

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ AMMAR THELIDJI DE LAGHOUAT

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Département électronique

Option : énergie renouvelable en électrotechnique



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master

Présentée par :

Chikh Aïssa Abdeslam

&

Benelmouaz Mezenda

Thème

**Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques
de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n.**

Soutenu le 25/06/2020

Devant le jury composé des :

Dr NACEUR SELMANE	Président	Université de Laghouat
Dr MOUHOUAB ABDELHAFID	Examineur	Université de Laghouat
Dr LEILA AMEL VILBOIS	Promoteur	Université de Laghouat

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2019/2020

Remerciement

Nous exprimons nos vifs remerciements en particulier à notre promoteur Mme **Vilbois Leila** qui a accepté de nous encadrer et pour ces orientations et son soutien.

Nous tenons aussi à remercier le président et les membres de jury qui ont bien voulu nous faire l'honneur de juger notre travail.

Nous remercions également les êtres les plus chers aux mondes « Nos Parents » pour tous les efforts et sacrifices qu'ils ont entrepris afin de nous voir réussir. A toute la communauté scientifique à travers le monde entier

Dédicaces

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 voudrais remercier mes grands-parents et
mes parents de m'avoir toujours soutenu et
encouragé tout au long de mes études.

Merci encore. A la fin de ce modeste travail, il me
reste qu'à le dédier à tous ceux et celles dont je garde
les bons souvenirs ; au plus profond de mon âme à :
À tous les membres de ma grande famille À tous mes
amis. À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin
à la réalisation de ce travail

Abdeslam

Dédicaces

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 voudrais remercier mes parents de m'avoir
toujours soutenu et encouragé tout au long de mes
études.

Merci encore. A la fin de ce modeste travail, il me
reste qu'à le dédier à tous ceux et celles dont je garde
les bons souvenirs ; au plus profond de mon âme à :
À tous les membres de ma grande famille À tous mes
amis. À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin
à la réalisation de ce travail

Mezenda

Abréviation

c-Si :	Silicium cristallin
MG-Si:	Métallurgique
mc-Si / ML-Si / Cz-Si / FZ-Si :	Silicium multicristallin / mono-like / Czochralski / Float-Zone
Ec/Ev :	Niveau en énergie de la bande de conduction/valence
Ef :	Position du niveau de fermi
Et :	Position du défaut dans le gap du silicium
ZCE :	Zone de Charge d'Espace
μ_e/μ_p :	Mobilité des électrons/ des trous
N_d/N_a :	Densité de porteurs de charge de type-p et -n
p/n :	Densité de porteurs de charge de type-p et -n et présence d'une excitation
ni :	Densité de porteurs de charge intrinsèques:
Δp :	Niveau d'injection des porteurs de charge minoritaires (trous)

Symbole

C :	La célérité de la lumière
λ :	La longueur d'onde
h :	La constante de Planck
I :	Courant fourni par la cellule
V :	Tension aux bornes de la cellule
Id :	Courant de diode
Iph :	Photo-courant dépendant de l'intensité de l'irradiation
Ish :	Courant dérivé par la résistance parallèle
Icc :	Courant de court-circuit
Jcc :	Densité de courant de court-circuit
Vco :	Tension de circuit ouvert
Rsh :	Résistance en parallèle, représentant l'admittance parallèle du générateur de courant
Rs :	Résistance en série, modélisant les pertes ohmiques du matériau et des contacts
G :	Irradiation solaire en W/m^2 ,
q :	Charge d'électron $1,602.10^{-9}$ C
k :	Constante de Boltzmann $1,3854.10^{-23}$ J/K,
n :	Facteur de non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique
T :	Température effective de la cellule en kelvin
n1 :	le facteur de non idéalité de la jonction de la diode 1 ,
n2 :	le facteur de non idéalité de la jonction de la diode 2,

Table des matières

Abréviations

Liste des figure

Introduction général

Chapitre I : Energie Photovoltaïque

I.1	Introduction :	3
I.2	L'énergie solaire :	3
I.2.1	Le soleil :	3
I.2.2	Le mouvement apparent du Soleil :	3
I.2.3	La masse d'air (AM) :	4
I.2.4	Le spectre solaire :	5
I.3	Zone utile de spectre solaire :	5
I.4	Différents types de rayonnement :	6
I.5	L'effet photovoltaïque :	7
I.6	Génération du photovoltaïque :	7
I.6.1	La Première génération :	8
I.6.2	Deuxième génération	8
I.6.3	Troisième génération	9
I.7	les avantages et les inconvénients :	12
I.8	Potentiel Solaire en Algérie :	12
I.9	Installations de systèmes solaires dans le monde	13
I.10	Conclusion :	14

Chapitre II:Théorie de la cellule solaire

II.1	Introduction :	18
II.2	Principe général du fonctionnement d'une cellule solaire :	18
II.3	L'absorption de la lumière dans le matériau :	18
II.3.1	Les Semi-conducteurs :	19
II.3.2	La notion d'électrons – trous :	20
II.4	Densité de porteurs à l'équilibre thermodynamique :	21
II.4.1	Les semi-conducteurs intrinsèques :	22

II.4.2	Les semi-conducteurs extrinsèques :	22
II.5	Notion de quasi-niveaux de Fermi :	23
II.6	Notion du gap direct et du gap indirect dans un semi-conducteur :	24
II.7	Les Courants dans le semi-conducteur :	25
II.7.1	Le courant de conduction :	25
II.7.2	Le courant de la diffusion :	26
II.8	Génération-Recombinaison :	26
II.8.1	Mécanismes de génération :	26
II.8.2	Mécanismes de recombinaison :	26
II.9	Modélisation de la cellule solaire :	27
II.9.1	La résistance série :	28
II.9.2	La résistance parallèle :	28
II.10	Grandeurs caractéristiques de la cellule solaire :	29
II.10.1	Courant de court-circuit, I_{cc} :	30
II.10.2	Tension à circuit ouvert, V_{co} :	30
II.10.3	Puissance maximale :	30
II.10.4	Facteur de forme, FF :	30
II.10.5	Rendement :	30
II.10.6	rendement quantique externe EQE (λ) :	31
II.10.7	Rendement quantique interne :	31
II.11	Facteurs limitant le rendement :	31
II.11.1	Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons :	32
II.11.2	Réflexion :	32
II.11.3	Pertes par Photons de grande longueur d'onde :	32
II.12	Conclusion :	33

Chapitre III : Technologie de la cellule solaire de type n

III.1	Introduction :	37
III.2	Silicium cristallin :	37
III.3	Silicium métallurgique :	38
III.1.1	La purification de silicium :	39
III.1.2	Cristallisation du silicium :	39

III.1.3	Types de silicium cristallin :	40
III.4	Processus de fabrication d'une cellule solaire photovoltaïque :	41
III.1.4	Obtention des wafers photovoltaïques :	41
III.1.5	Texturation (ou texturisation) :	41
III.1.6	La formation de la jonction PN:	42
III.1.7	Couche antireflet :	42
III.1.8	Passivation :	43
III.1.9	Le champ de surface arrière (BSF) :	43
III.1.10	Réalisation des contacts métallique :	44
III.5	Fabrication des cellules photovoltaïques sur substrat de silicium de type n :	44
III.1.11	Réalisation et étude du substrat :	44
III.1.12	Réalisation de l'émetteur dopé au bore :	45
III.1.13	Cellule type n avec face arrière (dopé Al) :	45
III.6	Conclusion :	46
III.1.14	Bibliographie	47
Bibliographie		54

Chapitre IV : Simulation, résultats et discussion

IV.1	Introduction :	50
IV.2	Le simulateur PC1D :	50
IV.2.1	Paramètres du dispositif (Device) :	50
IV.2.2	Paramètres des régions :	51
IV.2.3	Paramètres d'excitation :	51
IV.2.4	Résultats :	52
IV.3	Le simulateur PC3D :	52
IV.3.1	Feuille « Dashboard » :	52
IV.3.2	Feuille « Device » :	52
IV.3.3	Feuille « Data » :	53
IV.4	Applications et simulations :	53

IV.4.1	Paramètres physiques de la cellule :	53
IV.4.2	Méthode de simulation :	54
IV.4.3	Résultats de la simulation :	54
IV.5	Optimisation de la cellule de référence :	55
IV.6	Influence de la durée de vie :	55
IV.6.1	Influence de l'épaisseur :	56
IV.7	Influence de résistance de couche de l'émetteur :	57
IV.8	L'influence de la face arrière (BSF) :	58
IV.9	Performances de la cellule solaire optimisée :	58
IV.10	Comparaison avec les performances de la cellule à substrat de type p :	59
IV.11	Effets tridimensionnels sur les cellules de type n :	59
IV.11.1	Potentiels de quasi-niveaux de Fermi :	60

Liste des figures

Chapitre I :

Fig: schéma représente le mouvement du soleil	4
Figure I. 1:schéma représente le mouvement du soleil	3
Figure I. 2:Définition du nombre d'air masse (AM)	4
Figure I. 3:Influence de l'atmosphère sur le spectre solaire	5
Figure I. 4:Zone utile du spectre solaire.	6
Figure I. 5: Les différents types de rayonnement solaire	7
Figure I. 6: Schéma simplifié de fonctionnement de cellule solaire	7
Figure I. 7: Cellule solaire de première génération exemple (a) poly cristallin (b) monocristallin	8
Figure I. 8:cellule solaire de deuxième génération exemple (a) CIGS (b) CdTe	9
Figure I. 9: cellule solaire de deuxième génération exemple (a) Pérovskite (b)	10
Figure I. 10: Rendement de différentes cellules solaires en fonction des années	11
Figure I. 11:Diagramme des puissances des énergies renouvelable	13

Chapitre II

Figure II. 1 : Schéma représentant les bandes de valence, de conduction et interdite (gap) dans un isolant, un semi-conducteur et un conducteur.	20
Figure II. 2: schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur intrinsèque (Si)	20
Figure II. 3 : Un décalage de la position de l'énergie de Fermi dans le diagramme de bande et l'introduction du niveau d'énergie autorisé dans la bande interdite en raison du dopage.	24
Figure II. 4 : Structure de bandes d'un semi-conducteur à gap directe et à gap indirecte.	25
Figure II. 5 : Les mécanismes de recombinaison pour le fonctionnement de cellule	27
Figure II. 6 : Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire	27

Figure II. 7: Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réel	28
Figure II. 8 : L'effet de résistance série et shunt	29
Figure II. 9: Les courbes $I(v)$ et $P(v)$ sous éclairage et sous obscurité.	29
Figure II. 10 : Spectre d'émission solaire	32
Figure II. 11 : Diagramme des différentes pertes	33
Figure II. 1 : Schéma représentant les bandes de valence, de conduction et interdite (gap) dans un isolant, un semi-conducteur et un conducteur.	20
Figure II. 2: schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur intrinsèque (Si)	20
Figure II. 3 : Un décalage de la position de l'énergie de Fermi dans le diagramme de bande et l'introduction du niveau d'énergie autorisé dans la bande interdite en raison du dopage.	24
Figure II. 4 : Structure de bandes d'un semi-conducteur à gap directe et à gap indirecte.	25

Chapitre III

Figure III. 1 : Production du silicium métallurgique	38
Figure III. 2 : Schéma simplifié de méthode czochralski	39
Figure III. 3: les deux méthodes de cristallisation de silicium (a) La méthode de la zone fondue flottante (b) méthode czochralski	40
Figure III. 4 : Trajectoire d'un rayon lumineux arrivant sur une surface texturée	41
Figure III. 5: Schéma de principe d'un implanteur ionique	42
Figure III. 6: Structure de la cellule solaire	43
Figure III. 8: Formation d'un contact sérigraphié	44
Figure III. 9: La structure de cellule solaire de type n	45

Chapitre IV

Figure IV. 1: L'interface du logiciel PC1D	51
Figure IV. 2: Interface de PC3D	53
Figure IV. 3: Structure et région de simulation	54
Figure IV. 4: Caractéristiques (I-V) et (P-V) de la cellule solaire de référence	55
Figure IV. 5: Effet de la durée de vie sur les paramètres de la cellule solaire J_{cc} et η	56
	57

Figure IV. 6: Effet de l'épaisseur de base sur les paramètres de la cellule solaire J_{cc} et η	
Figure IV. 7: Effet de la résistance de couche de l'émetteur sur les paramètres de la cellule solaire J_{cc} et η ,	57
Figure IV. 8: Effet du champ de surface arrière sur les paramètres de la cellule solaire : en haut J_{cc} et η .	58
Figure IV. 9: Les courbes de cellule solaire de type n optimisée	59
Figure IV. 10 : Potentiels de quasi-niveaux de Fermi des électrons Φ_n	60
Figure IV. 11: Potentiels de quasi-niveaux de Fermi des trous Φ_p	60
Figure IV. 12 : Distribution de la densité des électrons normalisée au dopage de la base à la puissance du point maximum	61
Figure IV. 13 : Distribution de la densité des trous normalisée au dopage de la base à la puissance	61

Liste des tableaux

Tableau I. 1 :Exemples de cellules solaires de 1ème génération	8
Tableau I. 2: Exemples de cellules solaires de 2ème génération	9
Tableau I. 3: Exemples de cellules solaires de 3ème génération	10
Tableau III. 1 : Les propriétés mécaniques et thermiques du silicium [4]	37
Tableau III. 2 les types de silicium et sa gamme de taille du cristal	40
Tableau IV. 1 : les paramètres physiques de cellule	53
Tableau IV. 2 : Résultats de la simulation de la cellule de référence sous PC1D	55
Tableau IV. 3 : Les paramètres de la cellule solaire optimisée	58
Tableau IV. 4 : Comparaison des performances des cellules solaires	59

Introduction général

L'énergie solaire photovoltaïque est particulièrement bien adaptée aux enjeux majeurs de notre société : diminution des gisements fossiles et nécessité de lutter contre le changement climatique. L'énergie solaire est inépuisable, disponible partout dans le monde et ne produit ni déchets, ni gaz polluants.

L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de la production de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques. Ces panneaux sont fabriqués à partir des matériaux semi-conducteurs.

Les cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser le meilleur rendement énergétique.

L'objectif de ce travail est l'étude par simulation numérique de l'effet de les paramètres physiques sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire en silicium par le logiciel de simulation PC1D.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres en plus d'une introduction et d'une conclusion générale. Le premier chapitre, constitue un rappel général sur le gisement solaire, et la génération dans une cellule photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les notions fondamentales sur les semi-conducteurs ainsi que la jonction PN et les caractéristiques électriques de la cellule.

Dans le troisième chapitre, nous aborderons les méthodes de fabrication de la cellule solaire de la matière première jusqu'à la production de la cellule photovoltaïque.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation descriptive et illustrée du simulateur PC1D, PC3D, On présente aussi dans ce chapitre, les résultats de notre étude sur la cellule solaire de type N et dont on essaiera de les interpréter et les comparer avec une cellule de type P.

Enfin, nous faisons une conclusion générale sur le sujet et les perspectives attendues.

Chapitre I: Energie

Photovoltaïque

I.1 Introduction :

L'électricité photovoltaïque est une source important pour l'avenir, et des efforts considérables se font pour rendre cet apport d'énergie plus performant. Ce premier chapitre est consacré à une étude générale pour mettre en évidence la cellule solaire.

I.2 L'énergie solaire :

I.2.1 Le soleil :

Le Soleil est une étoile de 1391960 km (soit environ 109 fois la Terre) de diamètre. Il est la principale source d'énergie, de lumière et de chaleur dans le Système solaire, ce qui a permis la vie sur terre.

L'énergie solaire se crée profondément dans le noyau du Soleil. C'est là où la température est 10⁶ et la pression (340 milliards de fois la pression atmosphérique au niveau de la mer) est si intense que des réactions thermonucléaires ont lieu. Ces réactions provoquent la fusion de quatre protons (noyaux d'hydrogène) pour former une particule alpha (noyau d'hélium). La masse de la particule alpha est environ 70 % de la masse des quatre protons. La différence de masse est transformée en énergie et transportée vers la surface du Soleil, par un processus de convection, où elle est libérée sous forme de lumière. L'énergie générée dans le noyau met un million d'années pour atteindre la surface. Chaque seconde, 700 millions de tonnes d'hydrogène sont converties en hélium.[1]

I.2.2 Le mouvement apparent du Soleil :

Le mouvement apparent du Soleil vu par un observateur fixe en un point au nord de l'équateur est représenté sur la figure I.1. La position du soleil est définie par deux angles : sa hauteur angulaire h (l'angle entre la direction du soleil et le plan horizontal du lieu) et son azimut α (l'angle entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil).

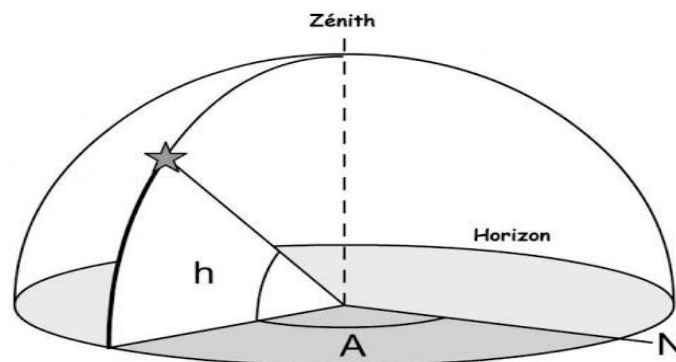


Figure I. 1:schéma représente le mouvement du soleil

I.2.3 La masse d'air (AM) :

La notion d'air mass "masse d'air" a été entrée, afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde. Elle varie en fonction de l'angle θ du soleil par rapport au zénith. [2]

La longueur du trajet rectiligne d'un rayon lumineux incliné d'un angle h par rapport à l'horizontale et par rapport à la verticale est donnée géométriquement par :

$$AM = \frac{1}{\sin\theta} \quad (\text{I. 1})$$

Avec :

θ : représente l'élévation du soleil sur l'horizon (90° au zénith)

Le spectre solaire AM_0 correspond à une masse d'air nulle (hors atmosphère) pour un rayonnement arrivant au-dessus de la couche atmosphérique à incidence normale, AM_1 pour un soleil vertical à la terre (le soleil est au zénith), et $AM_{1,5}$ pour un rayonnement solaire correspondant à une inclinaison du soleil de 48° par rapport au zénith.

L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil terre est de l'ordre de 1367W/m^2 (AM_0) hors atmosphère terrestre. Le rayonnement solaire global reçu au niveau du sol pour ($AM_{1,5}$) atteint 1000 W/m^2 , avec un petit arrondissement. [3]

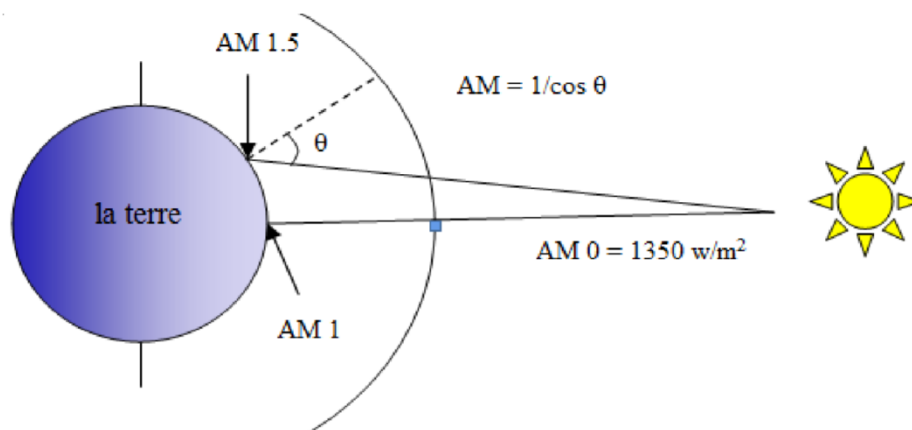


Figure I. 2:Définition du nombre d'air masse (AM)

I.2.4 Le spectre solaire :

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0.2 à 4 microns. La Figure I. 3 représente la variation de l'irradiance en fonction de la longueur d'onde. Le spectre solaire hors atmosphère est comparable à celui d'un corps noir à une température d'environ 5800 K. À la surface de la Terre, le spectre solaire n'est plus le même, car il est pondéré par l'absorption des molécules présentes dans l'atmosphère (O₃, CO₂, H₂O, ...).[4]

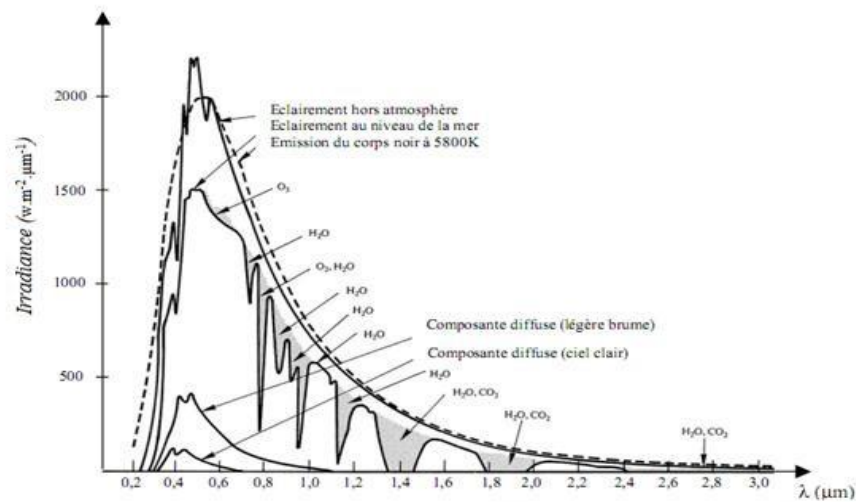


Figure I. 3:Influence de l'atmosphère sur le spectre solaire

I.3 Zone utile de spectre solaire :

La figure montre que les photons du spectre solaire ne vont pas être tous utilisables pour la génération de paires électrons-trous. Si $E < E_g$ le photon n'est pas absorbé par le semi-conducteur, si $E \geq E_g$, le photon est absorbé. Cette même figure résume ceci sur le spectre de référence en montrant les pourcentages correspondant :

- Photons non absorbés (I) environ 20%.
- Pertes thermiques (III) environ 32%.
- La zone utile pour le silicium est la zone (II) environ 48%.

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion par les Chapitre I Caractéristiques des cellules solaires 14 poussières et les aérosols.

Ainsi, la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge.

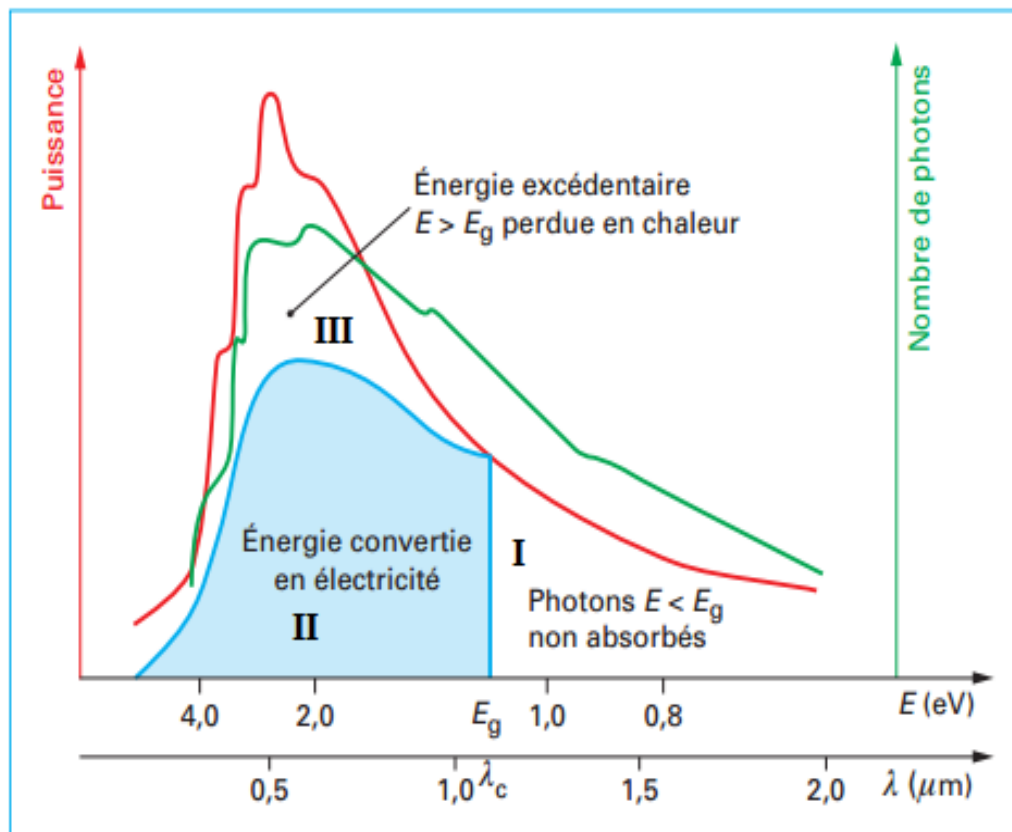


Figure I. 4: Zone utile du spectre solaire.

I.4 Différents types de rayonnement :

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes [5]:

Le rayonnement direct : est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.

Le rayonnement diffus : est constitué des photons diffusés par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Sa structure varie avec les conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet qu'il est isotrope, c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope (diffusion sur l'air), on a une couronne plus brillante autour du soleil (composante appelée circumpolaire) et souvent un renforcement sur l'horizon, la bande horizon.

L'albédo : est la partie réfléchiée par le sol. Il dépend de l'environnement du site, il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.

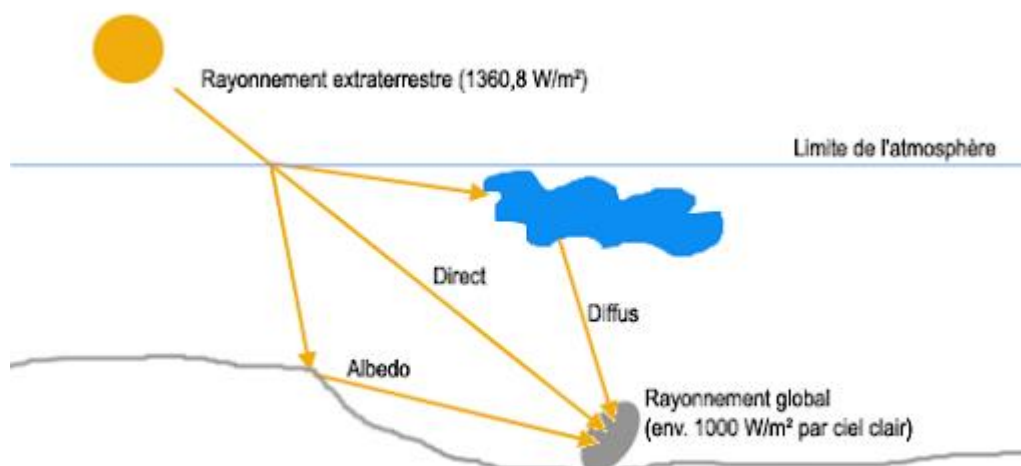


Figure I. 5: Les différents types de rayonnement solaire

I.5 L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité. Lorsqu'un photon d'énergie supérieure ou égale à l'énergie de gap est absorbé par le matériau semi-conducteur, il passe une partie de son énergie par collision à un électron. L'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction et laisse un trou derrière lui, d'où l'apparition d'une paire électron-trou, c'est la génération des charges libres.

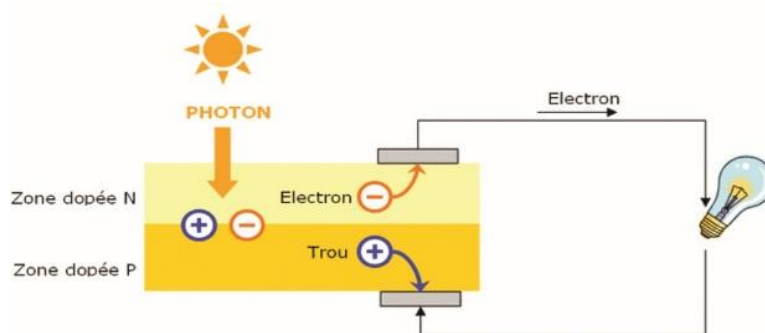


Figure I. 6: Schéma simplifié de fonctionnement de cellule solaire

I.6 Génération du photovoltaïque :

Les cellules solaires sont classées en trois générations à base de l'ordre de leur importance. Des recherches sont menées sur l'ensemble des trois générations en même temps pour améliorer leur efficacité. Voici la figure dessus qui montre les derniers rendements de chaque type de cellules.

I.6.1 La Première génération :

Elles sont à grande surface, à haute qualité et sont des dispositifs formés des cellules solaires simple jonction de la première génération. La réduction des coûts de production de cette technologie reste élevée en raison des coûts de main-d'œuvre élevée, et les coûts des matériaux surtout pour le silicium. Cette tendance se poursuit tant que l'industrie photovoltaïque est en expansion. Bien qu'il dispose d'une large partie d'absorption spectrale, les photons de haute énergie à la fin des longueurs d'ondes bleu et violet du spectre sont dissipés sous forme de chaleur. [6]

Tableau I. 1: Exemples de cellules solaires de 1^{ère} génération

Cellule solaire	Rendement (%)	Centre de test
Silicium monocristallin	26.1	ISFH**
Silicium polycristallin	23.5	JinkoSolar

**Institute for Solar Energy Research Hamelin



(a)



(b)

Figure I. 7: Cellule solaire de première génération exemple (a) poly cristallin
(b) monocristallin

I.6.2 Deuxième génération

Pour résoudre ces problèmes de besoins énergétiques et les coûts de production des cellules solaires, nous présentons la deuxième génération. Une réduction importante des coûts des matériaux est possible dans cette technologie. Ils ont aussi l'avantage d'augmenter la taille de l'unité. Avec l'augmentation de la dominance de cette technologie, Les matériaux généralement utilisés dans la technologie en couche mince sont principalement le silicium amorphe (a-Si), le di séléniure de cuivre et d'indium CuInSe_2 (CIS), le di séléniure de cuivre d'indium et de gallium Cu(InGa)Se_2 (CIGS). Ces matériaux réduisent la masse, et par conséquent le coût de substrat formant le support pour le verre et la céramique.

Tableau I. 2: Exemples de cellules solaires de 2ème génération

Cellule solaire	Rendement (%)	Centre de test
GaAs	27.8	ISFH*
CdTe	22.1	First solar
CIGS	23.5	Solar Frontier
Silicium amorphe	14	AIST*

*Institute for Solar Energy Research Hamelin

**National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.

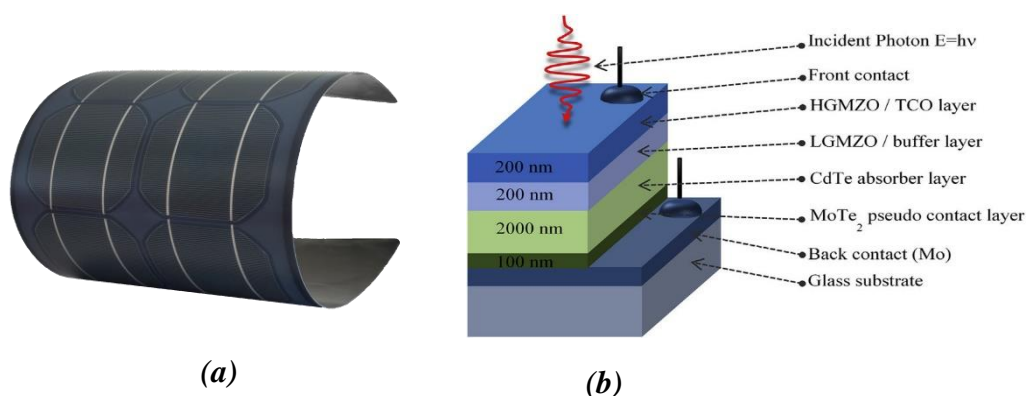


Figure I. 8: cellule solaire de deuxième génération exemple (a) CIGS (b) CdTe

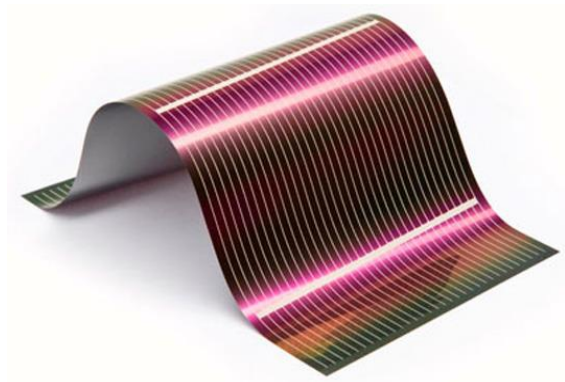
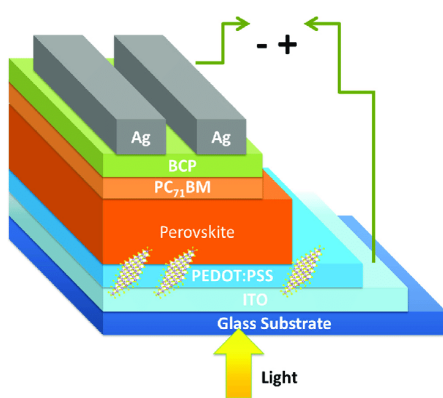
I.6.3 Troisième génération

La recherche pour améliorer les performances des cellules solaires en améliorant son efficacité a conduit à l'élaboration de la troisième génération des cellules solaires.[7] La piètre performance électrique de la technologie en couche mince en maintenant de faibles coûts de production de cette technologie, les technologies de non semi-conducteurs (y compris les cellules à base de polymères). Le progrès constant de l'évolution de l'industrie photovoltaïque est le résultat de l'augmentation de l'automatisation de la production de cellules solaires à couches minces avec une plus grande efficacité et des coûts réduits. En brisant les anciennes limites de l'efficacité et du coût en apportant les innovations par l'exploitation de compréhensions de la physique et de la science des matériaux deviendront une révolution.[8]

Tableau I. 3: Exemples de cellules solaires de 3ème génération

Cellule solaire	Rendement (%)	Centre de test
Colorante (Dye-sensitised)	12.3	EPFL*
Organique	17.4	SJTU-UMass
InGaP/GaAs/InGaAs (multijonction)	37.7	Sharp (IMM)
Pérovskite/Si (monolithique)	24.1	HZB

*École Polytechnique Fédérale de LausanneHelmholtz-Zentrum Berlin

**Figure I. 9:** cellule solaire de deuxième génération exemple (a) Pérovskite (b)

Best Research-Cell Efficiencies

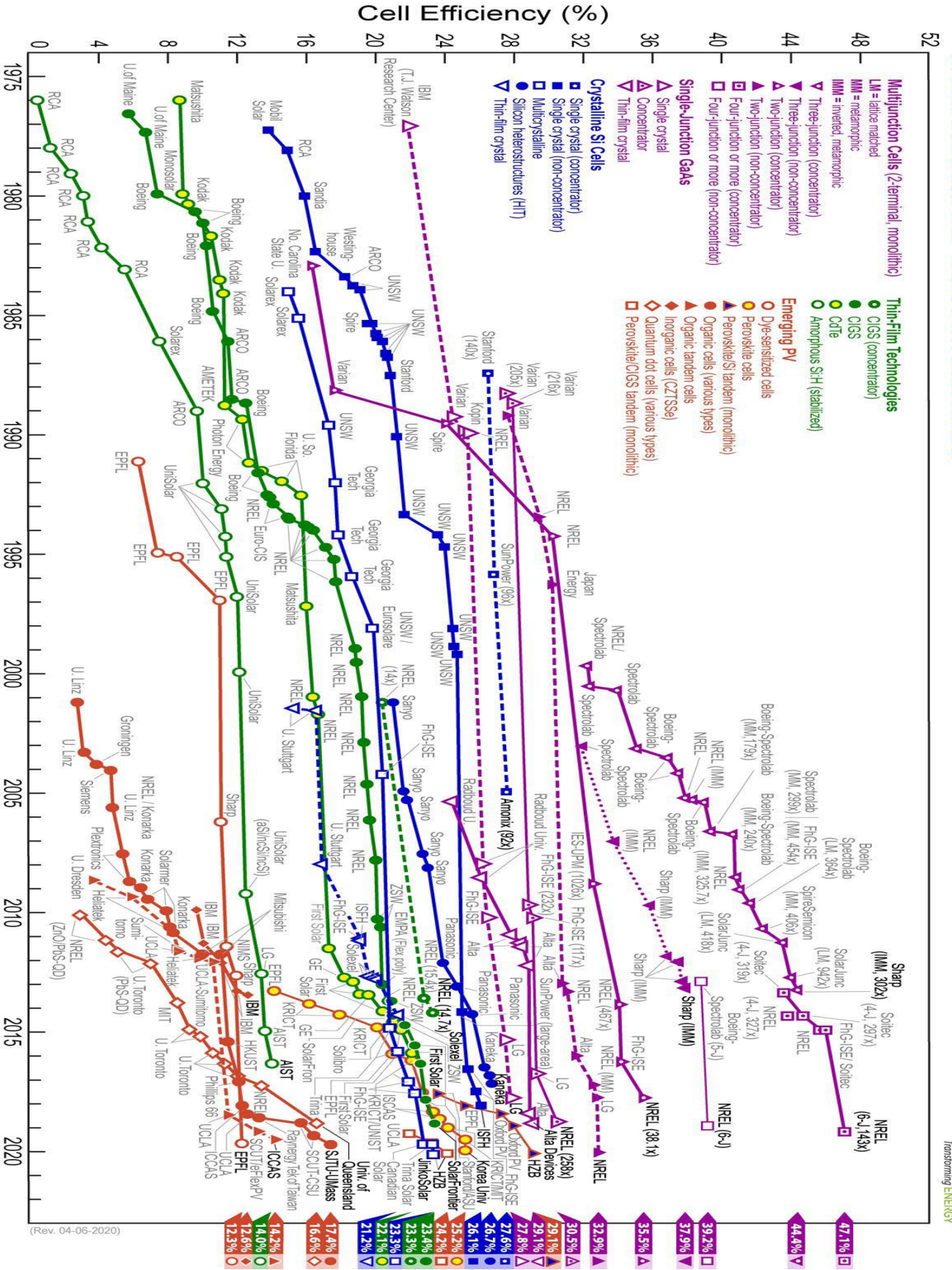


Figure I. 10: Rendement de différentes cellules solaires en fonction des années

I.7 les avantages et les inconvénients :

L'énergie photovoltaïque présente des avantages énormes tels que :

- Gratuité de cette ressource et énormité de son potentiel réparti sur le globe terrestre,
- Propreté durant son utilisation,
- Grande fiabilité,
- Peu d'entretien,
- Grande souplesse de production (variant de milliwatts aux mégawatts),
- Utilisation autonome et décentralisée. Malgré ces avantages intéressants,

Il y a aussi des inconvénients tels que :

- Source diffuse du rayonnement solaire qui nécessite de grandes surfaces,
- Technologie coûteuse,
- Facteur de charge faible,
- Stockage difficile,
- Difficulté à recycler les composants du système,
- Investissement élevé dépendant des décisions politiques.

I.8 Potentiel Solaire en Algérie :

L'Algérie produit 20.000 mégawatts d'électricité par an, pour une consommation nationale estimée à 15.680 mégawatts. Les autorités ont, depuis l'année 2015, lancé un vaste programme visant la production de 22.000 mégawatts d'énergie renouvelable d'ici 2030.

Les projets EnR de production de l'électricité dédiés au marché national seront menés en Première phase 2015 - 2030 : Cette phase verra la réalisation d'une puissance de 4010 MW, entre photovoltaïque et éolien, ainsi que 515 MW, entre biomasse, cogénération et géothermie. Le développement de l'interconnexion électrique entre le Nord et le Sahara (Adrar), permettra l'installation de grandes centrales d'énergies renouvelables dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoune et Bechar et leur intégration dans le système énergétique national.[9]

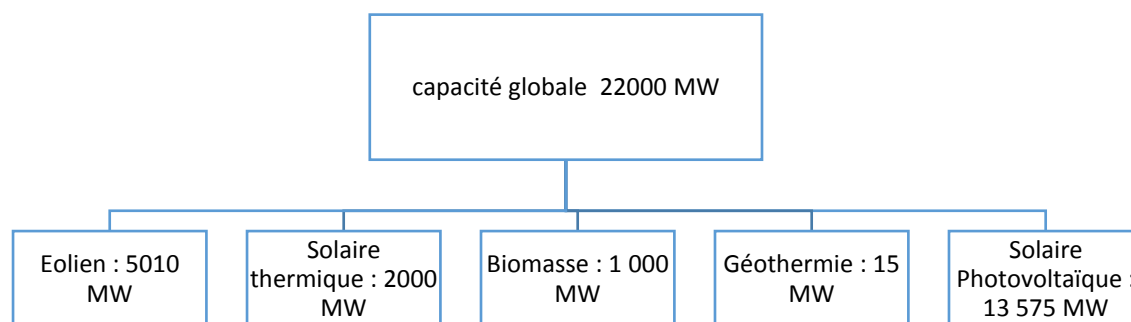


Figure I. 11:Diagramme des puissances des énergies renouvelable

I.9 Installations de systèmes solaires dans le monde

Les inquiétudes croissantes concernant le changement climatique, les effets sur la santé de la pollution atmosphérique, ont conduit à la nécessité de produire et d'utiliser des options technologiques alternatives à faible émission de carbone. Comme les énergies renouvelables. Le PV solaire a été l'une des technologies renouvelables pionnières au fil des décennies. La capacité totale installée du solaire photovoltaïque a atteint 480 GW dans le monde (hors CSP) fin 2018, ce qui représente la deuxième source d'électricité renouvelable après l'éolien. L'année dernière, le solaire photovoltaïque a de nouveau dominé le total des ajouts de capacités renouvelables et d'énergie, ajoutant deux fois plus de capacité que l'éolien et plus que tous les combustibles fossiles et le nucléaire ensemble, les ajouts de panneaux solaires atteignant environ 94 GW (IRENA, 2019c). L'évolution de l'industrie solaire photovoltaïque a jusqu'à présent été remarquable, avec plusieurs étapes franchies ces dernières années en termes d'installations (y compris hors réseau), de réductions de coûts et de progrès technologiques. [10]

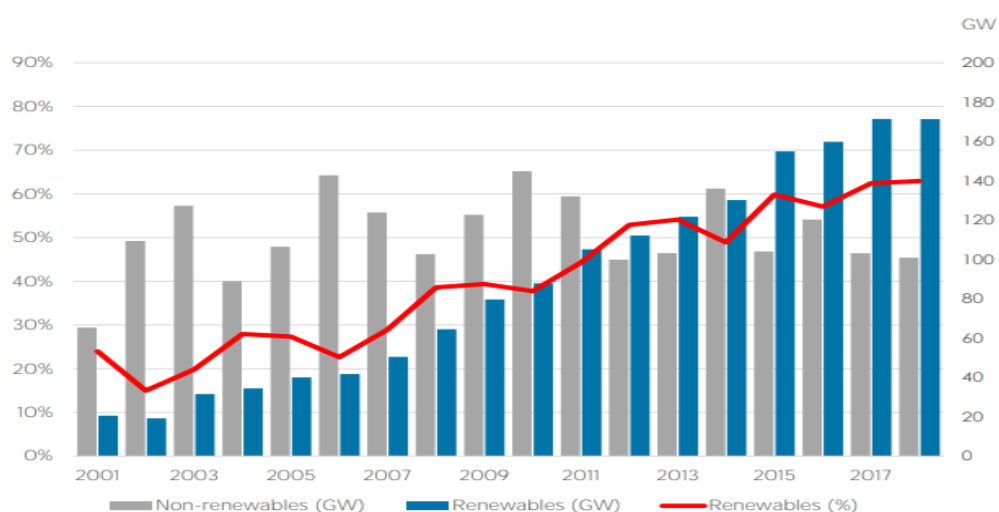


Figure I. 12:Diagramme de Capacités de production d'énergie renouvelables et transition énergétique [10]

I.10 Conclusion :

Ce présent chapitre introduit l'énergie photovoltaïque par sa source solaire : le soleil et traite les notions préliminaires nécessaires pour la compréhension de l'énergie photovoltaïque, ainsi nous avons étudié l'architecture de l'élément essentiel qui est la cellule et les facteurs limitant son rendement. Enfin, nous avons cité les différentes générations de cellule solaire. Par la suite on a abordé le potentiel du photovoltaïque en Algérie et dans le monde.

Bibliographie :

- [1] J. P. Rivet, Introduction à l'astronomie, CNRS, 2009.
- [2] A. Hamzaoui, «Effet de l'illumination sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires au silicium polycristallin,» thèse de magistère ,2012.
- [3] S. Quoizola., «Epitaxie en phase vapeur de Silicium sur Silicium mesoporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût,..» thèse de doctorat, Université de Lyon (2003)..
- [4] P. Würfel, «Physics of solar cells,» Wiley-VCH Deutsche, 2005.
- [5] L. Protin, Convertisseurs photovoltaïques,. s.l. : Techniques de l'Ingénieur D 3..
- [6] G. Gourdin, Solar cell technology (current state of the art),, 2007..
- [7] M. A., «. Green, 3rd generation PV solar cells for 2020 and beyond, vol 14,,» 2010..
- [8] T. Key, Solar photovoltaics: Expanding electric generation options,, 2008. .
- [9] A. Choumane, «l'énergie éolienne en algerie potentiel et realisations,» 2018.
- [10] «Renewable capacity highlights,» International Renewable Energy Agency (IRENA), 31 March 2019.
- [11] A. L. Adrian Chantreux, Le solaire photovoltaïque.Principe et applications, institut national des sciences appliquees de rouen.
- [12] L. Jean-François, «Thèse de doctorat:optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques.» 2009.
- [13] V. Anne Labouret, energie solaire photovoltaïque, DUNOD , 2e édition.
- [14] S. Protin, "Convertisseurs photovoltaïques, Techniques de l'ingénieur.".
- [15] A. Frederic P Miller, Semiconducteurs, VDM Publishing House Ltd., 2010.
- [16] D. Souici, «Physique des Semi-conducteurs,» Université de Béjaia, Algérie, Groupe de Cristallographie et Simulation des Matériaux., 2014-2015.

- [17] Alain Ricaud, Convertisseurs photovoltaïques, . Nov. 2007.
- [18] S. William N. Shafarman, Cu (InGa) Se₂SolarCells. In Handbook of Photovoltaic Science and Engineering,, 2011., p. page 546..
- [19] S. Protin, « Convertisseurs photovoltaïques,,» Techniques de l'Ingénieur D 3.

Chapitre II: Théorie de la cellule solaire

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on rappelle les principales notions des semi-conducteurs. On va aborder la théorie de jonction PN en équilibre, sous éclairage et sous obscurité pour la modélisation des paramètres physique, ce qui va nous permettre de définir les paramètres de la cellule comme le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, le rendement, le facteur de forme). Dans la seconde partie on présente la technologie de la cellule solaire de type n.

II.2 Principe général du fonctionnement d'une cellule solaire :

La conversion d'énergie photovoltaïque, met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés :

- L'absorption de la lumière dans le matériau ;
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques ;
- La collecte des charges

Il est donc clair qu'un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque. Une cellule solaire doit être composée d'un matériau absorbant ayant une bande interdite (gap) convenable dans la bande du spectre solaire (1-1.5 eV) afin de transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique, donc de créer des charges électriques. Ces dernières doivent être séparées par un champ électrique permanent et indestructible, puis collectées au moyen d'une structure de collecte de faible résistance. Ces deux conditions sont réunies dans les jonctions à semi-conducteurs dont la plus simple est l'homojonction P-N. En effet, pour comprendre le fonctionnement de la cellule solaire, nous étudierons la physique du semi-conducteur et la structure de base d'une cellule solaire qu'est la jonction P-N. [1]

II.3 L'absorption de la lumière dans le matériau :

La lumière c'est une onde électromagnétique elle est composée de minuscules boules d'énergie qu'on appelle des photons. Les photons n'ont pas de masse c'est-à-dire leur masse est nulle, ils n'ont pas de charge et leur vitesse dans le vide c'est la vitesse de la lumière ($c=3.10^8$ m/s) et il a une énergie caractérisée par [2]:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot (c/\lambda) \quad (\text{II. 1})$$

Avec : h : constante de Planck ($6,62.10^{-34}$ J.s).

ν : fréquence (Hz).

C : vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^8$ m/s).

λ : longueur d'onde (m).

Plus généralement un rayon lumineux qui arrive sur un objet peut subir trois événements optiques [3]:

- La réflexion : la lumière est renvoyée par la surface de l'objet.
- La transmission : la lumière traverse l'objet.
- L'absorption : la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme.

L'intensité d'une onde lumineuse I , décroît exponentiellement suivant la loi de Bouguer Lambert . [4]

Avec

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (\text{II. 2})$$

α : Coefficient d'absorption en fonction de l'énergie du photon et concentration x .

I_0 : le constant de flux incident.

II.3.1 Les Semi-conducteurs :

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Cette conductivité des semi-conducteurs, à la différence de celle des conducteurs et des isolants, dépend fortement de leur pureté, des irrégularités de leur structure, de la température et d'autres quantités physiques et chimiques. Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques très diversifiées. [5]

A la température de 0 K (-273°C) chaque atome de la grille cristalline est attaché à quatre atomes voisins par la mise en commun de leurs électrons périphériques (liaisons covalentes), assurant la cohésion du cristal. Dans la figure (II.1), les électrons qui participent à ces liaisons sont fortement liés aux atomes de silicium, aucune charge mobile susceptible d'assurer la circulation d'un courant électrique n'existe. La conductivité du silicium est alors très faible. [5]

Cependant l'élévation de la température permet la libération dans la structure, de certains électrons périphériques, par apport d'énergie. De plus, la libération d'un électron provoque l'apparition d'un trou dans la structure cristalline, soit la création d'une paire électron-trou. Par exemple, à la température de 300 K (27°C), il y a $1,45 \times 10^{10}$ paires électron trou dans un centimètre cube de silicium. Ce phénomène est à l'origine de l'augmentation de la conductivité du semi-conducteur. [5]

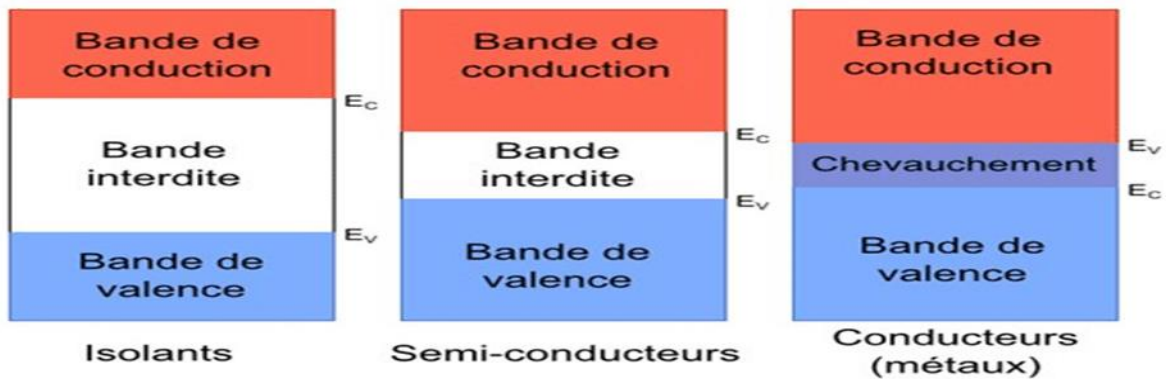


Figure II. 1 : Schéma représentant les bandes de valence, de conduction et interdite (gap) dans un isolant, un semi-conducteur et un conducteur.

II.3.2 La notion d'électrons – trous :

Dans les semi-conducteurs Les porteurs libres intrinsèques dans un semi-conducteur est double, soit des électrons (charge négative) soit des trous (charge positive) dont le nombre n_i et p_i est fonction de la température. La neutralité du matériau fait que n_i doit être égal à p_i . la figure représente ci-dessous. Le fait d'augmenter soit le nombre d'électrons soit le nombre des trous modifie énormément les propriétés électriques des semi-conducteurs.

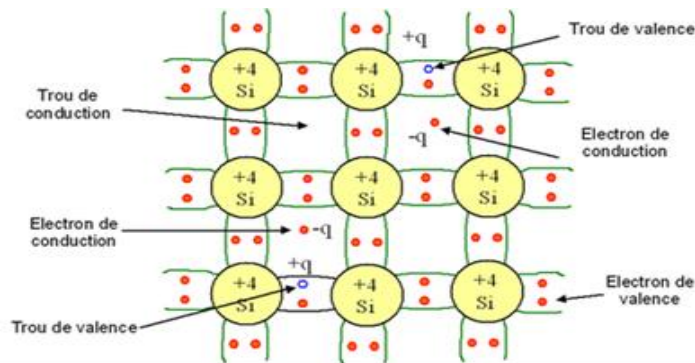


Figure II. 2: schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur intrinsèque (Si)

II.4 Densité de porteurs à l'équilibre thermodynamique :

Le nombre d'électrons libres dans la bande de conduction à l'équilibre thermodynamique est donné par l'intégrale :

$$n = \int_{E_c}^{\infty} N_c(E) f_n(E) d(E) \quad (\text{II. 3})$$

$N_c(E)$ est le nombre d'états possibles entre les niveaux E et $E + dE$ de la bande de conduction :

$$N_c(E) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{2m_c^*}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} (E - E_c)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II. 4})$$

$f_n(E)$ est la probabilité d'occupation d'un état d'énergie E par un électron au-dessus du niveau de Fermi et qui est donnée par la statistique de Fermi-Dirac :

$$f_n(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_c}{kT}\right)} \quad (\text{II. 5})$$

D'où finalement :

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (\text{II. 6}) \quad N_c = (1/4) \left(\frac{2kTm_c^*}{\pi h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{II. 7})$$

N_c est la densité effective des électrons dans la bande de conduction.

Identiquement, pour la densité des trous dans la bande valence :

$$p = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_f}{kT}\right) \quad (\text{II. 8}) \quad N_v = (1/4) \left(\frac{2kTm_v^*}{\pi h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{II. 9})$$

N_v est la densité effective des trous dans la bande de valence Avec :

m_c^* : masse effective d'électron

m_v^* : masse effective du trou

E_c : niveau du bas de la bande de conduction

E_v : niveau du haut de la bande de valence

h : constante de Planck, $h = h/2\pi$

k : constante de Boltzman

T : température absolue du matériau (en °K)

E_f : niveau de Fermi : énergie de référence pour laquelle la probabilité d'occupation $f(E_f)$ est égale à 0.5

II.4.1 Les semi-conducteurs intrinsèques :

Ce sont des semi-conducteurs très purs et bien cristallisés, ayant un taux d'impuretés très faible et où la densité des électrons est égale à celle des trous [6]

Les densités d'électrons et de trous sont égales et on peut écrire :

$$n = p = n_i \quad (\text{II. 11}) \quad \text{Donc} \quad n \cdot p = n_i^2 \quad (\text{II. 10})$$

n_i est appelé densité de porteurs intrinsèques, c'est une caractéristique du semiconducteur à une température donnée.

Le nombre d'électrons libres dans la bande de conduction est donné par le produit de la densité d'états $N_c(E)$ par la fonction de distribution de Fermi Dirac $F_n(E)$ intégré sur toute la bande de conduction :

$$p = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_f}{kT}\right) \quad (\text{II. 12})$$

Même pour les trous :

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (\text{II. 13})$$

II.4.2 Les semi-conducteurs extrinsèques :

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé par des impuretés spécifiques. On dit qu'un semi-conducteur extrinsèque est de type n si la densité des donneurs (N_d) est supérieure à la densité des accepteurs (N_a), dans le cas inverse, le semi-conducteur est de type p. En se basant sur l'équation de neutralité et dans le cas où tous les atomes dopants sont ionisés. [1]

Semi-conducteurs de type n :

D'après l'équation de neutralité la densité d'électrons (n) est supérieure à la densité de trous (p).

$$N_d < N_a \quad \text{et} \quad p < n \quad (\text{II. 14})$$

L'équation de neutralité et dans le cas où tous les atomes dopants sont ionisés

$$n + Na = p + Nd \quad (\text{II. 15})$$

On néglige la densité de trous donc on obtient :

$$n \simeq Nd - Na \quad (\text{II. 16})$$

On obtient la densité des trous (porteurs minoritaires) :

$$p = \frac{ni^2}{Nd - Na} \quad (\text{II. 17})$$

Semi-conducteurs de type p :

Dans ce type de semi-conducteur la densité en accepteurs (Na) est supérieure à la densité de donneurs (Nd). Dans ce cas, les porteurs majoritaires sont les trous. Les densités de porteurs sont :

$$Na < Nd \quad \text{et} \quad n < p \quad (\text{II. 18})$$

D'après L'équation **Error! Reference source not found.** et dans le cas où tous les atomes dopants sont ionisés.

On obtient la densité des trous (porteurs minoritaires) :

$$n = \frac{ni^2}{Na - Nd} \quad (\text{II. 19})$$

II.5 Notion de quasi-niveaux de Fermi :

Le semi-conducteur est à l'équilibre thermodynamique et la densité des porteurs peut s'écrire en fonction du nombre intrinsèque et du niveau de Fermi :

$$\begin{aligned} n &= N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{k_B T}\right) \\ p &= N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{k_B T}\right) \end{aligned} \quad (\text{II. 20})$$

On remarque que le niveau de Fermi est au-dessus du milieu de la bande interdite et tend vers le bas de la bande de conduction lorsque le dopage augmente Figure II. 3 Pour un semi-conducteur de type p et avec une procédure analogue, on obtient :

$$EF = Ec - k_B T \ln \frac{Nc}{Nd - Na} \quad (\text{II. 21})$$

Pour un semi-conducteur de type n et avec une procédure analogue, on obtient :

$$EF = E_v - k_B T \ln \frac{N_v}{N_a - N_d} \quad (\text{II. 22})$$

En présence d'une perturbation, la loi d'action masse n'est plus valable et la notion de niveau de FERMI nécessite l'équilibre thermodynamique. Le niveau de Fermi n'est pas le même, donc on parle de quasi-niveau de Fermi E_{Fn} pour les électrons et de quasi-niveau de Fermi E_{Fp} pour les trous. Ils sont donnés par les relations suivantes :

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_c}{k_B T}\right) \quad (\text{II. 23})$$

$$p = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_{Fp}}{k_B T}\right)$$

Par les relations précédents on trouve :

$$E_{Fn} = E_F + k_B T \ln\left(1 + \frac{\delta n}{n_0}\right) \quad (\text{II. 24})$$

$$E_{Fp} = E_F + k_B T \ln\left(1 + \frac{\delta p}{p_0}\right) \quad (\text{II. 25})$$

n_0 et p_0 sont les densités d'électrons et trous à l'équilibre thermodynamique.

δn et δp sont les variations des densités d'électrons et trous hors équilibre.

Le changement des niveaux énergétiques de Fermi sont illustrés sur la figure.

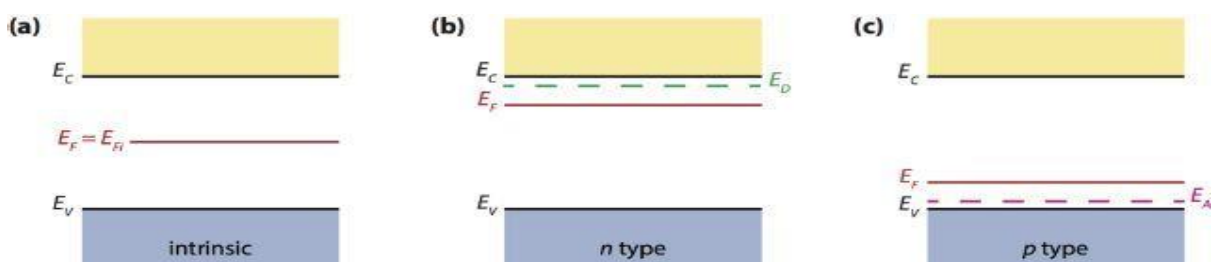


Figure II. 3 : Un décalage de la position de l'énergie de Fermi dans le diagramme de bande et l'introduction du niveau d'énergie autorisé dans la bande interdite en raison du dopage.

II.6 Notion du gap direct et du gap indirect dans un semi-conducteur :

Un semi-conducteur est à gap direct si le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande conduction peuvent correspondre au même vecteur d'onde k . Un semi-conducteur est à gap indirect si le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande

de conduction ne correspondent pas au même vecteur d'onde k . L'appellation gap « indirect » est justifiée par le fait que les électrons libres de la bande de conduction ont toujours tendance à se placer au minimum de la bande de conduction pour minimiser leur énergie.

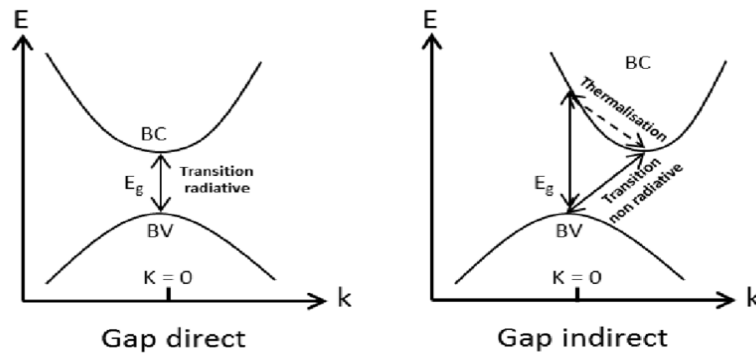


Figure II. 4 :Structure de bandes d'un semi-conducteur à gap directe et à gap indirecte.

II.7 Les Courants dans le semi-conducteur :

Nous devons étudier les courants résultants du déplacement des porteurs de charges que sont les électrons et les trous. Ce déplacement de charges se fait sous l'action d'une force dont l'origine peut être un champ électrique ou un gradient de concentration de porteurs de charges. Dans le premier cas, le courant est appelé courant de conduction, dans le second il est appelé courant de diffusion. La densité de courant se définit comme étant la quantité de charges qui traversent une unité de surface par unité de temps. [13]

II.7.1 Le courant de conduction :

Sous l'effet d'un champ électrique E , il y aura un déplacement des porteurs de charges donc un courant de conduction J_c donné par la loi d'ohm $\vec{J}_c = \sigma \vec{E}$ où σ est la conductivité du semi-conducteur.

Lorsque les trous et les électrons baignent dans le champ électrique créé par la mise sous tension de la jonction, ils se déplacent et génèrent ainsi le courant de conduction :

$$J_c = q(n\mu_n + p\mu_p)E \quad (\text{II. 26})$$

Où n et p sont les densités de porteurs, $q=1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$ la charge d'un électron, E le champ électrique de la jonction polarisée et μ_n et μ_p les mobilités respectivement des électrons et des trous.

II.7.2 Le courant de la diffusion :

La diffusion est un processus par lequel les particules ont tendance à se propager des régions à forte concentration de particules vers les régions à faible concentration de particules à la suite d'un mouvement thermique aléatoire. La force motrice de la diffusion est un gradient de concentration des particules. Les courants résultant de la diffusion sont proportionnels au gradient de concentration des particules. Pour les électrons et les trous, ils sont donnés par :

$$J_D = q(D_n \nabla n - D_p \nabla p) \quad (\text{II. 27})$$

D_n , D_p sont des constantes de diffusions des électrons et trous. Les courants totaux des électrons et des trous s'écrivent donc :

$$\begin{aligned} J_n &= q(n\mu_n E + D_n \nabla n) \\ J_p &= q(p\mu_p E - D_p \nabla p) \end{aligned} \quad (\text{II. 28})$$

II.8 Génération-Recombinaison :

II.8.1 Mécanismes de génération :

La génération est la création des porteurs dans le semi-conducteur, elle est caractérisée par un paramètre (**G**) qui mesure le nombre de porteurs créés par unité de volume et par unité de temps ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$). Elle peut être due à l'agitation thermique ou à l'excitation du semi-conducteur par une source extérieure (optique, électrique, etc...). [1]

II.8.2 Mécanismes de recombinaison :

Lorsqu'un semi-conducteur est retiré de l'équilibre thermique, par exemple par illumination et / ou injection de courant, les concentrations d'électrons (n) et de trous (p) ont tendance à se détendre vers leurs valeurs d'équilibre grâce à un processus appelé recombinaison dans lequel un l'électron tombe de la bande de conduction à la bande de valence, éliminant ainsi un trou de bande de valence, elle est caractérisée par un paramètre (**R**) leur unité ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$). Il existe plusieurs mécanismes de recombinaison importants pour le fonctionnement des cellules solaires. [1]

- La recombinaison par pièges (défauts) dans l'intervalle interdit.
- La recombinaison radiative (bande à bande).
- La recombinaison Auger.
- La recombinaison Shockley-Read-Hall, SRH).

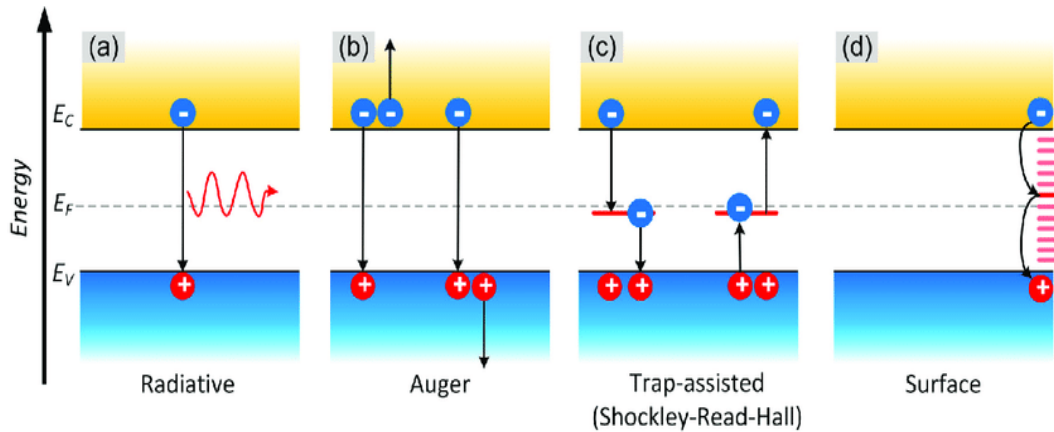


Figure II. 5 : Les mécanismes de recombinaison pour le fonctionnement de cellule

II.9 Modélisation de la cellule solaire :

Les caractéristiques $I(V)$ d'une cellule solaire idéale est la superposition de la courbe $I(V)$ sous obscurité et du courant photogénéré I_{ph} :

$$I(V) = I_{01} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - I_{ph} \tag{II. 29}$$

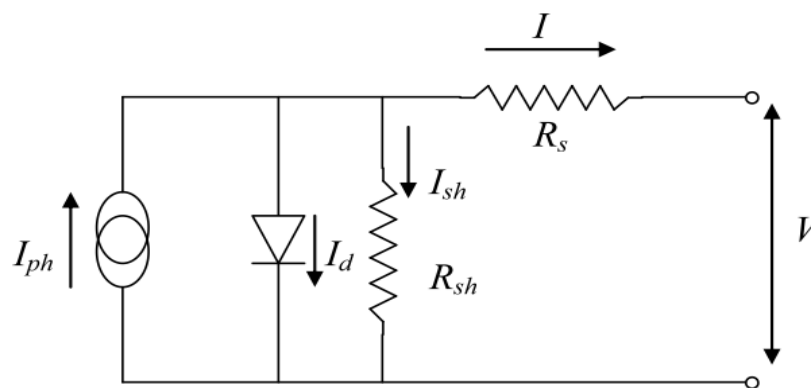
I_{01} : courant de saturation de la diode,

q : charge élémentaire, ($q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C)

k : constante de Boltzmann, ($K = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J.K⁻¹)

T : température (k)

Ce comportement peut être décrit par un simple circuit équivalent, illustré sur la Figure II. 6, dans lequel une diode et une source de courant sont connectées en parallèle. La diode est formée



par une jonction p-n.

Figure II. 6 : Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire

La cellule PV en condition d'utilisation ne peut pas être considérée comme une diode idéale et comporte des résistances parasites en série (R_s) et en parallèle (R_{sh}). Ces deux types de résistances auront pour effet de diminuer le facteur de forme et par conséquent la puissance délivrée par la cellule.

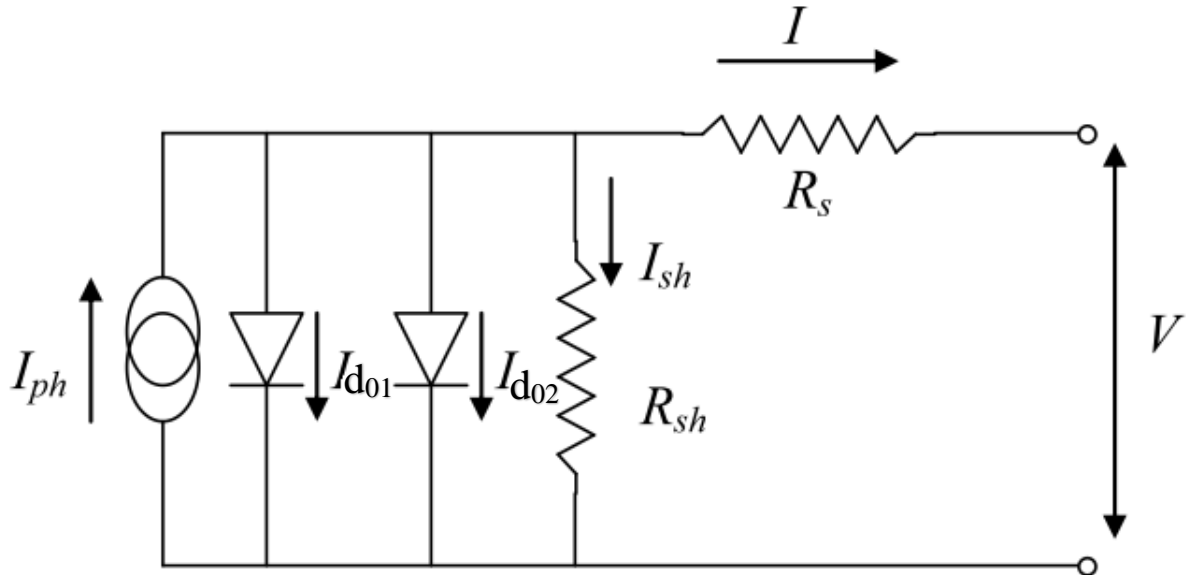


Figure II. 7:Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réel

On déduit du schéma de la figure (II.10), l'équation caractérisant la variation du courant en fonction de la tension à l'aide des lois de Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_{d01} \left(e^{\left(\frac{q(V+IR_s)}{kT} \right)} - 1 \right) - I_{d02} \left(e^{\left(\frac{q(V+IR_s)}{kT} \right)} - 1 \right) - \frac{(V + IR_s)}{R_p} \quad (\text{II. 30})$$

II.9.1 La résistance série :

La résistance série R_s est principalement due à la résistance en volume du semiconducteur, aux contacts métalliques et interconnexions, au transport des porteurs à travers la couche diffusante, aux résistances de contact avec les contacts métalliques des électrodes. Elle agit de manière peu prononcée sur le courant de court-circuit et peut être déterminée à partir de la courbe I-V en calculant la dérivée de celle-ci aux alentours de V_{oc} . Plus R_s est faible et meilleure est la cellule. [9]

II.9.2 La résistance parallèle :

La résistance parallèle R_{sh} est due aux impuretés proches de la jonction et au fait que la jonction p-n ne soit pas idéale. Ce qui causera des courants de fuite dans la jonction. En présence des défauts du cristal et de la précipitation des impuretés étrangères dans la région de

la jonction. Ainsi donc, nous pouvons dire que R_{sh} est liée au processus de fabrication. Elle agit de manière peu prononcée sur la tension en circuit-ouvert et peut être déterminée à partir de la courbe I-V en calculant la dérivée de celle-ci aux alentours de I_{sc} . Plus R_{sh} est forte et meilleure est la cellule. [7]

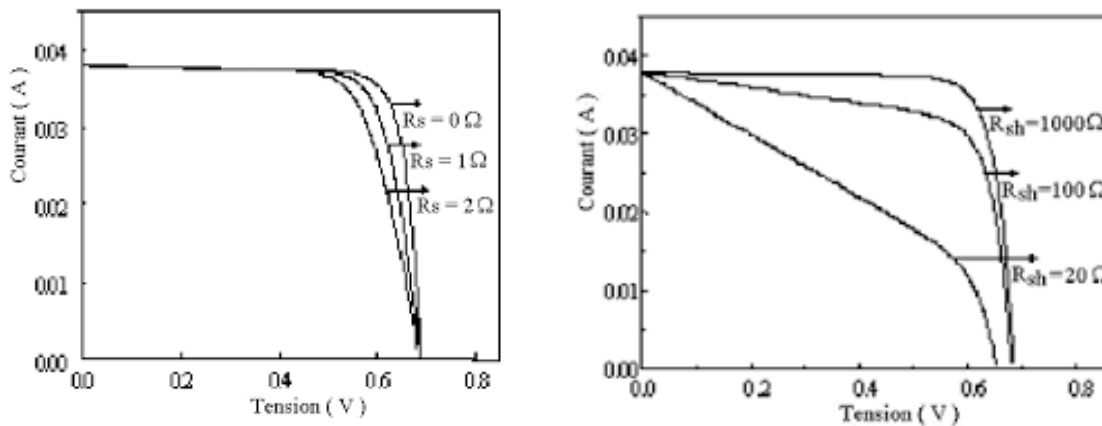


Figure II. 8 :L'effet de résistance série et shunt

II.10 Grandeurs caractéristiques de la cellule solaire :

Les grandeurs caractéristiques de la cellule solaire peuvent être déterminées à partir de la caractéristique I(V) décrivant le fonctionnement de la cellule. Les paramètres propres à la cellule photovoltaïque (V_{co} , I_{cc} , FF, η), extraits de la caractéristique I(V). La figure ci-dessous représente la caractéristique I(V) sous obscurité et sous éclairement et sa représentation conventionnelle.

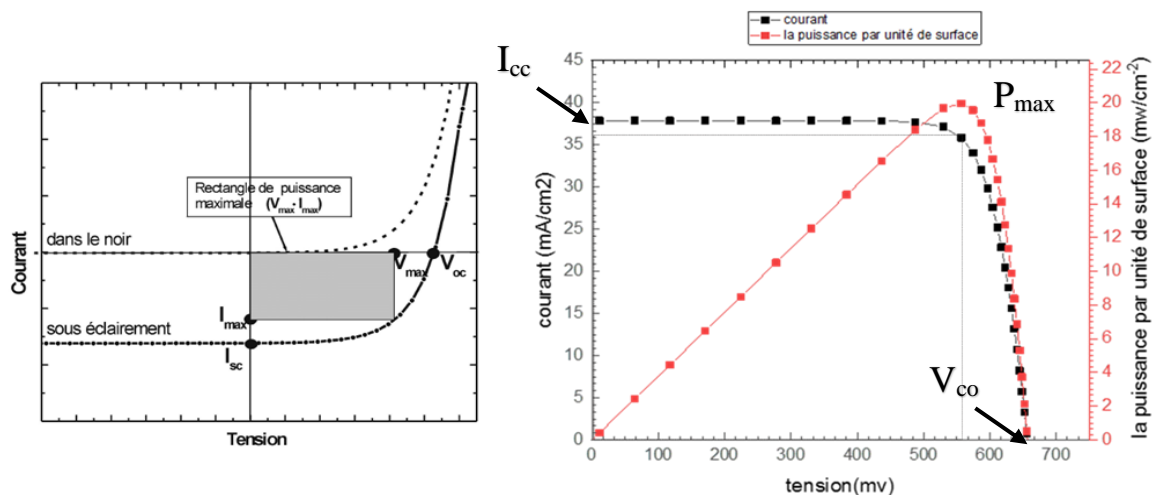


Figure II. 9: Les courbes I(v) et P(v) sous éclairement et sous obscurité.

II.10.1 Courant de court-circuit, I_{cc} :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$) dans le schéma équivalent. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

$$I_{cc} = I_{d_{01}} + I_{d_{02}} + I_{ph} \approx I_{ph} \quad (\text{II. 31})$$

II.10.2 Tension à circuit ouvert, V_{co} :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse. La tension V_{co} est donnée par la relation :

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right) \quad (\text{II. 32})$$

II.10.3 Puissance maximale :

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement P_{max} (I_{max} , V_{max}) de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{cc} et tension comprise entre 0 et V_{co}).

$$P_m = (I \times V)_{max} = I_m \times V_m \quad (\text{II. 33})$$

II.10.4 Facteur de forme, FF :

Le nom "facteur de forme" (fill factor) dérive de la représentation graphique. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (\text{II. 34})$$

II.10.5 Rendement :

Nous pouvons définir le rendement d'une cellule photovoltaïque comme le quotient de la puissance maximale et de la puissance lumineuse reçue P_i par la cellule. Cette puissance lumineuse correspond au produit de l'aire de la cellule A par l'ensoleillement.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{FF \times V_{co} \times I_{cc}}{P_i} \quad (\text{II. 35})$$

II.10.6 rendement quantique externe EQE (λ) :

Le rendement quantique, note EQE (external quantum efficiency), appelé aussi IPCE (incident photon to current conversion efficiency), est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Ce rendement ne prend pas en considération les photons réfléchis et transmis. Il est donné par la relation suivante. [8]

$$EQE = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi(\lambda)} \times \frac{E_{ph}(\lambda)}{e} = \frac{h \cdot c}{e} \times \frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi(\lambda)\lambda} = 1.24 \times \frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi(\lambda)\lambda} \quad (\text{II. 36})$$

Où : J_{cc} : est la densité de courant de Court-circuit ($A \cdot cm^{-2}$).

ϕ : est l'éclairement reçu par l'échantillon ($w \cdot cm^{-2}$).

λ : est la longueur d'onde monochromatique (nm).

h : est la constante de Planck (J.s).

c : est la vitesse de la lumière (Jms^{-1}).

e : la charge électronique.

E_{ph} : L'énergie du photon.

II.10.7 Rendement quantique interne :

Le rendement quantique interne est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre des photons incidents. Dans ce cas, les photons incidents sont considérés en soustrayant ceux perdus par réflexion à la surface de la cellule et absorption incomplète. Cette grandeur s'appelle le rendement quantique interne RQI ou IQE (Internal quantum efficiency). [1]

Elle est déduite à partir de la mesure du rendement quantique EQE et de la réflectivité $R(\lambda)$ tel que :

$$R_{si} = \frac{J_{ph}(\lambda)}{q\Phi_0(\lambda)(1 - R(\lambda))} \quad (\text{II. 37})$$

II.11 Facteurs limitant le rendement :

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale. Différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont donc la plupart des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée. Ces pertes sont évoquées ci-après :

II.11.1 Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons :

Un photon absorbé génère seulement une paire électron/trou. L'excès d'énergie, supérieur à la largeur de la bande interdite, est principalement dissipé sous forme de chaleur. Sous un éclairement normal AM1.5, ces pertes sont évaluées à 33% de la puissance totale dans le cas du silicium. [9]

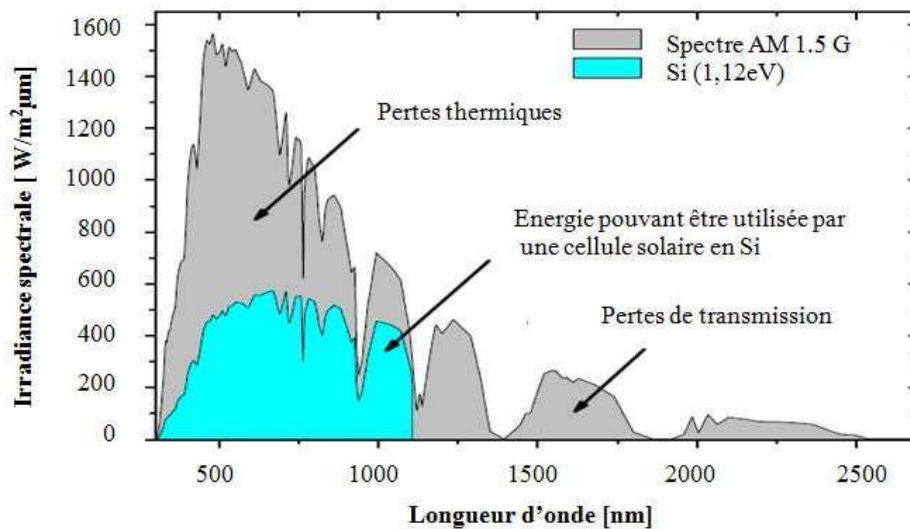


Figure II. 10 : Spectre d'émission solaire

II.11.2 Réflexion :

Le phénomène de la réflexion est l'un des problèmes qui impose la meilleure conversion d'énergie. Ces pertes affectent principalement le courant de court-circuit de la pile solaire. Généralement, la lumière se perd en deux formes, soit par réflexion, soit par transmission. Dans une structure photovoltaïque. Les trois niveaux suivants de la réflexion sont responsables des pertes optiques [10] :

1. Réflexion par les contacts ohmiques.
2. Réflexion par la surface avant du semi-conducteur.
3. Réflexion par la couche arrière (BSR)

II.11.3 Pertes par Photons de grande longueur d'onde :

La première limitation vient de la longueur d'onde du rayonnement incident, qui doit être assez faible. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un

semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). [9]

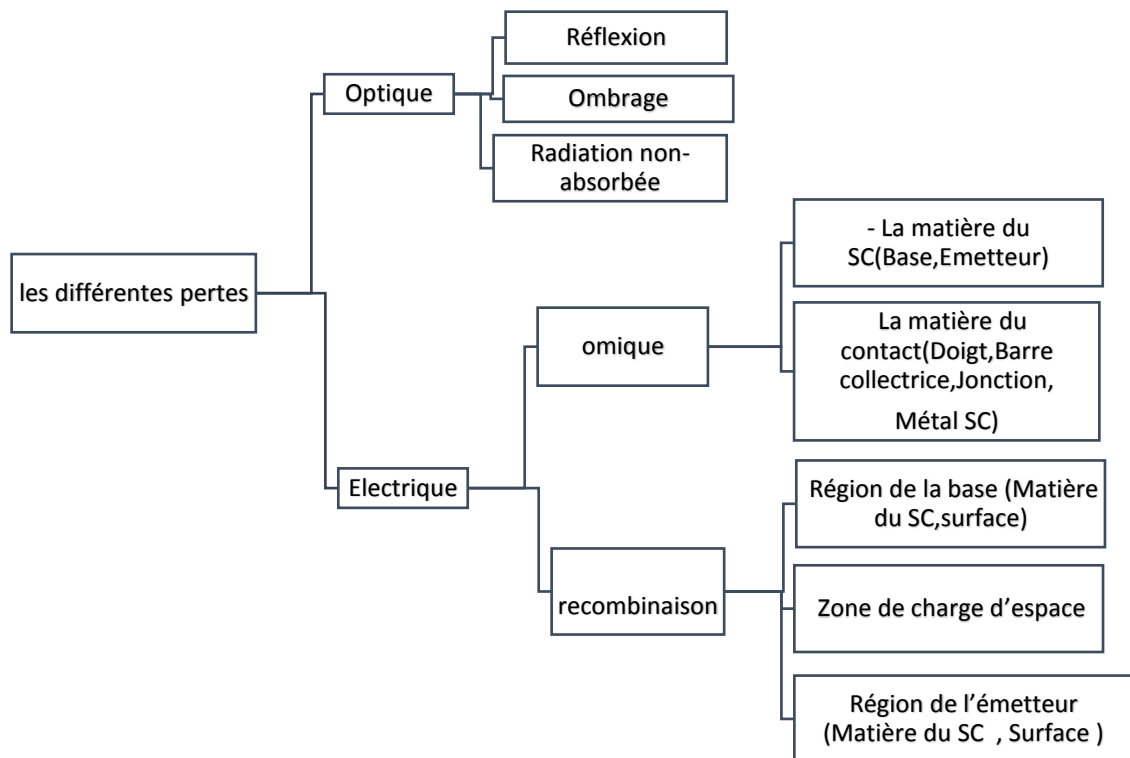


Figure II. 11 :Diagramme des différents pertes

II.12 Conclusion :

L'étude de la physique de semi-conducteur permet de modéliser la cellule solaire. Le modèle électrique réel d'une cellule solaire, est la superposition des quatre composantes : le photo-courant modélisant l'éclairement, le courant de diffusion dans l'émetteur et la base de la cellule solaire (diode en parallèle de facteur d'idéalité $n_1=1$), le courant de recombinaison des porteurs dans la zone de charge d'espace (diode également en parallèle de facteur d'idéalité $n_2=2$ et un quatrième courant modélisant les résistances série et shunt. Ce modèle permet d'extraire les quatre paramètres principaux de la cellule qui sont le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement de conversion.

Néanmoins, la conversion photovoltaïque n'est pas totale. Les différentes pertes optiques et électriques viennent influencer le rendement d'une cellule. Il est donc limité par ces pertes à une valeur théorique maximale.

Bibliographie :

- [1] M. Abdelkader, « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes. », Docteur en Physique, L'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2017..
- [2] William N. Shafarman, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, page 546., 2004.
- [3] L. Intitul, Département des Sciences de la Mati., (2011)..
- [4] H. Mathieu, « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques. », Dunod.,
- [5] S. A. L. Protin, "Convertisseurs photovoltaïques. s.l. : Techniques de l'ingénieur., 2009.
- [6] H. Mathieu, « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », paris: Edition Masson, 1996.
- [7] T. Mambrini, « Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. », UNIVERSITE PARIS-SUD, Jun 2015.
- [8] D. Wassila., « Modelisation des structures photovoltaïques : aspects fondamentaux et appliques », Thèse de Doctorat Université Abou BekrBelkïdde Tlemcen., 2010.
- [9] A. Ricaud, « Presse polytechniques et universitaires romandes. », chez *Lausanne, Suisse*, ., 1997, , p. p. 332.
- [10] B. Mouna, « Étude des matériaux semi-conducteurs III-V Application à la conversion photovoltaïque », Thèse de Magister, Université de Batna., » octobre 2007..

- [11] L. ntitul, République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Université Med Khider Biskra, Département des Sciences de la Mati., (2011)..
- [12] Souici, «Physique des Semi-conducteurs,» Université de Béjaia, Algérie, Groupe de Cristallographie et Simulation des Matériaux., 2014-2015.
- [13] Frederic Miller, V. Agnes et M. John , Semiconducteurs, VDM Publishing House Ltd., 2010.

Chapitre III : Technologie de la cellule solaire de type n

III.1 Introduction :

Les performantes de la cellule solaire sont limitées par différents pertes physiques et optiques. Dans ces conditions l'étude de technologie de cellule solaire est nécessaire pour minimiser ces pertes avec l'amélioration de performance de la cellule solaire.

On commence notre chapitre par l'étude des étapes de fabrication de la cellule solaire :

-première étape la source de matière puis la purification et différentes méthodes de cristallisation. Ensuite, on passe au procédé standard de la fabrication de la cellule solaire de type p détaillant ces différentes étapes, et finalement un descriptif sur la cellule solaire de type n qui est l'objet de notre étude.

III.2 Silicium cristallin :

Le silicium est un élément le plus abondant de la terre. On le trouve généralement sous forme de silicate dans de nombreuses roches. Dans le tableau périodique des éléments, il est situé dans la colonne IV ; entre le carbone (C) et le germanium (Ge) et la troisième ligne ; entre l'aluminium (Al) et le phosphore (P). C'est un semi-conducteur à gap indirect de 1.12 eV à la température ambiante. Le silicium cristallise dans la structure « Diamant ». Il ne se trouve pas sous sa forme pure, mais, sous forme de silice (SiO₂) dans le sable de quartz.

Tableau III. 1 : Les propriétés mécaniques et thermiques du silicium [4]

Propriété	Valeur
Numéro atomique	14
Poids atomique (amu)	28,0855
Densité atomique (atomes / cm ³)	$5,0 \times 10^{22}$
Structure de cristal	Diamant
Structure électronique	Ne 3s ² 3p ²
Densité à 20C (g. cm ⁻³)	2,34
Point d'ébullition (C)	2355
Point de fusion (C)	1410
Chaleur latente d'évaporation (J g ⁻¹)	13700

III.3 Silicium métallurgique :

La qualité la plus basse du silicium est ce que l'on appelle le silicium métallurgique, qui est fabriqué à partir de quartzite. Le quartzite est une roche constituée de dioxyde de silicium (SiO_2) presque pur. Pour produire du silicium, le quartzite est fondu dans un four à arc à électrodes immergées en le chauffant jusqu'à environ $1\,900\text{ }^\circ\text{C}$. Ensuite, le quartzite fondu est mélangé avec du carbone. Comme source de carbone, un mélange de charbon, de coke et de copeaux de bois est utilisé. Le carbone commence alors à réagir avec le SiO_2 . Les réactions étant assez complexes. La réduction de la silice par le carbone est un procédé mis en œuvre dans les fours électriques de l'industrie sidérurgique depuis le début du 20^{ème} siècle.

La température requise pour la réduction de l'oxyde de silicium nécessite un apport de chaleur réalisé par un arc électrique à l'extrémité d'électrodes en graphite. [1]

Les réactions chimiques mises en jeu dans un four à arc sont multiples et complexes. On distingue différentes zones de températures dans le four à arc ; dans chacune de ces zones se produit une réaction chimique différente (figure III-1)

La réaction globale peut cependant s'écrire comme suit :

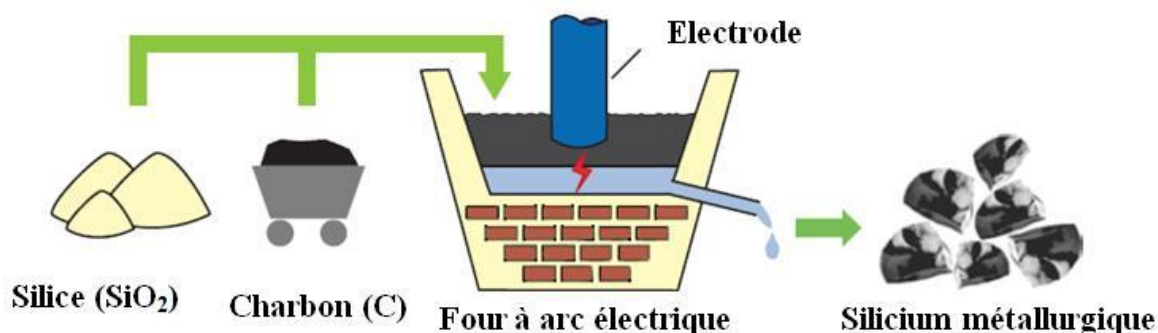
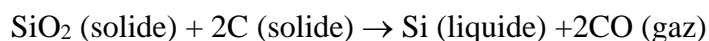


Figure III. 1 : Production du silicium métallurgique

III.1.1 purification de silicium :

Il s'agit, en partant du silicium métallurgique, de faire une purification chimique. De nombreux procédés ont été développés par les différents producteurs mondiaux de silicium. La voie traditionnelle de purification du silicium métallurgique est la voie dite « chimique », utilisée à l'origine pour l'élaboration de silicium de qualité électronique. Elle présente de nombreuses variantes selon l'opérateur (Siemens, Union Carbide Chemicals, Ethyl Corporation) basées sur trois opérations principales : la synthèse, la distillation et la pyrolyse. Au final, le procédé de purification aboutit à l'obtention de lingots de silicium purifiés à 99.99%.

III.1.2 Cristallisation du silicium :

Il existe plusieurs techniques de cristallisation du silicium purifié les plus connus sont : la méthode Czochralski et la méthode de la zone fondue flottante.

III.1.2.1 méthode Czochralski :

La principale méthode est celle de Czochralski. On fait fondre le silicium polycristallin dans un four d'étirage sous argon à 1450°C (1). Un germe monocristallin est amené au contact du silicium fondu (2) puis tiré lentement (de 0,4 à 3 mm/min) (3,4). Lors de la croissance du cylindre de silicium, le creuset contenant le silicium liquide et le cylindre sont animés d'un lent mouvement de rotation en sens inverse. On obtient alors un lingot cylindrique de 60 à 100 kg pour environ 2m de longueur dans le cas de disques (wafers) de 200 mm (5,2).

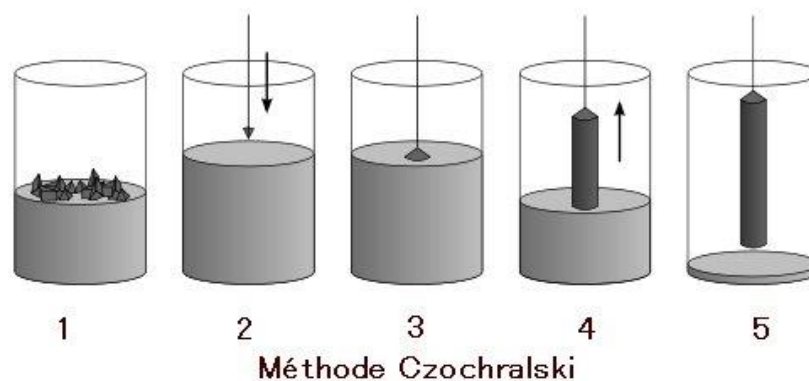


Figure III. 2 : Schéma simplifié de méthode czochralski

III.1.2.2 méthode de la zone fondue flottante :

L'autre technique (20% de la production) est celle de la zone fondue flottante (silicium FZ) qui permet d'obtenir du silicium d'une plus grande pureté en évitant la contamination par le creuset. Le processus consiste à produire une zone liquéfiée en chauffant un bâton de silicium polycristallin. Le bâton est déplacé verticalement et suivant une lente rotation. Un germe de cristal est utilisé pour initier la croissance. Cette méthode est cependant plus longue et plus chère.

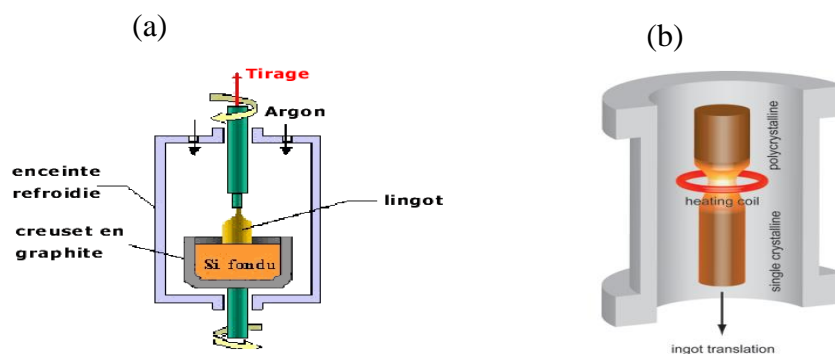


Figure III. 3: les deux méthodes de cristallisation de silicium (a) La méthode de la zone fondue flottante (b) méthode Czochralski

III.1.3 Types de silicium cristallin :

Le tableau III.2 illustre la gamme des grains selon la taille du type de silicium. Dans ce tableau, le poly-silicium est défini comme ayant une granulométrie comprise entre $1\mu\text{m}$ et 1mm . Ce type de matériau a des grains beaucoup plus petits que les grains des matériaux standards utilisés pour les cellules solaires, à savoir le silicium multi-cristallin, ce qui prête à confusion. Il est souvent considéré comme «poly cristallin». [2]

Tableau III. 2 les types de silicium et son gamme de taille du cristal

Type de silicium	abréviation	Gamme de taille du cristal
Silicium à simple cristal	Sc-Si	>10cm
Silicium multi cristallin	mc-Si	1mm – 10cm
Silicium poly cristallin	Poly-Si	$1\mu\text{m}$ – 1mm
Silicium microcristalline	$\mu\text{c-Si}$	10nm – $1\mu\text{m}$
Silicium nanocristallin	nc-Si	1-10nm

III.4 Processus de fabrication d'une cellule solaire photovoltaïque :

III.1.4 Obtention des wafers photovoltaïques :

Les lingots cylindriques (silicium monocristallin) ou parallélépipédiques (silicium polycristallin) de silicium obtenus à l'issue de l'étape de solidification sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées « wafers ». La coupe des lingots est effectuée par une scie à fil d'une épaisseur d'environ 250 μm . L'opération est réalisée en présence de slurry, une solution organique contenant des abrasifs en suspension (un mélange de liquide et de carbure de silicium). Ce n'est pas le fil lui-même qui coupe le matériau mais la solution. Le slurry frotte les lingots en coulant le long du fil et joue, en quelque sorte, le rôle des dents d'une scie. Pour que son action soit efficace, il faut que le slurry coule en continu dans la fente de la scie. [3]

III.1.5 Texturation (ou texturisation) :

La texturisation est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. Le relief créé permet d'augmenter la surface et induit des réflexions multiples sur les facettes des pyramides [4]. La texturisation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité [5]. Différents procédés sont utilisés pour réaliser la texturisation : attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides), texturisation mécanique, plasma ou laser. Ces méthodes peuvent faire passer la réflectivité effective de 39 % à moins de 10 %. [4]

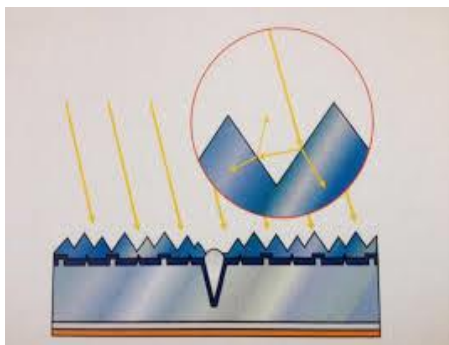


Figure III. 4 : Trajectoire d'un rayon lumineux arrivant sur une surface texturée

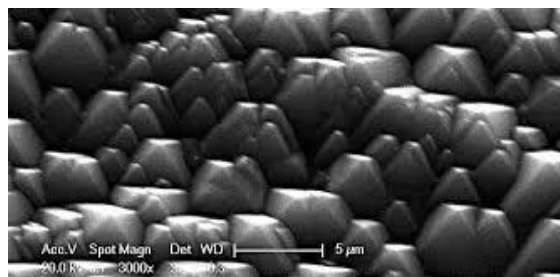


Figure III. 6:Texturisation alcalin

III.1.6 formation de la jonction PN:

La formation des jonctions n+ et p+ est obtenue par dopage. Le dopage dans les semi-conducteurs est possible grâce à l'introduction d'atomes (impuretés) dans le cristal, possédant une valence différente de celle des éléments composant le semi-conducteur. Le dopage permet alors de contrôler la concentration de charges et donc la conductivité du semi-conducteur. Il existe différents moyens pour introduire des impuretés pour le dopage des matériaux semi-conducteurs dont nous pouvons retenir [6]:

- l'implantation ionique.
- la croissance de couche par épitaxie.
- la diffusion thermique.

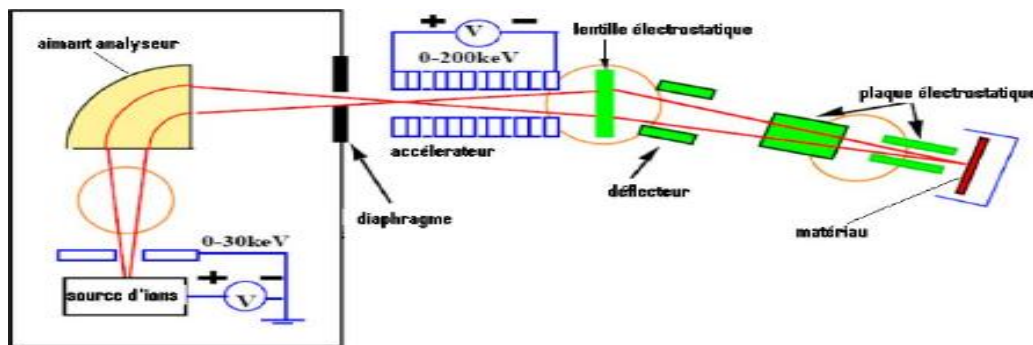


Figure III. 5: Schéma de principe d'un implantateur ionique

III.1.7 Couche antireflet :

La surface du silicium cristallin est réfléchissante, on peut réduire la réflexion en déposant à la surface des cellules une couche transparente ayant un indice de réfraction moyen situé entre celui du verre d'encapsulation et celui du silicium. La couche antireflet est souvent constituée d'un nitrure de silicium, qui peut être déposée par différentes techniques. Cette couche peut aussi être constituée d'un oxyde de silicium.

III.1.8 Passivation :

La surface des semi-conducteurs contient une densité importante de défauts (liaisons pendantes, impuretés, etc.) entraînant des pertes électriques dues à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Les principales couches de passivation utilisées couramment en photovoltaïque sont l'oxyde thermique de silicium (SiO_2) par oxydation thermique, le nitrure de silicium hydrogéné ($\text{SiN}_x:\text{H}$) par CVD (ou PCVD) et l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3). Le (SiO_2) et le nitrure de silicium hydrogéné ($\text{SiN}_x:\text{H}$) sont utilisés pour passiver les émetteurs n+, le (SiO_2) et (Al_2O_3) sont adaptés aux émetteurs p+.

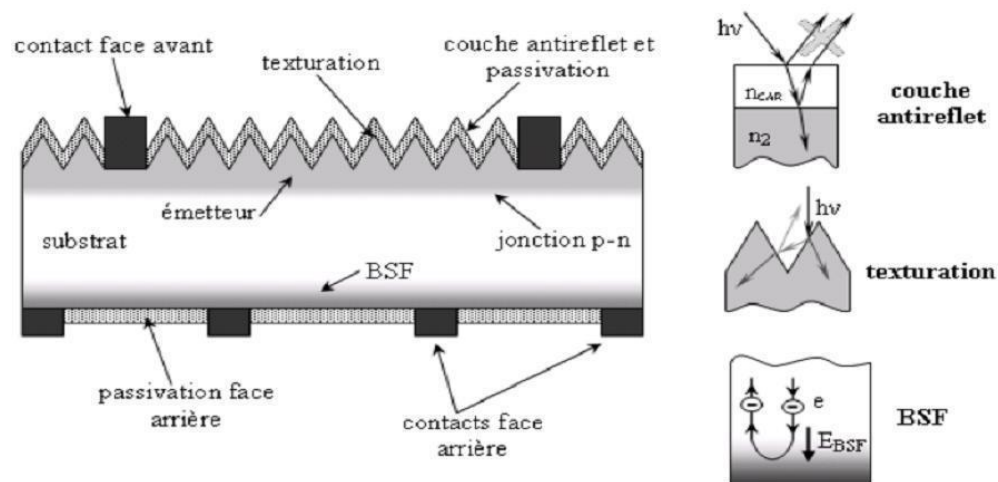


Figure III. 6: Structure de la cellule solaire

III.1.9 champ de surface arrière (BSF) :

Afin de collecter les paires électron-trous créées par les radiations de grandes longueurs d'onde du spectre solaire, on réalise un champ électrique par transition abrupte de dopage, sur la face arrière de la cellule solaire. Ce champ électrique arrière s'appelle BSF en anglais (Back Surface Field). Les porteurs excédentaires ainsi créés au voisinage de cette zone, au lieu de s'y recombiner, sont repoussés vers la région de charge d'espace de la jonction. Ils participent au photo-courant dans la mesure où la longueur de diffusion de ses porteurs de charge est plus importante que l'épaisseur totale de la couche de base de la cellule.[8] En ajoutant une couche plus dopée à l'arrière, il y aura donc

création d'une barrière de potentiel supplémentaire qui fait diminuer la vitesse de recombinaison sur la face arrière.

III.1.10 Réalisation des contacts métallique :

Les faces avant et arrière de la plaquette doivent être recouvertes par des contacts métalliques pour la collecte des porteurs de photo courant généré. L'électrode avant (contact avant) est déposée sous forme de grille, pour laisser passer la lumière. Par contre, l'arrière est simplement recouverte d'une couche métallique continue.

Il existe plusieurs techniques pour la métallisation. La méthode la plus utilisée dans l'industrie photovoltaïque est la sérigraphie en raison de sa simplicité de mise en œuvre et le bas coût, la sérigraphie de pâte à base d'argent (Ag) pour la face avant et d'aluminium (Al) pour la face arrière est utilisée pour plus de 85% de la production mondiale. [7]

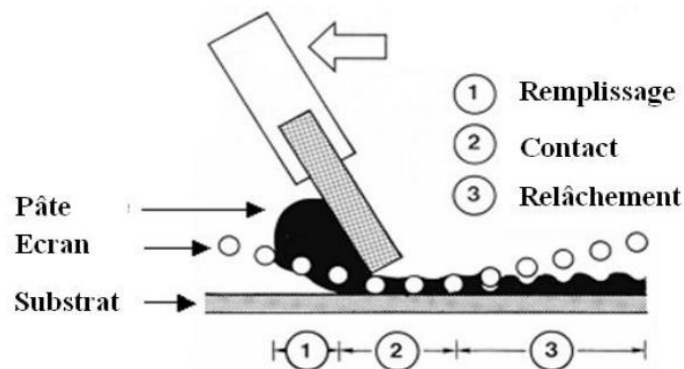


Figure III. 8: Formation d'un contact sérigraphié

III.5 Fabrication des cellules photovoltaïques sur substrat de silicium de type n :

Actuellement, le silicium cristallin domine le marché de production des cellules photovoltaïques dans le monde. Malgré tous les avantages liés aux propriétés du silicium type-N, ce dernier n'est pas majoritairement utilisé dans l'industrie photovoltaïque. La principale difficulté de ce dernier par rapport au silicium de type p est due à la formation de l'émetteur bore par diffusion avec les technologies existantes. De plus, la passivation de l'émetteur p+ était considérée comme un point bloquant, sachant que le nitrure de silicium n'est pas l'idéal pour la passivation de ces émetteurs [7].

III.1.11 Réalisation et étude du substrat :

Le substrat du silicium cristallin dopé n, a des avantages de taille par rapport à celui dopé p et qui sont énumérés ci-après [5] :

- Une faible sensibilité à la plupart des impuretés métalliques,
- Une faible variation de la durée de vie avec le niveau d'injection,
- Une faible dégradation des performances de la cellule solaire sous éclairage (Light Induced Degradation : LID) due à l'activation de complexes BoreOxygène (BO)

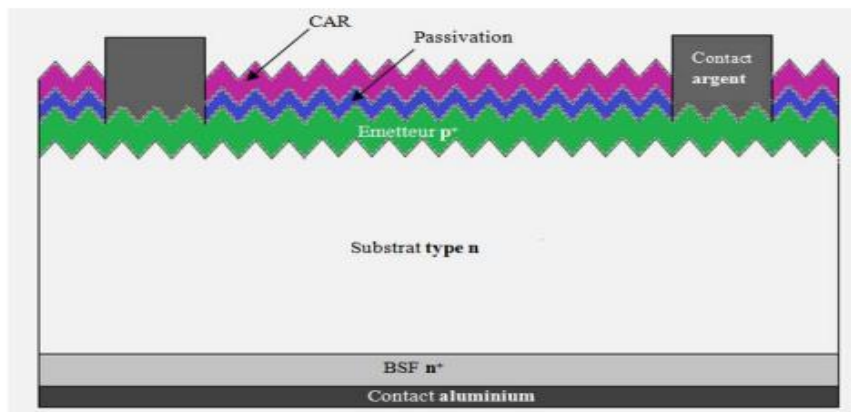


Figure III. 9: La structure de cellule solaire de type n

III.1.12 Réalisation de l'émetteur dopé au bore :

La réalisation de l'émetteur dopé au bore est réalisée à des températures supérieures à 900 °C, contrairement à la diffusion phosphore qui est réalisée aux alentours de 850°C. Cette augmentation de la température de la diffusion bore par rapport à la diffusion phosphore est nécessaire pour obtenir des dopages d'émetteurs similaires, puisque le coefficient de diffusion (D_0) du bore est de 0.76 cm²/s contre 3.85 cm²/s pour le phosphore. [5]

III.1.13 Cellule type n avec face arrière (dopé Al) :

Au cours des dernières années, l'application du processus standard industriel pour les cellules solaires en silicium type p aux substrats de type n [11]. C'est révélée un candidat prometteur pour une fabrication simple et économique des cellules solaires au silicium type n .A partir de cette

approche, une cellule solaire avec un champ de surface avant phosphoreux (FSF) et un émetteur arrière allié en Al sérigraphie émerge.

La fabrication de cette structure présentée sur la Figure II-6 reste proche du procédé industriel standard et évite l'étape de diffusion du Bore à haute température. [8]

Afin d'obtenir de bons résultats sur ce type de structure, il faut des substrats fins, un silicium de bonne qualité et des procédés de nettoyage plus importants que sur les autres structures. Le principal inconvénient de cette structure est que les porteurs générés en face avant doivent traverser la structure pour être collectés par l'émetteur en face arrière de la cellule. [8]

III.6 Conclusion :

La purification de silicium métallurgique n'est pas suffisant pour fabriquer le photovoltaïque. Plusieurs techniques sont utilisées pour monocristalliser le silicium purifié, les plus connues sont, le procédé « Czochralski » (Cz) et le procédé de Fusion de Zone « Float Zone » (FZ).

L'architecture de la cellule solaire en silicium de type n est analogue à celle en silicium de type p avec beaucoup d'étapes communes de production. Des avantages certains sont mis en avant pour cette architecture de cellule solaire comme énoncé plus haut dans ce chapitre. Dans cette optique le chapitre suivant sera consacré à la modélisation ainsi qu'à la simulation d'une cellule solaire de type N, avec les logiciels PC1D et PC3D afin d'obtenir la configuration la plus optimale.

Bibliographie

- [1] Arno HM Smets, . J. Klaus et I. Olindo , «Solar energy" The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems",» UIT Cambridge Ltd, 2016.
- [2] M. K. Selma, «ETUDE ET SIMULATION DE CELLULES PHOTOVOLTAIQUES A COUCHES MINCES A BASE DE CIS et CIGS.,» JUIN 2012..
- [3] A. L. Adrian CHANTREUX, Le solaire photovoltaïque.Principe et applications, INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE ROUEN.
- [4] L. Jean-François, «Thèse de doctorat:optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques.,» 2009.
- [5] M. Abdelkader, «Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules.innovantes.,» 2017.
- [6] S.M., « « Semiconductor devices physics and technology »,» Wiley,, 2002. .
- [7] P. LÖLGEN, « Surface and volume recombination in silicon solar cells, 152 p.: Thèse,» PaysBas: Universiteit Utrecht, Faculteit Natuur en Sterrenkunde, , Utrecht,, 1995. .
- [8] H. LACHACHI, «Etude de la diffusion du bore et de la passivation des défauts dans les cellules solaires au silicium type N à haut rendement,» UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID –DOCTORAT, 2019.

- [9] R. G. Lemus, H. F. et R. C. , «“ Optical and compositional characterisation of stain-etched porous silicon subjected to anodic oxidation and thermal treatments ”», Mater. Sci. Eng. B, vol 101,, 2003.
- [10] H. Jin, «The effect of boron diffusions on the defect density and recombination at the (111) silicon-silicon oxide interface,»Applied Physics Letters, vol. 92, p. 122109,, 2008.
- [11] N. M., «“Evolution of the microstructure during annealing of porous silicon multilayers’», Journal of Applied Physics,, 2009.

Chapitre IV : Simulation, résultats et discussion

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre on présente une introduction sur les simulateurs PC1D et PC3D pour la simulation des cellules solaires. Ensuite, on fait l'application du programme en étudiant la cellule solaire de type n afin d'optimiser ses paramètres dans le but d'améliorer ses performances. Enfin, on étudie les effets tridimensionnels de la cellule de référence afin d'analyser l'évolution de ces effets en deux dimensions.

IV.2 simulateur PC1D :

Le simulateur PC1D a été développé par P.A Basore et ses collaborateurs à l'université « New South Wales of Sydney » en Australie. Grâce à son interface simple et sa vitesse d'exécution, il a une grande popularité dans le domaine des recherches photovoltaïques. Malgré son unidimensionnalité, il est largement toujours utilisé dans la simulation des cellules solaires à structures simples ou comme un intermédiaire de calcul pour les simulateurs multidimensionnels ou tridimensionnels. Elle est disponible en téléchargement gratuit. Son interface utilisatrice et ses mises à jour continues (la dernière en date étant la version 6.1).

On peut simuler une structure photovoltaïque en introduisant ses paramètres (géométrie-dopages, paramètres électriques et optiques, etc...), en choisissant l'excitation et enfin en exécutant le programme pour l'obtention des résultats. Le logiciel se compose de 4 parties les trois parties consacrent de toute l'information de la cellule la dernière partie porte sur les résultats.

IV.2.1 Paramètres du dispositif (Device) :

Ils sont comme suit :

- La surface du dispositif,
- La texturisation,
- Les résistances shunt internes.
- Les résistances séries internes,
- La réflectance interne,
- La densité de charge surfacique,
- La couche de passivation,
- La réflectance externe

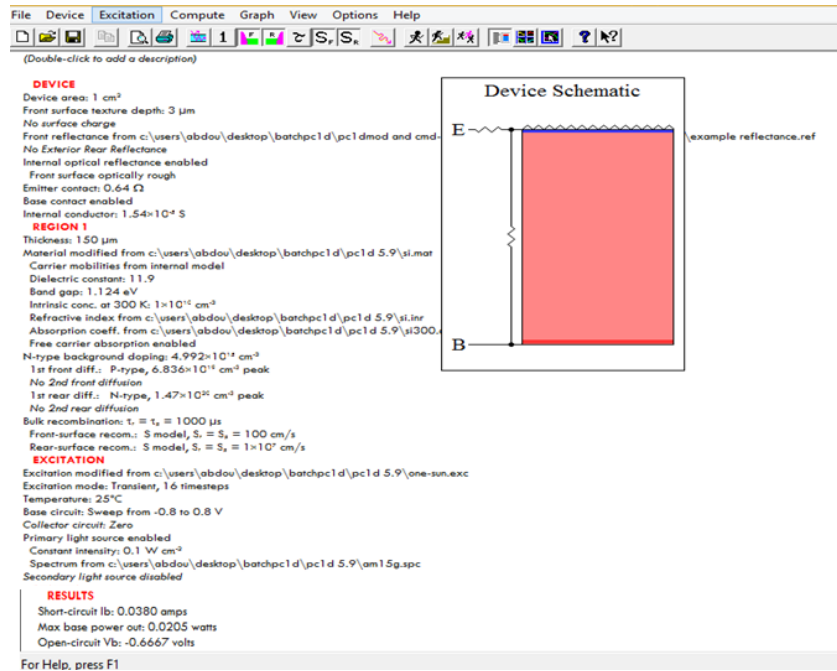


Figure IV. 1: L'interface du logiciel PC1D

IV.2.2 Paramètres des régions :

- On peut introduire plusieurs régions selon la forme et les propriétés de la structure. Ces paramètres de région sont les suivants [1]:

- L'épaisseur du matériau,

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

- Le type et la concentration du dopage,

- Les durées de vie des porteurs,

- Les vitesses de recombinaison dans chaque région. [2]

IV.2.3 Paramètres d'excitation :

Le logiciel contient deux fichiers intégrés :

- Le fichier « **One-Sun.exe** » (intensité globale de tout le spectre d'un seul soleil) permet de simuler différentes caractéristiques (courant/tension-puissance/tension, etc...), -le fichier « **Scan-qe.exe** » (intensité de chaque longueur du spectre) pour la simulation de la réponse spectrale,

-Mode d'excitation : il y a trois modes d'excitation (en équilibre, stationnaire et transitoire), Température, Circuit (résistance, tension), , Eclairage (intensité, fichier d'air masse).[2]

IV.2.4 Résultats :

Les résultats visualisés tout à fait en bas de la page lorsqu'on utilise le fichier

« **OneSun.exc** » comme excitation, sont :

- La valeur du courant de court-circuit,
- La valeur de la tension en circuit ouvert
- , - La valeur de la puissance maximale.

Ceux obtenus avec le fichier « **Scan-qe.exc** » sont [1]:

- La valeur de courant de court-circuit,
- La valeur de la puissance maximale.

IV.3 simulateur PC3D :

PC3D est un simulateur de dispositif tridimensionnel open source pour les cellules solaires à plaquette de silicium qui s'exécute dans une feuille de calcul Excel. En utilisant le langage de programmation VBA d'Excel. On peut explorer des solutions 3D complexes à différentes profondeurs à l'intérieur de la cellule et sous plusieurs angles de vue, y compris une animation « survol ». PC3D permet également d'insérer des défauts ponctuels, linéaires et plans dans la cellule et d'étudier leur impact sur les performances.

Le fichier Excel se compose de plusieurs feuilles. Parmi ces feuilles :

IV.3.1 Feuille « Dashboard » :

Cette feuille contient les paramètres de substrat comme le type de la base, les dimensions (2D ou 3D) ainsi que l'affichage des résultats des paramètres physiques de la cellule (photo génération, l'énergie de fermi, la recombinaison l'affichage des graphes de l'intensité I (A/cm^2) et la puissance P (W/cm^2) en fonction de la tension V (V) et le rendement quantique externe.

IV.3.2 Feuille « Device » :

Cette feuille comporte la dimension de substrat (longueur, largeur, épaisseur, la surface) la deuxième partie contient la résistance par surface de l'émetteur et la résistance par surface de la face arrière (BSF), ainsi que le dopage de la base et la résistance externe.

IV.3.3 Feuille « Data » :

La feuille contient les résultats des feuilles de « Dashboard » comme les valeurs de la courbe courant et de puissance en fonction de tension, d'autre part elle contient les résultats de chaque paramètre concerné. Ces valeurs peuvent être utiliser pour d'autres programmes.

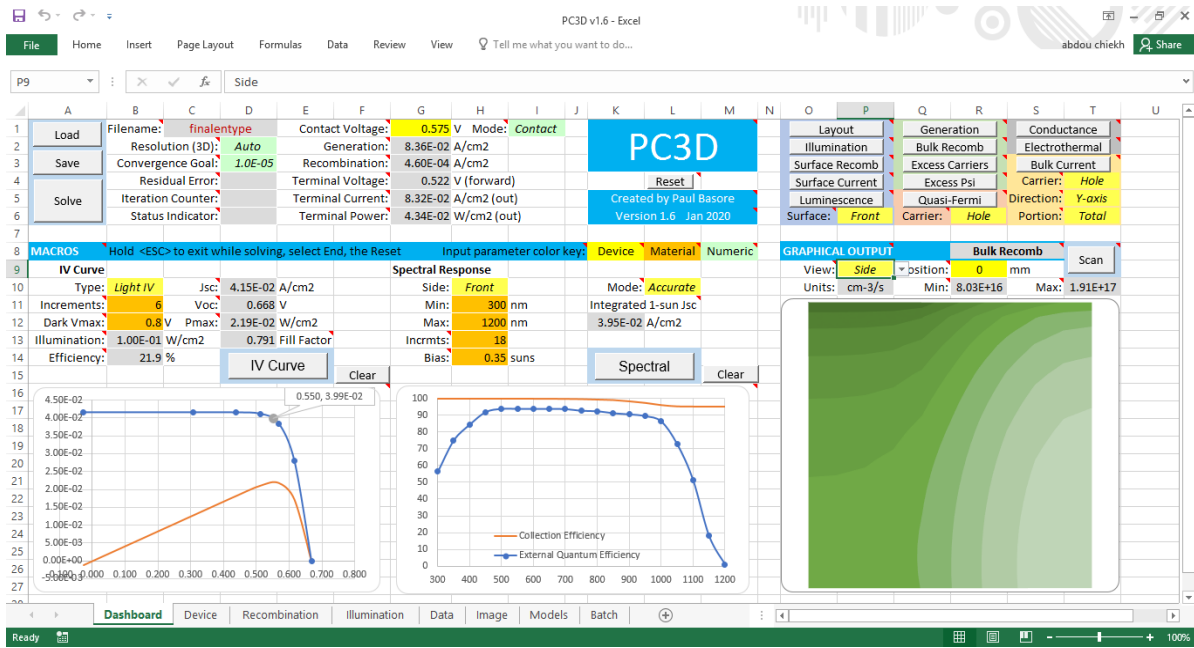


Figure IV. 2: Interface de PC3D

IV.4 Applications et simulations :

IV.4.1 Paramètres physiques de la cellule :

Tableau IV. 1: les paramètres physique de cellule

Paramètres	Valeurs
Surface du front à simuler	1 cm ²
Surface réelle de la cellule	234,60 cm ²
Côté de la cellule (L)	156 mm
La texturisation alcaline (KOH) -Angle de la pyramide :	54°74
Epaisseur de la pyramide	3 μm
L'épaisseur de la base (de la cellule)	150 μm

Le dopage de la base de type N	$4.992 * 10^{15}$
Résistance carrée de couche de l'émetteur	$90 \Omega/\square$
Résistance carrée de face arrière (BSF)	$30\Omega/\square$
Résistance de contact	$3.8\Omega.cm^2$.
Resistance série	$0.64 \Omega.cm^2$.

Il s'agit d'une cellule solaire Pn^+n^{++} au silicium monocristallin. L'émetteur est dopé au bore Pour la face arrière, Dopée par diffusion au phosphore (n^+) à profil gaussien .

IV.4.2 Méthode de simulation :

La cellule solaire est définie à partir des deux feuilles «**Device** »et «**Recombinaison** » et **Dashboard** du fichier Excel de PC3D. Le fichier du spectre solaire AM1.5G choisi comme référence est intégré dans la feuille «**Photo génération** ». Quant aux résultats de la simulation, ils sont présentés sur la feuille «**Data** ». Quelques paramètres, à introduire dans PC3D, nécessitent des calculs intermédiaires qui utilisent PC1D.

Dans le PC1D on introduites paramètres physiques de la cellule comme l'épaisseur de texturisation $3\mu m$, la résistance de l'émetteur et la résistance de la base.

IV.4.3 Résultats de la simulation :

La simulation avec ces paramètres donne les résultats suivants, présentés dans le Tableau. Les résultats trouvés (densité de courant de court-circuit J_{cc} , tension de circuit ouvert V_{co} , facteur

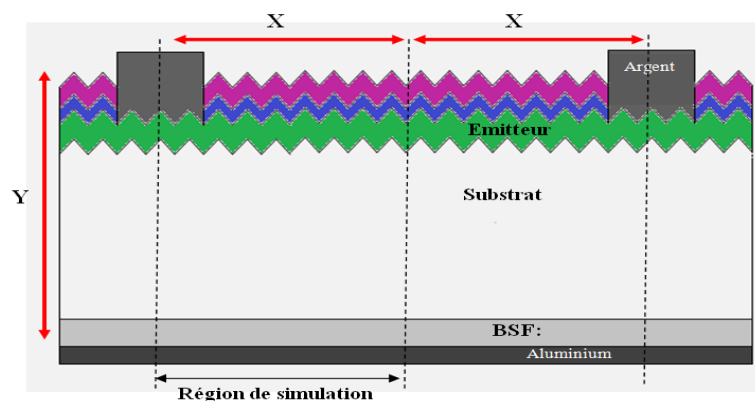


Figure IV. 3: Structure et région de simulation

de forme FF et le rendement de conversion η).

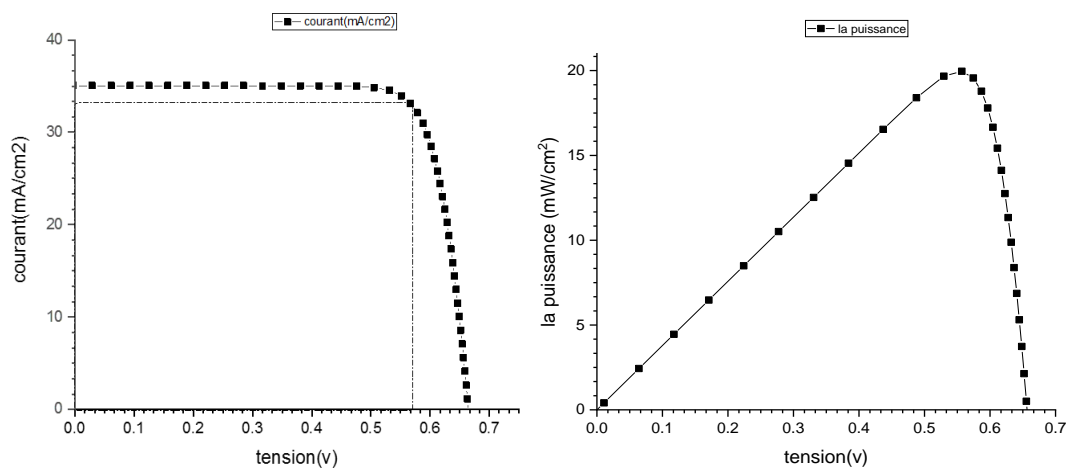


Figure IV. 4: Caractéristiques (I-V) et (P-V) de la cellule solaire de référence

Tableau IV. 2: Résultats de la simulation de la cellule de référence sous PC1D

Paramètres de la cellule simulée par PC1D.	Jcc (mA/cm ²)	Vco (mV)	FF (%)	η (%)
	37.870	565.6	80.28	19.9602

IV.5 Optimisation de la cellule de référence :

Afin d'améliorer les performances de la cellule solaire au silicium à base de substrat de type N, on va optimiser les paramètres des régions (base, émetteur, couche BSF), Les paramètres les plus importants de la base sont la durée de vie, la résistivité et l'épaisseur. Ces paramètres ont un rôle très important dans la collecte des porteurs de charge et influent de manière significative sur le photocourant de la cellule solaire et donc indirectement sur son rendement de conversion.

D'autre part, la résistance de couche de l'émetteur a également un grand effet sur les courants de recombinaisons, et par conséquent sur la tension de circuit ouvert.

Le BSF crée une barrière de potentiel tendant à confiner les porteurs minoritaires (trous) dans la région la moins dopée et aide à les conduire vers la face avant.

IV.6 Influence de la durée de vie :

En fait varier la durée de vie entre 1μs à 400 μs, on obtenu les courbes de la densité de courant et du rendement en fonction de la durée de vie. On constate une augmentation du rendement entre (19% et 21 %) ainsi que celle de la densité de courant entre 36.5mA/cm² jusqu'à 38 mA/cm² l'augmentation de la durée de vie entre 100μs et 400μs procure une meilleure collecte.

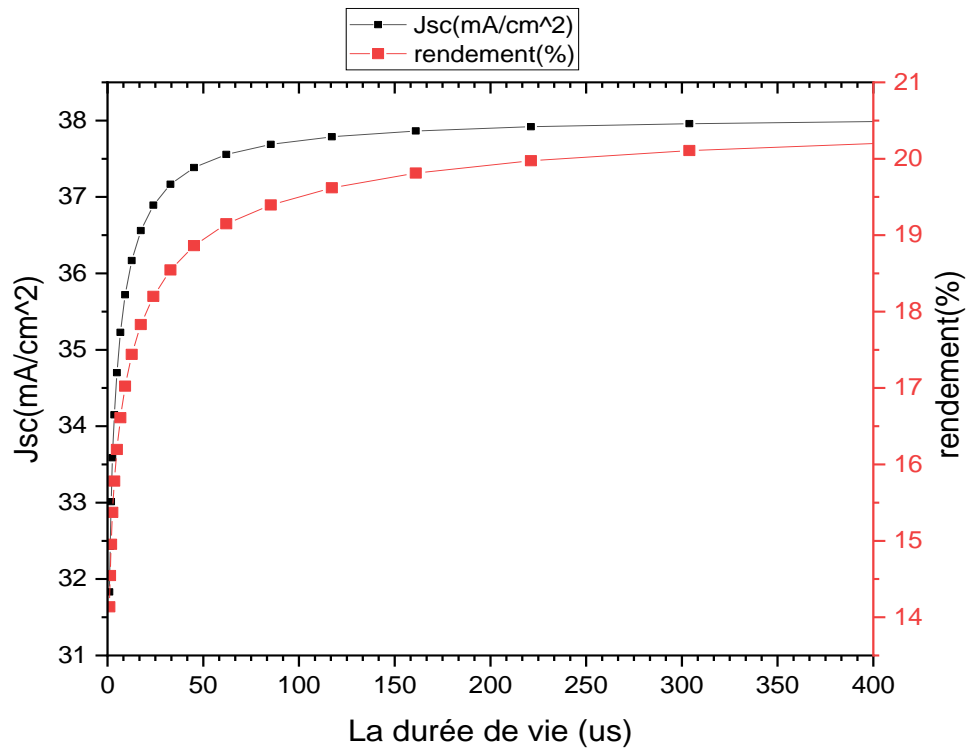


Figure IV. 5: Effet de la durée de vie sur les paramètres de la cellule solaire J_{cc} et η

IV.6.1 Influence de l'épaisseur :

Dans ce cas on varie l'épaisseur entre $1\mu\text{m}$ jusqu'à $1400\mu\text{m}$. En fonction du rendement l'augmentation de l'épaisseur du substrat est un avantage pour absorber plus de photons, au-delà d'une certaine valeur d'épaisseur le rendement de la cellule commence à diminuer, pour cela notre choix s'arrête sur une valeur au voisinage de $500\mu\text{m}$, le courant de court-circuit et le rendement de conversion sont optimisés à 40 mA/cm^2 et 21% ce qui explique le choix actuel de cet ordre de grandeur des épaisseurs des cellules conventionnelles.

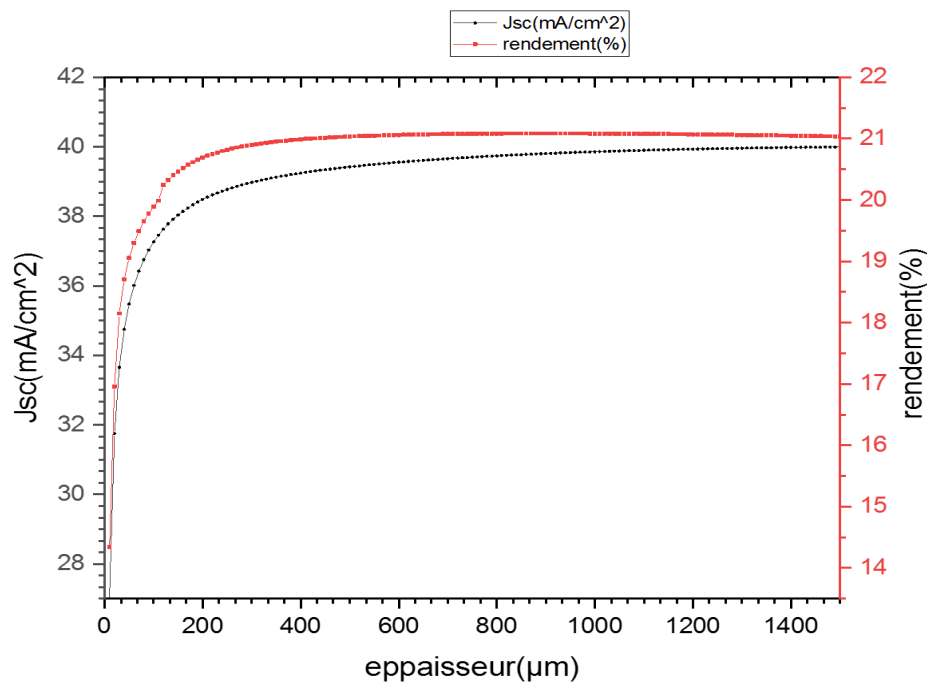


Figure IV. 6: Effet de l'épaisseur de base sur les paramètres de la cellule solaire J_{sc} et η

IV.7 Influence de résistance de couche de l'émetteur :

D'après la figure ci-dessous on remarque que le courant J_{sc} et le rendement augmentent avec la résistance de couche, la réduction du dopage de l'émetteur diminue le courant de recombinaison par conséquent une résistance de couche qui varie entre 90-100 Ω/\square nous permet d'obtenir un rendement de 19.82%. Pour une résistance de couche élevée le courant J_{sc} et le rendement restent constants.

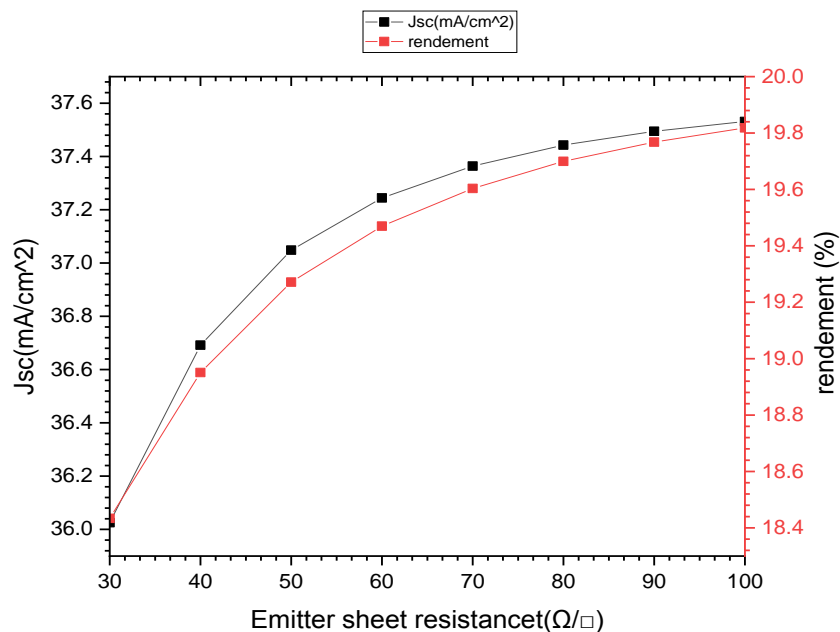


Figure IV. 7: Effet de la résistance de couche de l'émetteur sur les paramètres de la cellule solaire J_{sc} et η ,

IV.8 L'influence de la face arrière (BSF) :

La courbe montre que les paramètres diminuent avec l'augmentation de la résistance de couche de BSF, En d'autres termes, l'augmentation du dopage du BSF provoque une amélioration de l'intensité du champ de surface arrière dans la jonction n^+/n créant une barrière de potentiel, qui tend à confiner les porteurs minoritaires (trous) dans la région légèrement dopée et aide à les pousser vers le front.

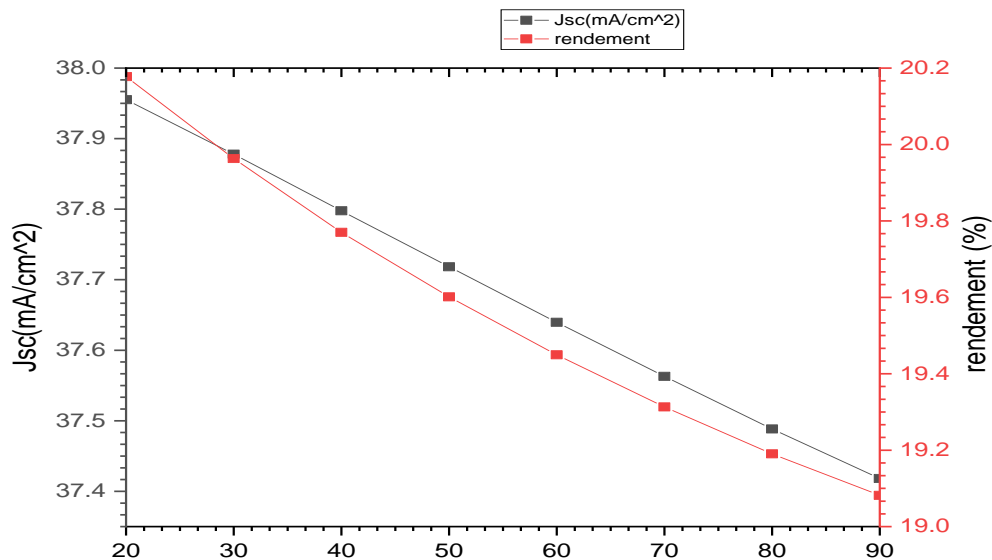


Figure IV. 8: Effet du champ de surface arrière sur les paramètres de la cellule solaire : en haut J_{cc} et η .

IV.9 Performances de la cellule solaire optimisée :

D'après la simulation faite, les valeurs optimisées sont :

- L'épaisseur de la base ($300\mu\text{m}$),
- Résistance de couche de l'émetteur ou (résistance carrée de l'émetteur) ($100 \Omega/\square$).
- La résistivité $2\Omega.\text{cm}$ (moyenne de la fourchette : $1.5\text{-}2 \Omega.\text{cm}$),
- La durée de vie du substrat (1.5 ms),
- Résistance carré du BSF ($20 \Omega/\square$).

Avec ces paramètres, l'optimisation donne les résultats suivants présentés dans le tableau :

Tableau IV. 3: Les paramètres de la cellule solaire optimisée

Paramètres de la Cellule optimisée	J_{cc} (mA/cm^2)	V_{co} (mV)	FF (%)	η (%)
	39.1	660.4	79.77	20.6

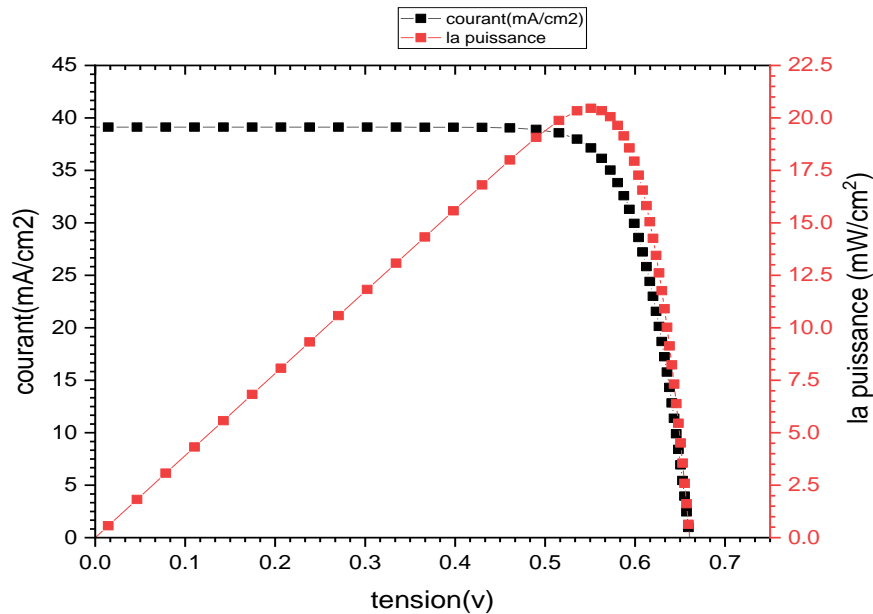


Figure IV. 9: Les courbes de cellule solaire de type n optimisée

IV.10 Comparaison avec les performances de la cellule à substrat de type p :

Selon certains de ses paramètres physiques de la cellule solaire type n. Pour concrétiser l'étude théorique faite, on va comparer les cellules à substrat de type n étudiées avec celles à substrat de type p.

Tableau IV. 4: Comparaison des performances des cellules solaires

Cellule	Jcc (mA/cm ²)	Vco (mV)	FF (%)	η (%)
Cellule optimisée de type n	39.1	660.4	79.77	20.6
Cellule optimisée de type p	39.3225	660.6	77.37	20.1

Le tableau ci-dessus montre que les performances des cellules à substrat de type n sont supérieures à celles de type p avec des différences absolues d'environ 0.2 mA pour Jcc, 0.2 mV pour Vco, 2 % pour FF et 0.5% pour le rendement de conversion η.

IV.11 Effets tridimensionnels sur les cellules de type n :

Les effets tridimensionnels des cellules solaires dus à l'inhomogénéité géométrique et physique de leur structure (doigts de la grille, dopage, ombrage... etc.) ne sont pas pris en compte par le modèle unidimensionnel classique (PC1D).

Le programme PC3D permet de visualiser différents effets en trois dimensions, tels que les potentiels de quasi niveaux de Fermi des porteurs et leurs densités.

IV.11.1 Potentiels de quasi-niveaux de Fermi :

Les figures (IV ;10 et IV.11) montrent les potentiels de quasi-niveaux de Fermi des trous et des électrons de la cellule solaire de type n à la puissance du point maximum du fonctionnement. Le gradient de ces potentiels indique la direction du courant des électrons et des trous (du contact avant vers le contact arrière).

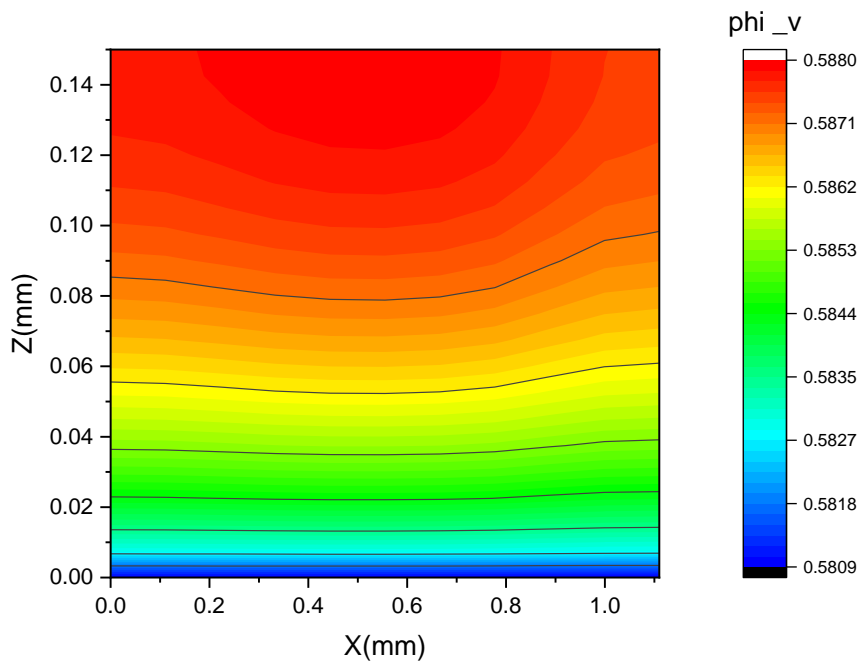


Figure IV. 11: Potentiels de quasi-niveaux de Fermi des trous

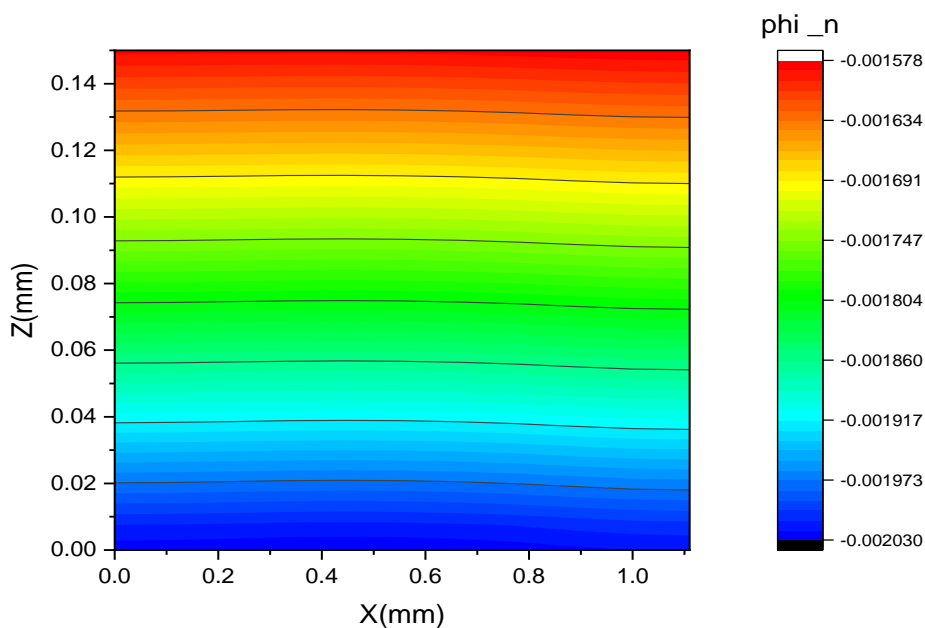


Figure IV. 10 : Potentiels de quasi-niveaux de Fermi des électrons Φ_n

IV.11.2 Densité des porteurs :

La densité des porteurs aux contacts est plus faible dans la zone analysée, ensuite elle augmente à travers les deux sens de la zone, pour atteindre son maximum à la zone inférieure du point milieu entre les contacts et plus prononcée vers le bas.

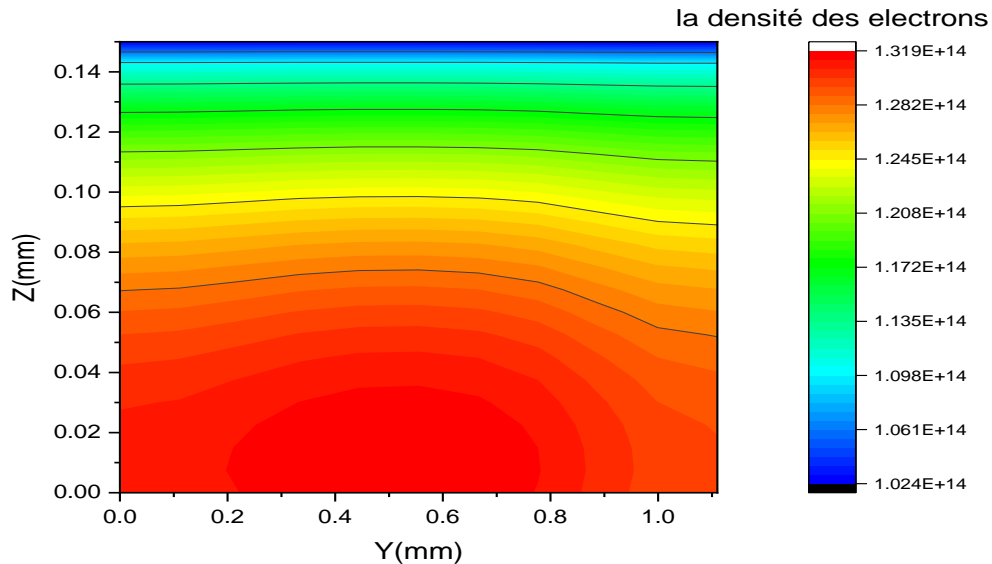


Figure IV. 12 : Distribution de la densité des électrons normalisée au dopage de la base à la puissance du point maximum

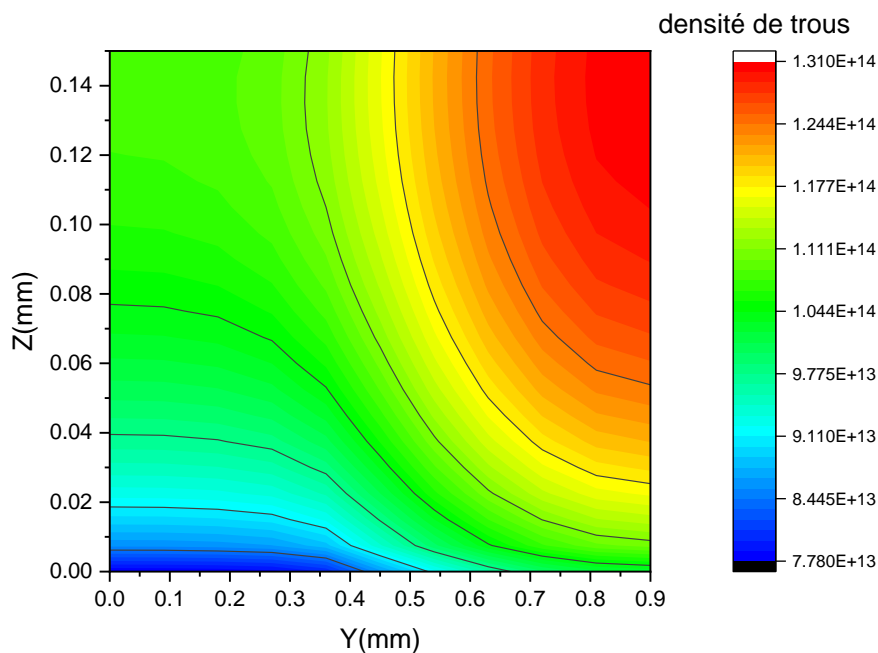


Figure IV. 13 : Distribution de la densité des trous normalisée au dopage de la base à la puissance

IV.12 Conclusion :

A travers des simulateurs PC1D et PC3D, on a optimisé les paramètres importants de la cellule solaire de type n.

Pour la base, on a constaté que tous les paramètres de la cellule (J_{cc} , V_{co} , FF et η) augmentent rapidement jusqu'à la valeur de 125 μs de la durée de vie correspondante aux valeurs (37.65 mA, 630 mV, 80.92 %, 20.48 %) respectivement, cet accroissement devient lent au-delà de cette valeur.

De même, le courant de court-circuit et le rendement de conversion augmentent avec l'épaisseur de la base jusqu'à 200 μm correspondante à 38.4 mA et 19.9 % respectivement, puis ils diminuent lentement en raison de l'augmentation de la résistance série.

L'analyse de l'émetteur de la cellule solaire montre que le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert et le rendement augmentent avec la résistance de couche de l'émetteur. Par contre, le facteur de forme diminue, car la résistance de couche élevée provoque un faible courant de recombinaison.

D'où le choix de la structure de l'émetteur sélectif qui a une résistance de couche réduite sous les contacts diminuant la résistance série et une résistance de couche élevée entre les contacts diminuant les courants de recombinaison. L'introduction du BSF a considérablement amélioré les quatre paramètres de la cellule. Le rendement est amélioré de 0.22 % avec la cellule à 20 Ω/\square de BSF par rapport à celle à 30 Ω/\square de BSF.

Finalement, on a visualisé quelques effets tridimensionnels de la cellule de référence de type n, tels que les potentiels de quasi-niveaux de Fermi des porteurs et leurs densités. L'étude de ces effets nous a permis de visualiser le sens des porteurs ainsi que leurs distributions à deux dimensions. On a constaté que les trous minoritaires se meuvent dans les deux sens de la structure partant du contact avant vers le milieu de la structure en raison de leurs déplacements latéraux.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, on a étudié les paramètres physiques de la cellule solaire photovoltaïque de type n par les deux simulateurs PC1D et PC3D. En raison des coûts élevés de l'expérimentation, les chercheurs se penchent de plus en plus vers l'outil de simulation numérique comme un moyen complémentaire essentiel dans la prédiction. L'analyse et l'interprétation des résultats. Le logiciel PC1D compte parmi les outils de simulation les plus simples dans l'étude des dispositifs électroniques et optoélectroniques. On a présenté les résultats de l'étude de la cellule solaire monocristallin de type n . Les résultats de l'étude sont générés par le simulateur PC1D. On à jouer sur l'épaisseur et la durée de vie des porteurs de substrat n et le dopage de l'émetteur et la base, la résistance de la couche de BSF.

D'après les résultats, nous avons constaté une amélioration générale dans les caractéristiques photovoltaïques de la cellule avec l'amélioration des paramètres physique comme la résistance de couche de l'émetteur $100 \Omega/\square$, la résistance de couche de BSF $20\Omega/\square$ l'épaisseur de la base 300 um. Notamment dans le courant de court-circuit (I_{cc}), le facteur de forme FF, la puissance maximale P_{max} et le rendement de conversion photovoltaïque η . A titre d'exemple, le courant de court-circuit J_{sc} s'améliore de 37mA à 38.5mA et le rendement de conversion photovoltaïque η rend plus grand de 19.96% à 20.5%.

Il est clair que la cellule solaire de type n présente des performances meilleures que celles de type P qui influe directement sur l'amélioration du rendement de conversion.

IV.12.1 Bibliographie :

- [1] M. Abdelkader, «Etude à deux dimensions de cellules solaires en silicium monocristallin à émetteur sélectif à l'aide de PC2D.» L'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem ,Faculté des Sciences Exactes et de l'Informatique,Département de Physique,Magister en Physique, 2013.
- [2] L. Jean-François, «Thèse de doctorat:optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques.» 2009.
- [3] P. LÖLGEN, « Surface and volume recombination in silicon solar cells, 152 p.: Thèse,» PaysBas: Universiteit Utrecht, Faculteit Natuur en Sterrenkunde, , Utrecht,, 1995. .
- [4] M. Abdelkader, «Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules.innovantes.» 2017.
- [5] M. K. Selma, «Etude et simulation de cellules photovoltaïques a couches minces a base de cis et cigs.» JUIN 2012.
- [6] Nerding, «‘Evolution of the microstructure during annealing of porous silicon multilayers’», Journal of Applied Physics,, 2009.
- [7] Lemus F, «‘ Optical and compositional characterisation of stain-etched porous silicon subjected to anodic oxidation and thermal treatments ’», Mater. Sci. Eng. B, vol 101,, 2003.
- [8] H. Jin, «The effect of boron diffusions on the defect density and recombination at the (111) silicon-silicon oxide interface», 2008.
- [9] A. LATIL, Le solaire photovoltaïque.Principe et applications, Institut national des sciences appliquees de rouen.
- [10] A. Smets, «Solar energy" The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems",» UIT Cambridge Ltd, 2016.
- [11] H. Lachachi, «Etude de la diffusion du bore et de la passivation des défauts dans les cellules solaires au silicium type N à haut rendement,» Universite abou-bekr belkaid –doctorat, 2019.
- [12] S., «« Semiconductor devices physics and technology »,» Wiley,, 2002..

