_p} \right) + ch \left(\frac{x}{L_p} \right) \right]}{\frac{S_p L_p}{D_p} \cdot \text{sh} \left(\frac{x_j}{L_p} \right) + ch \left(\frac{x_j}{L_p} \right)} \right\} \quad (II-21)$$

La densité de courant de porteurs minoritaires (trous) provient seulement de la diffusion :

$$J_e = -qD_p \cdot \left. \frac{d(p_n - p_{n_0})}{dx} \right|_{x=x_j} \quad (II - 22)$$

Avec :

D_p : Le coefficient de diffusion des trous minoritaires photo créés dans l'émetteur.

L_p : La longueur de diffusion des trous minoritaires photo créés dans l'émetteur.

x_j : La profondeur de jonction.

S_p : La vitesse de recombinaison des trous minoritaires photo créés dans l'émetteur (type N).

τ_p : La durée de vie des trous minoritaires photo créés dans l'émetteur (type N).

p_{n_0} : La densité des trous minoritaires dans l'émetteur à l'équilibre thermodynamique.

p_n : La densité des trous minoritaires dans l'émetteur après l'éclairement.

On trouve finalement la relation du photo-courant de l'émetteur (type N) :

$$J_e(\lambda) = \frac{q\alpha\phi_0(1-R)L_p}{\alpha^2 L_p^2 - 1} \left\{ -\alpha L_p \exp(-\alpha x_j) + \frac{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) \exp(-\alpha x_j) \cdot \left[\frac{S_p L_p}{D_p} \cdot \operatorname{Ch}\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \operatorname{sh}\left(\frac{x_j}{L_p}\right) \right]}{\frac{S_p L_p}{D_p} \cdot \operatorname{sh}\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \operatorname{ch}\left(\frac{x_j}{L_p}\right)} \right\} \quad (II - 23)$$

II-6-2. Le photo-courant de la base :

En général, la base est de type P ; les photos porteurs minoritaires sont les électrons. Le courant est donc un courant des électrons. L'équation de continuité s'écrit dans ce cas sous la forme :

$$D_n \frac{d^2}{dx^2} (n_p - n_{p_0}) + \hat{G} - \frac{(n_p - n_{p_0})}{\tau_n} = 0 \quad (II - 24)$$

Les conditions aux limites, dans ce cas sont :

- à $x = x_j + W$, $n_{p_0} = n_p$.
- à $x = H$, $-D_n \frac{d}{dx} (n_p - n_{p_0}) = S_n \cdot (n_p - n_{p_0})$

La solution de l'équation de continuité dans ce cas est :

$$n_p - n_{p_0} = \frac{\phi_0(1-R)\tau_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \cdot \exp(-\alpha(x_j + W)) \left[ch\left(\frac{x-x_j-W}{L_n}\right) - \exp(-\alpha(x-x_j-W)) \cdot sh\left(\frac{x-x_j-W}{L_n}\right) \cdot \frac{\left(\frac{S_n L_n}{D_n}\right) ch\left(\frac{H}{L_n}\right) + \alpha L_n \exp(-\alpha H) + sh\left(\frac{H}{L_n}\right) - \exp(-\alpha H)}{\frac{S_n L_n}{D_n} \cdot sh\left(\frac{H}{L_n}\right) + ch\left(\frac{H}{L_n}\right)} \right] \quad (II-25)$$

Avec :

D_n : Le coefficient de diffusion des électrons minoritaires photo créés dans la base.

L_n : La longueur de diffusion des électrons minoritaires photo créés dans la base.

S_n : La vitesse de recombinaison des électrons minoritaires photo créés dans la base (type P).

τ_n : La durée de vie des électrons minoritaires photo créés dans la base (type P).

n_{p_0} : La densité des électrons minoritaires dans la base à l'équilibre thermodynamique.

n_p : La densité des électrons minoritaires dans la base après l'éclairement.

H : L'épaisseur de la cellule photovoltaïque.

H' : L'épaisseur de la base de la cellule photovoltaïque.

W : Largueur de la Zone de Charge Espace (ZCE).

Le courant des électrons minoritaires photos créées dans la base est un courant de diffusion :

$$J_b = qD_n \cdot \left. \frac{d(n_p - n_{p_0})}{dx} \right|_{x=x_j+W} \quad (II-26)$$

On trouve finalement la relation du photo-courant de la base (type P) :

$$J_b(\lambda) = \frac{q\phi_0(1-R)L_n\alpha}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \cdot \exp(-\alpha(x_j + W)) \cdot \left[\alpha L_n - \frac{\left(\frac{S_n L_n}{D_n}\right) \cdot \left[ch\left(\frac{H'}{L_n}\right) - \exp(-\alpha H') \right] + \alpha L_n \exp(-\alpha H') + sh\left(\frac{H'}{L_n}\right)}{\frac{S_n L_n}{D_n} \cdot sh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + ch\left(\frac{H'}{L_n}\right)} \right] \quad (II - 27)$$

II-6-3. Le photo-courant de la zone de charge espace (courant de génération) :

Le photo-courant résulte de la dissociation des paires électrons-trous dans la Zone de Charge d'Espace par le champ intense résulte dans cette dernière est donné par la relation suivante :

$$J_{ZCE}(\lambda) = q\phi_0(1-R)(1 - \exp(-\alpha W)) \cdot \exp(-\alpha x_j) \quad (II - 28)$$

II-6-4. Le photo-courant total :

La densité du photo-courant total est la somme des trois contributions du photo-courant des trois régions (l'émetteur, la base, la ZCE) comme suivant :

$$J_{ph}(\lambda) = J_{cc}(\lambda) = J_b(\lambda) + J_e(\lambda) + J_{ZCE}(\lambda) \quad (II - 29)$$

Avec :

J_{cc} : La densité de courant de court-circuit de la cellule solaire.

II-7. Le courant d'obscurité :

Le courant d'obscurité est le courant obtenu par la polarisation de la jonction PN qui constitue la cellule photovoltaïque (c-a-d la cellule sans excitation lumineuse). Donc pour calculer ce courant, on fait $\phi_0 = 0$ et $V \neq 0$ dans les équations (II-18) et (II-24) .

Le courant d'obscurité des trous dans l'émetteur est :

$$J_{oe} = \frac{qD_p n_i^2}{N_D L_p} \left[\frac{\frac{D_p}{S_p L_p} th\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + 1}{\frac{D_p}{S_p L_p} + th\left(\frac{x_j}{L_p}\right)} \right] \cdot \left(\exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right) \quad (II - 30)$$

Le courant d'obscurité des électrons dans la base est :

$$J_{ob} = \frac{qD_n n_i^2}{N_A L_n} \left(\frac{\frac{D_n}{S_n L_n} \operatorname{th} \left(\frac{x_j + W}{L_n} \right) + 1}{\frac{D_n}{S_n L_n} + \operatorname{th} \left(\frac{x_j + W}{L_n} \right)} \right) \cdot \left(\exp \left(\frac{qV}{KT} \right) - 1 \right) \quad (II - 31)$$

Tandis que le courant d'obscurité total est :

$$J_o = J_{oe} + J_{ob} = J_0 \cdot \left(\exp \left(\frac{qV}{KT} \right) - 1 \right) \quad (II - 32)$$

Avec J_0 le courant de saturation de la jonction PN (de la diode), il dépend de la géométrie de la jonction et des paramètres de transport, et surtout de la concentration intrinsèque du semi-conducteur n_i .

II-8. Le modèle électrique d'une cellule photovoltaïque :

II-8-1. Le schéma équivalent idéal d'une cellule photovoltaïque :

Le schéma équivalent idéal d'une cellule photovoltaïque comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode parallèle qui modélise la jonction PN, et qui se repose sur l'équation du courant suivante:

$$I = I_{obs} - I_{ph} = I_0 \cdot \left(\exp \left(\frac{qV}{KT} \right) - 1 \right) - I_{ph} \quad (II - 33)$$

Avec :

$$I_{ph} = J_{ph} \cdot A \quad (II - 34)$$

$$I_0 = J_0 \cdot A \quad (II - 35)$$

A : La surface de la cellule photovoltaïque en cm^2 .

I : Le courant délivré par la cellule photovoltaïque.

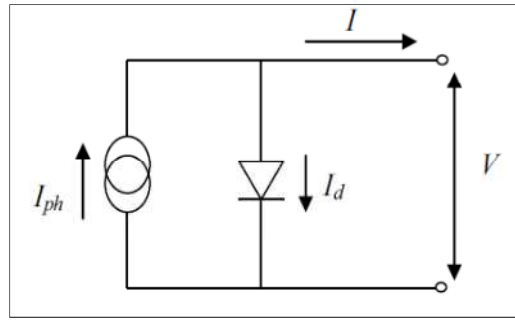


Figure II-16 : Le modèle électrique idéal d'une cellule photovoltaïque.

II-8-2. Le schéma équivalent réel d'une cellule photovoltaïque :

Pour tenir compte des limitations et des pertes de la cellule, et pour calculer le courant réellement délivré par la cellule photovoltaïque, on introduit le modèle réel qui comporte en plus une résistance série et une résistance parallèle ainsi qu'une deuxième diode en parallèle.

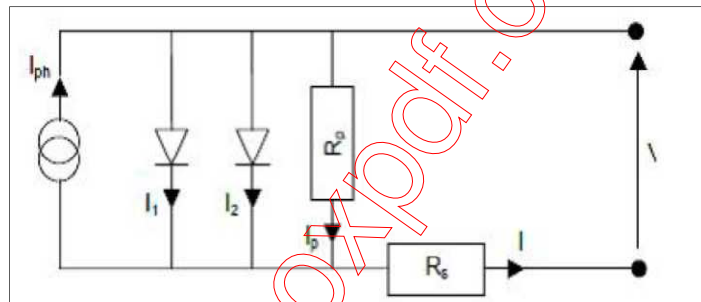


Figure II-17 : Le modèle électrique réel d'une cellule photovoltaïque.

La relation du courant délivré par la cellule photovoltaïque devient :

$$I = I_1 + I_2 + \frac{V - I \cdot R_s}{R_p} \tag{II - 36}$$

Ce qui implique :

$$I = I_{0_1} \cdot \left(\exp \left(q \cdot \frac{(V - R_s I)}{n_1 K T} \right) - 1 \right) + I_{0_2} \cdot \left(\exp \left(q \cdot \frac{(V - R_s I)}{n_2 K T} \right) - 1 \right) + \frac{(V - I \cdot R_s)}{R_p} - I_{ph} \tag{II - 37}$$

Avec :

R_s : La résistance série de la cellule photovoltaïque en (ohm), qui modélise les pertes dues aux contacts ohmiques.

R_p : La résistance de perte ou de shunt de la cellule photovoltaïque en (ohm).

I_{01} : Le courant de saturation de 1^{ère} diode en parallèle.

I_{02} : Le courant de saturation de 2^{ème} diode en parallèle.

Le modèle réel d'une cellule solaire est composé d'une source de courant qui modélise l'éclairement, et d'une diode D1 en parallèle d'un facteur d'idéalité ($n_1 \approx 1$) spécifiant le courant de diffusion dans l'émetteur et la base. La diode D2 en parallèle schématise, quant à elle, la recombinaison dans la zone de charge espace, elle a un facteur d'idéalité ($n_2 \approx 2$). La résistance de shunt (parallèle) modélise les pertes et les courants de fuites qui présents dans les bords de la cellule et dans l'émetteur, elle doit être importante. La résistance série caractérise les pertes résistives dans la base et l'émetteur, ainsi la résistance des contacts aux interfaces métal/semi-conducteur. Pour limiter leur influence sur le courant de la cellule, il faut que sa valeur soit la plus petite possible, en optimisant les contacts métal/semi-conducteur et on diminue ainsi la résistivité du matériau.

II-8-3. La caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque et ses paramètres caractéristiques:

En reposant sur les équations précédemment décrites qui relient le courant en fonction de la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque. La caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque est schématisée sur la Figure II-18 :

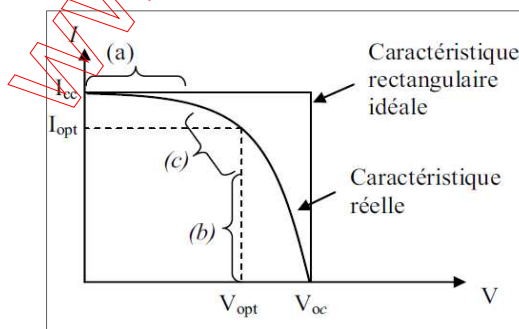


Figure II-18 : La caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque.

La Figure (II-18) se devise en trois régions :

- La région (a) : Dans cette région, la cellule se comporte comme une source de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement.

- La région (b) : Dans cette zone, la cellule se comporte comme une source de tension V_{oc} .
- La région (c) : Où l'impédance interne de générateur varie brusquement [5].

Les principaux paramètres qui caractérisent une cellule photovoltaïque sont :

➤ **Le courant de court circuit** I_{cc} :

C'est le courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule photovoltaïque ($V=0$), il augmente linéairement avec l'intensité d'éclairement et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde de rayonnement incident, de la mobilité des porteurs et aussi de la température.

➤ **La tension de circuit ouvert** V_{oc} :

C'est la tension obtenue quand le courant qui circule dans la cellule est nul ($I=0$). Il dépend peu de l'intensité lumineuse, mais dépend surtout de la résistance de shunt et décroît avec la température. La spéciale particularité de la tension de circuit ouvert est l'indépendance de la surface de la cellule, à la même température. Sa relation pour une cellule idéale est donnée par :

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1\right) \quad (II - 38)$$

➤ **Le facteur de Forme (FF)** :

La puissance délivrée par la cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance placée aux bornes de la cellule).

$$P = V \cdot I = \left(I_{ph} - I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right) \right) \cdot V \quad (II - 39)$$

Cette puissance est maximale, noté P_{max} , pour un point de fonctionnement nommé MPP : (Maximum Power Point), $P_{max}(I_m, V_m)$ de la courbe de la caractéristique $I(V)$ de la cellule photovoltaïque. Elle définit le point optimum de la cellule et est calculée analytiquement par la relation suivante :

$$\frac{dP}{dV} = 0 = I_{cc} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V_m}{V_T}\right) - 1 \right) - \frac{V_m}{V_T} I_0 \exp\left(\frac{V_m}{V_T}\right) \quad (II - 40)$$

Dans le MPP :

$$I_m = I_{cc} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V_m}{I_m}\right) - 1 \right) \quad (II-41)$$

Il s'en suit que :

$$V_m = V_{oc} - V_T \ln\left(1 + \frac{V_m}{V_T}\right) \quad (II-42)$$

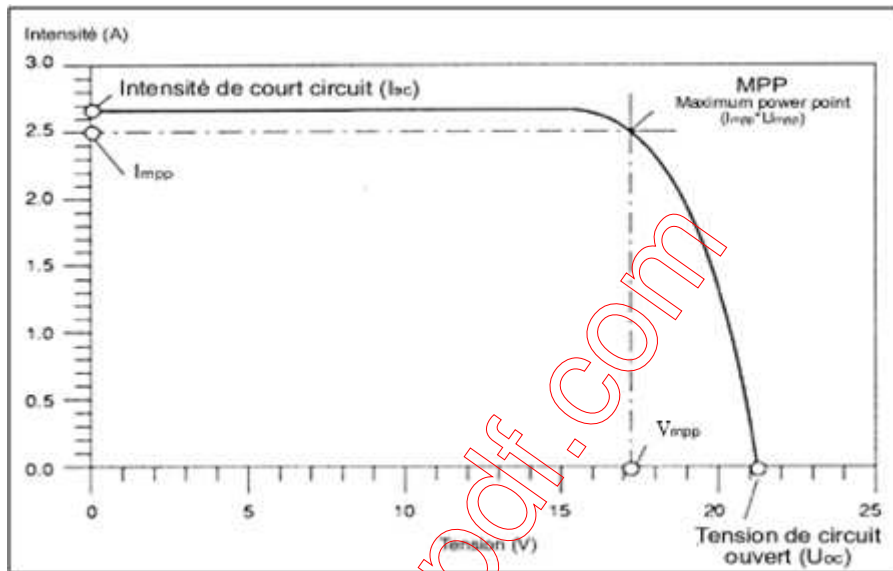


Figure II-19 : Le point MPP de la caractéristique I(V) de la cellule photovoltaïque.

Le facteur de forme de la cellule est le rapport entre la puissance maximale et le produit $I_{cc} \cdot V_{oc}$. Indiquant dans quelle mesure le dernier produit est de la puissance délivrée par la cellule photovoltaïque. Il est présenté en % :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (II-43)$$

Le FF peut être donné par une relation empirique comme suivant :

$$FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0,72)}{1 + v_{oc}} \quad (II-44)$$

L'index 0 sur FF indique la valeur de FF de la cellule idéale sans l'effet résistif pour la distinguer du FF de la cellule solaire avec des valeurs arbitraires des résistances séries.

v_{oc} est la valeur normalisée de la tension en circuit ouvert sur le potentiel thermique V_T comme suit :

$$v_{oc} = \frac{V_{oc}}{V_T} \quad (II - 45)$$

➤ Le rendement quantique :

C'est le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule photovoltaïque et la puissance lumineuse incidente. Il est exprimé en %.

$$\eta = \frac{V_m \cdot I_m}{G \cdot A} = FF \frac{V_{oc} \cdot I_{cc}}{G \cdot A} \quad (II - 46)$$

Avec :

G : L'irradiance total du spectre de photons incidents (W/cm^2).

A : La surface de la cellule (cm^2).

On observe que le rendement quantique d'une cellule photovoltaïque est proportionnel aux valeurs des trois principaux paramètres de la cellule : le courant de court circuit I_{cc} , le facteur de forme FF , la tension de circuit ouvert V_{oc} et l'irradiance incidente G .

II-9. Les différentes filières photovoltaïques :

II-9-1. La filière Silicium :

Les cellules au silicium sont à la base actuellement de près de 98% de la production industrielle photovoltaïque. Les cellules peuvent être faites à partir de plaquettes de Silicium cristallisé dans deux catégories distinctes. Le silicium monocristallin (mc-Si) et le Silicium poly cristallin (pc-Si). Le monocristallin est plus cher que le poly cristallin car il nécessite une pureté plus poussée dans sa fabrication, mais il présente un rendement plus intéressant, avec près de 24,5% contre 19% du rendement record sur les cellules polycristallines en laboratoire. Ces deux filières dominent le marché de vente avec environ 91% avec des modules photovoltaïques présentant des rendements de 15,4-17,4% [16] pour le silicium poly cristallin et 18-19,2% [16] pour le silicium monocristallin.

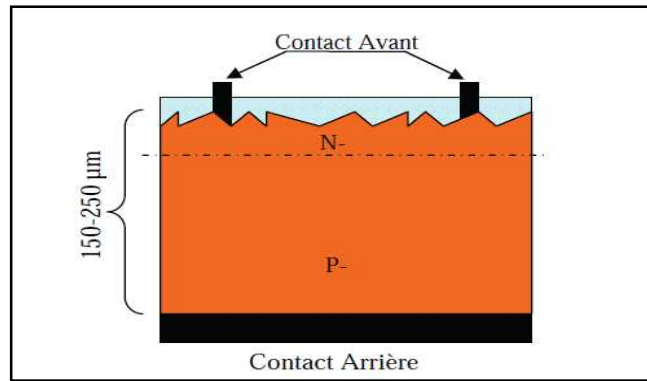


Figure 20 : Structure d'une cellule à base du silicium cristallin.

II-9-1-1. Les états du silicium:

Le silicium massif n'existe pas dans la nature à l'état pur. Il est extrait puis purifié à partir de la silice SiO_2 par différentes étapes de réduction et de purification chimique. Pour les applications microélectroniques et pour la fabrication des composants et dispositifs, le silicium est élaboré à l'état monocristallin sous forme de substrats massifs par les méthodes standard de Czochralski. En couches minces, les dépôts monocristallins de silicium sont obtenus par épitaxie en phase vapeur ou liquide. Selon l'application recherchée pour un dispositif voulu, d'autres techniques sont mises en jeu, telles que la méthode CVD ou le dépôt par sputtering, pour obtenir des couches minces de silicium dont la structure pourra être amorphe ou polycristalline.

A. Etat monocristallin :

La structure monocristalline est définie comme étant un arrangement ordonné et périodique d'atomes au sein d'un réseau cristallographique dont l'élément élémentaire est appelée maille [24]. Le silicium monocristallin a une structure cubique diamant, qui est une structure cubique à faces centrées (CFC) à motif, avec une distance inter-atomique ou paramètre de maille $a=2,35 \text{ \AA}$, et des angles de liaison bien définis [25], comme l'indique la figure (II.21.a).

B. Etat amorphe :

Cet état est systématiquement défini comme étant dépourvu d'ordre cristallin à longue distance par rapport à la distance inter-atomique. Les angles inter-liaison et les distances interatomiques ne sont pas respectés et seul un ordre à courte distance peut exister comme l'indique la figure (II.21.b). Le Silicium amorphe (a-Si), présente un coefficient d'absorption plus élevé dans le visible d'un facteur d'environ 100 par rapport au Silicium Cristallin, du fait du processus d'absorption plus efficace, à transitions directes. Cela peut envisager la

production de cellules à couches minces d'environ un micron d'épaisseur, qui permet de réduire significativement les coûts. Malgré leur faible rendement (6-9 %) par rapport au Silicium Cristallin, cette filière tend à se développer dans un contexte d'une éventuelle forte demande.

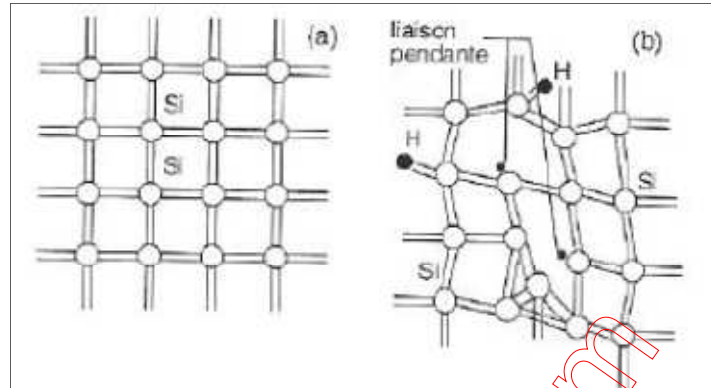


Figure II-21 : (a) : Structure monocristalline, (b) : amorphe [26].

B. Etat polycristallin :

Une structure polycristalline est considérée comme étant un état intermédiaire entre l'état monocristallin et l'état amorphe, elle est souvent considérée comme un mélange de ces deux phases. Le silicium polycristallin est constitué de grains monocristallins séparés entre eux par des zones désordonnées et riches de défauts cristallins, que l'on peut assimiler à du silicium amorphe et que l'on nomme joints de grains comme montre la figure II-22.

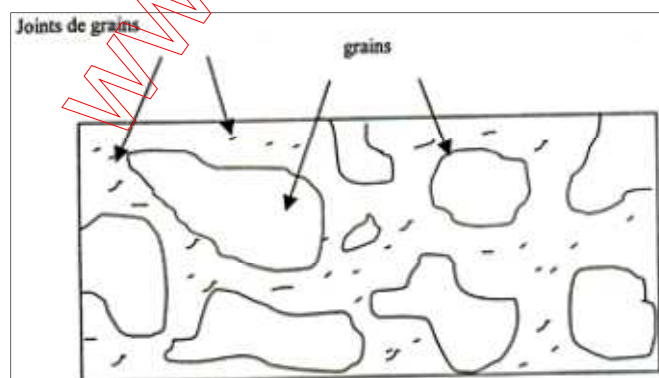


Figure II-22 : structure polycristalline.

Les modules en silicium cristallin sont fabriqués industriellement. Il en existe plusieurs techniques pour cette filière. La technique la plus réputée et la plus ancienne est la technique de Czochralski qui consiste à introduire un germe monocristallin dans le lingot du silicium en

fusion. Le silicium se solidifie sur ce germe en gardant la même structure cristalline de celui-ci. Afin de réduire les coûts, il s'est développé des techniques de production qui ne passent pas par le découpage des plaquettes, qui consomment de la matière et d'énergie, mais utilisent directement le tirage du ruban à partir de bains fondus.

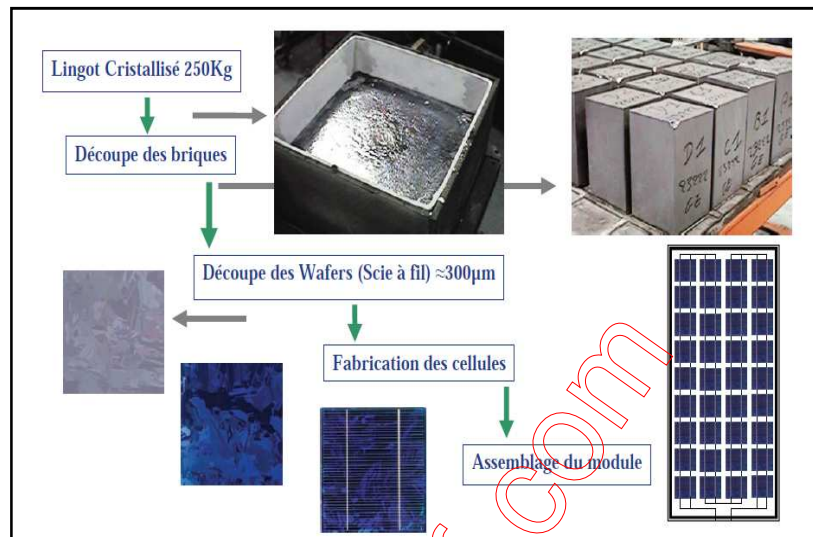


Figure II-23 : Les étapes de fabrication d'une cellule solaire à base du silicium cristallin.

La séquence de la fabrication d'une cellule photovoltaïque avec le silicium cristallin se divise en plusieurs étapes :

- Traitement de la surface de la cellule et texturisation.
- Formation de la jonction n+/p ou n+/pp+.
- Métallisation : Dépôt de la grille conductrice.
- Dépôt de la couche antireflet.
- Et les autres (encapsulation, etc,...).

A- Traitement de la surface de la cellule et texturisation

- **Préparation de la surface :**

Les substrats utilisés pour la fabrication des cellules sont en général de type P, dopés au Bore et d'orientation (100) et de résistivité comprise entre 0,3 et 3 Ω .cm. Elles sont issues à partir des lingots cylindriques du silicium obtenus par la méthode de croissance de Czochralski pour le silicium monocristallin, et par des procédés nouveaux entre autres celui de H.E.M [12], Silso [13], polyx [18], Soplin [14] pour le silicium multi cristallin. Leurs

surfaces sont brutes de sciage surtout depuis la mise au point de la scie à fil. Elles doivent donc être traitées afin d'éliminer les traits de scie ainsi que les graisses de sciage.

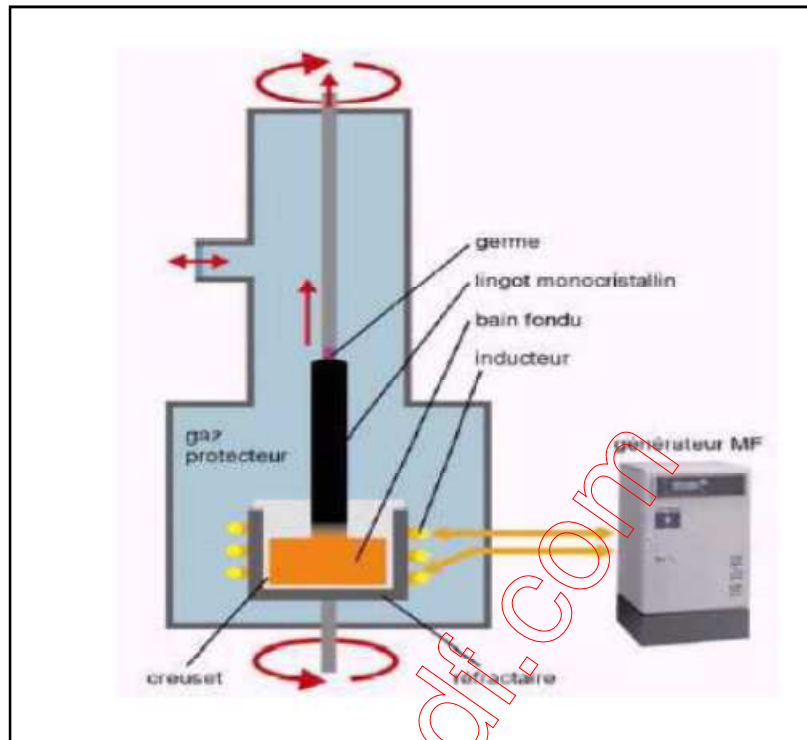


Figure 24: La méthode du Czochralski.

- **La texturisation :**

Comme il a été défini plus haut (II-3-4-1), la texturisation est une technique qui consiste à diminuer la réflexion à la surface de la cellule par attaque chimique sur cette dernière. Cette étape a l'avantage d'éviter l'étape de dépôt des couches antireflets. Par contre elle est mal adaptée au silicium semi cristallin (taux de cristallinité dans le silicium n'atteint jamais 100%) à cause de l'orientation aléatoire des grains.

- **B – Formation de la jonction :**

La jonction est formée par la diffusion d'une impureté dopante dans la région superficielle de la plaquette (substrat de type p). Le dopant généralement est le Phosphore qui va produire une couche de type n. La méthode la plus courante est la diffusion dans un four ouvert au Phosphore à partir d'une source liquide d'Oxychlorure de Phosphore ($POCl_3$), Solide de Pentoxyde de Phosphore P_2O_5 ou Gazeuse de phosphine (PH_3).

La profondeur de jonction est de 0,2-0,5 μm [15]. Il existe aussi d'autres techniques de diffusion telles que la diffusion par spin-on et l'implantation ionique.

C- Métallisation :

C'est l'étape principale après la formation de la jonction. Elle permet d'établir la liaison entre la structure et le circuit extérieur lors de l'assemblage des photopiles dans un cadre rigide. Pour cette métallisation, deux étapes sont généralement utilisées : l'évaporation sous vide et la sérigraphie. La surface arrière est entièrement métallisée tandis que sur la surface en avant, le contact métallique est sous la forme d'une grille conductrice dont la géométrie allie une collecte maximale de porteurs doublée d'une absorption photonique optimale.

D- Dépôt de la couche antireflet :

Le rayonnement solaire incident perd une partie de son énergie par la réflexion sur la surface. Nous cherchons à capter le maximum du spectre solaire incident utile. Pour cela, on dépose une couche antireflet sur la surface de la plaquette du semi-conducteur. Cette dernière doit être diélectrique, transparente et non absorbante. Plus de détails sur cette technique sont donnés en (II-3-4-1).

Une autre structure de silicium est le Silicium amorphe (a-Si), qui présente un coefficient d'absorption plus élevé dans le visible d'un facteur d'environ 100 par rapport au Silicium Cristallin, du fait du processus d'absorption plus efficace, à transitions directes. Cela peut envisager la production de cellules à couches minces d'environ un micron d'épaisseur, qui permet de réduire significativement les coûts. Malgré leur faible rendement (6-9 %) par rapport au Silicium Cristallin, cette filière tend à se développer dans un contexte d'une éventuelle forte demande.

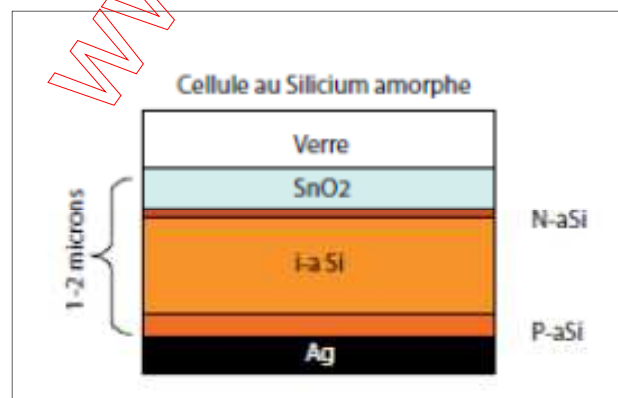


Figure II-25 : Structure d'une cellule photovoltaïque à base du Silicium amorphe.

Type de Silicium	Rendement en laboratoire	Rendement théorique	Rendement commercial	Domaines d'applications
Silicium Monocristallin	24,7%	27,0 %	14,0-16,0 %	Pour les modules de grandes dimensions sur les toits et façades d'immeubles. Pour l'espace (Satellites).
Silicium Polycristalin	19,8%	27%	12-14 %	Pour les modules de grandes dimensions sur les toits et façades. Pour générateurs photovoltaïque toutes tailles.
Silicium Amorphe	13%	25,0%	6,0%-8%	Pour les appareils de faibles puissance (les calculatrices, montres ...). Pour les modules de grandes dimensions pour intégration aux bâtiments.

Tableau II-2 : Rendements et domaines d'applications de diverses cellules solaires à base du Silicium [8].

II-9-2. Les filières hors Silicium : CIGS et CdTe :

Deux filières se sont imposées progressivement. L'une basée sur le Tellure de Cadmium noté CdTe et l'autre sur les alliages Cu (In, Ga) Se₂ (Cuivre Indium/Gallium Sélénium) notés CIGS. Des rendements records de 16,5% pour CdTe et de près de 20% pour le CIGS. Ces filières sont les mieux adaptées pour une utilisation en couches minces tout en délivrant de hauts rendements, parce qu'elles présentent des propriétés thermo-physiques et des caractéristiques chimiques permettent de déposer facilement les couches actives avec des épaisseurs petites.

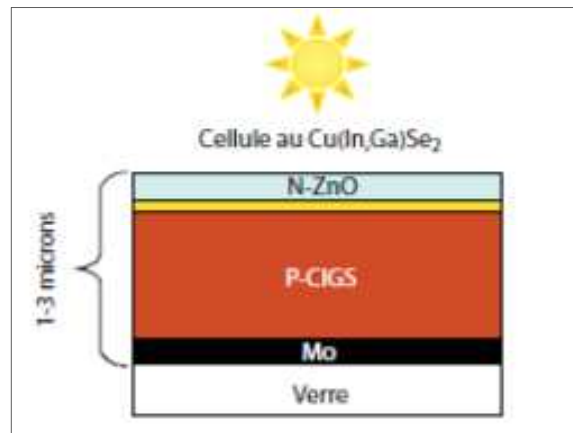


Figure II-26 : Structure d'une cellule photovoltaïque à base des matériaux CIGS.

II-9-3. Les cellules multi-jonctions à haut rendement :

Dans une simple jonction PN, les photons qui présentent des énergies inférieures au gap du matériau semi-conducteur, ne sont pas absorbés et par conséquent ne peuvent pas créer des paires électrons-trous, la réponse spectrale de la cellule est ainsi limitée. Seule la portion du spectre solaire dont l'énergie des photons est supérieure au gap est utile. Une première réponse à ce problème est d'empiler d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux constitués de simples jonctions possédant des gaps décroissants. Ainsi, il est possible d'exploiter la quasi-totalité du spectre solaire avec des hauts rendements de conversion d'environ 40% avec l'association de semi-conducteurs de types III-V [6].

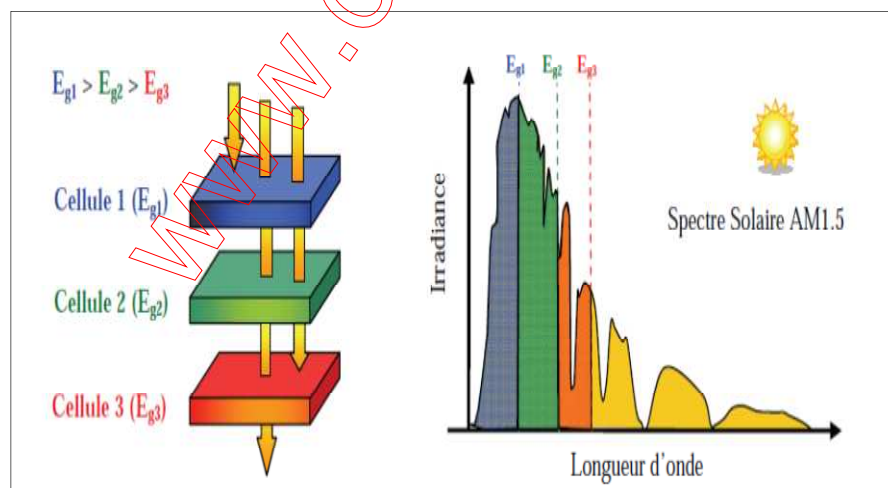


Figure II-27 : les cellules multi-jonctions.

II-10. Influence des pertes physiques et technologiques sur le rendement de la cellule photovoltaïque :

Le rendement d’une cellule photovoltaïque peut être exprimé en tenant en compte sur les pertes sous la forme suivante [7] :

$$\eta = \frac{\int_0^{\lambda_g} P(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{E_g \int_0^{\lambda_g} N(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{qV_{oc}}{E_g} \cdot FF \cdot (1-R) \cdot \frac{S - S_{metal}}{S} \cdot \eta_{\alpha} \cdot \eta_{COL} \tag{II-47}$$

Facteurs : (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8)

Ces différentes pertes sont dues soit aux restrictions purement physiques liées au matériau, soit aux limitations technologiques liées au processus de fabrication.

II-10-1. Les pertes physiques :

(1) Pertes dues aux photons de grande énergie que le gap :

Tout les photons incidents qui possédant une longueur d’onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ($\lambda \geq \lambda_g$) ne peuvent générer de paires électrons-trous et seront donc perdus. Les mécanismes d’absorption assistées par phonons permettent néanmoins de repousser la limite inférieure de l’énergie correspondant au gap du semi-conducteur (1,052 eV au lieu 1,124 eV dans le cas du Silicium). Sous l’irradiance AM1.5G, ces pertes sont évaluées à peu près de 23,5% pour le cas du Silicium [6].

(2) Pertes dues à l’énergie excédentaire des photons :

Tout photon absorbé peut créer une seule paire électron-trou. L’excès d’énergie supérieure au gap du semi-conducteur est principalement dissipé sous forme de chaleur (thermalisation). Sous AM1.5G, ces pertes sont évaluées à environ 33% dans le cas du Silicium [6].

(3) Le facteur de tension :

C'est le rapport de la tension maximale développée par la cellule V_{oc} par la tension du gap $\frac{E_g}{q}$. La tension aux bornes de la cellule V_{oc} est qu'une portion de la tension du gap à cause de la chute de tension aux niveaux des contacts. La meilleure tension de circuit ouvert d'une cellule à haute rendement est de l'ordre de 700 mV.

(4) Facteur de forme (FF) :

L'équation de courant-tension est sous forme exponentielle du type $\left(\exp\left(\frac{qV}{KT}\right) \right)$

donc elle ne peut jamais être rectangulaire, même dans le cas d'une cellule idéale, le facteur de forme ne va pas au-delà de 0,89. Ce facteur dépend fortement des paramètres technologiques modélisés par les résistances séries et de shunts.

II-10-2. Les Pertes technologiques :**(5) La réflectivité :**

Une partie de l'énergie lumineuse incidente sur la surface (non métallique) de la cellule va être réfléchi. Le coefficient de réflexion est optimisé par les techniques de traitements de la surface et par les couches antireflets.

(6) Le taux d'ombrage :

Les contacts métalliques (d'une surface S métallique) qui présentent sur la face avant de la cellule photovoltaïque entraînent des pertes de puissance, puisque elles couvrent une partie de la surface S de la cellule.

(7) Rendement d'absorption :

À cause de l'épaisseur limitée de la cellule, un nombre considérable des photons qui ont une énergie requise, traverse l'épaisseur de la cellule sans être absorbé. Des techniques de réflexion sur la face arrière (pour les cellules à base de Silicium cristallin (n+/p)) sont réalisées pour absorber le maximum de ces photons, pour augmenter le rendement.

(8) Rendement de collecte :

C'est le rapport entre le nombre des porteurs collectés et le nombre des porteurs photogénérés. Certains porteurs photogénérés peuvent se recombinier dans le volume de la cellule et à la surface, tout dépend de la durée de vie des porteurs τ .

II-11. Le rendement quantique et la réponse spectrale :

Le rendement quantique est un facteur important de la cellule photovoltaïque. Il représente le nombre d'électrons produits dans un circuit extérieur par la cellule pour tout photon incident du spectre solaire. Il y a deux types de rendement quantique : l'un extérieur et l'autre intérieur.

Dans le cas du rendement quantique intérieur, seul le rayonnement absorbé est pris en considération, en revanche dans le cas de rendement quantique extérieur, il est déterminé par rapport au rayonnement incident. Les équations respectives des rendements quantiques intérieur et extérieur sont :

$$RQI = \frac{J_{cc}(\lambda)}{q\phi_0(1-R)} \tag{II-48}$$

$$RQE = \frac{J_{cc}(\lambda)}{q\phi_0} \tag{II-49}$$

Plusieurs paramètres diminuent le rendement quantique comme : la recombinaison en surface et en volume (la Base), la réflexion sur la face avant où les longueurs de diffusion des porteurs photos créés sont faibles.

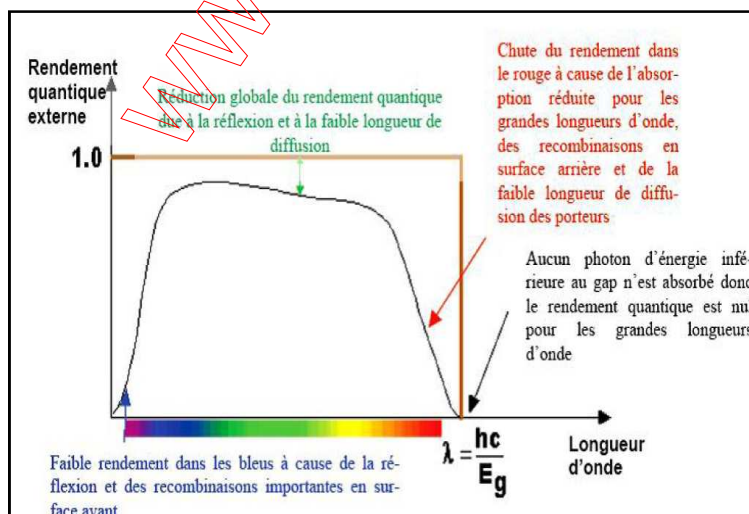


Figure II-28: Le Rendement quantique extérieur d'une cellule Photovoltaïque.

La réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant de court-circuit et l'irradiance spectrale. Les équations des réponses spectrales internes et externes sont respectivement:

$$RSI = \frac{J_{cc}(\lambda)}{I_{\lambda} \cdot (1-R)} \quad (II-50)$$

$$RSE = \frac{J_{cc}(\lambda)}{I_{\lambda}} \quad (II-51)$$

L'unité est en A/W.

II-12. Influence du champ électrique supplémentaire :

Les pertes dues à la recombinaison des porteurs de charges dans la base et dans la surface de la cellule (front), peuvent être réduites en améliorant la qualité du matériau et en diminuant la profondeur de la jonction x_j , ainsi que la vitesse de recombinaison en surface S . Elles peuvent aussi l'être en augmentant la vitesse des porteurs, en créant d'un champ électrique supplémentaire en surface (front) ou dans la base de la cellule. Celui-ci peut être obtenu de deux façons différentes:

- A l'aide d'un gradient de dopage.
- Par un gradient de bandes interdites successives.

1- Par un gradient de bande interdite :

Le front constitue une large bande interdite qui diminue progressivement jusqu'à la jonction. La partie où la bande interdite est variable constitue d'un générateur supplémentaire et va créer ainsi un champ électrique, en reposant sur la relation suivante :

$$E = \frac{1}{q} \cdot \frac{dE_g}{dx} \quad (II-52)$$

On obtient une bande interdite variable par des alliages, la variation de cette bande interdite signifie que le paramètre cristallin va aussi modifier. Par conséquent, celui-ci induit des contraintes élastiques si l'écart entre les paramètres cristallins est faible et de nombreux défauts si l'écart est élevé. Donc la durée de vie se dégrade significativement. On est limité à l'utilisation des alliages comme $Al_xGa_{1-x}As$ qui présentent des paramètres cristallins un peu faibles par rapport à d'autres Alliages ($a = 5,8 \mu\text{m}$) [17].

2- Par un gradient de dopage :

Si $N_i(x)$ le profil de concentration d'impuretés, le champ électrique créé est donné par :

$$E = \frac{D}{\mu} \cdot \frac{1}{N_i} \cdot \frac{dN_i(x)}{dx} \tag{II-53}$$

• **Existence d'un champ électrique sur le front n^+ :**

Ce cas est réaliste dans les cas des jonctions uniformes (les photopiles réalisées par diffusion), l'émetteur étant plus dopé que la base. Dans le cas des photopiles n^+n/p diffusées (Figure (II-29)), l'équation (II-18) devient :

$$D_p \frac{d^2}{dx^2} (p_n - p_{n_0}) - \frac{d}{dx} (E\mu_p p_n) + \alpha(\lambda) \cdot \phi_0(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot x) - \frac{(p_n - p_{n_0})}{\tau_p} = 0 \tag{II-54}$$

Les conditions aux limites sont :

- En $x = 0$, $D_p \frac{dp_n}{dx} - E\mu_p p_n = S_p (p_n - p_{n_0})$
- En $x = x_j$, $p_n = p_{n_0}$

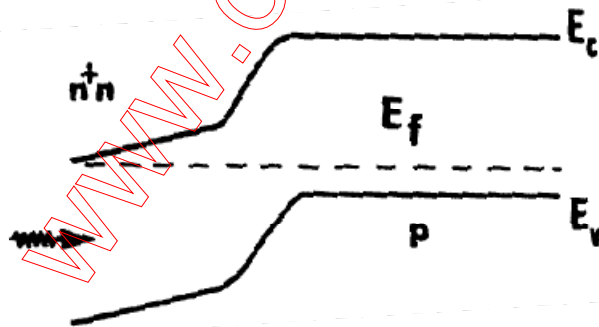


Figure II-29 : Photopile n^+n/p à gradient de concentrations dans la zone frontale, le champ créé améliore la collecte des trous.

En supposant que E, μ, τ sont constants et en posant :

$$\ell = \frac{2KT}{qE} \tag{II-55}$$

$$L_p' = \frac{L_p \ell}{\sqrt{L_p^2 + \ell^2}} \tag{II-56}$$

La résolution de l'équation (II-54) donne :

$$J_e(\lambda) = \frac{q\alpha\phi_0(1-R)L_p'}{\left(\alpha + \frac{1}{\ell}\right)^2 L_p'^2 - 1} \left\{ \left[\left(\alpha + \frac{1}{\ell}\right) \cdot L_p' - 1 \right] \exp(-\alpha x_j) + \frac{\left(\frac{S_p L_p'}{D_p} + \frac{L_p'}{\ell}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{x_j}{\ell}\right) - \exp\left(\left(\frac{1}{L_p'} - \alpha\right) \cdot x_j\right) \right] + \left(\alpha + \frac{1}{\ell}\right) \cdot L_p' \exp\left(\frac{x_j}{\ell}\right) - \exp\left(\left(\frac{1}{L_p'} - \alpha\right) \cdot x_j\right)}{\left(\frac{S_p L_p'}{D_p} + \frac{L_p'}{\ell}\right) \cdot \text{sh}\left(\frac{x_j}{L_p'}\right) + \text{ch}\left(\frac{x_j}{L_p'}\right)} \right\} \quad (II-57)$$

Pour que $\alpha x_j \geq 1$ et pour $L_p' \cong \ell$ l'équation (II-57) devient alors :

$$J_e = \frac{q\phi_0(1-R)}{1 + \frac{1}{2} \frac{S_p \ell}{D_p} \left(1 - \exp\left(\frac{2x_j}{\ell}\right) \right)} \quad (II-58)$$

Cette relation montre que la profondeur de la jonction est remplacée par une profondeur équivalente KT/qE , d'autant plus faible que le champ est élevé. Le rôle de la base et de la zone de charge d'espace reste inchangeable.

II-13. Les photopiles à champ électrique arrière :

La base de ce type de photopiles est constituée par deux régions : la base proprement dite et une zone très dopée sur le contact arrière, une telle structure entraîne deux conséquences : création d'une petite barrière de potentiel V_b et un confinement des porteurs de charges dans la base. De cette façon, on récupère une partie des électrons perdus créés à l'arrière au voisinage du contact ohmique où $S \approx \infty$. Dans le cas des cellules photovoltaïques au silicium, cette astuce technologique est particulièrement intéressante parce qu'on améliore la réponse spectrale dans les régions des basses énergies du spectre solaire.

II-14. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les points importants de la physique de la cellule photovoltaïque pour la compréhension du sujet. Nous avons rappelé le principe de fonctionnement d'une cellule solaire et nous avons calculé le photo-courant fourni par la cellule en premier temps, ensuite nous avons montré les modèles électriques idéal et réel de la photopile, ainsi que leurs principaux paramètres caractéristiques. Par la suite, nous avons rappelé la technique de fabrication d'une cellule solaire à base de silicium cristallin et les types actuels des cellules photovoltaïques. Finalement nous avons étudié l'influence du champ électrique supplémentaire sur les performances de la cellule.

Alors dans le chapitre suivant, on parlera un peu sur le logiciel utilisé pour la simulation qui est le PSpice.

Bibliothèque du Chapitre II :

- [1] : Alain Ricaud, Valbonne, septembre 2011, *European Master in Renewable Energy*.
- [2] : *Energie Solaire Photovoltaïque, volume 1 physique et technologie de la conversion photovoltaïque*, B.Equer, Directeur de recherche au CNRS, Ecole Polytechnique, UNESCO 1991.
- [3]: 2002 *Modeling photovoltaic systems using PSpice*, Luis Castaner and Santiago Sylvester, Universidad Politecnica de Cataluña Barcelona , Spain.
- [4]: Queen, M.A. and keevers, M, "Optical properties of intrinsic silicon at 300 °K progress in photovoltaic's", P 189-92, VOL. 3 .N03 1995.
- [5] : Thèse de Magister Micro-électronique –Photovoltaïque, Bendjellouli Zakaria, Université de Bechar, juin 2009, « contribution à la modélisation d'une cellule solaire ».
- [6] : Thèse de doctorat d'Université de Toulouse III (France), M. Petibon Stéphane, le 20 /01/2009, « Nouvelles architectures distribués de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ».
- [7] : Mémoire de Magister en Physique, école doctorale énergie renouvelable « Etude de silicium poreux destiné aux cellules solaires » Université de Constantine. Mai 2009. Ouddah Mourad.
- [8]: <http://www.espci.fr/recherche/labos/upr5/fr/themes-optique/theme1.htm> (Consulté le 15/05/2013).
- [9]: K. Shirasawa, H. Takahachi, Y. Inomata, K. Fukui K. Okada, M. Takyama and H. Watanabe, *Pro 12th EC PVSEC*, Amsterdam, April 1994.
- [10]: A.Mouhoub. « Procédés Technologiques Alternatifs de Réalisation des Photopiles Solaires au Silicium Cristallin» *Rev.Energ.Ren.* Vol 4, 2001.
- [11]: Mémoire de Magister, Nait Kaci Faiza, "Etude et réalisation de couches d'oxynitrure de silicium sur un substrat de Silicium Monocristallin ou Multi cristallin " Université de Boumerdèse, 27/06/2010.

- [12]: H.Herzer, "The development of the Wafer cost and availability for the photovoltaic industry: Ribbon/Sheet approaches and its comparison with wafers: Efficiency-cost Trade-Off" *Proc.10th EC PVSEC, Lisbon, 1991.*
- [13]: C.P.Khattak, F.Schmid, *Proc.6th int. Photovoltaic Siemens and engineering conference (PVSEC-6) New Delhi, India, Feb.10-14-1992.*
- [14] : J.Fally, E Fabre, B .Chabot, *Rev de l'énergie, 819, 761 (1986).*
- [15] : R.Smati, *Mémoire de fin étude, UDTS Alger 1992.*
- [16] : http://www.q-cells.com/en/products/solar_cells.html#3364 (Consulté le 15/05/2013).
- [17]: B. G. Yacobi, "Semiconductor Materials, An Introduction to Basic principles" Kluwer academic publishers, University of Toronto, Canada, ISBN: 0-306-47361-5, 2004.
- [18]: J. Dietl, D. Elmreich, E.Sirtl, 'Crystals: Growth, Properties and Applications'. Springer-Verlag (1981).
- [19]: S. M. Sze, "Physics of semiconductor Devices", Edit. Wiley, New York, 1969.
- [20] :Y. Sayad, 'Détermination de la longueur de diffusion des porteurs de charge minoritaires dans le silicium cristallin par interaction lumière matière', Thèse de Doctorat N°Ordre 2009-ISAL-0053. Institut national de sciences appliquées de Lyon (France), Année 2009.
- [21]: R. N. Hall, "Electron-Hole Recombination in Germanium," *Phys Rev.*87, 387 (1952).
- [22]: P. P. Altermatt, J. Schmidt, G. Heiser, A.G. Aberle, "Assessment and parameterization of Coulomb-enhanced Auger recombination coefficients in lowly injected crystalline silicon", *J.Appl.Phys.*82. (1977), 4938-4944.
- [23] : Y. Veschetti, 'Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures Photovoltaïques sur substrat de silicium mince', Thèse de Doctorat, Physique des semi-conducteurs, Université Louis Pasteur Strasbourg (France), Octobre 2005.
- [24]: A. K. Ghosh, C. Fishman, and T. Feng, "Theory of the electrical and photovoltaic properties of polycrystalline Silicon", *J.Appl.Phys.* Vol.51, No.1, January 1980, pp 446-454.
- [25]: M. Johnson, *Unified Set of Models for Minority Carrier Transport Parameters In Heavily Doped Monosilicon And Polysilicon*", *International workshop on VLSI process and Device modeling, (1993 VPAD), (1993), pp.178-179.*

[26]: C. Feldman, N. A. Blum, H. K. Charles, Jr. and F. G. Satkiewicz, *J. Electron.*

“Evaporated polycrystalline silicon films for photovoltaic applications - grain size effects”

Mat. 7, (1978)309.

www.oxpdf.com

Chapitre III :
Le logiciel PSpice

www.exploit.com

III-1. Introduction :

L'ingénierie photovoltaïque est une spécialité multidisciplinaire profondément enracinée dans la physique du semi-conducteur et de la technologie de la cellule solaire. Elle est dépendante de l'ingénierie électrique et électronique pour la conception d'un système d'analyse. La conception et l'analyse des systèmes photovoltaïques sont des tâches importantes souvent nécessitant l'aide d'ordinateurs pour effectuer des calculs rapides et précis. Dans ce chapitre, on présente tout d'abord le logiciel utilisé pour la simulation de la cellule photovoltaïque étudiée dans ce travail, qui est PSpice (Créé par des étudiants en informatique de l'université de Berkeley en Californie dans les années 70, pour la conception des circuits intégrés analogiques). Ensuite et à titre d'exemple, on présente quelques exemples de simulation des spectres solaires $AM0$ et $AM1,5G$ déterminés par ce logiciel.

III-2. Pourquoi simuler une cellule photovoltaïque? :

La simulation est un aspect avancé très important utilisé actuellement dans presque tous les laboratoires de recherche à travers le monde. La simulation numérique d'une cellule solaire est utilisée couramment pour l'optimisation de ses caractéristiques électriques, en plus de leur évolution au cours d'une période de temps donnée (par exemple la puissance maximale d'une cellule solaire).

En effet, la simulation numérique présente les avantages suivants :

- Elle est plus rapide et moins coûteuse qu'une recherche expérimentale,
- Les modèles théoriques et les codes numériques sont connus ou établis si nécessaire,
- Les étapes critiques sont simulées en quelques heures avec des moyens informatiques adéquats, alors qu'une expérimentation peut prendre plusieurs jours ou semaines avec tous les aléas du matériel,
- Elle est indépendante de la technologie utilisée (on peut donc varier à souhait les paramètres de la cellule),
- Elle permet d'éviter la fabrication de plusieurs prototypes de la cellule avec des paramètres différents,
- La simulation donne à l'ingénieur ou le chercheur la possibilité de réaliser puis tester un prototype virtuel d'une cellule photovoltaïque.

III-3. Présentation du logiciel PSpice :

Le logiciel PSpice a été conçu pour éliminer autant que possible l'étape du prototype lors de la conception des circuits intégrés. Il a depuis évolué vers un outil d'usage beaucoup plus général et plus courant utilisé dans l'industrie électronique. Le logiciel PSpice apporte des améliorations aussi bien au niveau de la simulation avec :

- Une vitesse d'exécution plus élevée,
- Une meilleure convergence,
- Une amélioration substantielle de la partie consacrée à la modélisation comportementale et la simulation logique.

Qu'au niveau de l'interface utilisateur avec en amont :

- Une saisie de schémas,
- Un générateur de modèles,
- Un éditeur de stimuli (éditeur de forme d'onde d'entrée graphique).

Et en aval :

- Un outil de visualisation graphique des résultats, ces outils ont été portés sous l'environnement Windows.

PSpice est la norme la plus populaire pour la simulation analogique et signaux mixtes. Les ingénieurs s'appuient sur PSpice pour une analyse précise et robuste de leurs conceptions. Les universités et les fabricants des semi-conducteurs travaillent avec PSpice, et également pour fournir les modèles PSpice pour les nouveaux périphériques.

PSpice est un outil de simulation puissant et robuste et fonctionne également avec Orcad capture1, concept1 HDL, ou des schémas PSpice dans un environnement intégré où les ingénieurs créent des dessins, mettent en place et exécutent des simulations, et analysent enfin leurs résultats. Plus de détails et d'informations sont donnés dans le site officiel de PSpice [1]. Nous avons utilisé dans ce travail une version de PSpice student 9.1, qui est fournie gratuitement et téléchargeable librement.

III-4. Les Composantes de PSpice :

Les principaux composants du logiciel PSpice sont cités comme suit [2] :

✓ Capture Student :

Capture student est un programme de saisie de conception dont on a le besoin pour préparer notre circuit de la simulation, cela signifie :

- 1- Mise en place et le raccordement des symboles partie (Diode, résistance série, les sources de courant....., etc.),
- 2- La définition des valeurs de composants et d'autres attributs,
- 3- La définition des formes d'ondes d'entrée,
- 4- La permission d'une ou plusieurs analyses.

✓ Stimulus Editor :

Stimulus Editor est un éditeur de forme d'onde d'entrée graphique qui nous permet de définir la forme des signaux temporels utilisés afin de tester la réaction de notre étude lors de la simulation.

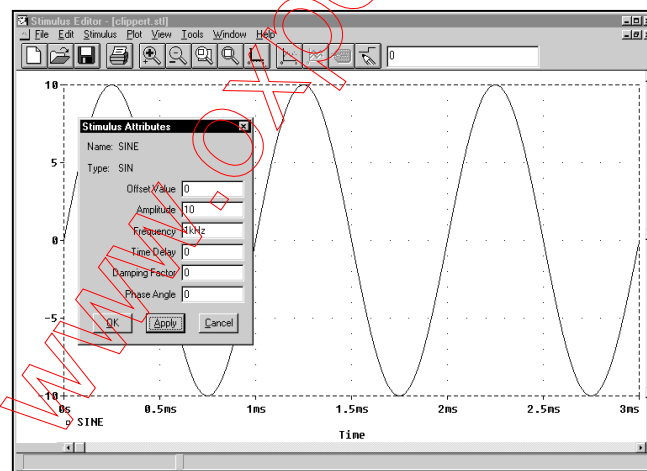


Figure III-1 : Fenêtre d'un Stimulus Editor.

✓ Model Editor :

Le Model Editor est un modèle d'extraction qui génère la définition du modèle de PSpice à utiliser lors de la simulation. Tout ce que l'éditeur de ce modèle a besoin dans cette étape, ce sont les informations sur le périphérique qui se trouvent dans les fiches techniques standards. Lorsque vous visualisez dans la feuille des données d'informations, l'éditeur du modèle affiche les courbes de caractéristiques du dispositif afin que vous puissiez vérifier le modèle basé sur le comportement du dispositif.

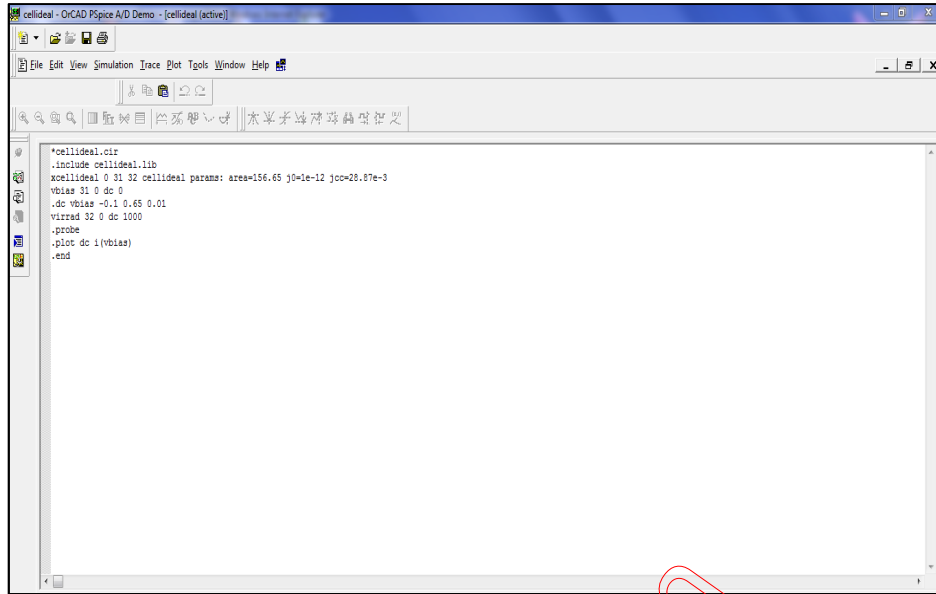


Figure III-3 : Fenêtre du logiciel PSpice AD utilisé en simulation numérique.

Les résultats de simulation sous forme graphique sont montrés dans la Figure (III-4) :

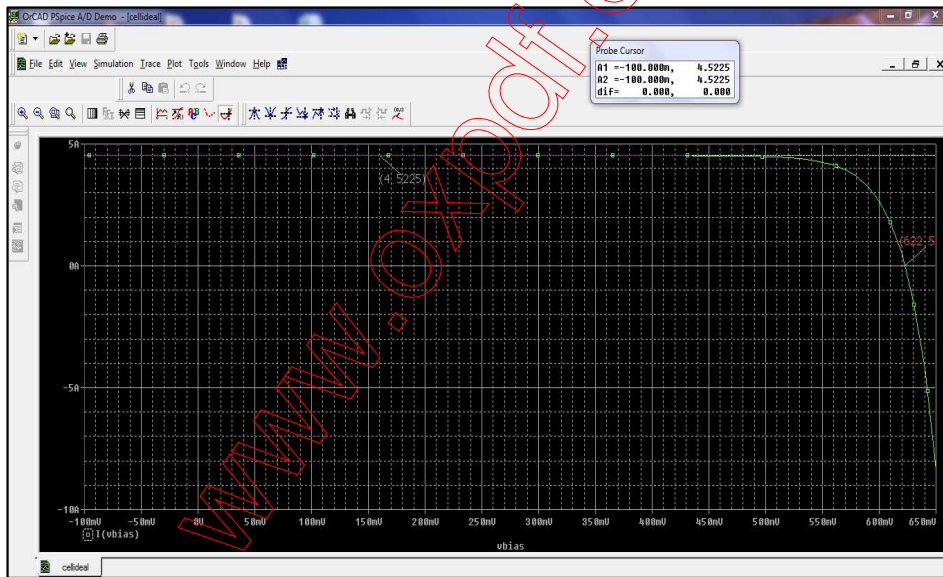


Figure III-4 : Résultats de la simulation.

Dans ce menu, il est présenté :

- La caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque à base du silicium cristallin,
- La tension de circuit ouvert ($V_{oc} = 622\text{mV}$),
- Le courant de court-circuit ($I_{cc} = 4,522\text{A}$).

III-5. Piecewise Linear Source (PWL) de PSpice :

Dans les applications photovoltaïques, les contributions au système sont généralement les valeurs de l'éclairement et de la température, ce qui ne peut pas être décrit par une sorte d'impulsion électrique d'une source sous PSpice. Cependant, une description facile des sources arbitraires en forme est disponible dans PSpice sous la dénomination : (Piecewise Linear Source (PWL)), elle très convenable pour la description de nombreuses variables dans le photovoltaïque.

III-6. Modèle PSpice du spectre solaire Air-Mass 1,5 Global (AM1,5G) :

Le spectre reçu à une surface inclinée 42° et face au soleil est nommé spectre *AM1,5G* et ses valeurs de données, généralement prises de la référence [3], sont couramment utilisées comme étalon dans l'ingénierie photovoltaïque.

Un moyen facile d'incorporer le spectre standard dans les circuits PSpice, est d'écrire un sous-circuit qui contient tous les points de données de ce spectre dans la forme d'une source PWL. Le résultat graphique de la simulation par PSpice du spectre *AM1,5G* normalisé à 1000 W/m^2 est illustré sur la (Figure III-5).

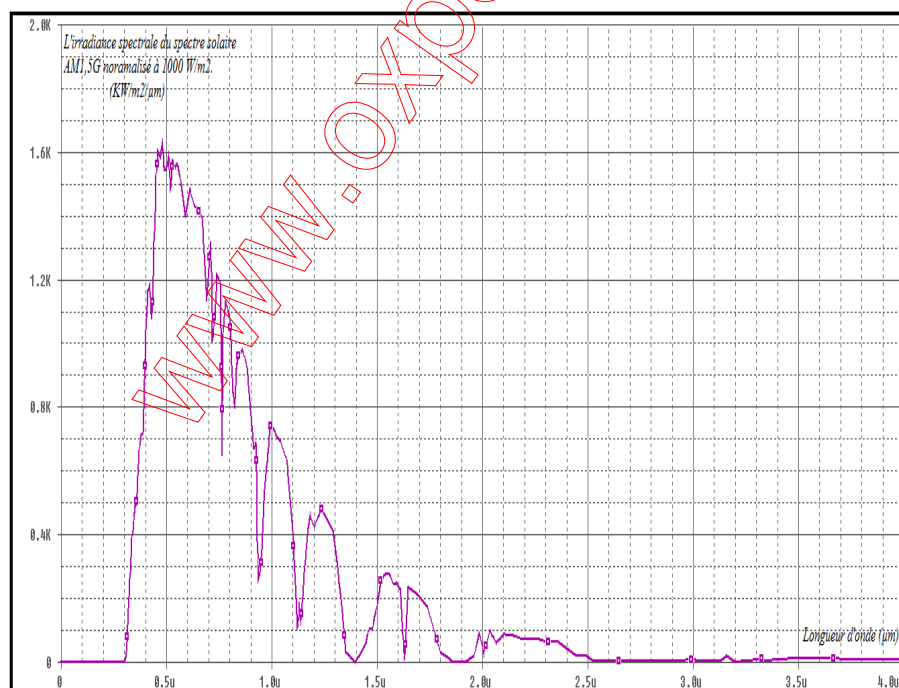


Figure III-5 : La simulation par PSpice du spectre solaire *AM1,5G* normalisé à

$$1 \text{ KW} / \text{m}^2 .$$

Le spectre AM1,5G a une irradiance totale de 962,5 W/m². Pour faciliter les calculs, ce spectre est normalisé à 1000 W/m².

La normalisation du spectre AM1,5G à 1000 W/m² se fait par la méthode suivante :

$$\left(\frac{1000}{962,5} \cdot \text{valeurs de AM1.5G} \right)$$

Avec :

$\frac{1000}{962,5}$: Le facteur de normalisation.

À partir de la Figure (III-5), on remarque que la valeur maximale de AM1,5G normalisé est située dans la partie visible du spectre, précisément à la longueur d'onde 0,47 μm , avec 1630 W/m²/μm, comme valeur maximale d'irradiance spectrale. Elle commence à diminuer lorsqu'on se rapproche de l'infrarouge à cause de l'absorption et la diffusion par l'atmosphère décrites dans le chapitre I. Elle s'annule dans l'infrarouge lointain.

III-7. Modèle PSpice du spectre solaire Air-Masse Hors-Atmosphère

AM0 :

Le spectre solaire hors atmosphère est nommé AM0 avec une irradiance totale de 1367 W/m² [4]. Le résultat graphique de la simulation part PSpice du spectre AM0 est illustré dans la figure (III-6).

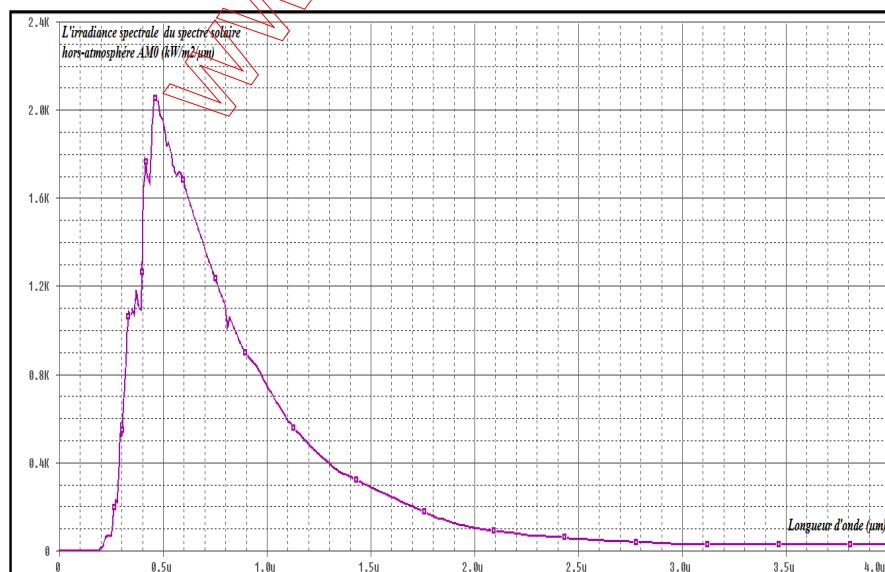


Figure III-6: La simulation par PSpice du spectre solaire AM0.

À partir de la Figure (III-6), on observe que le maximum d'irradiance du spectre solaire AM0 est situé à la longueur d'onde $0,42 \mu\text{m}$, avec une valeur maximale de $2,05 \text{ kW} / \text{m}^2 / \mu\text{m}$.

Le spectre hors atmosphère présente une grande irradiance par rapport à AM1.5 G, ce qui augmente le rendement des panneaux solaires (exemple : les cellules équipées les satellites en hors atmosphère présentent une amélioration par rapport à ceux au niveau de la terre).

Un deuxième avantage de l'irradiance hors atmosphère est la disponibilité 24/24 h (nuits et jours). Il est intéressant de trouver une solution pour capter le rayonnement hors atmosphère et l'utiliser pour la conversion photovoltaïque au niveau de la terre ! Cette idée fascine depuis les années 1970 et des recherches plus concrètes commencent à lui donner forme. JAXA, l'agence spatiale japonaise et Solaren une entreprise américaine, imaginent un projet d'une grosse centrale spatiale de 1GW pour alimenter toute une ville. ASTRUIM, division spatiale d'EADS (agence européenne), envisage, quant à elle, de placer en orbite des satellites équipés de panneaux photovoltaïques à très hauts rendements qui fourniraient de l'énergie à des zones isolées terrestres. La technique est de regrouper en réseau ces satellites par centaines pour transformer les rayons solaires en électricité et utiliser cette électricité produite pour ensuite envoyer un rayon laser infrarouge à une longueur d'onde de $1,5 \mu\text{m}$ (capable de transporter des énergies comparables au rayonnement solaire AM1.5G d'une façon directe et dirigée) vers des capteurs photovoltaïques d'environ 100 m^2 de surface au niveau de la terre, et alimenter ainsi les villes par cette énergie.

Dans ce travail, nous utilisons le spectre solaire terrestre AM1.5G, utilisée comme étalon et qui représente l'entrée (sous forme des valeurs numériques) du modèle électrique de la cellule photovoltaïque simulée par PSpice.

III-8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le logiciel conçu pour la simulation de la cellule étudiée, nous avons cité quelques informations sur le logiciel PSpice et leurs composants. Ensuite, nous avons donné deux exemples de la simulation PSpice : le premier concerne la simulation PSpice du spectre solaire AM1,5G et le deuxième sur la simulation PSpice du spectre solaire AM0.

Bibliographie du chapitre III:

[1] : <http://www.PSpice.com/> (consulté le 15/05/2013).

[2] : <http://www.electronics-lab.com/downloads/schematic/013/tutorial/PSPICE.pdf>
(consulté le 15/05/2013).

[3]: *Hulstrom, R., Bird, R., Riordan, C., Spectral Solar Irradiance data sets for Selected Terrestrial conditions, Solar cells vol. 15, pp. 365-391, (1985).*

[4]: *M.P.Thekaekara, A.J. Drummond, D.G. Murcray, P.R.Gast, E.G. Laue and R.C Wilson, 'Solar Electromagnetic radiation' NASA SP 8005, (1971).*

www.oxpdf.com

*Chapitre IV :
Simulation par PSpice d'une
cellule solaire à base de
silicium polycristallin*

www.oxford.com

IV-1. Introduction :

Après avoir décrit, dans le chapitre II, les notions fondamentales de la physique de la cellule photovoltaïque et la présentation du logiciel PSpice dans le chapitre III, on entame dans ce chapitre la simulation par PSpice d'une photopile fournie par Irysolar de Montpellier (France) [1] afin d'extraire les résultats théoriques et les comparer ensuite aux résultats expérimentaux obtenus par l'équipe du laboratoire de cette entreprise française de fabrication de cellules solaires. Dans ce qui suit, on cherchera à optimiser le rendement énergétique par l'étude de l'influence de certains paramètres (comme l'épaisseur de l'émetteur x_j , la longueur de diffusion des porteurs minoritaires L , l'épaisseur de la cellule solaire H , les vitesses de recombinaison en surface de l'émetteur S_e et de la base S_b , la résistance série R_s , la résistance de shunt R_p . Enfin, on étudiera l'effet de la température sur les performances de cette même cellule.

IV-2. La Cellule photovoltaïque simulée:

IV-2-1. Les paramètres de la simulation :

Notre cellule simulée a été réalisée chez Irysolar de Montpellier. Elle est de type n^+/p semi-square qui présente une surface de 156 mm x 156mm ainsi qu'une Couche AntiReflet (CAR) et une texturisation à la surface avant pour optimiser le captage du rayonnement solaire incident (Figure IV-1).

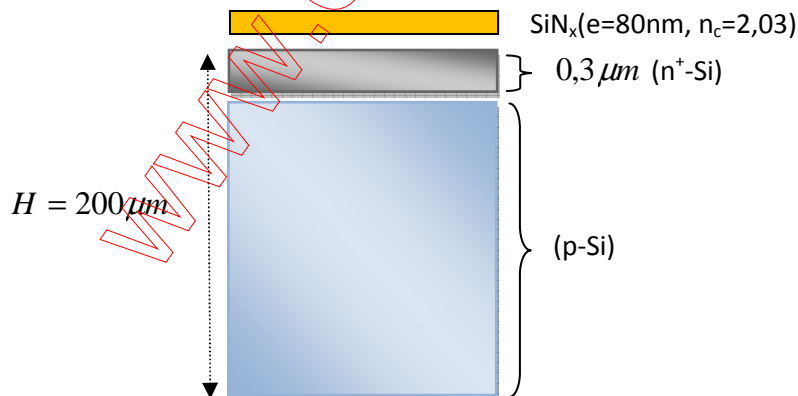


Figure IV-1 : Schéma de la cellule solaire simulée à base de silicium polycristallin.



Figure IV-2 : Image de la face avant de la cellule simulée réalisée chez Irysolar.

La cellule solaire simulée est à base de Silicium polycristallin (poly-Si) d'épaisseur d'environ $200\mu m$ avec un émetteur de type n^+ dopé Phosphore, d'épaisseur égale à $0,3\mu m$. Elle présente une résistivité de $\rho_n = 7,7 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot cm$ sur la face avant (face éclairée), recouverte d'une Couche AntiReflet (CAR), composée de Nitrure de Silicium SiN_x d'épaisseur de $80nm$ et d'un coefficient de réfraction $n_c = 2,03$ à $\lambda=605 nm$. Quant au substrat, il est de type p avec une résistivité $\rho_p = 1,5\Omega \cdot cm$.

- **Les paramètres des porteurs minoritaires dans la base (électrons) de la cellule solaire simulée :**

Dans la base de la cellule solaire de type p, la durée de vie des porteurs minoritaires, qui sont ici les électrons, est déterminée à partir des recombinaisons SRH – (Shockley- Read-Hall) qui sont les plus prépondérantes et qui dépend fortement de la nature, de la densité, de la position des pièges recombinants et de la température. La durée de vie des électrons minoritaires τ_n dans la base, est alors donnée par la relation empirique suivante utilisée dans ce travail [2]:

$$\frac{1}{\tau_n} = \left(\frac{1}{2,5 \cdot 10^{-3}} + 11,76 \cdot 10^{-13} \cdot N_A \right) \cdot \left(\frac{300}{T} \right)^{0,57} \quad (s^{-1}) \quad (IV-1)$$

Avec :

N_A : la concentration des atomes accepteurs par cm^{-3} .

T : la température en °K.

Ce qui donne approximativement, à la température ambiante $T=300$ °K, une valeur de $\tau_n = 84 \mu s$ (pour une densité des dopants accepteurs $N_A = 9,79 \cdot 10^{15} cm^{-3}$ correspondante à la résistivité ρ_p précédemment donnée de la base et calculée à l'aide de PC1D (un logiciel spécialisé de la simulation des cellules solaires) [3].

Chapitre IV : Simulation par PSpice d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin

La mobilité des électrons dans la base est donnée par la relation utilisée par PC1D en fonction de la température et du dopage suivant la relation ci-dessous [4] :

$$\mu_n = \mu_{n\min} \cdot T_n^{\beta_1} + \frac{(\mu_{n\max} - \mu_{n\min}) \cdot T_n^{\beta_2}}{1 + \left\{ \frac{N_A}{N_{ref} \cdot T_n^{\beta_3}} \right\}^{\alpha T_n^{\beta_4}}} \quad (\text{cm}^2/\text{V.s}) \quad (\text{IV-2})$$

Avec :

$\mu_{n\max}, \mu_{n\min}$: respectivement les valeurs maximale et minimale de la mobilité des électrons minoritaires.

N_{ref} : niveau de référence du dopage p dans la base.

N_A : la concentration des atomes accepteurs.

T_n : la température normalisée par rapport à la température ambiante $\left(T_n = \frac{T}{300^\circ \text{K}} \right)$.

α : un exposant défini suivant la nature des porteurs.

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$: les coefficients dépendant de la température.

Le tableau IV-1 rassemble tous les paramètres de l'équation (IV-2) extraits à partir de PC1D :

Paramètres	$\mu_{n\max}$ ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	$\mu_{n\min}$ ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	$N_{ref} (\text{cm}^{-3})$	α	$T_n (300^\circ \text{k})$	β_1	β_2	β_3	β_4
Electrons	1417	160	$5,6 \cdot 10^{16}$	0,647	1	-0,57	-2,33	2,4	-0,146

Tableau IV-1 : Les paramètres utilisés dans l'équation (IV-2).

A partir de ces paramètres, on trouve approximativement une valeur de $\mu_n \approx 1109,70 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$. Les figures IV-3 et IV-4 montrent les évolutions de la mobilité des électrons minoritaires dans la base de la cellule solaire en fonction respectivement du dopage et de la température :

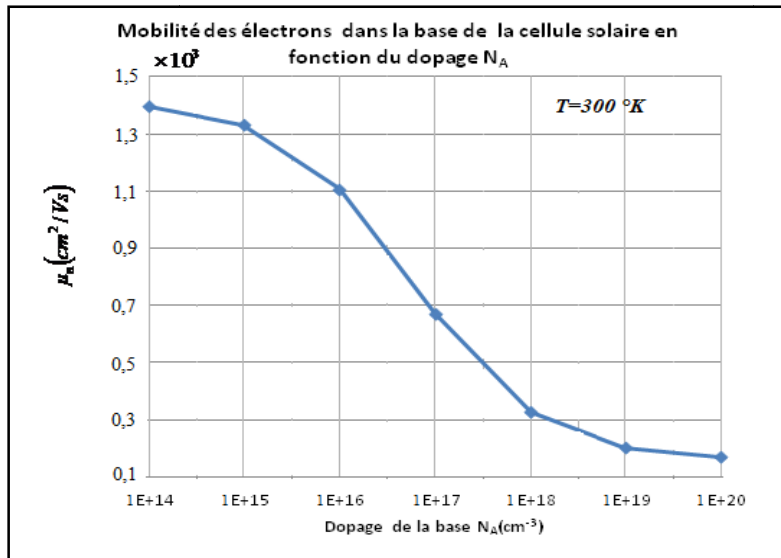


Figure IV-3 : Mobilité des électrons minoritaires en fonction du dopage de la base.

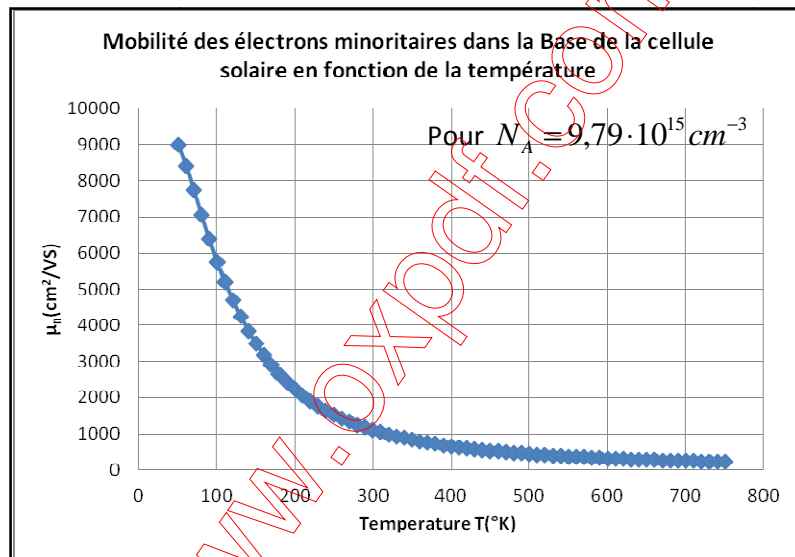


Figure IV-4 : Mobilité des électrons minoritaires en fonction de la température.

Le coefficient de diffusion des électrons minoritaires dans la base de la cellule solaire simulée est donné par la relation d'Einstein :

$$D_n = \frac{KT}{q} \mu_n \quad (\text{cm}^2/\text{s}) \quad (\text{IV-3})$$

À l'équilibre thermodynamique à $KT/q \approx 26 \text{ mV}$, on trouve approximativement

$$D_n = 28,85 \text{ cm}^2 / \text{s}.$$

La longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la base de la cellule solaire simulée qui sont dans ce cas les électrons, est exprimée par l'expression suivante :

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} \quad (\text{cm}) \quad (\text{IV-4})$$

Chapitre IV : Simulation par PSpice d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin

Par cette application numérique, on trouve approximativement $L_n \approx 492,28 \mu m$. En comparant cette valeur trouvée avec l'épaisseur de la base $\approx 200 \mu m$, on peut la prendre comme une valeur optimale qui permet d'assurer une collecte satisfaisante des électrons générés dans la base.

• Les paramètres des porteurs minoritaires dans l'émetteur (trous) de la cellule solaire simulée :

Au sein de l'émetteur de la cellule solaire simulée de type n^+ , la durée de vie des porteurs minoritaires, qui sont ici les trous, est exprimée par la relation empirique (IV-5) [5] :

$$\frac{1}{\tau_p} = [7,8 \cdot 10^{-13} \cdot N_D + 1,8 \cdot 10^{-31} \cdot N_D^2] \quad (s^{-1}) \quad (IV-5)$$

Avec

N_D : la concentration des atomes donneurs (cm^{-3}).

Ce qui donne approximativement $\tau_p \approx 4,26 \cdot 10^{-10} s$ (pour une densité des dopants donneurs $N_D = 1,12 \cdot 10^{20} cm^{-3}$ correspondante à une profondeur de jonction $x_j = 0,3 \mu m$ de la cellule solaire simulée donnée par PC1D).

De même, la mobilité des trous dans l'émetteur est donnée par la relation utilisée également dans PC1D en fonction de la température et du dopage qui varie comme suit :

$$\mu_p = \mu_{p \min} \cdot T_n^{\beta_1} + \frac{(\mu_{p \max} - \mu_{p \min}) \cdot T_n^{\beta_2}}{1 + \left\{ \frac{N_D}{N_{ref} \cdot T_n^{\beta_3}} \right\}^{\alpha \cdot T_n^{\beta_4}}} \quad (cm^2/V.s) \quad (IV-6)$$

Avec:

$\mu_{p \max}, \mu_{p \min}$: respectivement les valeurs maximale et minimale de la mobilité des trous minoritaires.

N_{ref} : niveau de référence du dopage n dans l'émetteur.

Les paramètres de l'équation (IV-6) sont rassemblés dans le tableau IV-2 ci-après et prélevés à partir de PC1D :

Chapitre IV : Simulation par PSpice d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin

Paramètres	μ_{pmax} ($cm^2/V.s$)	μ_{pmin} ($cm^2/V.s$)	N_{ref} (cm^{-3})	α	T_n (300 °k)	β_1	β_2	β_3	β_4
Trous	470	155	10^{17}	0,9	1	-0,57	2,23	2,4	-0,146

Tableau IV-2 : Les paramètres utilisés dans l'équation (IV-6).

On trouve approximativement $\mu_p \approx 155,56 cm^2 / Vs$. Les figures IV-5 et IV-6 représentent respectivement les variations de la mobilité des trous minoritaires dans l'émetteur de la cellule solaire en fonction du dopage et de la température :

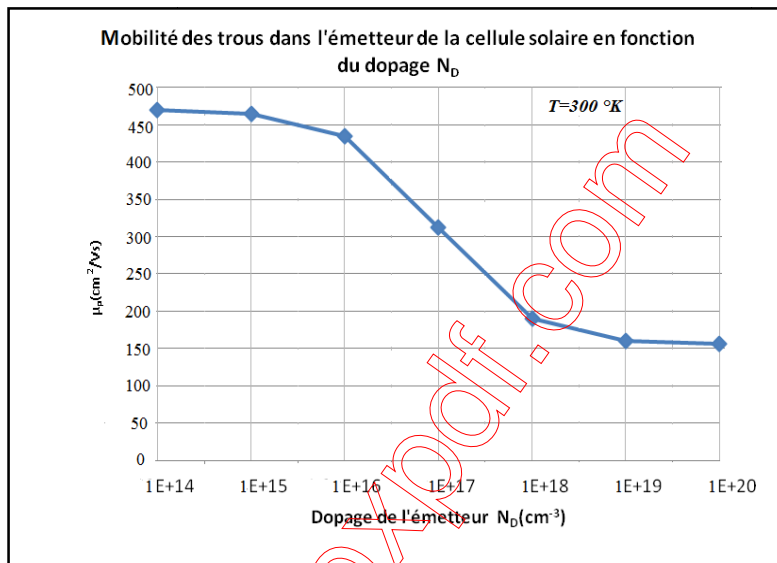


Figure IV-5 : Mobilité des trous minoritaires en fonction du dopage de l'émetteur.

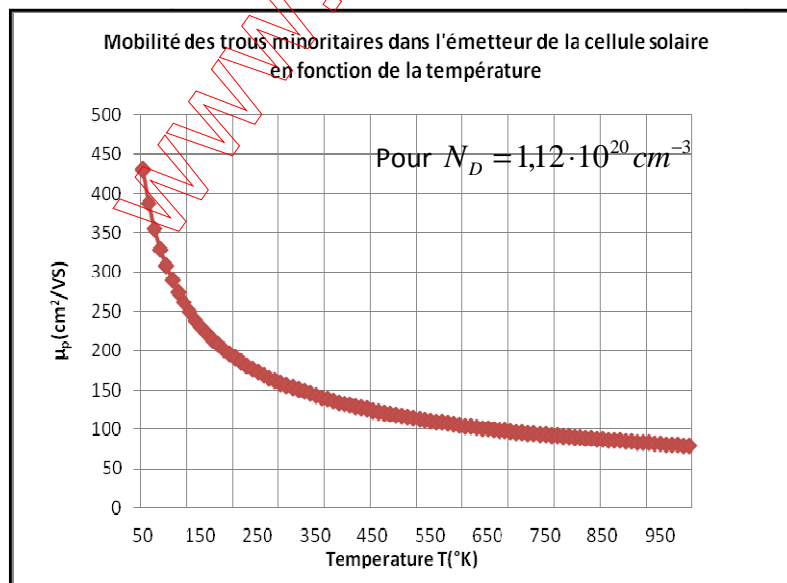


Figure IV-6 : Mobilité des trous minoritaires en fonction de la température.

Chapitre IV : Simulation par PSpice d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin

Le coefficient de diffusion des trous minoritaires dans l'émetteur de la cellule solaire simulée est donné par la relation d'Einstein:

$$D_p = \frac{KT}{q} \mu_p \quad (\text{cm}^2/\text{s}) \quad (\text{IV-7})$$

À l'équilibre thermodynamique, on trouve approximativement $D_p \approx 4,045 \text{ cm}^2 / \text{s}$.

La longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans l'émetteur de la cellule solaire simulée, qui sont ici les trous, est exprimée par la relation suivante :

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p} \quad (\text{cm}) \quad (\text{IV-8})$$

Par cette application numérique, on trouve approximativement $L_p \approx 0,42 \mu\text{m}$. En comparant cette valeur avec l'épaisseur de l'émetteur $\approx 0,3 \mu\text{m}$, on peut dire qu'il s'agit d'une valeur concrète pour une bonne collecte des trous générés dans l'émetteur.

Tous les différents paramètres de la simulation sont groupés dans le tableau (IV-3).

Chapitre IV : Simulation par PSpice d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin

Les paramètres de la simulation	Valeurs
La surface de la cellule solaire.	$156 \text{ mm} \times 156 \text{ mm}$
La profondeur de jonction.	$x_j = 0,3 \mu\text{m}$
L'épaisseur de la cellule solaire simulée.	$H = 200 \mu\text{m}$
La Couche AntiReflet (CAR).	$\text{SiN}_x (e = 80\text{nm} / n_c = 2,03)$
La mobilité des électrons minoritaires dans la base.	$\mu_n = 1109,70 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$
La mobilité des trous minoritaires dans l'émetteur.	$\mu_p = 155,56 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$
Le coefficient de diffusion des électrons minoritaires dans la base.	$D_n = 28,85 \text{ cm}^2 / \text{s}$
Le coefficient de diffusion des trous minoritaires dans l'émetteur.	$D_p = 4,045 \text{ cm}^2 / \text{s}$
Le Pic de dopage dans l'émetteur.	$N_D = 1,12 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
Dopage de la base.	$N_A = 9,79 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
La vitesse de recombinaison des trous minoritaires dans l'émetteur.	$S_p = 5000 \text{ cm} / \text{s} [6]$
La vitesse de recombinaison des électrons minoritaires dans la base.	$S_n = 1000 \text{ cm} / \text{s} [6]$
La durée de vie des trous minoritaires dans l'émetteur.	$\tau_p = 4,26 \cdot 10^{-4} \mu\text{s}$
La durée de vie des électrons minoritaires dans la base.	$\tau_n = 84 \mu\text{s}$
Longueur de diffusion des électrons minoritaires dans la base.	$L_n = 492 \mu\text{m}$
Longueur de diffusion des trous minoritaires dans l'émetteur.	$L_p = 0,42 \mu\text{m}$
La résistance shunt.	$R_p = 3,019 \Omega$
La résistance série.	$R_s = 5,2 \text{ m}\Omega$
L'irradiance totale incidente de référence.	$G = 1000 \text{ W} / \text{m}^2$
La profondeur de la ZCE	$W = 0,355 \mu\text{m}$

Tableau IV-3 : Les paramètres de la simulation.

IV-3. Le modèle PSpice de la densité du courant de court-circuit J_{cc} :

On construit le modèle PSpice à partir des équations de la densité du courant spectral de court-circuit respectivement dans l'émetteur, la base et la zone de charge d'espace (II-23), (II-27), (II-28). Comme les trois grandeurs incluses dans ces équations sont en fonction de la longueur d'onde (le coefficient d'absorption $\alpha(\lambda)$, de l'irradiance spectrale $I_\lambda(\lambda)$ et du coefficient de réflexion $R(\lambda)$), le modèle PSpice le plus simple de la densité du courant spectral de court-circuit, peut être facilement décrit en utilisant des sources PWL, pour inclure les fichiers (liste des valeurs) de ces grandeurs (Voir Annexe 1) [3]. Le fichier de la réflexion spectrale a été extrait à partir de la littérature [7]. Les résultats de la simulation par PSpice de la densité du courant spectral de court-circuit des trois zones de la cellule solaire sont affichés sur la Figure IV-7 :

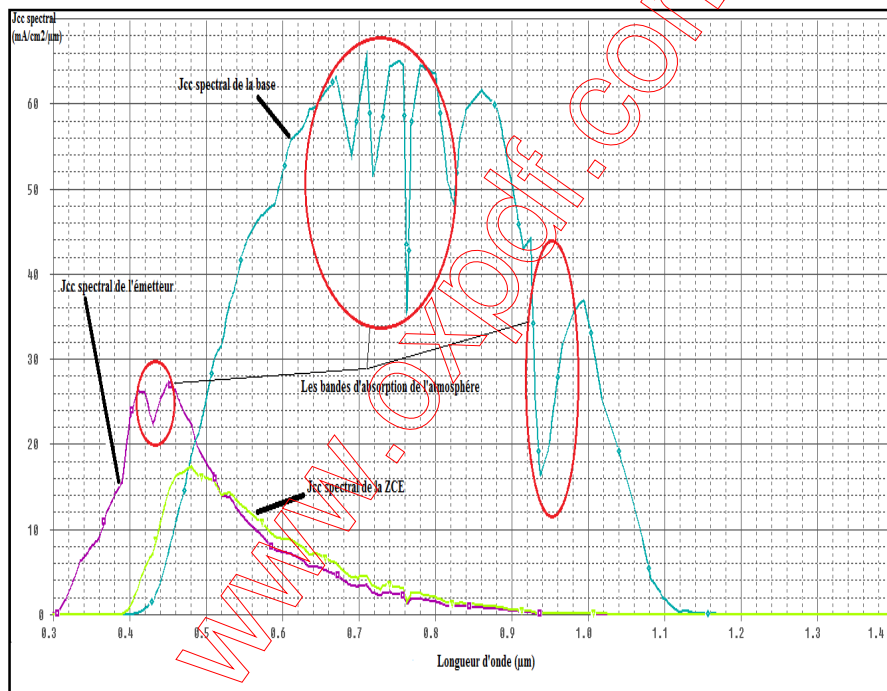


Figure IV-7 : L'évolution de la densité du courant spectral de court-circuit des trois régions de la cellule solaire en fonction de la longueur d'onde.

On constate, l'influence des bandes d'absorption de l'atmosphère présentes dans le spectre solaire AM 1,5G (Chapitre I, page 7) sur la densité du courant spectral comme le montre la Figure IV-7. La base est quantitativement la composante principale qui contribue le plus au courant total, dans presque toutes les longueurs d'onde utiles pour le Silicium (0,4µm-1,1µm), excepté les longueurs d'onde courtes ($\approx 0,3\mu\text{m}-0,6\mu\text{m}$) correspondantes la zone de l'UV où c'est la contribution de l'émetteur qui est la plus significative. Ceci est dû aux recombinaisons importantes des photos-porteurs au niveau de la surface de la cellule photovoltaïque, en raison

Chapitre IV : Simulation par PSpice d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin

du dopage important présent sur le front. Par ailleurs, la Zone de Charge d'Espace (ZCE), exploite les longueurs d'ondes moyennes ($\approx 0,4\mu\text{m}-0,6\mu\text{m}$) où elle contribue par un courant moins important dépendant uniquement du nombre de photons absorbés par seconde (courant de génération).

La variation en fonction de la longueur d'onde de la densité du courant de court-circuit total J_{cc} , est illustrée sur la Figure IV-8 :

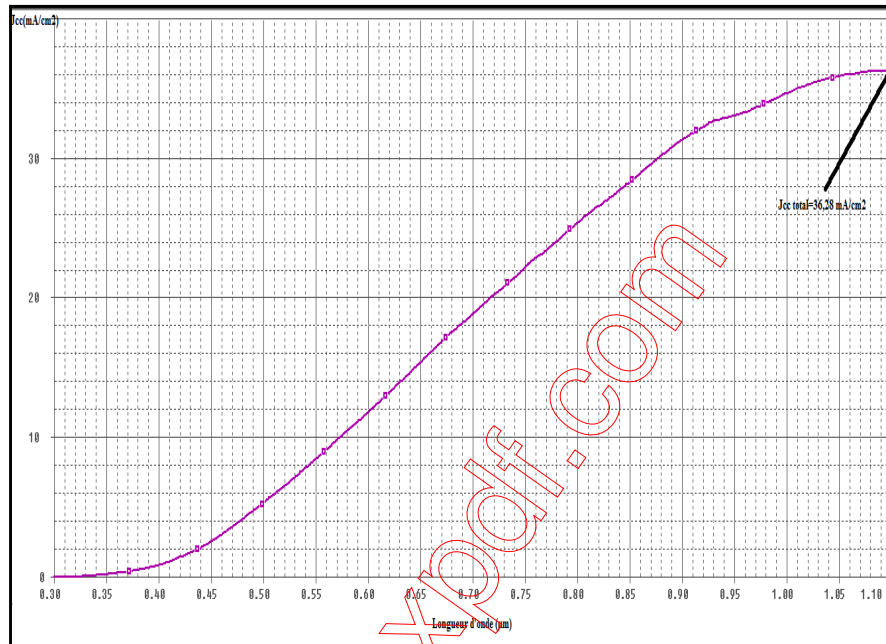


Figure IV-8 : La simulation par PSpice de la densité du courant total de court-circuit.

La Figure (IV-8) schématise l'évolution de J_{cc} (déterminée par l'intégration de la densité du courant spectral de court-circuit de la figure IV-7 sur toute la gamme des longueurs d'onde présentes [0,3µm-1,1µm]). Sur cette courbe, on remarque que la densité du courant de court-circuit total fournie par la cellule solaire, est donnée à la longueur d'onde de seuil du Silicium: $\lambda_s = 1,1\mu\text{m}$, où elle est égale approximativement à $J_{cc} = 36,28\text{mA}/\text{cm}^2$, ce qui conduit à un courant de court-circuit de $I_{cc} = 8,823\text{A}$.

IV-4. Le rendement quantique de la cellule solaire simulée :

La Figure (IV-9) représente la courbe obtenue par PSpice du Rendement Quantique Interne (RQI) des trois zones de la cellule solaire simulée et qui représente le rapport du nombre des porteurs collectés par la cellule solaire sur le nombre de photons absorbés à une énergie ou une longueur d'onde donnée.

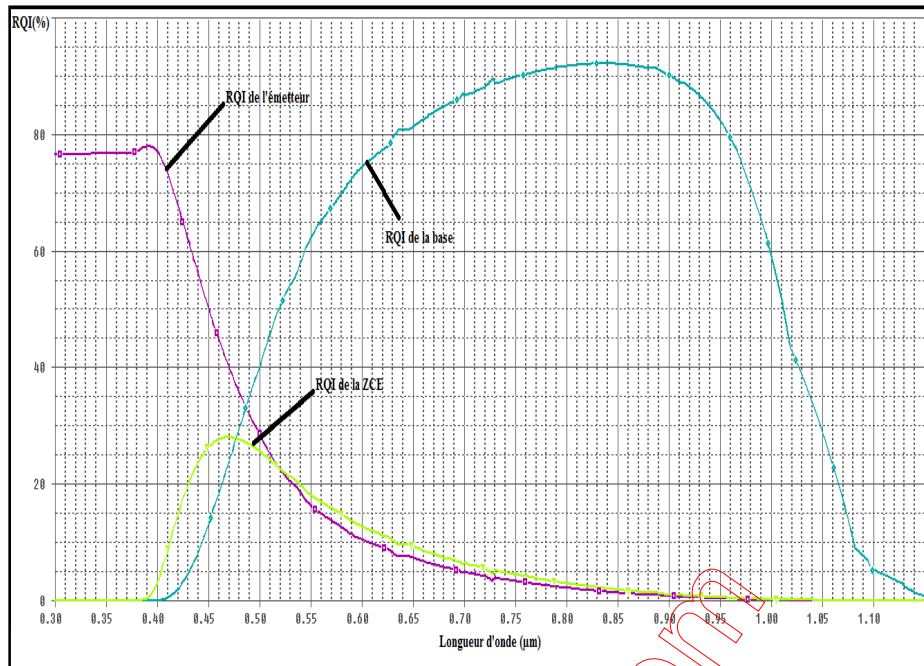


Figure IV-9 : La courbe du Rendement Quantique Interne (RQI) des trois zones de la cellule solaire simulée.

La figure (IV-9) montre le Rendement Quantique Interne des trois zones de la cellule solaire simulée. On remarque que le front exploite les photons d'énergie élevée, c-a-d de courte longueur d'onde qui pénètrent très peu dans le Silicium. Les photons de plus grande longueur d'onde dont l'énergie est au moins égale au gap du Silicium ($E_g = 1,12 eV$) atteignent la base, beaucoup plus épaisse que le front ($\approx 200 \mu m$) où ils y sont collectés. Quant à la zone de charge espace, elle traite les photons de longueur d'onde moyenne.

La Figure (IV-10) représente la courbe de la simulation par PSpice du Rendement Quantique Interne total de la cellule solaire simulée :

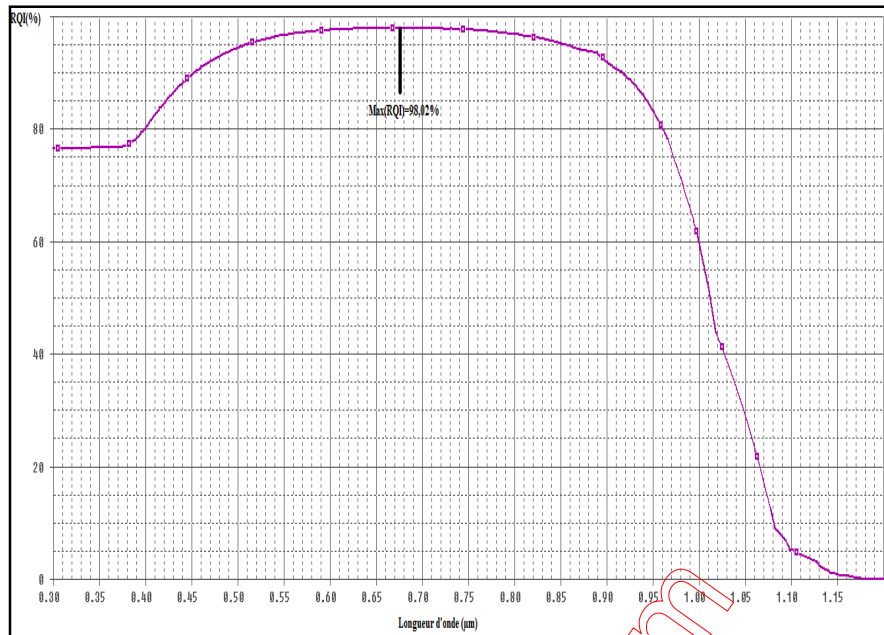


Figure IV-10 : La courbe du Rendement Quantique Interne total (RQI).

Selon cette figure, on distingue que le rendement quantique interne de la cellule solaire est constant sur la gamme des longueurs d'onde $[0,3\mu\text{m}-0,38\mu\text{m}]$ au niveau de l'UV, puis il commence à s'accroître jusqu'à la longueur d'onde $0,675\mu\text{m}$ correspond au bleu dans le visible où il présente un maximum de valeur égale à 98,02%, ensuite il chute légèrement à partir de la longueur d'onde $0,8\mu\text{m}$ équivalent au rouge dans le visible puis elle décroît brutalement à la fin du spectre au niveau de la longueur d'onde du gap du silicium.

Naturellement, la géométrie et la conception de la photopile solaire ont beaucoup plus d'influence sur la forme de la courbe du RQI. Notons que la photopile idéale est celle où le rendement est proche des valeurs maximales de 100%. Les différences observées sont dues essentiellement aux différentes pertes engendrées dans la cellule telles que les pertes résistives et d'ombrage de la métallisation, des différents défauts de fabrication, d'absorption ou de réflexion.

IV-5. La réponse spectrale de la cellule solaire simulée :

La courbe de la réponse spectrale interne des trois régions de la cellule solaire simulée est donnée par la Figure IV-11 :

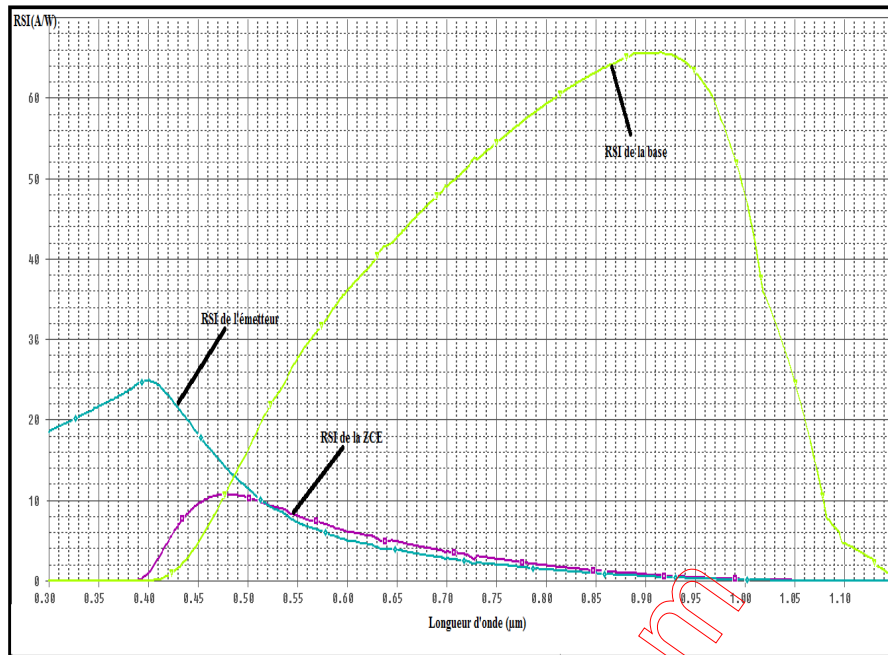


Figure IV-11 : La simulation par PSpice de la Réponse Spectrale Interne (RSI) des trois régions de la cellule solaire simulée.

La figure (IV-11) montre donc la Réponse Spectrale Interne ou la sensibilité (RSI) distincte des trois zones de la cellule solaire simulée. Aux grandes longueurs d'onde des photons (basses énergies), la plupart des photos porteurs sont générés dans la base en raison de l'absorption dans cette zone due essentiellement à sa grande épaisseur. Dès que la longueur d'onde des photons commence à diminuer, la sensibilité de la cellule solaire dans les régions de l'émetteur et de la zone de charge espace va croître sensiblement mais la contribution de la région de la zone de charge espace ne dépasserait pas celle de la région d'émetteur en raison de la très grande valeur du coefficient d'absorption au-dessus de 3,2 eV (soit pour $\lambda = 0,387 \mu\text{m}$) (chapitre II, page 36), ce qui provoque l'absorption de la quasi-totalité de la lumière incidente à haute énergie dans la région de l'émetteur supérieure à $0,1 \mu\text{m}$ [11].

La courbe de la réponse spectrale interne totale de la cellule solaire est donnée par la Figure IV-12 :

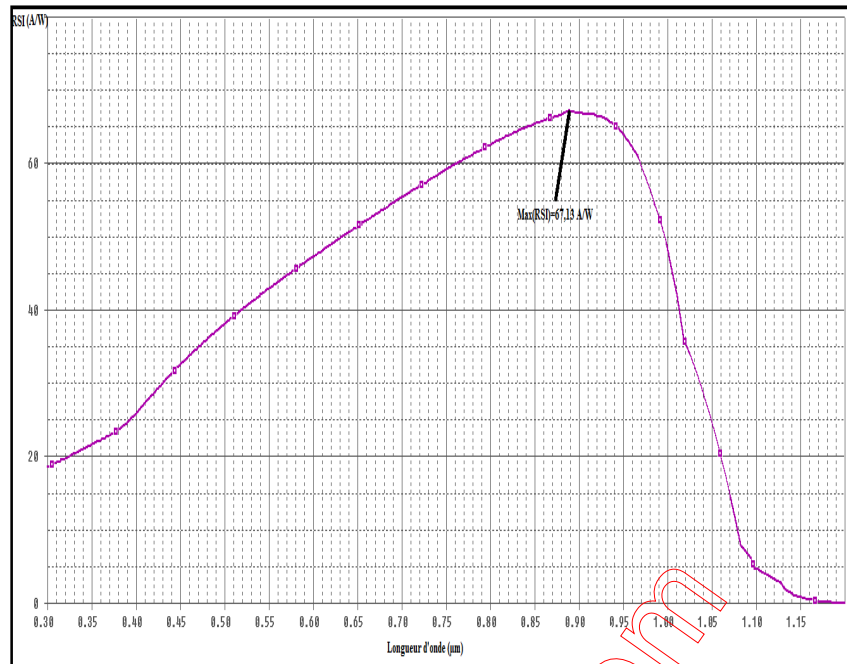


Figure IV-12 : La simulation par PSpice de la Réponse Spectrale Interne totale (RSI).

La figure IV-12 représente la réponse spectrale interne de la cellule solaire simulée en fonction de la longueur d'onde. A partir de cette figure, on voit que la sensibilité de la cellule solaire est faible dans la partie bleue du spectre solaire, elle commence à s'accroître à partir de la longueur d'onde $0,3\mu\text{m}$ jusqu'à la valeur de $0,89\mu\text{m}$ où elle présente un maximum de $67,13\text{ A/W}$. Elle commence ensuite à s'abaisser autour de la longueur d'onde de seuil du gap du Silicium ($\lambda_s = 1,1\mu\text{m}$). Ce qui explique qu'elle est quasiment nulle dans l'infrarouge lointain.

IV-6. Le modèle PSpice de la cellule solaire:

Dans le chapitre II, on a vu que le modèle électrique réel d'une cellule solaire, est constitué d'une source de courant modélisant l'éclairement, d'une diode D1 en parallèle (de facteur d'idéalité $n=1$) spécifiant le courant de diffusion dans l'émetteur et la base de la cellule solaire, d'une résistance série R_s , qui modélise la résistance des contacts et les pertes résistives dans la base et l'émetteur ; d'une résistance shunt R_p qui tient en considération les pertes et les courants de fuites dans l'émetteur et la base, enfin d'une seconde diode D2 également en parallèle (de facteur d'idéalité $n=2$) tenant compte de la recombinaison des porteurs dans la Zone de Charge Espace (Figure IV-13).

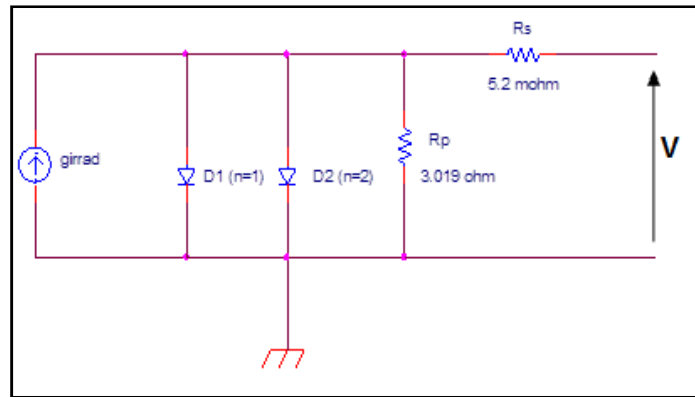


Figure IV-13: Le modèle réel de la cellule photovoltaïque pris dans PSpice.

La source de courant g_{irrad} de la figure IV-13, est donnée par la relation suivante :

$$g_{irrad} = \frac{J_{cc} \cdot A}{1000} \cdot G \quad (IV-9)$$

g_{irrad} est exprimée en mA lorsque J_{cc} est en mA/cm², A est la surface de la cellule solaire en cm² et G, l'irradiance de référence correspondante à AM1,5 (en W/m²). La valeur de J_{cc} dans la relation (IV-9) est donnée aux conditions standards (AM1,5G, $G = 1000 \text{ W} / \text{m}^2$, $T = 25^\circ \text{C}$) qui sont les conditions où les mesures sont étalonnées dans le domaine du photovoltaïque.

Les caractéristiques I(V) et P(V) de la cellule solaire obtenus sont montrés sur la Figure IV-14 :

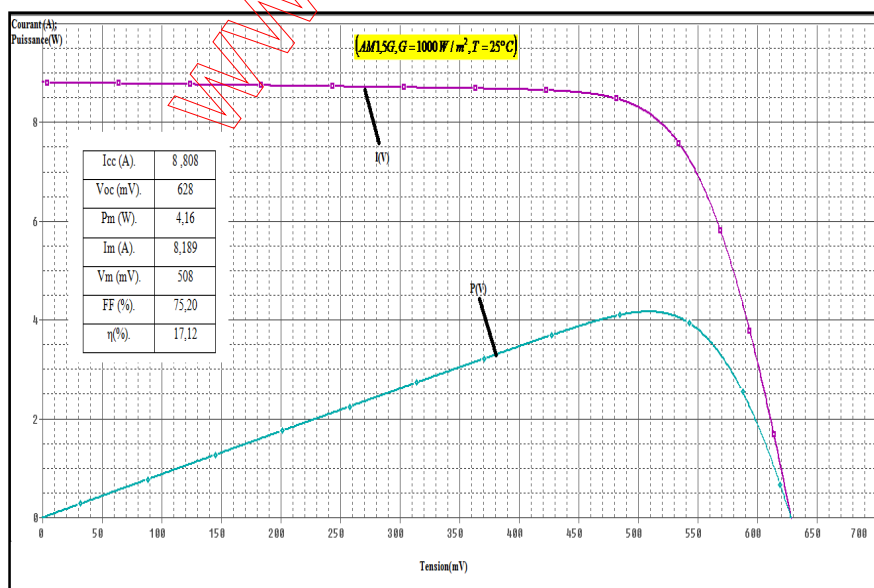


Figure IV-14: Les caractéristiques I(V) et P(V) de la cellule solaire simulée.

Chapitre IV : Simulation par PSpice d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin

Sur cette figure, on constate clairement que les paramètres caractéristiques de la cellule solaire obtenus sont légèrement supérieurs à ceux trouvés expérimentalement par l'équipe de recherche d'Irysolar sur la même cellule et qui sont montrés dans le tableau IV-4. Ceci ne sont dus qu'aux paramètres intervenant dans les équations du courant (II-23), (II-27), (II-28) : $\mu_n, \mu_p, \tau_n, \tau_p$ qui en réalité dépendent de la position du dopage (les défauts profonds en particulier qui peuvent être dans le Silicium polycristallin). De plus, la géométrie de la cellule solaire étudiée peut être compliquée : gradient d'impuretés, de composition...etc. La résolution de l'équation (II-29) n'est donc généralement pas possible. Par contre, sa résolution numérique peut être effectuée avec des techniques de calcul plus poussées. Ce n'est pas le cas dans ce travail. Pour minimiser les calculs, on a opté pour des hypothèses plus simples avec des modèles plus ou moins élémentaires. Les résultats que l'on en tire, nous ont donnés renseignement précieux sur l'optimisation des divers paramètres étudiés. Il est important toutefois de noter que la réalité est toujours plus complexe, que les résultats expérimentaux seront souvent inférieurs aux prévisions.

Le courant de court-circuit I_{cc} (A).	8,763
La tension de circuit ouvert V_{oc} (mV).	615
La puissance maximale P_m (W).	3,94
Le courant maximal I_m (A).	7,577
La tension maximale V_m (mV).	507
Le facteur de forme FF (%).	73,13
Le rendement η (%).	16,2

Tableau IV-4: Les données expérimentales de la cellule solaire d'Irysolar.

IV-7. L'Influence de l'épaisseur de l'émetteur:

Pour le Silicium, le coefficient d'absorption α augmente lentement avec l'énergie des photons, qui, de ce fait, pénètrent profondément dans le matériau comparativement à d'autres matériaux. On a vu dans la figure IV-7 que l'essentiel du spectre solaire utile pour le Silicium reçu au sol est collecté par la base. Il faut donc privilégier cette zone. Parmi les solutions idoines pour l'optimisation de la base, c'est de réduire l'épaisseur de l'émetteur. Pour étudier l'influence de l'épaisseur de l'émetteur de la cellule solaire simulée, nous avons varié cette

dernière tout en fixant les autres paramètres. Les résultats trouvés de la densité du courant de court-circuit total pour différentes épaisseurs de l'émetteur sont montrés sur la figure IV-15 :

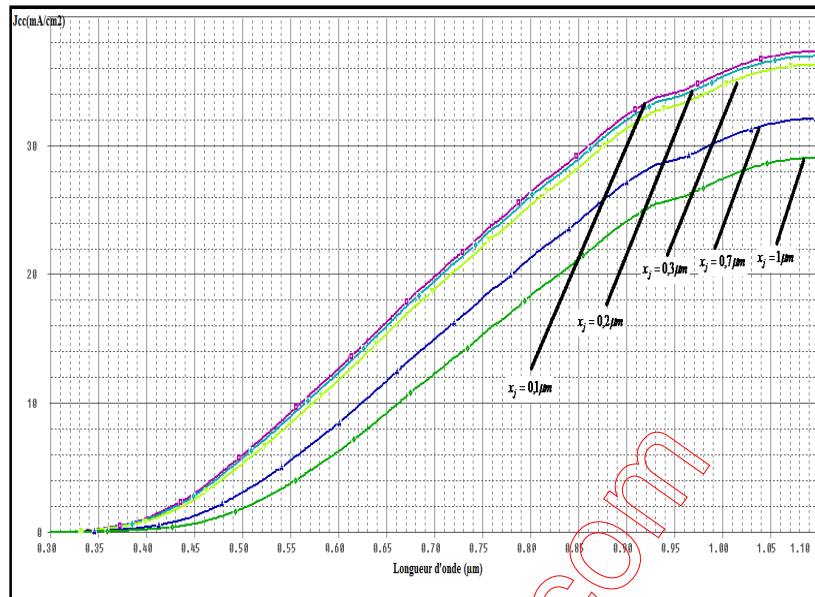


Figure IV-15: Influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la variation de la densité du courant de court-circuit.

Il est clair que sur cette figure, la densité du courant de court-circuit total augmente. Ceci est plus sensible avec la décroissance de l'épaisseur de l'émetteur x_j à la longueur d'onde de seuil du Silicium.

D'autre part, les résultats de PSpice des caractéristiques I(V) et P(V) sont pour ce cas, indiqués sur la Figure IV-16:

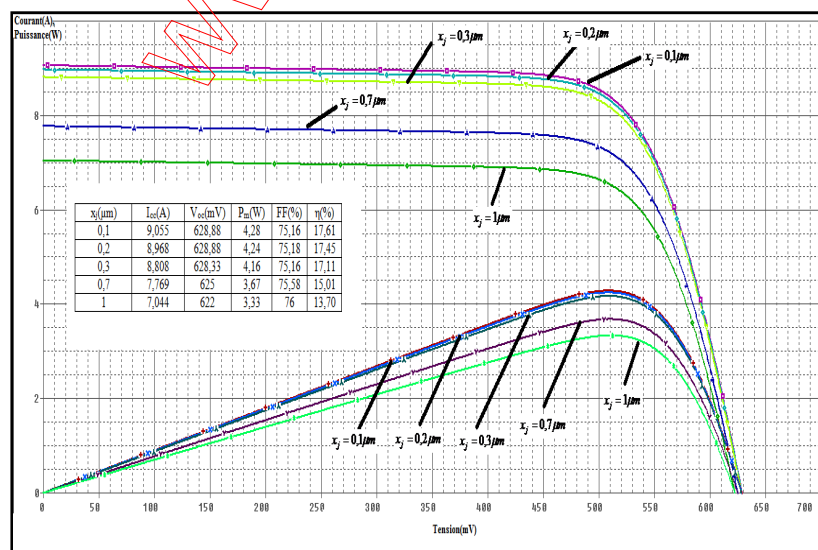


Figure IV-16 : Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur les caractéristiques I(V) et P(V).

Chapitre IV : Simulation par PSpice d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin

La figure IV-16 représente les caractéristiques I(V) et P(V) de la cellule solaire pour différentes valeurs de l'épaisseur de l'émetteur : 0,1 μm -0,2 μm -0,3 μm -0,7 μm -1 μm . Cette figure indique distinctement une augmentation du courant de court-circuit et légèrement de la tension de circuit-ouvert avec la diminution de l'épaisseur de l'émetteur x_j , alors que le facteur de forme diminue d'environ 0,42 %. Quant à la puissance maximale et au rendement, leurs variations sont de l'ordre de celles du courant de court-circuit et de la tension de circuit-ouvert. En comparant une cellule solaire avec une épaisseur de l'émetteur de 0,3 μm et une autre cellule solaire de 0,1 μm , nous pouvons dire qu'une diminution de l'épaisseur de l'émetteur de 0,2 μm engendre une augmentation de 0,5% du rendement de la cellule solaire. D'après le résultat obtenu, nous choisissons donc un émetteur de 0,1 μm pour la suite d'étude, ce choix est dû au rendement élevé trouvé par rapport aux autres épaisseurs.

IV-8. L'influence de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la base:

La longueur de diffusion est un paramètre extrêmement influent sur le rendement des cellules photovoltaïques. Pour cela, nous avons fixé les autres paramètres de la cellule solaire et varié la longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la base. Les résultats par PSpice des caractéristiques I(V) et P(V) pour ce cas, sont affichés sur la Figure IV-17 :

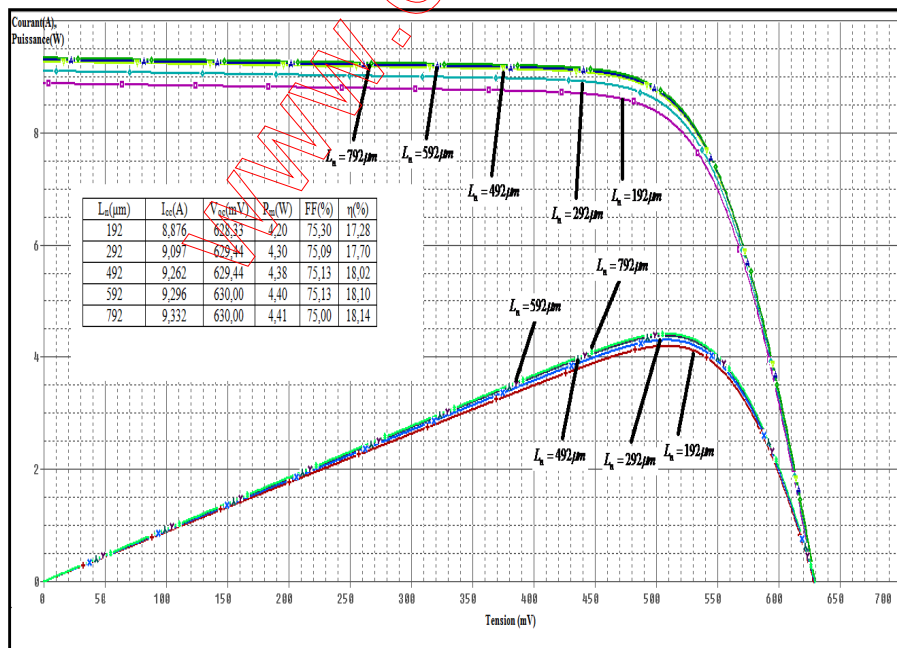


Figure IV-17 : Effet de la longueur de diffusion sur les caractéristiques I(V) et P(V).

Chapitre IV : Simulation par PSpice d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin

Sur la figure IV-17, nous avons présenté les caractéristiques I(V) et P(V) de la cellule solaire, pour différentes valeurs de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la base : 192 μm , 292 μm , 492 μm , 592 μm , 792 μm . Selon les résultats exprimés sur cette figure, on remarque que le rendement est à son maximum pour la longueur de diffusion la plus élevée. En comparant au niveau rendement, une cellule solaire avec une longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la base de 492 μm et une cellule solaire à 792 μm , les calculs montrent qu'une différence de 300 μm fait croître le rendement de la cellule solaire que de 0,12%. Nous pouvons conclure qu'à partir de cette étude qu'il n'est pas nécessaire d'augmenter la longueur de diffusion des électrons minoritaires dans la base de la cellule solaire simulée en ne dépassant pas de l'ordre de la limite de l'épaisseur de la base.

IV-9. L'influence de l'épaisseur de la cellule solaire:

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de la cellule solaire, nous avons pris la valeur optimale de l'épaisseur de l'émetteur ($x_j=0,1\mu\text{m}$) précédemment déterminée tout en variant cette épaisseur de la cellule. Les résultats ainsi obtenus de l'allure de la densité du courant de court-circuit total pour différentes épaisseurs de la cellule solaire allant de 100 μm à 400 μm sont réunis sur la figure ci-dessous (Figure IV-18).

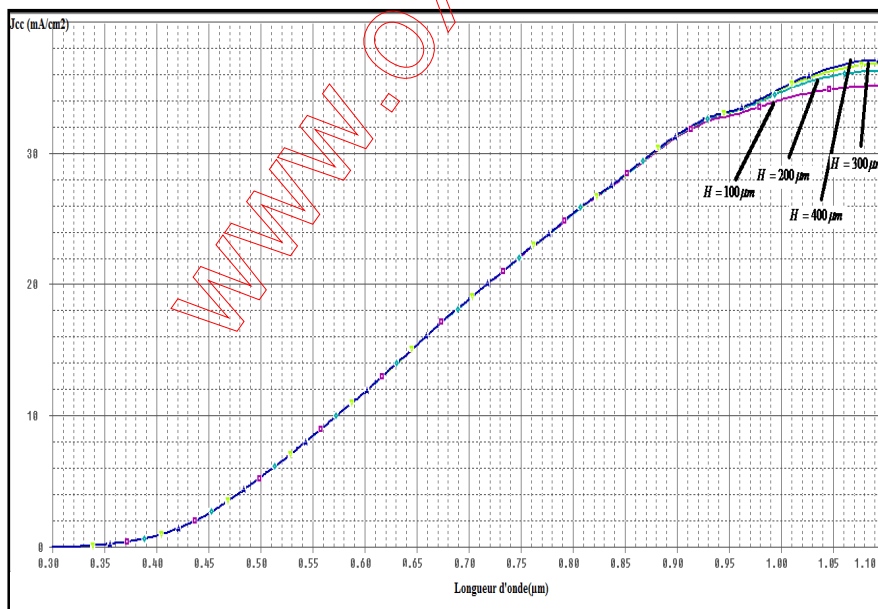


Figure IV-18: Influence de l'épaisseur de la cellule solaire sur la variation de la densité du courant de court-circuit.

Comme on peut le voir sur cette figure, on remarque que l'influence sur la densité du courant de court-circuit total avec l'augmentation de l'épaisseur de la cellule solaire

Chapitre IV : Simulation par PSpice d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin

n'apparaît qu'au voisinage de la longueur d'onde de seuil du Silicium trouvée avec un léger accroissement.

Les suites de la simulation de la caractéristique I(V) et P(V) pour ce cas de figure, sont portées sur la Figure IV-19 :

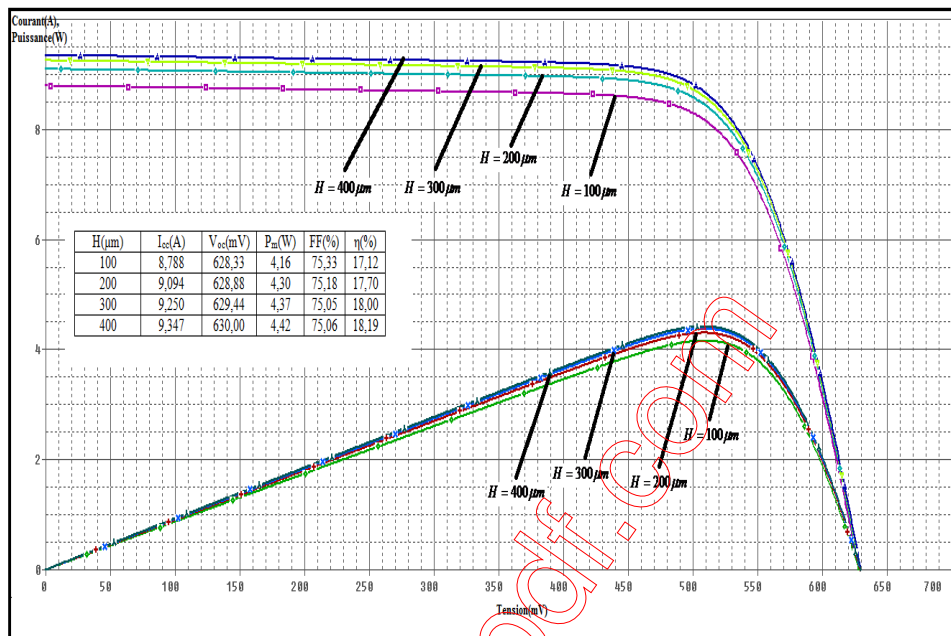


Figure IV-19 : Effet de l'épaisseur de la cellule solaire sur les caractéristiques I(V).

La figure IV-19 représente les caractéristiques I(V) et P(V) de la cellule solaire simulée, pour différentes valeurs de l'épaisseur de la cellule : 100 μm, 200 μm, 300 μm, 400 μm. Cette figure montre clairement l'augmentation du rendement avec l'épaisseur de la cellule. Par ailleurs, On peut constater qu'à une épaisseur de la cellule solaire de 400 μm, on prévoit un rendement théorique de l'ordre de 18,19%, soit une augmentation de 0,5% du rendement et ce grâce à l'amélioration de l'absorption des photons en sein de la cellule solaire.

IV-10. L'influence de la vitesse de recombinaison en surface de la base et l'émetteur de la cellule solaire:

La vitesse de recombinaison des porteurs en surface est aussi un paramètre important qui a une grande influence sur le rendement de la cellule solaire. Elle dépend indéniablement de la longueur de diffusion des porteurs. Pour examiner l'influence de la recombinaison sur les faces avant et arrière de la cellule solaire, nous avons pris la valeur optimale de l'épaisseur de l'émetteur précédemment déterminée et en faisant varier séparément ces deux paramètres. Les résultats de la simulation sont présentés sur les figures IV-20 et IV-21 ci-dessous.

Chapitre IV : Simulation par PSpice d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin

On constate sur ces figures que la vitesse de recombinaison en surface joue un rôle majeur dans le rendement des cellules solaires. Une grande vitesse de recombinaison peut dégrader le rendement, de plus, on discerne que la vitesse de recombinaison en surface de l'émetteur n'a pas beaucoup d'influence sur les caractéristiques de la cellule. Par contre la vitesse de recombinaison en surface de la base affecte bien sur les performances de la cellule, notamment son rendement (parce que la longueur de diffusion des électrons minoritaires dans la base $L_n=490 \mu\text{m}$ est comparable à l'épaisseur de la base, la raison en est que les porteurs minoritaires photocréés dans la base atteindront la surface arrière de la cellule avant toute recombinaison). On constate selon nos calculs qu'avec une vitesse $S_b=10 \text{ cm/s}$, on peut obtenir un rendement de 18,23 %, soit une optimisation de 0,53 %.

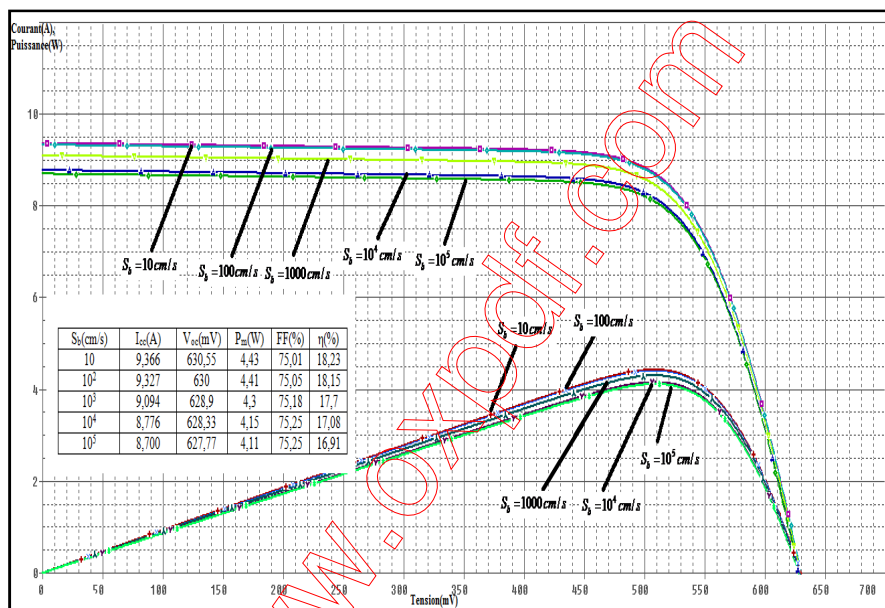


Figure IV-20 : Effet de la vitesse de recombinaison en surface de la base sur les caractéristiques I(V) et P(V).

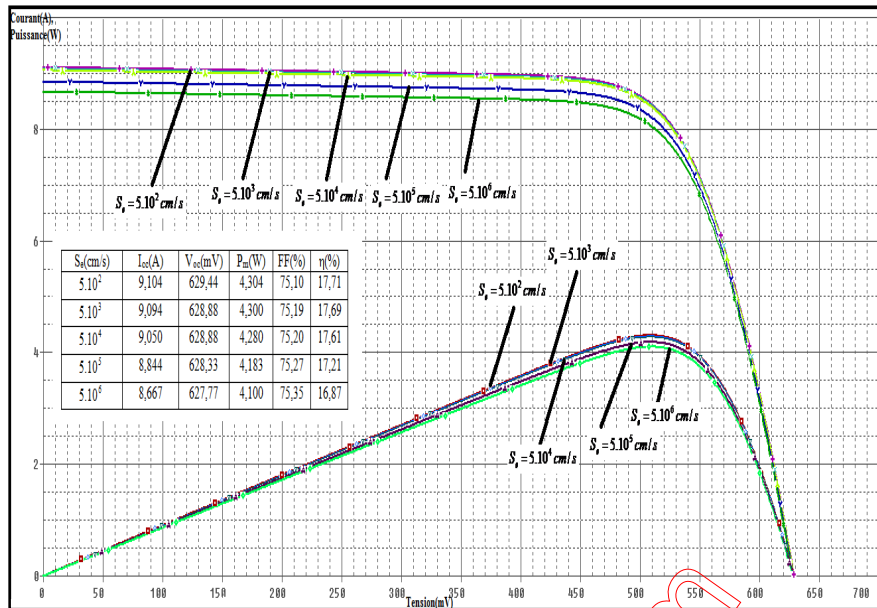


Figure IV-21 : Effet de la vitesse de recombinaison en surface de l'émetteur sur les caractéristiques I(V) et P(V).

IV-11. L'Influence de la résistance série:

Si nous restreignons l'analyse seulement à l'effet de la résistance de série, la cellule solaire peut être modélisée par la diode de diffusion et une résistance de série, en simplifiant l'équation (II-37) :

$$I = I_{cc} - I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) - 1 \right) \quad (IV-10)$$

Pour les conditions de circuit ouvert, l'équation (IV-10) devient:

$$0 = I_{cc} - I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{oc}}{nV_T}\right) - 1 \right) \quad (IV-11)$$

A partir de l'équation (IV-11), on tire I_0 :

$$I_0 = \frac{I_{cc}}{\left(\exp\left(\frac{V_{oc}}{nV_T}\right) - 1 \right)} \approx I_{cc} \cdot \exp\left(-\frac{V_{oc}}{nV_T}\right) \quad (IV-12)$$

Ensuite, on remplace I_0 (équation IV-12) par son expression dans l'équation (IV-10) :

$$I = I_{cc} - I_{cc} \cdot \exp\left(-\frac{V_{oc}}{nV_T}\right) \cdot \left(\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) - 1 \right) \quad (IV-13)$$

Au point de fonctionnement de la cellule à la puissance maximale, l'expression du courant maximal est donnée comme suit :

Chapitre IV : Simulation par PSpice d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin

$$I_m \approx I_{cc} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{V_m + I \cdot R_s - V_{oc}}{nV_T}\right) \right) \quad (\text{IV-14})$$

Une formule simple qui suppose que la puissance maximale délivrée par la cellule photovoltaïque peut être décrite sous la forme suivante :

$$P_m' = P_m - I_m^2 \cdot R_s \quad (\text{IV-15})$$

Avec P_m' est la puissance maximale quand la résistance série n'est pas négligeable.

En mettant P_m en facteur, on obtient :

$$P_m' = P_m \left(1 - \frac{I_m}{V_m} \cdot R_s \right) \quad (\text{IV-16})$$

Si on suppose que :

$$\frac{I_m}{V_m} \approx \frac{I_{cc}}{V_{oc}} \quad (\text{IV-17})$$

L'équation (IV-16) devient donc :

$$P_m' = P_m \cdot \left(1 - \frac{I_{cc}}{V_{oc}} \cdot R_s \right) = P_m (1 - r_s) \quad (\text{IV-18})$$

Où :

$$r_s = \frac{R_s}{\frac{V_{oc}}{I_{cc}}} \quad (\text{IV-19})$$

r_s est la valeur normalisée de la résistance série. Le résultat de l'équation (IV-18) est facilement translaté au facteur de forme :

$$FF = \frac{P_m'}{V_{oc} I_{cc}} = \frac{P_m (1 - r_s)}{V_{oc} I_{cc}} = FF_0 (1 - r_s) \quad (\text{IV-20})$$

Cette dernière relation relie donc la valeur du facteur de forme FF pour une résistance série non nulle à la valeur du facteur de forme FF_0 quand la résistance série négligeable.

L'effet de la résistance série sur la caractéristique I(V) de la cellule solaire simulée, est montré sur la figure IV-22:

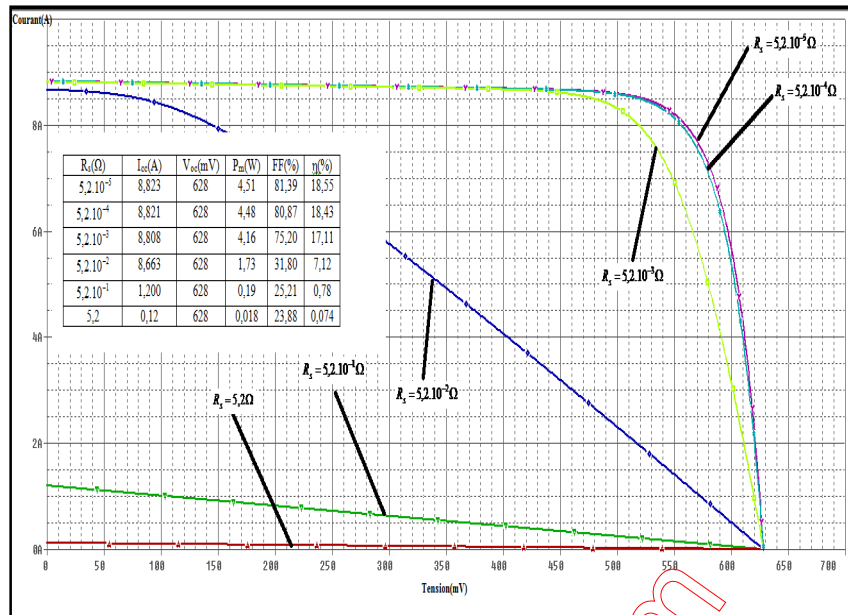


Figure IV-22 : Effet de la résistance série sur la caractéristique I(V).

La Figure IV-22 représente la caractéristique I(V) de la cellule solaire, pour différentes valeurs de la résistance série: $5,2 \cdot 10^{-5} \Omega$ - $5,2 \cdot 10^{-4} \Omega$ - $5,2 \cdot 10^{-3} \Omega$ - $5,2 \cdot 10^{-2} \Omega$ - $5,2 \cdot 10^{-1} \Omega$ - $5,2 \Omega$. Cette figure montre clairement une minime augmentation du courant de court-circuit relative à la diminution de la résistance série ($R_s = 5,2 \cdot 10^{-3} \Omega$). La tension de circuit ouvert est pratiquement constante sur la gamme des résistances séries présentées dans la même figure, alors que le facteur de forme tend à diminuer. Aussi, on observe que la puissance maximale et le rendement présentent des valeurs maximales pour des moindres résistances séries ($R_s = 5,2 \cdot 10^{-4} \Omega$ et $R_s = 5,2 \cdot 10^{-5} \Omega$). Par ailleurs, on remarque une importante dégradation du rendement et de la puissance maximale pour des résistances séries un peu plus grandes ($5,2 \cdot 10^{-1} \Omega$ et $5,2 \Omega$). D'autre part, on constate qu'avec une résistance série $R_s = 5,2 \cdot 10^{-5} \Omega$, on obtient un rendement de 18,55% alors qu'avec une résistance série de $5,2 \cdot 10^{-4} \Omega$, on parvient à un rendement de 18,43%. On peut donc conclure que pour un bon fonctionnement de la cellule solaire, les valeurs de la résistance série doivent être les plus réduites possibles par l'utilisation des techniques à l'exemple de celles de la technologie de l'émetteur sélectif (le haut niveau de dopage présent sous les contacts réduirait la résistance de contact sur la face avant de la cellule solaire $R_c \propto \exp(1/N_D)$ et se répercute par conséquent de manière bénéfique sur la résistance série totale).

IV-12. L'influence de la résistance shunt:

L'effet de la résistance shunt sur les caractéristiques I(V) et P(V) de la cellule solaire simulée est présenté sur la Figure IV-23:

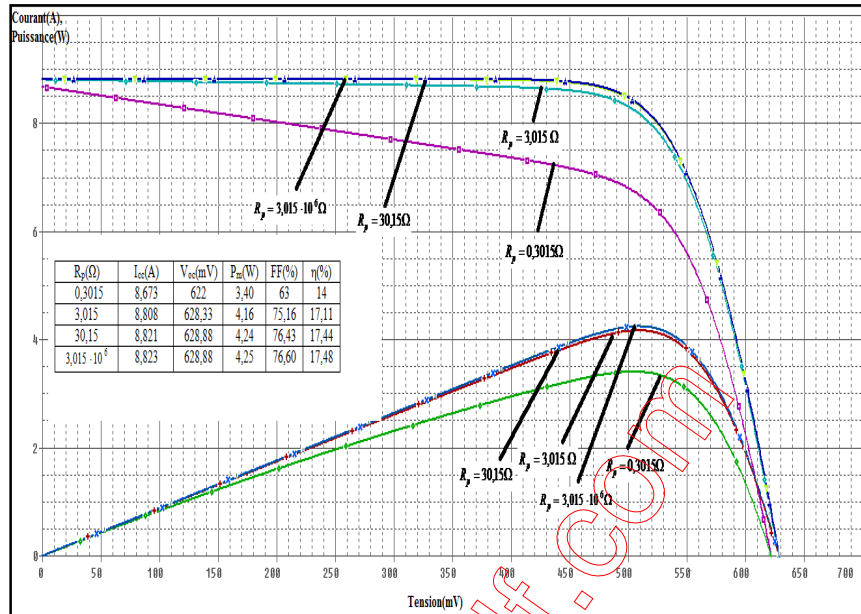


Figure IV-23 : Effet de la résistance de shunt sur les caractéristiques I(V) et P(V).

La figure IV-23 montre les caractéristiques I(V) et P(V), pour différentes valeurs de la résistance shunt: 0,3015 Ω-3,015 Ω-30,15 Ω- $3,015 \cdot 10^6 \Omega$. Il est évident sur cette figure que, si la résistance shunt prend des valeurs plus petites (moins de $R_p = 3,015 \Omega$), la puissance maximale délivrée va légèrement se rabaisser et qui verrait le rendement diminué. En revanche, si elle prend des valeurs plus grandes ($3,015 \cdot 10^6 \Omega - 30,15 \Omega$) le rendement va manifestement augmenter. D'autre part, on distingue qu'il n'y a pas une grande différence entre le rendement trouvé respectivement pour des résistances shunt $R_p = 3,015 \cdot 10^6 \Omega$ et $R_p = 30,15\Omega$. Il suffit donc d'augmenter dix fois la résistance shunt de la cellule solaire simulée ($R_p = 3,015\Omega$) pour une amélioration de 0,33% du rendement.

Le tableau suivant résume les paramètres étudiés de la cellule qui peuvent donner un bon rendement :

Epaisseur de l'émetteur	0,1μm
Longueur de diffusion	792μm
Epaisseur de la cellule solaire	400μm
La résistance série	$5,2 \times 10^{-5} \Omega$
La résistance shunt	30,15Ω
La vitesse de recombinaison de l'émetteur	10 cm/s

Tableau IV-5: paramètres optimisés de la cellule solaire obtenus par notre étude.

IV-13. Influence de la température sur la performance de la cellule solaire :

La température de fonctionnement de la cellule solaire a un important effet non moins négligeable sur la réponse électrique de cette dernière. En tenant compte du fait que pour dans certaines applications terrestres, les cellules peuvent facilement se réchauffer à 60-65 °C [8] et que pour les applications spatiales, les températures peuvent être encore plus élevées, nous avons jugé utile d'étudier dans ce travail l'effet de la température dans une cellule solaire où son influence est implicitement incluse dans les paramètres prédéfinis du schéma électrique équivalent. À savoir la densité du courant de saturation d'une diode qui ait une forte dépendance de la température où elle est généralement donnée par la relation suivante simplifiée:

$$J_0 = B \cdot T^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_{g_0}}{KT}\right) \quad (\text{IV-21})$$

Avec B , une constante indépendante de la température mais dépendante des paramètres de transport du matériau.

D'autre part, l'expression de la bande interdite d'un semi-conducteur en fonction de la température est exprimée par:

$$E_g = E_{g_0} - \frac{a \cdot T^2}{b + T} \quad (\text{IV-22})$$

Avec E_{g_0} est l'énergie de la bande interdite à la température absolue 0 °K pour le semi-conducteur considéré. Pour le silicium, elle est égale à environ 1,17 eV.

Chapitre IV : Simulation par PSpice d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin

a : Constante du matériau qui est égale à $473 \cdot 10^{-4} \left(\frac{eV}{^{\circ}K} \right)$ pour le Silicium [9].

b : Une seconde constante du matériau qui vaut $636^{\circ}K$ pour le Silicium.

Les figures IV-24 et IV-25 représentent les variations respectives du courant de saturation et de la largeur de la bande interdite avec la température :



Figure IV-24 : l'évolution du courant de saturation avec la température.

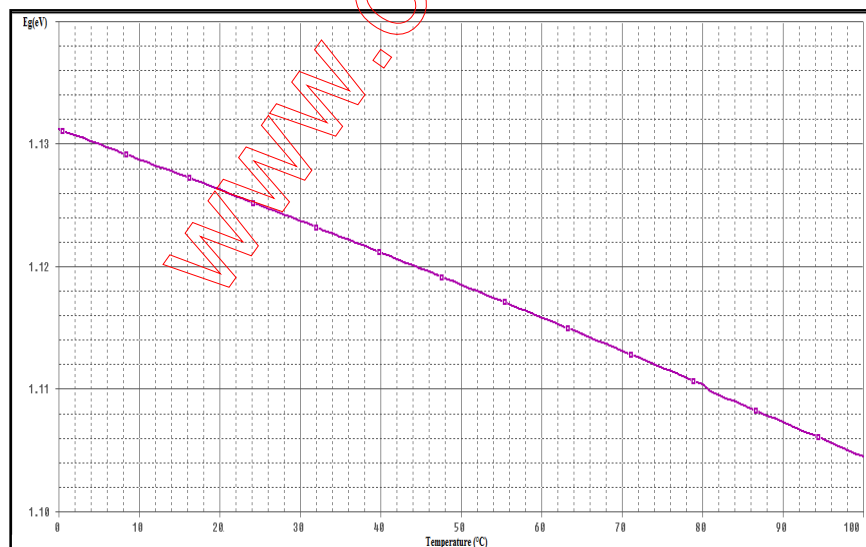


Figure IV-25: l'évolution de la largeur de la bande interdite avec la température.

A partir de ces figures, on voit que le courant de saturation augmente avec la température à cause de l'augmentation de la densité intrinsèque des porteurs n_i avec la température contre une décroissance de la largeur de la bande interdite avec celle-ci.

Chapitre IV : Simulation par PSpice d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin

Les calculs indiquent une infime augmentation du courant de court-circuit, I_{cc} avec la température (Voir Figure IV-26). Toutefois, il s'agit d'un petit effet et le coefficient de la température de la densité du courant de court-circuit pour le silicium est donné par [8]:

$$\frac{dJ_{cc}}{dT} = J_{cc_coef} = 6,4 \cdot 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

La relation (IV-9) devient dans ce cas :

$$g_{irrad} = \frac{J_{cc} \cdot A}{1000} \cdot G + J_{cc_coef} \cdot A \cdot (T - 25) \quad (\text{IV-23})$$

L'influence de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V) est reportée sur la figure IV-26 :

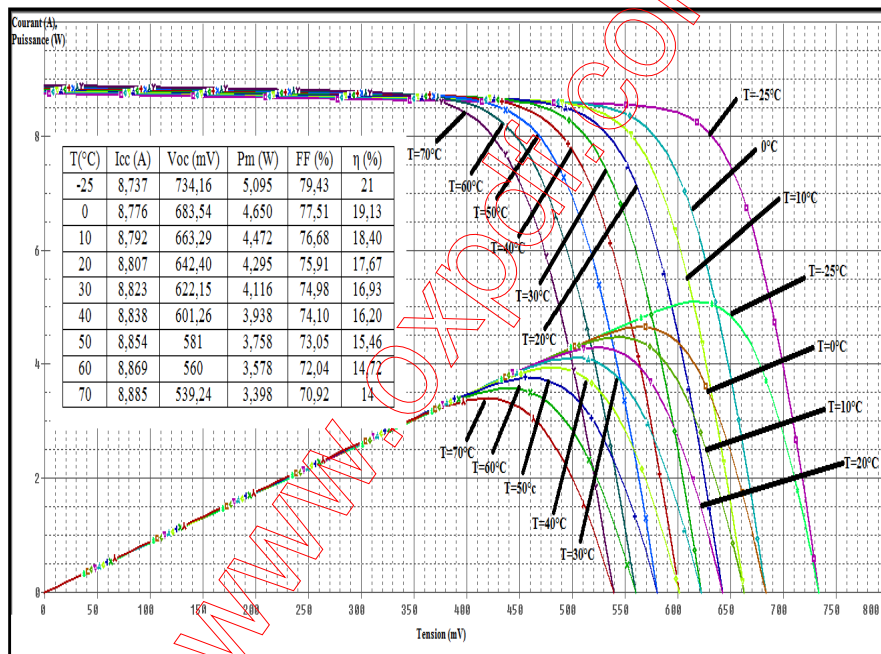


Figure IV-26: Influence de la température sur I(V) et P(V) de la cellule solaire simulée.

La figure IV-26 montre l'influence néfaste d'une température élevée sur le rendement de la cellule photovoltaïque. De point de vue théorique, cela est dû principalement à la dépendance de la tension de circuit ouvert V_{oc} avec le courant de la saturation J_0 et donc implicitement avec la température (équation IV-21). Par contre, aux basses températures on observe une amélioration du fonctionnement de la cellule photovoltaïque. On discerne qu'aux températures de fonctionnement comprises entre -25°C et 0°C , on obtient dans l'ordre des rendements de 21% et 19,13%. On peut ainsi conclure que les cellules solaires privilégient un meilleur fonctionnement dans des environnements froids et en même temps ensoleillés.

Chapitre IV : Simulation par PSpice d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin

Actuellement, il existe des techniques de refroidissement, dans les zones torrides, des panneaux photovoltaïques qui sont ventilés par de l'air frais ou de l'eau pour évacuer l'énergie thermique des cellules solaires [10].

IV-14. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons validé les résultats expérimentaux d'Irysolar par notre programme élaboré à l'aide de PSpice. Nous avons étudié l'impact de certains paramètres sur la performance de la cellule photovoltaïque simulée. Nous avons constaté par exemple que l'abaissement de l'épaisseur de l'émetteur de la cellule solaire à $0,1\mu\text{m}$ peut augmenter le rendement expérimental de notre cellule de 0,5%. Ainsi qu'une longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la base de $792\mu\text{m}$ peut améliorer le rendement que de 0,12%. Aussi, nous avons observé qu'avec une épaisseur de la cellule solaire de $400\mu\text{m}$, on peut obtenir un rendement de 18,19%, tout en prenant en compte les valeurs optimales de l'épaisseur de l'émetteur et de la longueur de diffusion des porteurs précédemment cités. La vitesse de recombinaison a un effet majeur sur le rendement de la cellule solaire, et on a vu qu'avec une vitesse de recombinaison en surface de la base $S_b=10\text{ cm/s}$, on obtient un rendement de 18,23%. Ensuite, nous avons observé l'influence des résistances série et shunt où une résistance série de $5,2 \cdot 10^{-4}\Omega$ et de shunt de $30,15\Omega$, donnent un meilleur rendement de 18,43% et 17,44% respectivement.

On a également montré qu'une température élevée de la cellule solaire dégrade ses performances contrairement aux basses températures qui favorisent le bon fonctionnement de la cellule solaire. Ainsi, on remarque qu'avec une température de 0°C , on obtient un rendement de 18,14%.

Bibliographie du Chapitre IV :

- [1]- <http://www.semcoeng.com/irysolar> (consulté le 15/05/2013).
- [2] - Augustin McEvoy, Tom Markvart, Luis Castaner, "Practical Handbook of Photovoltaic: Fundamentals and Applications", page 111, 2003, Elsevier Ltd.
- [3]- [\(consulté le 15/05/2013\)](http://www.pv.unsw.edu.au/info-about/our-school/products-services/pc1d)
- [4]- Paul A. Basore: « PC1D Installation Manuel and User's Guide Version 3.1 », Sandia National Laboratories (UNSW-Australia), May 1991, page20.

Chapitre IV : Simulation par PSpice d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin

[5]- *“Properties of Crystalline Silicon”*, Edited by R.Hull, INSPEC, London, 1999, page 414.
http://books.google.dz/books?id=C_TWB_0rRLgC&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (consulté le 15/05/2013).

[6]- Lelievre Jean-François, « *Elaboration de SiNx:H par PECVD : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques* », INSA de Lyon (France), Laboratoire INL - Institut des Nanotechnologies de Lyon (France), 2007, page103.

[7]- <http://www.filmetrics.com/reflectance-calculator> (consulté le 15/05/2013).

[8]- *“Modeling photovoltaic systems using PSpice”*, Luis Castañer and Santiago Sylvestre, Universidad Politecnica de Cataluña Barcelona, Spain, Edit. John Wiley and Sons, LTD, 2002, page.60.

[9]- <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/1083/9/chapitre3.pdf> (consulté le 15/05/2013).

[10]- R. Mazón-Hernández, JR García-Cascales, F Vera-García, A Sánchez-Kaiser, B Zamora-Parra Thermal and Fluid Engineering Department, Technical University of Cartagena, Doctor Fleming, s/n 30202, Cartagena, Murcia, Spain, “Development of an installation to reduce the temperature of photovoltaic modules and improve their efficiency”, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10), Granada (Spain), 23rd to 25th March, 2010.

[11]- Ghada G. Younise: “Modelling and Analysis of Homojunction Silicon Solar Cell”, *Jou. Raf. Sci.*, Vol. 22, No.1 pp 72- 79, 2011.

Conclusion générale

L'industrie photovoltaïque est constituée à plus de 90% de l'utilisation du silicium comme matériau de base. Ce matériau bénéficie également d'une implantation importante et durable dans l'industrie mondiale de la micro-électronique.

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude, sur la base d'une modélisation à l'aide d'un programme élaboré par PSpice, d'une cellule solaire de type polycristalline (poly-Si) fournie par la société française de fabrication de cellules solaires, Irysolar de Montpellier (France).

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé les notions générales relatives à l'ensoleillement, utiles pour l'optimisation du fonctionnement des panneaux photovoltaïques.

Dans un second chapitre, nous avons présenté la structure, le principe physique de fonctionnement et les modèles électriques d'une cellule solaire idéale ensuite réelle, ainsi que ses principales caractéristiques. Par la suite, nous avons rappelé les différentes étapes des techniques de fabrication des cellules solaires à base de silicium cristallin ainsi que les actuelles technologies des cellules photovoltaïques existantes sur le marché industriel. En fin de ce même chapitre, nous avons décrit l'utilité et l'influence de l'application d'un supplémentaire champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) sur l'amélioration des performances de la cellule photovoltaïque.

Dans le troisième chapitre, nous avons exposé le logiciel PSpice choisi ici pour la simulation de la cellule, notamment en ce qui concerne cette étude, les différents outils et les composants de ce programme.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous avons établi des programmes de calcul sous cet environnement PSpice qui a permis d'obtenir les variations de la densité du courant de court-circuit J_{cc} délivrée par la cellule, le rendement quantique interne (RQI), la réponse spectrale interne (RSI) dans la gamme du spectre solaire étalon AM1.5G, ensuite la caractéristique $I(V)$ et la puissance $P(V)$ de cette même cellule.

D'autre part, le programme élaboré est également adapté pour l'étude d'autres effets tels que l'optimisation de l'épaisseur de la jonction, de la longueur de diffusion des porteurs, des différentes vitesses de recombinaisons, de la résistance shunt, de la résistance série et enfin de la température sur les performances de la cellule photovoltaïque.

A titre de comparaison, nous avons clairement noté que les paramètres caractéristiques de la cellule solaire déterminés par la simulation sont légèrement supérieurs à ceux trouvés expérimentalement par l'équipe de recherche d'Irysolar. L'explication vient du fait que plusieurs facteurs limitant les différents défauts présents dans le silicium polycristallin comme les gradients d'impuretés, de composition, les pertes résistives et optiques, etc... qui ne sont pas pris en considération dans les programmes de ce travail.

En outre, on a montré que la diminution de l'épaisseur de l'émetteur à $0,1\mu\text{m}$ augmente le rendement expérimental de notre cellule simulée de l'ordre de 0,5% environ par rapport au rendement théorique trouvé (17,11%).

Aussi, une longueur de diffusion de $792\mu\text{m}$ des porteurs minoritaires dans la base accroît légèrement le rendement de la cellule de 0,12 % par rapport au rendement théorique trouvé (17,11 %).

Par ailleurs, une épaisseur de $400\mu\text{m}$ de la cellule solaire permet d'obtenir un rendement de 18,19 %, tout en prenant en compte les valeurs optimales de l'épaisseur de l'émetteur et de la longueur de diffusion des porteurs précédemment cités.

Quant à la vitesse de recombinaison, elle a un effet majeur sur le rendement de la cellule solaire. On a ainsi constaté qu'avec une vitesse de recombinaison en surface de la base $S_b=10\text{ cm/s}$, on obtient un rendement bonifié de 18,23 % par rapport à ce même rendement théorique.

Ensuite, nous avons noté qu'une résistance série de $0,52\text{ m}\Omega$ et shunt de $30,15\ \Omega$ donnent de bons rendements, respectivement de l'ordre de 18,43 % et 17,44 %.

D'autre part, nous avons remarqué qu'aux températures élevées ($60 ; 70 ; 80\text{ }^\circ\text{C}$), les performances de la cellule se dégradent proportionnellement à ces élévations contrairement aux basses températures ($0 ; -20\text{ }^\circ\text{C}$) qui optimisent linéairement les paramètres de fonctionnement de la cellule. A titre d'exemple, une température de $0\text{ }^\circ\text{C}$ améliore le rendement à 18,14 %.

Enfin, nous attendons à ce que cette étude serait reprise et poursuivie par d'autres travaux tout en améliorant le programme en prenant en compte tous les paramètres réels de la cellule afin de prédire les performances des cellules solaires avant de les réaliser et que ce travail servirait comme un élément de base supplémentaire pour d'autres recherches dans le domaine du photovoltaïque.

www.oxpdf.com

Résumé:

Ce travail contribue à la simulation d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin (poly-Si), fabriquée par la société française Irysolar de Montpellier. Nous avons établi des programmes de calculs sous l'environnement PSpice, permettant de tracer la caractéristique I-V et de calculer la puissance maximale délivrée par la cellule photovoltaïque correspondante.

L'objectif de cette étude est de comparer les paramètres caractéristiques de la cellule, obtenus par nos estimations et ceux trouvés expérimentalement par l'équipe d'Irysolar de Montpellier (France). Après la validation des résultats par notre simulation, on optimise ensuite dans ce travail les performances de la cellule par l'étude de l'influence de certains paramètres sur le rendement comme l'épaisseur de la jonction, longueur de diffusion des porteurs, les vitesses de recombinaisons, la résistance shunt, la résistance série et la température.

MOTS-CLES: Silicium polycristallin, PSpice, Rendement, Énergie solaire, Cellule Photovoltaïque, Epaisseur de la jonction, Longueur de diffusion des porteurs, Les vitesses de recombinaisons, La résistance shunt, La résistance série.

Abstract:

This work contributes to the simulation of a solar cell based on polycrystalline silicon (poly-Si), manufactured by the French company Irysolar Montpellier. We have developed programs for calculations under the PSpice environment, to draw the IV characteristic and calculate the maximum power delivered by the corresponding photovoltaic cell.

The objective of this study is to compare the characteristics of the cell parameters obtained by our estimates and those found experimentally by the Irysolar team of Montpellier (France). After validating the results of our simulation, the performance of the cell is then optimized in this work by studying the influence of some parameters on the efficiency as the thickness of the junction, carrier diffusion length, speeds recombination, the shunt resistance, series resistance and temperature.

KEYWORDS: polycrystalline silicon, PSpice, Efficiency, Solar Energy, Solar Cells, Thickness of the junction, the carrier diffusion length, and recombination speeds, the shunt resistance, series resistance.

Annexe 1

Les fichiers PSpice utilisés dans la simulation

Le fichier d'AM1,5G :

*am15g.lib

.subckt am15g 11 10

v_am15g 11 10 pwl 0.307 7.2

+0.329 9.4

+0.347 11.5

+0.359 12.8

+0.371 3.1

+0.374 12.6

+0.382 3.1

+0.387 1.3

+0.393 18.7

+0.396 5.2

+0.406 3.1

+0.413 6.3

+0.417 7.3

+0.422 4.2

+0.489 3.1

+0.497 17.8

+0.506 20.4

+0.525 59.8

+0.546 67.7

+0.564 68.9

+0.577 79.2

+0.59 85.9

www.oxpof.com

+0.6 58.2
+0.609 95.9
+0.618 25.8
+0.625 87.8
+0.633 20.4
+0.646 1.2
+0.667 1.9
+0.689 29.2
+0.713 165.3
+0.739 212.5
+0.753 226.3
+0.761 235.6
+0.77 220.4
+0.779 238.5
+0.786 235.7
+0.796 265
+0.806 264.3
+0.816 253.1
+0.828 167.1
+0.84 101.7
+0.848 101.3
+0.859 53.7
+0.889 1.5
+0.919 31.3
+0.939 241.1
+0.961 398.1
+1.004 463.1

www.oxpdf.com

+1.033 408.2

.end am15g

Le fichier de la longueur d'onde:

wavelength.lib

.subckt wavelength 11 10

v_longeuronde 11 10 pwl 0.295u 0.295

0.295u 0.295

+ 0.305u 0.305

+ 0.315u 0.315

+ 0.325u 0.325

+ 0.335u 0.335

+ 0.345u 0.345

+ 0.355u 0.355

+ 0.365u 0.365

+ 0.375u 0.375

+ 0.385u 0.385

+ 0.395u 0.395

+ 0.405u 0.405

+ 0.415u 0.415

+ 0.425u 0.425

+ 0.435u 0.435

+ 0.445u 0.445

+ 0.455u 0.455

+ 0.465u 0.465

+ 0.475u 0.475

+ 0.485u 0.485

+ 0.495u 0.495

www.oxpof.com

+ 0.505u 0.505
+ 0.515u 0.515
+ 0.525u 0.525
+ 0.535u 0.535
+ 0.545u 0.545
+ 0.555u 0.555
+ 0.565u 0.565
+ 0.575u 0.575
+ 0.585u 0.585
+ 0.595u 0.595
+ 0.605u 0.605
+ 0.615u 0.615
+ 0.625u 0.625
+ 0.635u 0.635
+ 0.645u 0.645
+ 0.655u 0.655
+ 0.665u 0.665
+ 0.675u 0.675
+ 0.685u 0.685
+ 0.695u 0.695
+ 0.6983u 0.6983
+ 0.7u 0.7
+ 0.71u 0.71
+ 0.72u 0.72
+ 0.7277u 0.7277
+ 0.73u 0.73
+ 0.74u 0.74

www.xpdf.com

+ 0.75u 0.75
+ 0.7621u 0.7621
+ 0.77u 0.77
+ 0.78u 0.78
+ 0.79u 0.79
+ 0.8u 0.8
+ 0.8059u 0.8059
+ 0.825u 0.825
+ 0.83u 0.83
+ 0.835u 0.835
+ 0.8465u 0.8465
+ 0.86u 0.86
+ 0.87u 0.87
+ 0.875u 0.875
+ 0.8875u 0.8875
+ 0.9u 0.9
+ 0.9075u 0.9075
+ 0.915u 0.915
+ 0.925u 0.925
+ 0.93u 0.93
+ 0.94u 0.94
+ 0.95u 0.95
+ 0.955u 0.955
+ 0.966u 0.966
+ 0.975u 0.975
+ 0.985u 0.985
+ 1.018u 1.018

www.oxpdf.com

+ 1.082u 1.082
+ 1.094u 1.094
+ 1.098u 1.098
+ 1.101u 1.101
+ 1.128u 1.128
+ 1.131u 1.131
+ 1.144u 1.144
+ 1.178u 1.178
+ 1.264u 1.264
.ends wavelengh

Le fichier du coefficient d'absorption du silicium:

*absorption.lib

.subckt absorption 11 10

V_abscoefsilicon 11 10 pwl 0.295u 1.890E+06

+ 0.305u 1.545E+06

+ 0.315u 2.080E+06

+ 0.325u 1.875E+06

+ 0.335u 1.155E+06

+ 0.345u 1.100E+06

+ 0.355u 1.060E+06

+ 0.365u 8.860E+05

+ 0.375u 5.070E+05

+ 0.385u 2.260E+05

+ 0.395u 1.385E+05

+ 0.405u 9.250E+04

+ 0.415u 6.765E+04

+ 0.425u 5.180E+04

+ 0.435u 4.165E+04
+ 0.445u 3.380E+04
+ 0.455u 2.800E+04
+ 0.465u 2.360E+04
+ 0.475u 2.000E+04
+ 0.485u 1.705E+04
+ 0.495u 1.485E+04
+ 0.505u 1.280E+04
+ 0.515u 1.100E+04
+ 0.525u 9.735E+03
+ 0.535u 8.865E+03
+ 0.545u 7.600E+03
+ 0.555u 6.775E+03
+ 0.565u 6.195E+03
+ 0.575u 5.685E+03
+ 0.585u 5.100E+03
+ 0.595u 4.585E+03
+ 0.605u 4.245E+03
+ 0.615u 3.955E+03
+ 0.625u 3.685E+03
+ 0.635u 3.145E+03
+ 0.645u 3.150E+03
+ 0.655u 2.895E+03
+ 0.665u 2.650E+03
+ 0.675u 2.435E+03
+ 0.685u 2.255E+03
+ 0.695u 2.085E+03

www.oxpdf.com

+ 0.6983u 1.930E+03
+ 0.7u 2.000E+03
+ 0.71u 1.860E+03
+ 0.72u 1.710E+03
+ 0.7277u 1.400E+03
+ 0.73u 1.580E+03
+ 0.74u 1.460E+03
+ 0.75u 1.340E+03
+ 0.7621u 1.234E+03
+ 0.77u 1.133E+03
+ 0.78u 1.039E+03
+ 0.79u 9.510E+02
+ 0.8u 8.690E+02
+ 0.8059u 8.300E+02
+ 0.825u 6.880E+02
+ 0.83u 6.550E+02
+ 0.835u 6.245E+02
+ 0.8465u 5.535E+02
+ 0.86u 4.830E+02
+ 0.87u 4.340E+02
+ 0.875u 4.115E+02
+ 0.8875u 3.890E+02
+ 0.9u 3.080E+02
+ 0.9075u 2.720E+02
+ 0.915u 2.555E+02
+ 0.925u 2.240E+02
+ 0.93u 2.090E+02

www.oxpdf.com

+ 0.94u 1.820E+02
+ 0.95u 1.570E+02
+ 0.955u 1.455E+02
+ 0.966u 1.240E+02
+ 0.975u 1.040E+02
+ 0.985u 8.705E+01
+ 1.018u 3.990E+01
+ 1.082u 6.200E+00
+ 1.094u 4.700E+00
+ 1.098u 3.500E+00
+ 1.101u 3.500E+00
+ 1.128u 2.000E+00
+ 1.131u 1.5
+ 1.144u 0.68
+ 1.178u 0.065
+ 1.264u 0

.ends absorption

Le fichier du coefficient de la réflexion de la couche antireflet SiNx:

*reflection.lib

.subckt reflection 11 10

V_coef_reflexion_silicium 11 10 pw1 0.295u 0.2398

+0.305u	0.2291
+0.315u	0.2266
+0.325u	0.2266
+0.335u	0.2264
+0.345u	0.2271
+0.355u	0.2318

+0.365u	0.2255
+0.375u	0.1902
+0.385u	0.1415
+0.395u	0.1038
+0.405u	0.0775
+0.415u	0.0579
+0.425u	0.0427
+0.435u	0.0309
+0.445u	0.022
+0.455u	0.0154
+0.465u	0.0106
+0.475u	0.0072
+0.485u	0.0048
+0.495u	0.0033
+0.505u	0.0022
+0.515u	0.0015
+0.525u	0.0011
+0.535u	0.0008
+0.545u	0.0006
+0.555u	0.0005
+0.565u	0.0004
+0.575u	0.0003
+0.585u	0.0003
+0.595u	0.0003
+0.605u	0.0004
+0.615u	0.0005
+0.625u	0.0007

www.oxpdf.com

+0.635u	0.0009
+0.645u	0.0011
+0.655u	0.0015
+0.665u	0.0018
+0.675u	0.0023
+0.685u	0.0027
+0.695u	0.0033
+0.6983u	0.003432
+0.7u	0.0035
+0.71u	0.0041
+0.72u	0.0047
+0.7277u	0.005239
+0.73u	0.0054
+0.74u	0.0061
+0.75u	0.0068
+0.7621u	0.007768
+0.77u	0.0084
+0.78u	0.0092
+0.79u	0.01
+0.8u	0.0108
+0.8059u	0.0112956
+0.825u	0.0129
+0.83u	0.0133
+0.835u	0.0137
+0.8465u	0.014712
+0.86u	0.0159
+0.87u	0.0167

www.oxpof.com

+0.875u	0.0171
+0.8875u	0.01815
+0.9u	0.0192
+0.9075u	0.01985
+0.915u	0.0205
+0.925u	0.0213
+0.93u	0.0217
+0.94u	0.0225
+0.95u	0.0233
+0.955u	0.0237
+0.965u	0.0245
+0.975u	0.0252
+0.985u	0.026
+1.018u	0.0284
+1.082u	0.0331
+1.094u	0.0335
+1.098u	0.0337
+1.101u	0.0341
+1.128u	0.0355
+1.138u	0.0358
+1.144u	0.0362
+1.178u	0.0382
+1.264u	0.0424

.ends reflection

Le subcircuit de J_{cc} :

.subckt jcc 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 300 400 401 500 502 600 601
PARAMS: xj=1, lp=1, dp=1, se=1,

+ h=1, ln=1, dn=1, sb=1, w=1

.param q=1.6e-19

egeom3 230 200 value= {1.6e-19*v (202)*v (203)*(1000/962.5)*v (201)*(1e16/19.8)*
+ lp*(1-V (204))/(v (202)*lp+1)}

egeom0 231 200 value= {cosh (xj/lp) + (se*(lp/dp))*sinh (xj/lp)}

egeom1 232 200 value= {se*(lp/dp)*cosh (xj/lp) +sinh (xj/lp)}

egeom2 233 200 value= {se*(lp/dp) +v (202)*lp-exp (-v (202)*xj)*v (232)}

ejsce 205 200 value= {v (230)/(v(202)*lp-1)*(-v(202)*lp*
+ exp (-v (202)*xj) +v (233)/v (231))}; short circuit

eqee 400 200 value= {100*(v (205)*19.8/ (q*v (203)*(1000/962.5)*(1-v
(204))*v(201)*1e16))};quantum efficiency of emitter

esre 401 200 value= {v (400)*0.808*v (201)}

egeom30 240 200 value= {cosh (h/ln) +sb*ln/dn*sinh (h/ln)}

egeom31 241 200 value= {sb*ln/dn*(cosh (h/ln)-exp(-v (202)*h))}

egeom32 242 200 value= {sinh (h/ln) +v (202)*ln*exp (-v (202)*h)}

egeom33 243 200 value= {1.6e-19*v (202)*v (203)*v (201)*(1e16/19.8)*(1000/962.5)*
+ (1-v (204))*ln*exp (-xj+w)*v (202))/ ((ln*v (202)) **2-1)}

ejscb 206 200 value= {v(243)*((v(202)*ln)-(v(241)+v(242))/v(240))};short circuit

eqeb 500 200 value= {100*(v (206)*19.8/ (q*v (203)*(1000/962.5)*(1-
v(204))*v(201)*1e16))};quantum efficiency of base

esrb 502 200 value= {v (500)*0.808*v (201)}

ejccZCE 207 200 value= {q*v (203)*(1000/962.5)*(1e16/19.8)*v (201)*(1-v (204))*(1-exp(-
v(202)*w))*exp(-v(202)*xj)}

eqzce 600 200 value= {100*(v (207)*19.8/ (q*v(203)*(1000/962.5)*(1-
v(204))*v(201)*1e16))}

esrzce 601 200 value= {v (600)*0.808*v (201)}

ejsc 208 200 value={1e6*sdt (v(205)+v(206)+v(207))};total current

eqe 209 200 value= {(v(400)+v(500)+v(600))*100}

esr 300 200 value= {v(209)*0.808*v(201)}

```
.ends jcc
```

Le programme PSpice de Jcc:

```
*jcc.cir
```

```
.include wavelengh.lib
```

```
.include absorption.lib
```

```
.include am15g.lib
```

```
.include jcc.lib
```

```
.include reflection.lib
```

```
Xwavelengh 21 0 wavelengh
```

```
Xspectre 23 0 am15g
```

```
Xabsorption 22 0 absorption
```

```
Xreflexion 24 0 reflection
```

```
X_currentcircuit 0 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 40 41 50 52 60 61 Jcc params: xj=0.3  
h=200e-4 lp=0.42e-4 ln=492e-4
```

```
+ Sb=1000 se=5000 dp=4.045 dn=28.85 w=3.55e-5
```

```
.tran 0.1u 1.1u 0.3u 0.01u
```

```
.probe
```

```
.end
```

Le subcircuit de la cellule solaire simulée :

```
*cellreal.lib
```

```
.subckt cellreal 300 303 302 params: area=1, j0=1, jcc=1, rs=1, rsh=1, j02=1
```

```
girrad 300 301 value={(v(302)*jcc*area)/1000}
```

```
d1 301 300 diode1
```

```
.model diode1 d (is= {j0*area}, n=1)
```

```
d2 301 300 diode2
```

```
.model diode2 d (is= {j02*area}, n=2)
```

```
rs 301 303 {rs}
```

```
rsh 301 300 {rsh}
```

```
.ends cellreal
```

Le programme PSpice de la cellule solaire simulée :

```
*cellreal1.cir
```

```
.include cellreal1.lib
```

```
Xcellreal 0 31 32 cellreal params: area=243.20 j0=1e-12 j02=1e-9 jcc=36.28e-3 rs=5.2e-3  
rsh=3.015
```

```
Vbias 31 0 dc 0
```

```
.dc vbias 0 0.7 0.001
```

```
virrad 32 0 dc 1000
```

```
.probe
```

```
.end
```

www.oxpof.com

Annexe 2

Le programme PSpice de l'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le J_{cc} :

```
*jcc.cir
.include wavelengh.lib
.include absorption.lib
.include am15g.lib
.include jcc.lib
.include reflection.lib
Xwavelengh 21 0 wavelengh
Xspectre 23 0 am15g
Xabsorption 22 0 absorption
Xreflexion 24 0 reflection
Xcurrentcircuit 0 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 40 41 50 52 60 61 jcc params:
xj= {XJ} h=200e-4 Lp=0.42e-4 Ln=492e-4 Sb=1000 Se=5000 Dp=4.045
+Dn=28.85 W=3.55e-5
.param XJ=1
.step param XJ list 0.1e-4 0.2e-4 0.3e-4 0.7e-4 1e-4
.tran 0.1u 1.1u 0.3u 0.01u
.probe
.end
```

Le programme PSpice de l'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur les caractéristiques de la cellule solaire simulée:

```
*cellreal1.cir
.include cellreal1.lib
Xcellreal 0 31 32 cellreal params: area=243.20 j0=1e-12 j02=1e-9 jcc= {JCC}
rs=5.2e-3 rsh=3.015
```

```

.param Jcc=1
vbias 31 0 dc 0
.dc vbias 0 0.7 0.001
Virrad 32 0 dc 1000
.step param Jcc list 37.30e-3 36.94e-3 36.27e-3 32.08e-3 29.05e-3
.probe
.end

```

Le programme PSpice de l'influence de la longueur de diffusion sur le J_{cc}:

```

*jcc.cir
.include wavelengh.lib
.include absorption.lib
.include am15g.lib
.include jcc.lib
.include reflection.lib
Xwavelengh 21 0 wavelengh
Xspectre 23 0 am15g
Xabsorption 22 0 absorption
xreflexion 24 0 reflection

x_currentcircuit 0 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 40 41 50 52 60 61 jcc params:
xj=0.1e-4 h=200e-4 Lp=0.42e-4 Ln= {LN}
+ Sb=1000 Se=5000 Dp=4.045 Dn=28.85 W=3.55e-5

.param LN=1
.step param LN list 192e-4 292e-4 492e-4 592e-4 792e-4
.tran 0.1u 1.1u 0.3u 0.01u
.probe

```

.end

Le programme PSpice de l'influence de la longueur de diffusion sur les caractéristiques de la cellule solaire simulée:

*cellreal1.cir

.include cellreal1.lib

Xcellreal 0 31 32 cellreal params: area=243.20 $j_0=1e-12$ $j_{02}=1e-9$ $j_{cc}=\{J_{CC}\}$
 $r_s=5.2e-3$ $r_{sh}=3.015$

.param $J_{CC}=1$

Vbias 31 0 dc 0

.dc vbias 0 0.7 0.001

Virrad 32 0 dc 1000

.step param J_{CC} list 36.36e-3 36.95e-3 37.30e-3 37.36e-3 37.43e-3

.probe

.end

Le programme PSpice de l'influence de la résistance série sur les caractéristiques de la cellule solaire simulée:

*cellreal1.lib

.include cellreal1.lib

Xcellreal 0 31 32 cellreal params: area=243.36 $j_0=1e-12$ $j_{02}=1e-9$ $j_{cc}=36.27e-3$
 $r_s=\{R_S\}$ $r_{sh}=3.019$

.param $R_S=1$

.step param R_S list: 5.2e-5 5.2e-4 5.2e-3 5.2e-2 5.2e-1 5.2

Vbias 31 0 dc 0

.dc vbias 0 0.63 0.01

virrad 32 0 dc 1000

.plot dc i (vbias)

.probe

.end

Le programme PSpice de l'influence de la résistance shunt sur les caractéristiques de la cellule solaire simulée:

*cell2.cir

.include cell2.lib

xcell2 0 31 32 cell2 params: area=243.20 $j_0=1e-12$ $j_{02}=0$

+ $J_{cc}=36.27e-3$ $r_s=5.2e-3$ $r_{sh}=\{R_{SH}\}$

.param $R_{SH}=1$

Vbias 31 0 dc 0

virrad 32 0 dc 1000

.plot dc i(vbias)

.dc vbias 0 0.64 0.01

.step param R_{SH} list 3.015e6 30.15 3.015 0.3015

.probe

.end

Le programme PSpice de l'influence de la température sur les caractéristiques de la cellule solaire simulée:

*cellreal_temp.lib

.include cellreal_temp.lib

Xcellreal 0 31 32 cellreal_temp params: area=243.20 $j_0=1e-12$ $j_{02}=1e-9$
 $j_{cc}=36.27e-3$ $r_s=5.2e-3$ $r_{sh}=3.019$

Vbias 31 0 dc 0

.dc vbias 0 0.9 0.01

virrad 32 0 dc 1000

.temp -25 0 10 20 30 40 50 60 70

.probe

.end

Le programme PSpice de l'influence de la vitesse de recombinaison en surface de la base sur le J_{cc} :

*j_{cc}.cir

.include wavelengh.lib

.include absorption.lib

.include am15g.lib

.include jcc.lib

.include reflection.lib

Xwavelengh 21 0 wavelengh

Xspectre 23 0 am15g

Xabsorption 22 0 absorption

Xreflexion 24 0 reflection

x_currentcircuit 0 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 40 41 50 52 60 61 j_{cc} params:

x_j=0.1e-4 h=200e-4 L_p=0.42e-4 L_n=792e-4

+ S_b= {SB} S_e=5000 D_p=4.045 D_n=28.85 W=3.55e-5

.param SB=1

.step param SB list 5e1 5e2 5e3 5e4 5e5

.tran 0.1u 1.1u 0.3u 0.01u

.probe

.end

Le programme PSpice de l'influence de la vitesse de recombinaison en surface de la base sur les caractéristiques de la cellule solaire simulée:

*cellreal1.cir

.include cellreal1.lib

```
Xcellreal 0 31 32 cellreal params: area=243.20 j0=1e-12 j02=1e-9 jcc= {JCC}  
rs=5.2e-3 rsh=3.015
```

```
.param JCC=1
```

```
vbias 31 0 dc 0
```

```
.dc vbias 0 0.7 0.001
```

```
Virrad 32 0 dc 1000
```

```
.step param JCC list 37.85e-3 36.40e-3 35.84e-3 35.77e-3 35.76e-3
```

```
.probe
```

```
.end
```

Le programme PSpice de l'influence de l'épaisseur de la cellule solaire sur le J_{cc}:

```
*jcc.cir
```

```
.include wavelengh.lib
```

```
.include absorption.lib
```

```
.include am15g.lib
```

```
.include jcc.lib
```

```
.include reflection.lib
```

```
Xwavelength 21 0 wavelength
```

```
Xspectre 23 0 am15g
```

```
Xabsorption 22 0 absorption
```

```
Xreflexion 24 0 reflection
```

```
x_currentcircuit 0 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 40 41 50 52 60 61 jcc params:  
xj=0.1e-4 h= {H} Lp=0.42e-4 Ln=792e-4
```

```
+ Sb=1000 Se=5000 Dp=4.045 Dn=28.85 W=3.55e-5
```

```
.param H=1
```

```
.step param H list 100e-4 200e-4 300e-4 400e-4
```

```
.tran 0.1u 1.1u 0.3u 0.01u
```

```
.probe
```

```
.end
```

Le programme PSpice de l'influence de l'épaisseur de la cellule solaire sur les caractéristiques de la cellule solaire simulée:

```
*cellreal1.cir
```

```
.include cellreal1.lib
```

```
Xcellreal 0 31 32 cellreal params: area=243.20 j0=1e-12 j02=1e-9 jcc= {JCC}  
rs=5.2e-3 rsh=3.015
```

```
.param JCC=1
```

```
Vbias 31 0 dc 0
```

```
.dc vbias 0 0.7 0.001
```

```
Virrad 32 0 dc 1000
```

```
.step param JCC list 36.18e-3 37.43e-3 38.05e-3 38.44e-3
```

```
.probe
```

```
.end
```