

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE BOUIRA



FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES APPLIQUEES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MEMOIRE PRESENTE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME

MASTER EN PHYSIQUE

OPTION

PHYSIQUE DES MATERIAUX

THEME

**Etude de l'effet des divers paramètres sur le
rendement photovoltaïque d'une cellule solaire à base
du mono-silicium**

Présenté par : **Alouache naima**

Soutenue le 06/10/2018

Devant le jury :

Président : Dr BOUHDJER Lzher	MCA	Univ. BOUIRA
Rapporteur : Dr MADI Djamel	MCA	Univ. BOUIRA
Co-Rapporteur : Mr HACINI Ismail	MA	Univ. BOUIRA
Examineur : Dr ZERIRGI Djamel	MAB	Univ. BOUIRA

Remerciements

Avant tout je remercie Dieu tout puissant de m' avoir accordé la volonté, le courage et la force pour réaliser ce mémoire.

Je tiens à remercier monsieur Madi Djamel enseignant à la faculté des sciences et des sciences Appliquée pour l'encadrement qu' il ma assurer et ces précieux conseils qu' il ma donnée tout ou long de ce projet, sa confiance témoignée, sans oublier sa qualité humaine.

Je tiens à adresser mes remerciements à monsieur Hacini Ismail pour avoir accepté aussi d'encadrer mon mémoire sans oublier ces conseils et son aide.

J' exprime mes sincères remerciements à monsieur Bouhdjer Lzher enseignant à la faculté des sciences et des sciences Appliquée pour m' avoir fait l' honneur de présider le jury de mémoire.

Je tiens également à remercier monsieur Zerirgi Djamel enseignant à la faculté des sciences et des sciences Appliquée pour avoir aimablement accepté de prendre part au jury en tant qu' examinateur.

Je tiens aussi à remercier tout les enseignants de départements physique aussi de départements génie électrique notamment le chef de département et monsieur Benzian Mourad pour tout les conseils donnée.

A tous ce qui furent à un moment ou à toute instant partie prenante de ce travail.

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

Dédicace



*A l'aide de dieu 'Allah' tout puissant qui ma tracé le chemin de ma vie,
J'ai pu réaliser ce travail.*

Je dédie ce mémoire à :

*Les plus chers au monde, qui ont souffert nuit et jour pour nous couvrir de leur amour, mes parents : A mon très cher père Akli et à ma Très Chère mère Tassadit que dieu me les gardent et me protège
Je t'aime énormément.*

A mes très chers frères : rabah, ismail, said, ramdhan, ferhat

A mes très chers sœurs : nwara, wahiba, khokha

A Toute ma famille.

A tout mes amies et mes collègues d'études.

A tous ce que j'aime et qui m'aiment



Naima



Sommaire	
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Le gisement solaire.....	3
I-1 Introduction.....	4
I-2 L'énergie Solaire.....	5
I-3 Notion essentielles d'astronomie.....	5
I 3-1 position du soleil.....	5
a- Les Coordonnées équatoriales.....	5
b- Les Coordonnées horizontales.....	7
I-3-2 Mouvement de la terre autour du soleil.....	8
I-4 Le rayonnement solaire.....	9
I-4-1 Les différentes types de rayonnements.....	9
I-4-2 Constant solaire.....	10
I-4-3 Masse d'aire.....	11
I-4-4 Durée d'insolation.....	12
I-4-5 Taux d'ensoleillement.....	12
I-4-6 Spectre Solaire.....	13
I-5 L'influence des phénomènes atmosphériques sur le rayonnement solaire.....	14
I-5-1 Diffusion.....	14
a- Diffusion moléculaire.....	14
b- Diffusion par les aérosols.....	15
I-5-2 Absorption.....	15
I-6 Le gisement solaire en Algérie.....	16
I-7 Conclusion.....	20
Chapitre II : l'état de l'art de silicium monocristallin.....	21
II-1 Introduction.....	22
II-2 Notions Fondamentales sur le silicium monocristallin (mono-si).....	22
II-3 Propriétés Cristallographiques du mono-si.....	22
a- Structure cristalline.....	22
b- Défauts dans le silicium.....	24
c- défaut dans la maille cristalline.....	24
d- Impuretés métallique.....	25
e- L'oxygène.....	27
II-4 Méthodes d'élaboration du silicium monocristallin.....	28
II-4-1 Purification du silicium.....	28
II-4-2 Cristallisation des lingots de silicium monocristallin.....	30
II-5 Propriétés électriques du silicium monocristallin.....	31
II-6 Dopage du mono silicium	32
II-6-1 Concentration des porteurs de charges à l'équilibre thermodynamique.....	32
II-6-2 Processus de transport des porteurs de charges	33
II-6-2-1 Conduction	33
II-6-2-2 Diffusion.....	34
II-7 Propriétés optiques du silicium monocristallin.....	34
II Conclusion.....	37
Chapitre 3 :L'aspect physique des cellules photovoltaïques	38
III-1 Introduction.....	39
III-2 structure d'une cellule photovoltaïque.....	40
III-3 principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	40

Sommaire	
III-4 Recombinaison des porteurs de charge dans le silicium.....	42
III-5 Paramètre électrique d'une cellule photovoltaïque	44
a-Courant de court circuit.....	46
b-Tension en circuit ouvert.....	46
c-Facteur de forme.....	47
d-Rendement de conversion photovoltaïque.....	47
III-6 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque.....	47
III-7 Conclusion.....	49
Chapitre IV : Synthèse des résultats de la simulation avec le logiciel PC1D	50
IV-1 Introduction.....	51
IV-2 Aperçu général du Logiciel de simulation PC1D	51
a- Paramètres de la partie liée au dispositif (Device)	52
b- Paramètres de la région 1.....	52
c- Paramètres de la partie excitation	54
d- Partie résultats.....	54
e- Partie normée « <i>Device schematic</i> »	54
IV-3 Résultat de la simulation.....	54
a- Effet de l'éclairement.....	57
b- Effet de la Température.....	58
c- Effet de la texture de la face avant de la cellule solaire	58
d- Effet du niveau de dopage du lingot du silicium monocristallin.....	59
e- Effet de l'épaisseur du lingot du silicium.....	60
f- Effet de la durée de vie des porteurs de charge libres en volume de la cellule solaire.....	61
IV-5 Discussion des résultats.....	62
IV-6 Conclusion.....	63
Conclusion générale.....	65
Références bibliographiques.....	67
Résumé en français.....	71
Résumé en anglais.....	72
Résumé en arabe.....	73

Introduction générale

Les besoins énergétiques ne cessent d'accroître jour après jour avec l'accroissement de la population mondiale. En conséquence, la production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. De nos jours, une grande partie de la production d'énergie dans le monde est assurée à partir des énergies fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est que ces énergies ne peuvent plus être disponibles à long terme. Aujourd'hui, les énergies renouvelables deviennent progressivement des énergies rivalisant avec les énergies fossiles du point de vue coût et performance de production. Cependant, leurs systèmes de production d'énergie sont encore trop chers et présentent quelques défaillances importantes en rendement malgré qu'il existe énormément de travaux de recherche établissant la fiabilité de ces sources d'énergies comme celle du soleil.

L'énergie photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en électricité. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite solaire ou photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. La quantité d'énergie électrique générée peut varier en fonction du matériau utilisé et de ses paramètres technologiques (géométriques et physiques) ainsi que ceux liés à l'environnement. Notre objectif de ce travail est de suivre l'évolution de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire en silicium monocristallin sous éclairage suite aux effets de quelques facteurs, à savoir, ceux en relation avec la conception de la cellule et encore avec l'environnement.

Ainsi, ce mémoire est divisé en quatre chapitres :

- ✓ Le premier chapitre est consacré à l'étude du gisement solaire où quelques définitions et notions fondamentales de l'astronomie sont rappelées. De plus, une description plus ou moins générale du rayonnement solaire et sa composition ainsi que l'influence des conditions atmosphériques sur la répartition spectrale, le taux et la durée d'insolation.
- ✓ Le deuxième chapitre présente l'état de l'art du silicium monocristallin, à savoir, son état cristallin et ses propriétés cristallographiques, optiques et électriques. De plus, il évoque les bases théoriques des mécanismes de diffusion des porteurs de charges dans le silicium monocristallin.

- ✓ Le troisième chapitre expose les parties essentielles qui composent une cellule solaire enchaîné par une discussion de son principe de fonctionnement avec un rappel plus ou moins détaillé des différents mécanismes de recombinaison des porteurs de charge minoritaires en surface et en volume de la cellule solaire qui influencent énormément le rendement photovoltaïque. Enfin, on termine le chapitre par les modèles mathématiques et les schémas électriques dédiés à la compréhension du fonctionnement réel des dispositifs photovoltaïques.

- ✓ Le dernier chapitre traite la simulation d'une cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin avec le logiciel PC1D en analysant la caractéristique courant – tension qui découle de l'effet des différents paramètres liés à l'environnement et à sa technologie de fabrication.

Chapitre I

Le gisement Solaire

I.1 Introduction

Le soleil est une formidable et inépuisable source d'énergie renouvelable. Sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre. Il est composé de 75% d'hydrogène et de 25 % d'hélium. Sa température en son centre est de 15 millions de degrés centigrades. Sa distance de la terre est de 149,6 millions de kilomètre. Il fait 108 fois le diamètre de notre planète. Outre la lumière et la chaleur, il nous apporte aussi différents rayons, tels que les ultraviolets, les infrarouges, les rayons X... La masse d'énergie qu'il dégage est égale à 386 milliards de mégawatts [1].

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à mettre à profit l'énergie du soleil sur l'ensemble de la planète surtout à fur et à mesure que les besoins énergétiques ne cessent de croître à cause des chocs pétroliers. L'énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre malgré une atténuation importante au niveau de la couche atmosphérique. L'ensoleillement change selon les conditions météorologiques. On peut compter sur 10000 W/m² crête dans les zones tempérées jusqu'à 14000 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée. Ainsi, la répartition spectrale se trouve perturber à cause des diverses réflexion, diffusion et absorption du rayonnement solaire par les gaz, les aérosols et les nuages.

L'énergie solaire reçue par une surface plane élémentaire (capteur plan) dépend de son emplacement et son orientation par rapport à la position du Soleil. Pour connaître l'éclairement global reçu par une surface plane, il est nécessaire de déterminer le temps solaire vrai, la hauteur du Soleil et l'atténuation du rayonnement solaire lorsqu'il traverse l'atmosphère terrestre [2].

Dans ce premier chapitre, nous aborderons ainsi en premier temps quelques notions indispensables sur le gisement solaire à savoir les notions essentielles relatives à la géographie et l'astronomie. Nous décrirons ensuite, le rayonnement solaire et sa composition, l'influence des conditions atmosphériques sur la répartition spectrale, la durée et le taux d'insolation en particulier en Algérie.

I-2 L'énergie solaire

Les conditions résidentes au cœur du soleil favorisent l'interaction des différents atomes d'hydrogène qui subissent une réaction de fusion thermonucléaire. Le résultat de ce processus, lorsqu'il se répète, est la fusion de quatre noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium avec émission d'énergie sous forme de rayonnements X et gamma.

Chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 560 millions de tonnes d'hélium, cette différence de 4 millions de tonnes par seconde correspond à la différence d'énergie de liaison entre les protons d'hydrogène et ceux d'hélium donnant une énergie sous forme de rayonnement estimée à $3,7 \cdot 10^{26}$ J/s [3].

L'énergie solaire est la seule source d'énergie externe à la terre. Elle présente les propriétés suivantes [4]:

- Elle est universelle, sa densité de puissance maximale est de 1 kW/m^2 à midi par ciel bleu sur toute la planète.
- Elle est abondante. Notre planète reçoit plus de 10^4 fois l'énergie que l'humanité consomme.
- Elle est intermittente et variable à cause de l'alternance du jour et de la nuit, des variations saisonnières et quotidiennes de l'ensoleillement.
- L'énergie reçue par une surface donnée n'est pas récupérable en totalité ceci est dû aux pertes d'énergie sous formes conductrice, convective ou rayonnante.
- Elle est propre.

I-3 Notions essentielles d'astronomie

I-3-1 Position du soleil

La position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents :

- par rapport au plan équatorial de la terre (repère équatorial)
- par rapport au plan horizontal du lieu (repère horizontal)

a- Les coordonnées équatoriales

Dans ce repère, la position du soleil dans le ciel est déterminée par deux grandeurs :

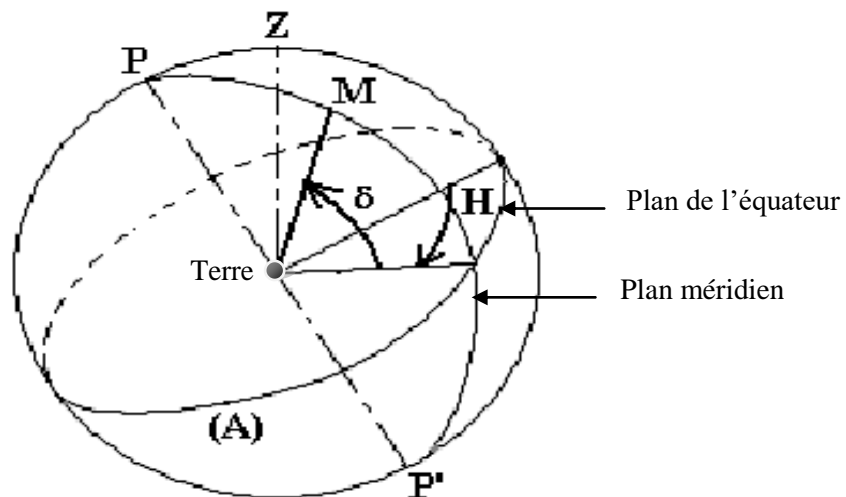


Figure I-1 : Repérage de la position du soleil, indiqué comme étant un point M sur la figure, en coordonnées équatoriales.

- **Déclinaison solaire δ**

La déclinaison solaire δ est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial Terrestre. Cet angle varie au cours des saisons. Variée tout au long de l'année entre deux valeurs extrêmes -23.27° et $+23.27^\circ$. Elle est nulle aux équinoxes et maximale aux solstices.

Equinoxe de printemps : 21 Mars, $\delta = 0$

Solstice d'été : 22 Juin, $\delta = + 23^\circ 27'$

Equinoxe d'automne : 23 Septembre, $\delta = 0$

Solstice d'hiver : 22 Décembre, $\delta = - 23^\circ 27'$

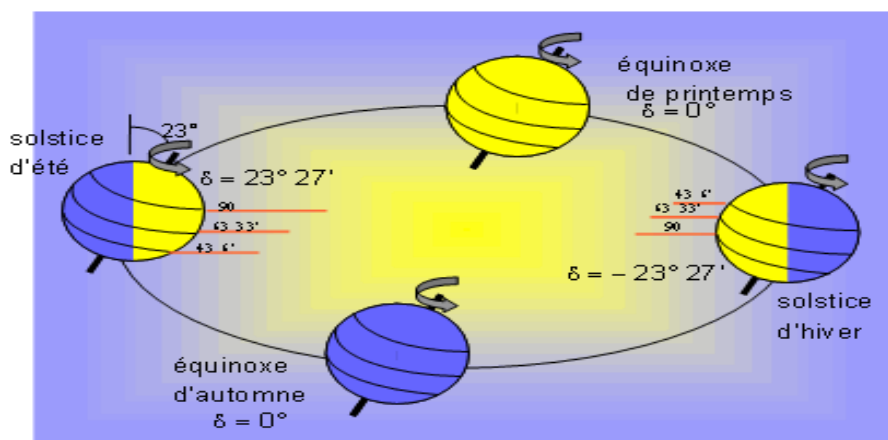


Figure I-2: Variation annuelle de la déclinaison solaire.

La déclinaison solaire δ peut être évaluée en première approximation par la relation suivante [5] :

$$\delta = 23,27^\circ \times \sin \left[360 \times \frac{(284 + J)}{365} \right] \quad (\text{I} - 1)$$

J : Numéro du jour dans l'année à partir du 1 janvier.

δ : est exprimée en degrés.

- **L'angle horaire H**

C'est l'angle que font les projections de la direction du soleil sur le plan équatorial avec la direction du méridien du lieu. L'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation :

$$H = \frac{360^\circ}{24} \times (\text{TSV} - 12) \quad (\text{I} - 2)$$

TSV : Temps solaire vrai. Il est défini comme étant le temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith Z à midi.

TSV en heures et H en degrés.

b- Les coordonnées horizontales

Un autre système de coordonnées qui permet de repérer la position du soleil dans le ciel est celui nommé les coordonnées horizontales.

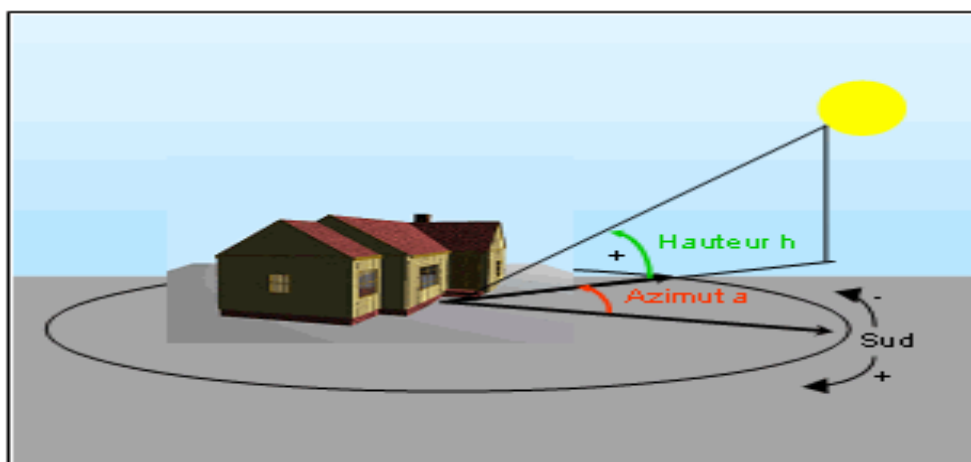


Figure I-3 : Repérage de la position du soleil en coordonnées horizontales.

On distingue dans ce système deux grandeurs :

- **Hauteur angulaire h**

C'est l'angle h formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil. Il est donné par la relation:

$$\sin h = (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta) \cos H \quad (I - 3)$$

Où φ , δ , H sont respectivement l'altitude du lieu, la déclinaison du soleil et l'angle horaire. De la hauteur angulaire h , on peut déduire les heures du lever et du coucher de soleil.

- **L'azimut a**

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. L'azimut du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation suivante [5] :

$$\sin a = \sin H \cos \delta / \cos H \quad (I - 4)$$

I-3-2 Mouvement de la terre autour du soleil

Dans son mouvement autour du soleil, la terre décrit une ellipse dont le soleil est l'un de ses foyers. La révolution complète s'effectue en une période de 365,25 jours. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique [5].

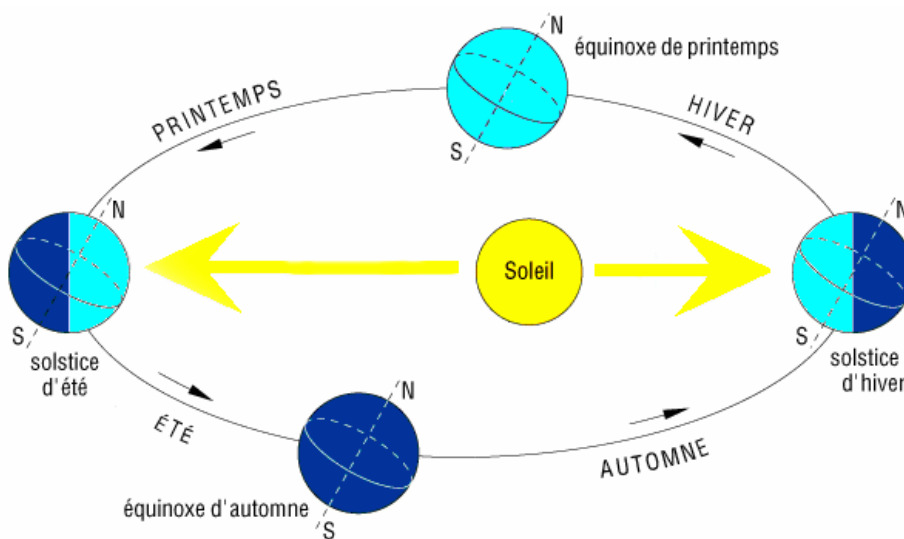


Figure I-4 : Mouvement de rotation de la terre autour du soleil.

C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil : 147 millions de km. Au 22 juin la distance terre-soleil vaut 152 millions de km, c'est le jour où la terre est la plus éloignée du soleil (le solstice d'été). Le 21 mars et le 21 septembre sont appelés respectivement équinoxes de printemps et équinoxe d'automne, respectivement. Aux équinoxes le jour et la nuit sont égaux [5].

I-4 Le rayonnement solaire

Les réactions thermonucléaires produites au cœur du soleil génèrent des rayonnements corpusculaires et électromagnétiques se propageant dans toutes les directions du vide interplanétaire avec une vitesse de $3.10^6 m/s$ et couvrant toutes les longueurs d'ondes depuis les rayons X et gamma jusqu'à l'infrarouge lointain.

I-4-1 Les différents types de rayonnements

L'ensoleillement correspond à l'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan à un instant donné. Il s'exprime en watts par mètre carré (W/m^2). L'ensoleillement varie de zéro, au lever du soleil, à sa valeur maximale, typiquement au midi solaire. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes du rayonnement incident :

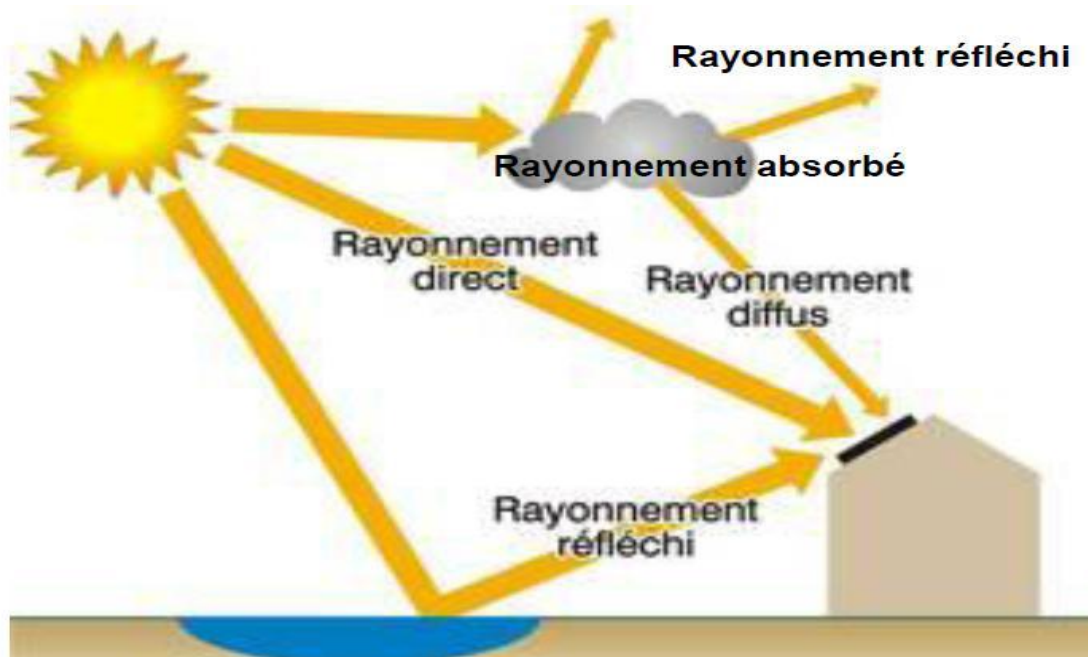


Figure I-5 : Les diverses composantes du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre.

- **Le rayonnement direct :** est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il provient du disque solaire seulement à l'exclusion de tout rayonnement diffusé, réfléchi ou réfracté par l'atmosphère [6].
- **Le rayonnement diffus :** est la part du rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste, à l'exception du disque solaire, et diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Le rayonnement diffus n'a pas de direction privilégiée dans l'espace [7].
- **Le rayonnement Albédo ou réfléchi :** est la fraction d'un rayonnement incident réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé aux rayonnements réfléchis au sol ou par les nuages.
- **Rayonnement global :** est le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du soleil et de la totalité de la voûte céleste. Il est, en général, la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. Il est donc fonction de la composition et de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons lumineux au cours de la journée. Il se décompose en rayonnement direct et rayonnement diffus et ce sont ces deux rayonnements qui sont exploités par les générateurs solaires [5].

Les trois rayonnements, direct, diffus et global notés respectivement I, D, et G, sont reliés par la relation suivante :

$$G = I \times \sin(h) + D \quad (I - 5)$$

h : Angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal.

I-4-2 Constante solaire

L'énergie solaire reçue par unité de temps à la limite supérieure de l'atmosphère sur une surface unité perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance terre - soleil égale à sa valeur moyenne, est appelée la constante solaire. La constante solaire a été estimée à 1370 W/m^2 par Claus Fröhlich et Christoph Wehrli du Centre radiométrique mondial de Davos (Suisse) [8].

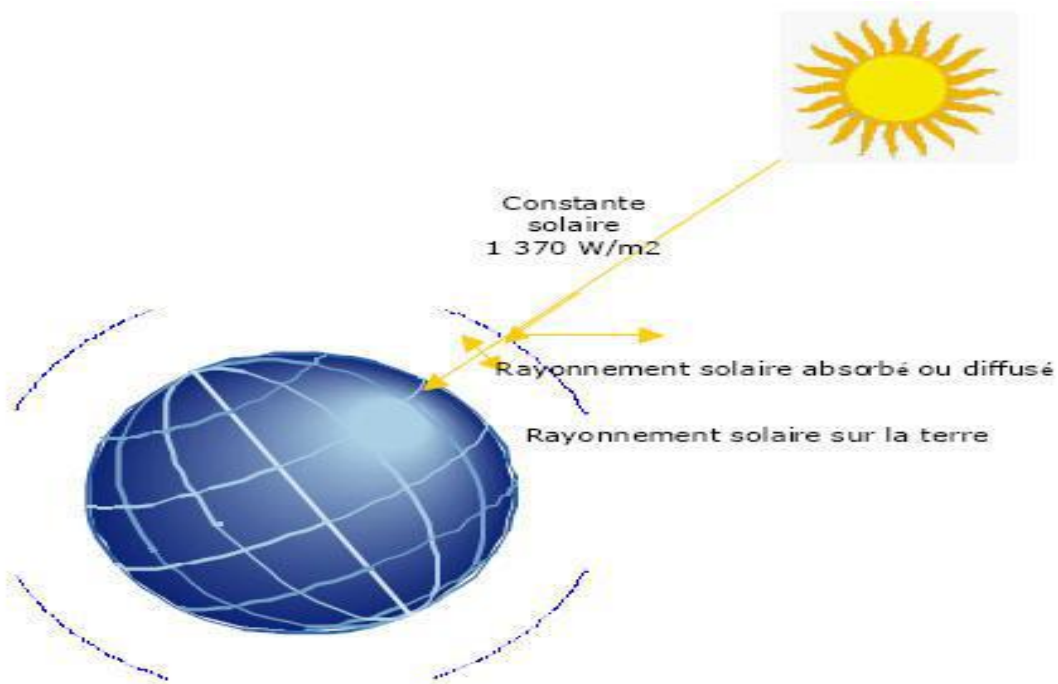


Figure I.6 : La constante solaire à la limite supérieure de l'atmosphère estimée par Claus Fröhlich et Christoph Wehrli.

I-4-3 Masse d'air

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0.22 à 10 μm . L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme étant :

- 9% dans la bande des ultraviolets $< 0.4 \mu\text{m}$,
- 47% dans la bande visible de 0.4 à 0.8 μm ,
- 44% dans la bande des infrarouges $> 0.8 \mu\text{m}$.

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de $1.37\text{kW}/\text{m}^2$ avec un spectre centré au voisinage de $\lambda = 0.48 \mu\text{m}$. Il en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre n'est plus que de $0.9\text{kW}/\text{m}^2$. Pour mesurer l'effet de l'atmosphère, on utilise la masse d'air défini par $AM = 1/\cos\alpha$ où α représente l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale. AM0 Représente le spectre solaire en dehors de l'atmosphère avec une puissance de l'ordre de $1367\text{kW}/\text{m}^2$. AM1 Correspond au soleil à la verticale avec une puissance d'incidence de $925\text{kW}/\text{m}^2$. AM1.5 Défini par l'angle

48.2° au dessus de l'horizon, d'une intensité de $925kW/m^2$ est approprié pour les applications terrestres [8].

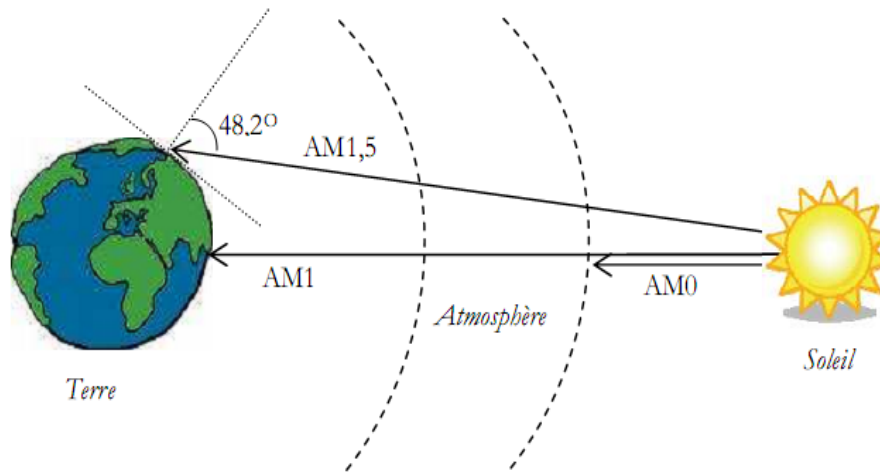


Figure I.7 : Différentes constantes d'illumination.

I-4-4 Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell-Stokes [8] dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir d'un calcul du mouvement astronomique relatif au soleil et à la terre d'évaluer la durée théorique du jour, c'est-à-dire celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil. Cette durée est calculée en fonction de la l'altitude du site et de la déclinaison apparente qu'elle-même dépend de la période de l'année considérée [9].

I-4-5 Taux d'ensoleillement

Pour un ciel clair sans nuages, le sol reçoit le rayonnement solaire direct pendant toute la durée du jour, ou plus précisément pendant la durée maximale d'ensoleillement SS_0 . On appelle taux d'ensoleillement ou le taux d'insolation σ le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement [10] :

$$\sigma = \frac{SS}{SS_0} \quad (\text{I} - 6)$$

I-4-6 Spectre solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique, sa décomposition en longueurs d'ondes est appelée spectre électromagnétique. Elle est en effet composée de toutes sortes de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. La fréquence de la lumière détermine sa couleur. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur fréquence (longueur d'onde) par la relation [11]:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot C}{\lambda} \quad (\text{I} - 7)$$

Où h est la constante de Planck, ν la fréquence, C la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde. C'est cette relation mise à jour par Louis de Broglie en 1924 qui a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière : présence de corpuscules « les photons » et propagation d'ondes avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde [11].

La figure I.8 montre la partie visible du spectre électromagnétique. La gamme des longueurs d'onde visibles est comprise entre 390 *nm* (violet) à 780 *nm* (rouge). Le tableau I.1 montre la gamme de longueurs d'ondes approximatives des couleurs visibles [11].

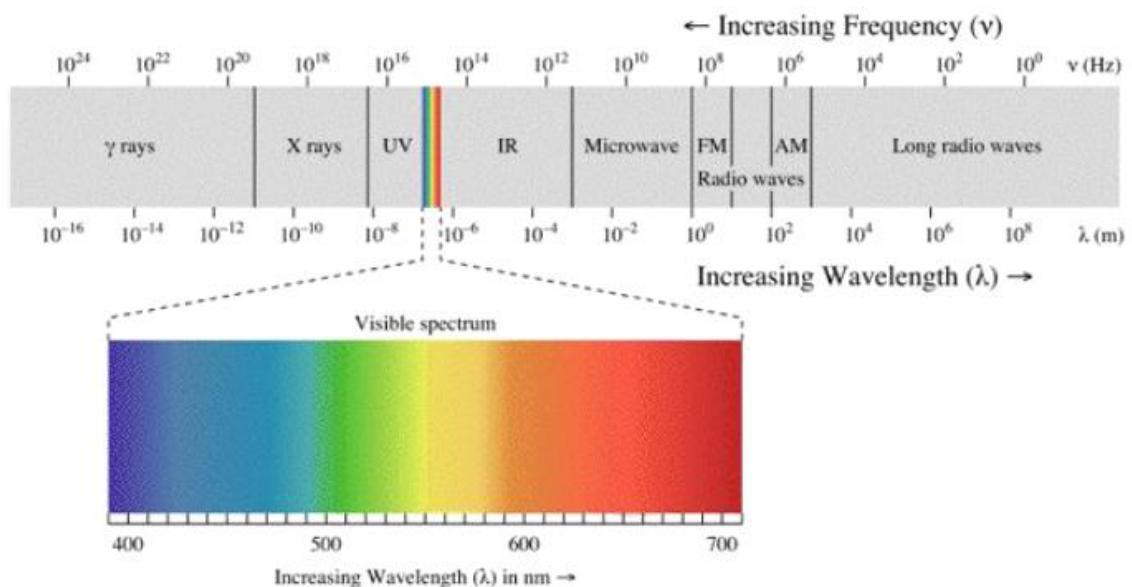


Figure I.8 : Spectre électromagnétique de la lumière.

Couleur	Longueur d'onde associée (nm)
Rouge	622 - 780
Orange	597 - 622
Jaune	577 - 597
Vert	492 - 577
Bleu	455 - 492
Violet	390 - 455

Tableau I.1 : Valeurs des longueurs d'ondes approximatives des différentes couleurs de la lumière visible.

I-5 L'influence des phénomènes atmosphériques sur le rayonnement solaire

L'atmosphère modifie le spectre énergétique du rayonnement solaire à travers trois mécanismes principaux:

- l'absorption par les différents gaz, chacun ayant des raies caractéristiques.
- la diffusion moléculaire de Rayleigh.
- la diffusion par les aérosols, par les poussières et par les nuages.

On définit un coefficient d'extinction $k(\lambda)$ par unité de longueur :

$$\phi(\lambda) = \phi_0(\lambda) \cdot e^{-\int_0^x k(\lambda) \cdot dx} \quad (I - 8)$$

$\phi_0(\lambda)$: Intensité de la radiation incidente hors atmosphère

I-5-1 Diffusion

La diffusion est un phénomène qui s'avère particulièrement délicat à analyser car il faut tenir compte de la nature des particules rencontrées, de leur incidence de réfraction et de leurs dimensions. Les diffusions les plus prépondérantes sont celles liées aux molécules et aux aérosols [12].

a) Diffusion moléculaire

Les molécules d'air diffusent les radiations du spectre solaire. La loi de diffusion de Rayleigh s'applique à des molécules d'air pur et sec. Le coefficient d'extinction varie alors

proportionnellement à l'inverse de la puissance quatrième de la longueur d'onde incidente, soit :

$$k(\lambda) = 8,79 \cdot 10^{-3} \times \lambda^{-4} \quad (\text{I} - 9)$$

λ en μm .

La relation (I – 9) traduit une plus forte extinction du rayonnement incident dans les courtes longueurs d'ondes (de l'ultraviolet au bleu) que dans la partie infrarouge du spectre solaire où l'effet devient négligeable. Ainsi s'explique la couleur bleu du ciel : la lumière diffusée vers le sol par les molécules d'air est constituée essentiellement des longues longueurs d'ondes du spectre. L'œil plus sensible au bleu, ne distingue pratiquement que cette teinte. De même, quand le soleil se rapproche de l'horizon, le trajet optique augmente, les courtes longueurs d'onde du spectre solaire sont absorbées. Au coucher ou lever du soleil, les teintes les moins atténuées, le rouge et le jaune, prédominent et donne une couleur arrangée au disque solaire.

b) Diffusion par les aérosols

On définit les aérosols comme les particules microscopiques, sèche, en suspension dans l'air. Elles se caractérisent par le rapport $2\pi r/\lambda$, r étant leur diamètre. Avec des particules telles que $2\pi r/\lambda < 0,1$, la diffusion suit la loi de Rayleigh. Par contre, pour celles de dimensions supérieures, la diffusion ne dépend pas de la longueur d'onde. Entre ces deux extrêmes, on a :

$$k(\lambda) = \frac{\beta}{\lambda^\alpha} \quad (\text{I} - 10)$$

β et α sont les coefficients d'Angström [12]. Ce dernier a attribué à α une valeur égale à 1,3 dans les régions tempérées. Le coefficient de trouble atmosphérique d'Angström β est de 0,02 pour un ciel bleu et de 0,3 pour un ciel très nuageux.

I-5-2 Absorption

Parmi les constituants atmosphériques, deux d'entre eux, l'ozone et la vapeur d'eau, provoquent une absorption extrêmement sensible dans certaines longueurs d'onde du spectre solaire.

L'ozone entraîne de fortes bandes d'absorption aux radiations $0,2 - 0,3 \mu\text{m}$ et une légère absorption dans la bande spectrale comprise entre $0,44 \mu\text{m}$ et $0,74 \mu\text{m}$ [12].

La vapeur d'eau forme plusieurs bandes d'absorption au-delà de $0,65 \mu\text{m}$. suivant l'ordre croissant de longueurs d'onde, on dénombre une bande spectrale centrée sur $0,7 \mu\text{m}$, puis entre $0,85 \mu\text{m}$ et $0,98 \mu\text{m}$, ainsi que d'autres absorptions au-delà de $1,1 \mu\text{m}$ [12].

L'oxygène est à l'origine de deux bandes d'absorption étroite, à $0,69 \mu\text{m}$ et à $0,76 \mu\text{m}$. le gaz carbonique a une bande très étroite vers $1,6 \mu\text{m}$ et $2 \mu\text{m}$, puis des bandes d'absorption très fortes centrées sur $2,75 \mu\text{m}$ et $4,25 \mu\text{m}$ [12].

I-6 Le gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [13]. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure I.9.

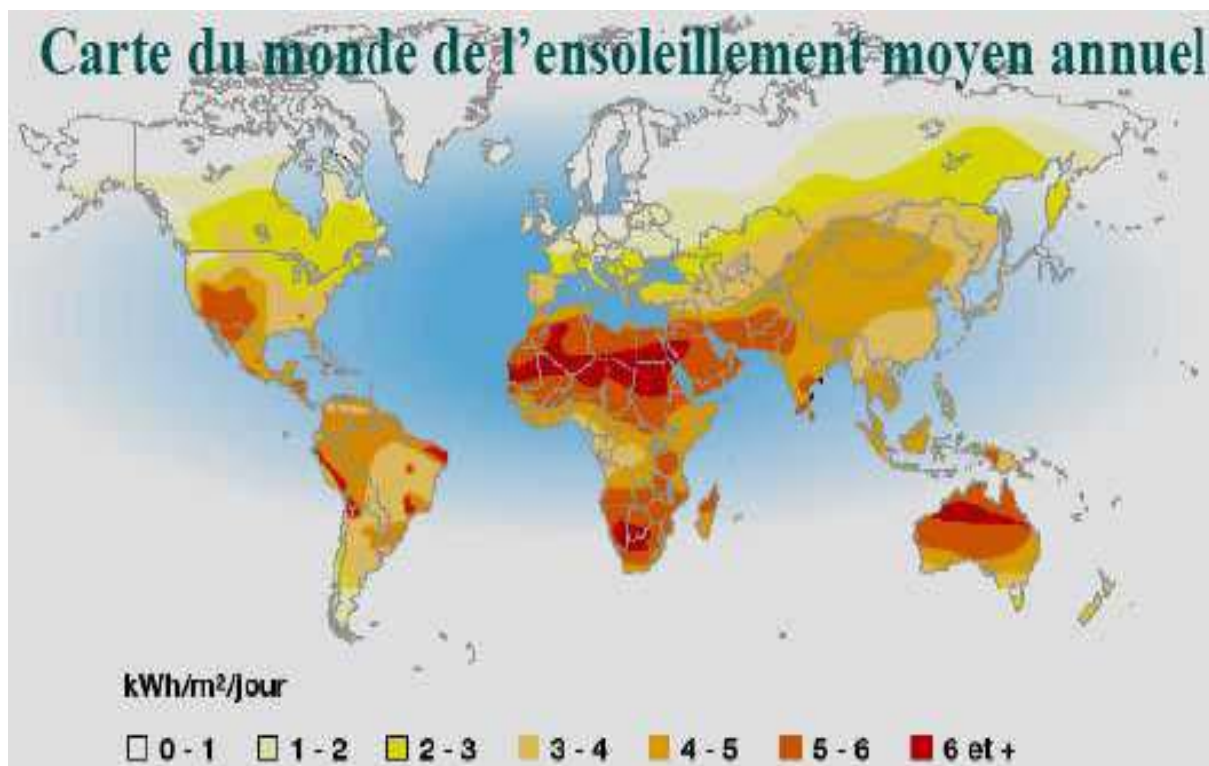


Figure I.9 : Carte du monde de l'ensoleillement annuel moyen.

Elle est un des pays les plus riches au monde en matière non seulement d'énergie solaire mais aussi éolienne. De plus, elle occupe une position exceptionnelle selon une évaluation effectuée par l'agence spatiale Allemande (ASA), soit plus de 3500 heures d'ensoleillement par an au Sahara qui couvre 86% de la superficie totale du pays au taux annuel moyen de 6kWh/ m² d'énergie solaire [13]. De plus, l'Agence Spatiale Allemande a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le Potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau I.2 selon l'ensoleillement reçu annuellement [14]. Il est à signaler que la durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale.

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m²/an)	1700	1900	26500

Tableau I.2 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques[14].

De part sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara) comme le montre la figure I.10 qui illustre l'irradiation globale journalière moyenne reçue au moins de juillet11 [15].

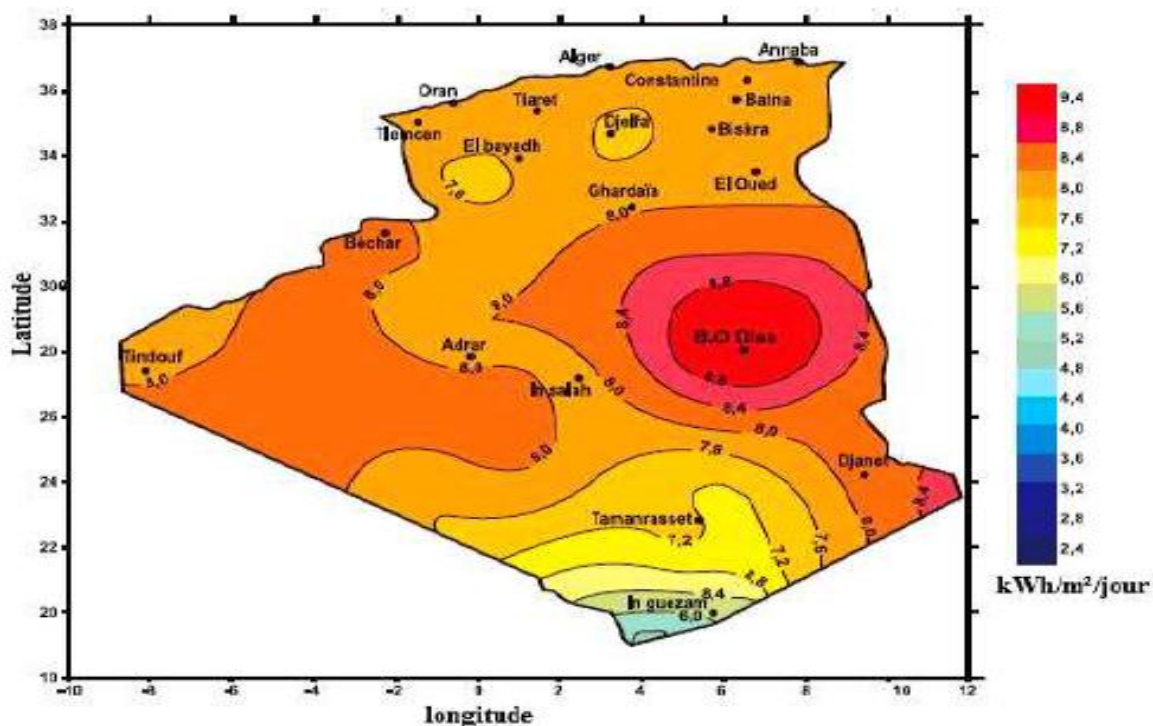


Figure I.10 : Irradiation globale journalière moyenne reçue sur un plan horizontal au mois de juillet.

La consommation d'électricité en Algérie a augmenté durant les dernières années de 4% par an et la demande en électricité devrait à long terme croître de 7% par année [16]. Le potentiel énergétique solaire permet de répondre à certaines lacunes relatives à l'amélioration des conditions de vie des citoyens par le biais de la voie solaire d'origine photovoltaïque. Cette voie permet d'assurer entre autres [17, 18]:

- L'électrification des sites isolés
- L'éclairage domestique et éventuellement public
- L'alimentation en eau potable et l'irrigation des surfaces agricoles
- L'alimentation énergétique des moyens de télécommunications
- Le dessalement des eaux de mer

Dans notre pays, les premières expériences sont apparues avec le programme d'électrification rurale solaire durant la période 1995-2002 qui a concerné 20 villages répartis dans 4 wilayas du grand sud de l'Algérie : Tamanrasset (9 villages), Tindouf (3 villages), Illizi (6 villages) et Adrar (2 villages), comme le montre la figure I.11 ainsi que le tableau I.3

où sont indiquées les puissances correspondantes. Ces villages étaient caractérisés par leur isolement et leur éloignement de tout réseau de communication. Leur alimentation par les filières classiques (diesel, réseau électrique), en plus des coûts de réalisation excessifs, auraient posé le problème de l'acheminement du combustible et dans le cas du réseau, des difficultés certaines pour les travaux et la maintenance des lignes aériennes. Le solaire photovoltaïque pourrait également constituer une alternative pour un programme ultérieur. Malgré ces efforts, l'Algérie enregistre un taux faible en matière d'énergie renouvelable dans le bilan énergétique national qui ne représente que 0,02 % de la consommation nationale d'électricité [16, 19].

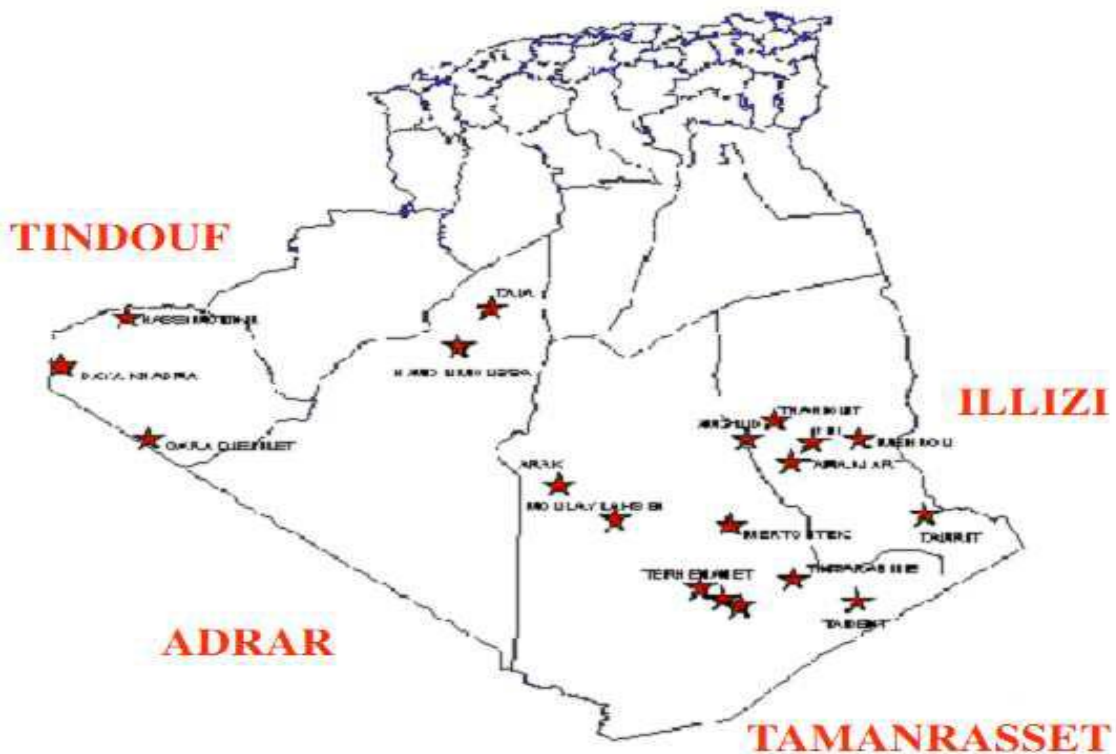


Figure I.11 : Programme d'électrification de 20 villages du sud.

Wilaya	Puissance électrique obtenues (kW)
Tamanrasset	149 703
Illizi	23 813
Tindouf	85 882
Adrar	25 145

Tableau I.3 : Puissance photovoltaïque installée dans le grand sud.

I-7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions générales relatives au soleil ainsi que quelques notions fondamentales de l'astronomie. Les différents types de rayonnement solaire et les effets des phénomènes atmosphériques sur ce rayonnement ont été aussi mis en évidence. Aussi, le gisement solaire que dispose l'Algérie a été également cité afin d'identifier les zones les plus ensoleillées dans le but de prévoir un programme d'électrification ultérieur avec le solaire photovoltaïque.

Chapitre II

L'état de l'art de silicium monocristallin

II-1 Introduction

Contrairement à l'énergie solaire thermique qui utilise le soleil comme source de chaleur, l'énergie photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière en transformant en électricité l'énergie des photons arrivant à la surface des panneaux solaires. Ces derniers sont généralement à base de matériaux semi-conducteurs en particulier le monosilicium. Ainsi, Dans ce chapitre, nous allons citer les notions fondamentales du silicium monocristallin, décrire son état cristallin et aussi ses différentes propriétés cristallographiques, optiques et électriques. De plus, les bases théoriques des mécanismes de diffusion des porteurs de charges en régimes d'équilibre ainsi que les techniques et les étapes de son élaboration seront aussi rappeler.

II-2 Notions fondamentales sur le silicium monocristallin (mono-Si)

La plus grande partie des composants électroniques (cellules solaires, transistors, diodes, ...) sont réalisés à base du silicium. En effet, il est le matériau support de 90% de l'industrie microélectronique. Par ailleurs, comme beaucoup d'autres éléments, le silicium peut exister à température ambiante sous différentes états, dont les deux extrêmes sont respectivement l'état amorphe et l'état cristallin. Pour ce dernier état, il s'est avéré que l'élaboration du silicium monocristallin donne lieu à des matériaux de grande pureté et moins de défauts. C'est pour cela qu'il est le plus avantageux à utiliser pour pouvoir atteindre des rendements photovoltaïques élevés.

II-3 Propriétés cristallographiques du mono-Si

Le silicium est un élément chimique le plus abondant dans la croûte terrestre, après l'oxygène, puisqu'il représente 25,7% de sa masse. Il fait partie de la famille des cristallogènes, son symbole est « Si » et son numéro atomique est « 14 ». Dans la nature, il n'existe pas à l'état pur, mais sous forme de composés comme la silice qui est un dioxyde de silicium (SiO_2) et que l'on trouve dans le sable.

a. Structure cristalline

La matière condensée peut se former suivant deux états solides différents : un état dit amorphe, dans lequel la disposition des atomes est aléatoire, ou un état cristallin, caractérisé par un arrangement régulier des atomes. La structure monocristalline est définie comme étant

un arrangement ordonné et périodique d'atomes au sein d'un réseau cristallographique dont l'élément élémentaire est appelée maille [20]. Le silicium monocristallin possède une structure cubique diamant où chaque atome est entouré de quatre plus proche voisins. Elle peut être décrite comme étant deux réseaux cubiques à faces centrées (CFC) déplacés l'un par rapport à l'autre le long de la diagonale principale. La position de l'origine du deuxième CFC par rapport à celle du premier CFC est de $(1/4, 1/4, 1/4)$. On remarque sur la figure II.1 le mode de liaison tétraédrique (représenté en rouge) et quelques valeurs caractéristiques, à savoir, le paramètre de maille a et la distance r entre deux proches voisins : $a = 5,43 \text{ \AA}$ et $r = 2,35 \text{ \AA}$ [10].

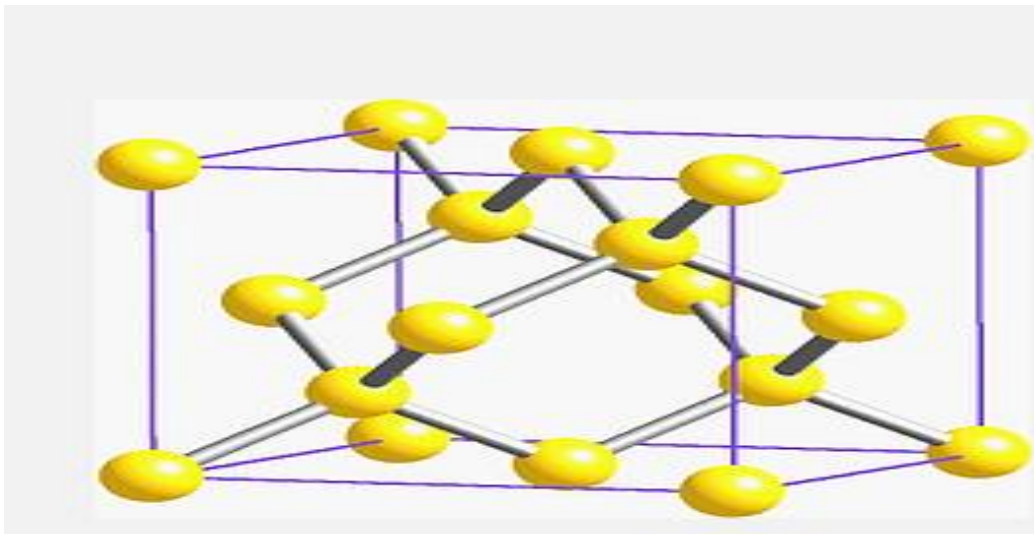


Figure II.1 : Structure cristalline du silicium monocristallin

Les liaisons chimiques dans le mono-Si sont de type covalentes et à ce type de liaison correspond des états électroniques couplés entre eux par un potentiel périodique du cristal, conduisant à des états permis et interdits pour les électrons, et qui définissent l'existence de bandes d'énergies permises et interdites [20].

Le silicium monocristallin est le semi-conducteur le plus utilisé dans l'industrie électronique. C'est un matériau qui présente de très bonnes propriétés électroniques en raison de sa grande pureté chimique et de la faible quantité de défauts structuraux qu'il renferme. Il peut être élaboré à partir de deux procédés, la méthode Czochralski (CZ) et celle de la zone flottante (FZ). Ces deux procédés réalisés à haute température et en phase liquide mènent à des lingots cylindriques de monosilicium. Les lingots sont ensuite découpés en plaquettes (wafers) grâce à une scie à fil [20].

b. Défauts dans le silicium

Malgré les méthodes d'élaboration FZ et CZ offre l'opportunité d'avoir du mono-Si, néanmoins ils subsistent au sein du matériau des défauts intrinsèques liés à la maille cristalline du silicium et des défauts extrinsèques issus de la présence des atomes étrangers désirables comme les dopants et indésirables comme les impuretés métalliques.

b.1 Défauts dans la maille cristalline

Les défauts cristallographiques sont des anomalies dans la maille cristalline du silicium. Ils sont classés en deux catégories :

- **Intrinsèques** pour des défauts liés aux atomes de silicium lui-même, exemple : une lacune.
- **Extrinsèques** pour des défauts en relation avec des atomes étrangers, exemple : précipité

Ils sont répertoriés en quatre types suivant leur présence dans la maille cristallin du silicium : ponctuel, linéaire, surfacique et volumique [21] (voir le tableau II.1 et la figure II.2). Ces défauts sont majoritairement formés durant la cristallisation des lingots de Si mais ils peuvent également se développer lors du procédé de fabrication des composants électroniques comme les cellules solaires si des contraintes trop importantes sont appliquées au silicium.

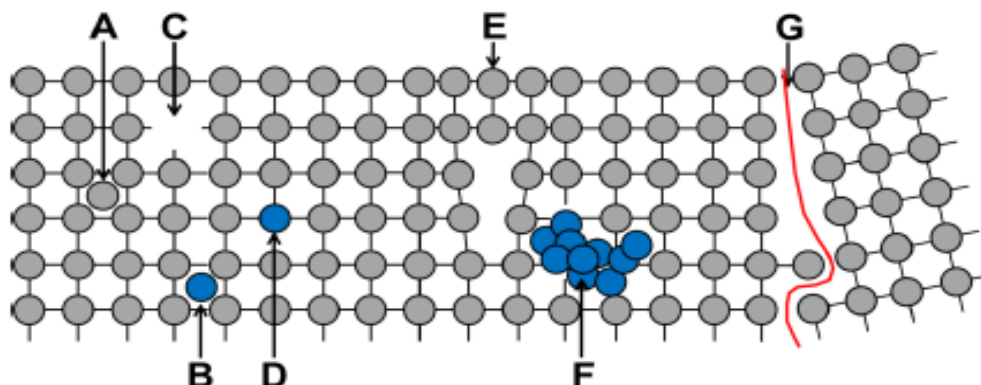


Figure II.2 : Représentation des différents de défauts dans la maille cristalline du silicium.

A et B : atome en position interstitielle ; C : lacune ; D : atome étranger position substitutionnelle ; E : dislocation ; F : précipité ; G : joint de grain.

Nom de défaut	Type de défaut	Sa définition	Représentation correspondante en figure II.2
Interstitial	Ponctuel	Atome en dehors de la maille cristalline et positionné entre les atomes de silicium.	A et B
Lacunaire	Ponctuel	Absence d'atome dans la maille cristalline du silicium.	C
Substitutionnel	Ponctuel	Atome étranger prenant la place d'un atome de silicium.	D
Dislocation	Linéaire	Défauts classés en deux types : vis et coin. Une dislocation coin est générée avec l'ajout ou la disparition d'un plan atomique dans la maille. Par contre, une dislocation vis est créée à la perpendiculaire d'un glissement de deux plans cristallins.	E
Joint de grain	Surfacique	Frontière entre deux cristaux d'orientations cristallines différentes.	G
Précipité	Volumique	Agrégat d'impuretés dans le silicium	F

Tableau II.1 : Défauts présents dans le silicium cristallin.

b.2 Impuretés métalliques

La présence d'impuretés métalliques introduit des niveaux d'énergie dans la bande interdite du silicium pouvant générer des recombinaisons des porteurs de charge de type Shockley-Read-Hall (SRH) (voir le chapitre III). Les pièges créés sont ainsi caractérisés en termes de densité dans le silicium (N_t), de la section efficace de capture des trous (σ_p) et des électrons (σ_n) et également de leur position dans la bande interdite (E_T). Suivant ces paramètres, les impuretés métalliques impactent différemment les propriétés électriques du silicium. En jouant le rôle de dopant désirable, ces impuretés peuvent également donner un caractère donneur ou accepteur au silicium [20].

La composition du silicium, lorsqu'il est fondu dans le creuset, est relativement infectée par les impuretés métalliques. Les atomes dopants désirables sont ajoutées sous forme de

poudre ou sous forme de bouts de silicium cristallin fortement dopés (par exemple un dopage en phosphore donne lieu à du silicium de type n) afin d'obtenir la gamme de résistivité souhaitée. Lors de refroidissement du silicium, les concentrations incorporées dans la partie cristalline ne sont pas identiques pour chaque fraction solidifiée du lingot. En effet, un rapport de concentrations entre la phase liquide C_ℓ et la phase solide C_s se crée en fonction de l'affinité des impuretés avec chaque phase. Ce rapport est appelé coefficient de ségrégation. Il est défini à l'équilibre par [20]:

$$k_{eq} = C_s/C_\ell \quad (II - 1)$$

Lors de la cristallisation, un coefficient de ségrégation effectif (k_{eff}) permet de prendre en compte la vitesse de croissance du cristal (ϑ) et la diffusivité des espèces dans la zone fondue (D). Il s'exprime suivant l'équation suivante [20].

$$k_{eff} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{k_{eq}} - 1\right) e^{-\frac{\vartheta}{D}}} \quad (II - 2)$$

Les impuretés ne réagissant pas de la même façon, leur k_{eff} est différent. Quelques exemples sont montrés dans le tableau II.2.

	P	B	Al	Cu	Cr	Fe	Ni	Mg
k_{eff}	0.35	0.8	3×10^{-2}	8×10^{-4}	1.1×10^{-6}	6.4×10^{-6}	3.2×10^{-5}	3.2×10^{-6}

Tableau II.2 : Coefficient de ségrégation effectif de différentes impuretés dans le silicium pour une vitesse de tirage de 7cm/min d'un lingot CZ [20].

Connaissant la concentration initiale (C_0) de l'impureté dans le creuset et son k_{eff} , il est alors possible de connaître sa concentration dans chaque fraction solidifiée f_s du lingot grâce à la loi de Scheil-Gulliver [22] :

$$C_s = k_{eff} \cdot C_0 \cdot (1 - f_s)^{[k_{eff}-1]} \quad (II - 3)$$

Le phosphore et le bore suivent également cette loi, la concentration en dopant et la résistivité varient le long d'un lingot de silicium (Figure II.3).

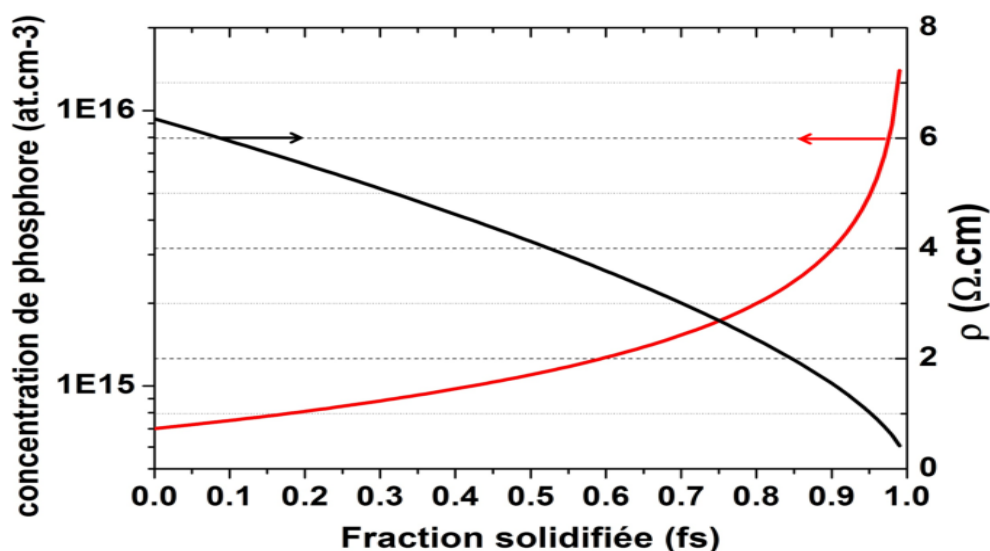


Figure II.3 : Exemple de variation de la concentration du phosphore et de la résistivité le long d'un lingot de silicium [22].

b.3 L'oxygène

L'oxygène présent dans le silicium cristallin élaboré par la méthode Czochralski provient essentiellement de la dissolution des creusets en silice dans le silicium fondu. L'oxygène est alors, préférentiellement, positionné en interstitiel (O_i) dans la maille du silicium en quantité importante. Au contraire, dans le silicium FZ, l'absence de contact du barreau de silicium avec un creuset ou une atmosphère légèrement oxydée réduit les quantités d'oxygène incorporées[20].

La gamme de concentration O_i que l'on peut trouver dans les différents types de silicium est présentée dans le Tableau II.3. Il est à constater que le silicium CZ obtenu à 1414°C est celui qui se rapproche le plus de la limite de solubilité de l'oxygène dans le Si qui est d'environ 2.75×10^{18} atomes/cm³ [23].

Structure cristalline de silicium	Concentration d'oxygène (O_i) dans le Si (atomes/cm ³)
Silicium multi cristallin (mc-Si)	$(2 - 6) \times 10^{17}$
Silicium monocristallin :	
• Cz-Si	$(5 - 15) \times 10^{17}$
• FZ-Si	$\approx 10^{16}$

Tableau II.3 : Gamme de concentration d'oxygène (O_i) pour différentes structures cristallines de silicium [23].

Par ailleurs, la concentration d'oxygène O_i dans le silicium CZ dépend principalement des paramètres de tirage des lingots, à savoir,

- La vitesse et le sens de rotation du cristal de silicium qui modifient les convections thermiques et forcées dans le bain de silicium fondu [24][25] ;
- La pression atmosphérique dans le four qui influence le taux d'évaporation de l'oxygène sous forme de monoxyde de silicium (SiO), CO , CO_2 et, donc, la concentration d'oxygène O_i dans le silicium fondu [26][27] ;
- Le rapport des surfaces entre le silicium liquide et le silicium solide qui gouverne le diamètre des lingots de Si cristallisés ainsi que leurs concentrations en oxygène [28][29].

L'oxygène O_i , lorsque qu'il est isolé dans la maille du silicium, est électriquement inactif. Cependant, il aura tendance à diffuser de plus en plus rapidement avec l'augmentation de la température et à s'agglomérer sous formes de défauts. En effet, d'après [30], pour des températures en dessous de $350^\circ C$, l'oxygène diffuse faiblement dans le Si et reste électriquement inactif. Par contre, à fur et à mesure que la température augmente, les atomes de O_i se regroupent pour former des agrégats appelés les donneurs thermiques (DT). Ces derniers sont connus par leur activité recombinante importante des porteurs de charges [31].

II-4 Méthodes d'élaboration du silicium monocristallin

Etant donné que le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque ne génère pas de nuisance particulière, les impacts environnementaux se situent nécessairement au moment de l'élaboration et en fin de vie lors du démontage. Il est donc utile de connaître les techniques de fabrication notamment celles liées à la formation du silicium afin de bien identifier d'où proviennent et comment sont utilisés les différents flux de matières et d'énergie mis en jeu. De plus, il est à signaler que chaque industriel développe bien entendu ses propres variantes mais néanmoins, on se limite dans la suite aux étapes courantes les plus adaptées à l'élaboration du silicium monocristallin.

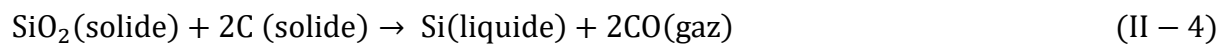
II-4-1 Purification du silicium

Le silicium extrait des mines n'est pas assez pur pour une application photovoltaïque et il a besoin d'être purifié. Pour cela, une succession importante d'étapes de purification ont été développées. En effet, la démarche consiste dans un premier temps d'obtenir du silicium de

qualité dite métallurgique (**MG-Si**), puis de purifier le matériau pour atteindre la pureté électronique (**EG-Si**) [20].

- **De la silice au silicium métallurgique**

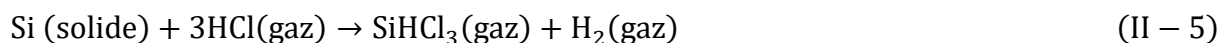
Le silicium n'existe pas à l'état naturel en tant que corps pur mais en tant que silice (SiO_2) sous forme granuleuse (sable) ou solide (quartz). La carboréduction de la silice à des températures supérieures à 1900°C permet d'obtenir le MG-Si [32][33]. L'opération est réalisée dans un four à arc électrique où des composés fortement carbonés, utilisés comme réducteur, sont mélangés au SiO_2 :



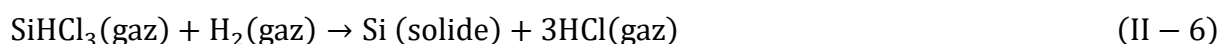
A ce stade, le MG-Si obtenu contient des impuretés en grande quantité dont des carbures de silicium (SiC), du SiO_2 ou encore des impuretés métalliques. Pour la fabrication des matériaux destinés aux cellules solaires, une étape de purification supplémentaire est nécessaire [20].

- **Du silicium métallurgique au silicium électronique**

La méthode la plus fréquemment utilisée pour diminuer les impuretés dans le silicium, à des niveaux très bas, est le procédé Siemens [34][35]. Cette voie de purification est dite chimique. Elle consiste à la fabrication du trichlorosilane (SiHCl_3) à partir d'une réaction entre le MG-Si et le gaz de chlorure d'hydrogène (HCl ou acide chlorhydrique) à des températures comprises entre $300\text{-}350^\circ\text{C}$ suivant la réaction :



La réaction avec le chlore permet une première purification puisque des précipités chlorés de métaux ne sont pas mélangés au trichlorosilane. Ce dernier est ensuite réduit pour redonner du silicium dans un réacteur de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) à haute température ($\approx 1100^\circ\text{C}$) dont la réaction chimique bilan est la suivante [20] :



Le silicium obtenu est de structure polycristalline dont la forme est cylindrique ayant des diamètres au alentour de 20 cm.

Cependant, ce type de purification est énergivore et lourd à appliquer. Pour cela, une amélioration des techniques de purification et une augmentation des volumes de production

ont vu le jour dans le but de réduire les coûts de production et de rendre le EG-Si compatible avec l'industrie photovoltaïque aussi bien en termes de coût que de performance [20].

II-4-2 Cristallisation des lingots de silicium monocristallin

Le silicium monocristallin est fabriqué à partir du silicium polycristallin (**EG-Si**) obtenu après les étapes de purification. A cet effet, le monosilicium est considéré comme étant une matière d'une très grande pureté. Il est généralement obtenu par trois méthodes principales :

Procédé Czochralski (Cz)

Un germe monocristallin est trempé à la surface d'un bain de silicium contenu dans un creuset de silice. Ce germe est tiré à vitesse continue, le bain étant faiblement surchauffé. La solidification reproduit l'orientation cristalline du germe si la vitesse de tirage et la rotation du cristal sont bien contrôlées. La vitesse de tirage dépend du diamètre du lingot. Elle varie entre 12 et $3 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. L'opération produit une billette de silicium monocristallin avec une très faible densité de dislocations ($< 10^2 \text{cm}^{-2}$). La contamination par l'oxygène à cause du creuset en silice, est l'un des points faibles de la méthode Cz [36].

Procédé Fusion de Zone (FZ)

Le principe de cette méthode consiste à faire fondre une petite tranche d'un lingot polycristallin cylindrique grâce à une spire d'induction mobile (Figure II - 4). La bobine se déplace verticalement, depuis le bas du lingot où se trouve un germe cristallin. On tire un monocristal à partir de la zone fondue [36].

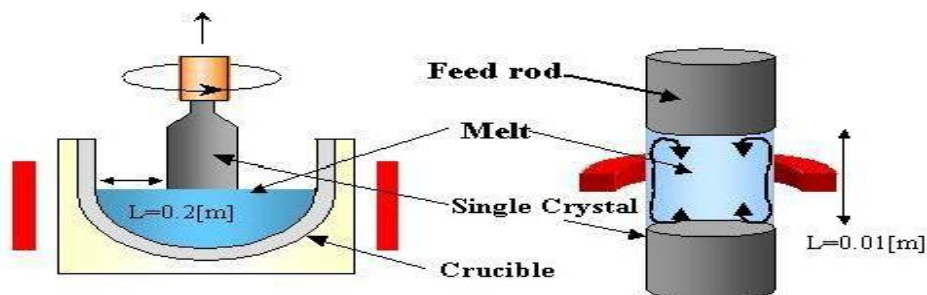


Figure II-4: Schéma des deux méthodes de solidification pour le Si monocristallin CZ et FZ

L'intérêt de cette méthode est que les lingots de silicium produits sont très purs et ont une teneur en oxygène de 10 à 100 fois plus faible que dans le cas de la méthode CZ, mais son coût reste trop élevé pour les applications photovoltaïques[36].

II-5 Propriétés électriques du silicium monocristallin

Les propriétés électroniques des matériaux semi-conducteurs résultent de la mobilité, dans le réseau cristallin, de deux types de porteurs de charge électrique : les électrons libres et les trous. Ces porteurs interagissent de différentes manières avec le réseau cristallin et avec des impuretés ainsi que d'autres défauts qui peuvent fixer des charges, positives ou négatives, et se trouver ionisés.

Le silicium cristallise dans le système cubique à faces centrées, chaque atome établissant des liens de covalence avec quatre de ses voisins. Les électrons ne peuvent être que libres ou liés aux atomes du cristal, la transition entre l'un et l'autre des deux états s'accompagnant nécessairement de sauts d'énergie potentielle d'amplitude au moins égale à l'énergie d'ionisation de ces atomes dans le cristal. Il est à admettre qu'un trou comme la charge positive d'un atome ayant perdu l'un de ses électrons de valence ; la migration de cette charge positive, par le jeu du déplacement de proche en proche d'autres électrons de valence, lui donne le caractère dual de l'électron libre. On en déduit le modèle simplifié de la figure II.8, également applicable aux autres matériaux semi-conducteurs : la bande de valence, comme son nom l'indique, regroupe les niveaux d'énergie des électrons de liaison et la bande de conduction regroupe ceux des électrons libres : les deux bandes sont séparées par une bande interdite de largeur E_g représentant l'énergie d'ionisation (à 300 K : $\approx 1,12$ eV pour le silicium ; $\approx 1,43$ eV pour l'arséniure de gallium) ; les trous correspondent aux lacunes de la bande de valence.

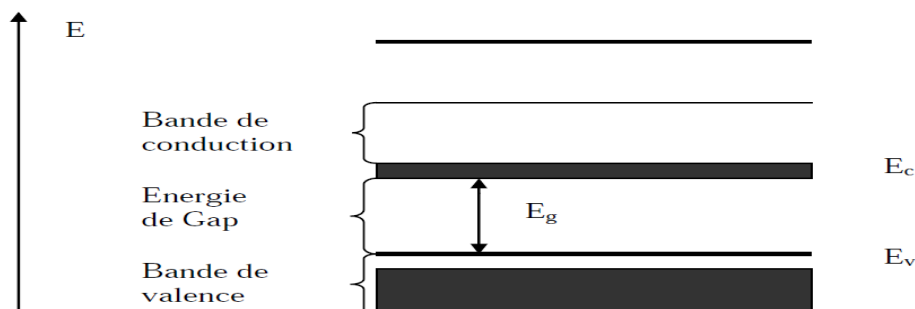


Figure II.8 : Diagramme de bandes d'énergie simplifié du silicium

La concentration des électrons libres à la température T est appelée la concentration intrinsèque $n_i(T)$. Elle est donnée par la relation suivante [37]:

$$n_i(T) = BT^{3/2} e^{-E_g/2k_B T} \quad (\text{II} - 7)$$

Où B est une constante de l'ordre de $7,3 \times 10^{15} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-3/2}$, $E_g = 1,12 \text{eV}$ et $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ est la constante de Boltzmann. A la température ambiante ($T = 300 \text{K}$), $n_i = 10^{10} \text{cm}^{-3}$.

II-6 Dopage du monosilicium

Parmi les atomes étrangers qu'on peut rencontrer dans le cristal de silicium, ceux qui se trouvent ionisés aux températures de fonctionnement des éléments électroniques jouant ainsi un rôle particulièrement important : les atomes dopants. On distingue les atomes donneurs ionisés positivement et les atomes accepteurs ionisés négativement. Le dopage du cristal est l'introduction contrôlée de tels atomes. Pour le silicium, il s'agit essentiellement d'atomes pentavalents, phosphore ou arsenic (donneurs) et trivalents, bore ou aluminium (accepteurs). Ces atomes sont introduits dans le matériau semi-conducteur, lors même de son élaboration, et par des procédés tels que l'implantation ionique et la diffusion à haute température, à différentes étapes du processus de fabrication des composants. Dans le réseau cristallin, ces atomes dopants se substituent de place en place aux atomes de silicium et leur énergie d'ionisation est assez faible dans ces conditions pour qu'on puisse les considérer comme effectivement tous ionisés, sauf aux très basses températures. À ces atomes dopants se trouvent donc associés, dans la bande d'énergie dite « interdite », des niveaux d'énergie proches de la bande de conduction pour les donneurs, de la bande de valence pour les accepteurs.

II-6-1 Concentrations des porteurs de charge à l'équilibre thermodynamique

Les concentrations des porteurs de charge sont gouvernées par deux équilibres :

- i. L'équilibre entre la création et la recombinaison de paires électron-trou, qui est exprimé par la loi d'action des masses [37]:

$$n \cdot p = n_i^2 = B^2 T^3 e^{-E_g/kT} \quad (\text{II} - 8)$$

Où n et p sont respectivement les densités volumiques des électrons et des trous.

ii. L'équilibre électrique (neutralité électrique) qui est exprimé par la relation suivante :

$$p + N_D = n + N_A \quad (\text{II} - 9)$$

Où N_A et N_D représentent respectivement les concentrations en atomes accepteurs et donneurs ionisés

II-6-2 Processus de transport des porteurs de charges

Tout gradient d'une grandeur intensive engendre dans le cristal des flux de porteurs de charges mobiles, c'est-à-dire un courant électrique. Il en est ainsi pour le potentiel électrique, les concentrations de porteurs, la température. On se limitera ici au cas le plus important en pratique où on considère les seuls effets des gradients de potentiel (conduction) et de concentration (diffusion).

II-6-2-1 Conduction

En présence d'un champ électrique, au mouvement désordonné d'agitation thermique des porteurs mobiles se superpose un mouvement de dérive dans le sens du champ pour les trous, dans le sens contraire pour les électrons. À cette dérive des porteurs correspondent des courants de conduction dont les densités s'expriment simplement par :

$$\begin{cases} \vec{J}_p &= |e| \cdot p \cdot \vec{\vartheta}_p \\ \vec{J}_n &= -|e| \cdot n \cdot \vec{\vartheta}_n \end{cases} \quad (\text{II} - 10)$$

On appelle mobilité (μ_n pour les électrons, μ_p pour les trous) la valeur absolue du rapport de la vitesse de dérive (respectivement ϑ_n et ϑ_p) à l'intensité E du champ électrique, ce qui permet d'écrire encore :

$$\begin{cases} \vec{J}_p &= |e| \cdot p \cdot \mu_p \cdot \vec{E} \\ \vec{J}_n &= |e| \cdot n \cdot \mu_n \cdot \vec{E} \end{cases} \quad (\text{II} - 11)$$

La densité totale de courant de conduction des porteurs est donc :

$$\vec{J}_{\text{cond}} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{II} - 12)$$

Où σ représente la conductivité électrique du cristal :

$$\sigma = |e| \cdot (p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n) \quad (\text{II} - 13)$$

II-6-2-2 Diffusion

Lorsque les porteurs libres ne sont pas uniformément distribués dans le cristal, ils subissent le processus très général de la diffusion. Les flux d'électrons et de trous sont proportionnels aux gradients de concentration respectifs et il en résulte des densités de courant :

$$\begin{cases} \vec{J}_n = +|e| \cdot D_n \cdot \overline{\text{grad}(n)} \\ \vec{J}_p = -|e| \cdot D_p \cdot \overline{\text{grad}(p)} \end{cases} \quad (\text{II} - 14)$$

Où D_n et D_p sont les constantes de diffusion.

La relation d'Einstein relie entre les mobilités des porteurs et leurs constantes de diffusion par :

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{KT}{|e|} \quad (\text{II} - 15)$$

Dans le cas où le courant provient des effets du champ électrique et du gradient de concentration, on écrit :

$$\begin{cases} \vec{J}_n = |e| \cdot n \cdot \mu_n \cdot \vec{E} + |e| \cdot D_n \cdot \overline{\text{grad}(n)} \\ \vec{J}_p = |e| \cdot p \cdot \mu_p \cdot \vec{E} - |e| \cdot D_p \cdot \overline{\text{grad}(p)} \end{cases} \quad (\text{II} - 16)$$

II-7 Propriétés optiques du silicium monocristallin

Le rendement des cellules solaires dépend principalement de la lumière absorbée par la couche absorbante. Du point de vue technologique, la couche absorbante doit avoir un gap optimal pour absorber la plus large gamme des longueurs d'ondes du spectre solaire avec un coefficient d'absorption élevé. Dans ce cas, il est important de minimiser les pertes relatives aux phénomènes de réflexion et/ou de transmission. Conformément à la théorie corpusculaire, l'énergie d'un photon correspondant à une radiation donnée est reliée à sa longueur d'onde par la relation [38]:

$$E_{ph} = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{1,24 \text{ eV}}{\lambda} \quad (\text{II} - 17)$$

ν est la fréquence de la radiation, λ est la longueur d'onde de la radiation en μm , c est la vitesse de la lumière dans la vide, E_{ph} est l'énergie du photon en eV et h est la constante de Plank.

Une radiation lumineuse rencontrant un semi-conducteur est absorbée suivant la loi de Lambert-Bouguer [38]:

$$I(x) = I_0 (1 - R) \cdot e^{-\alpha x} = I_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (\text{II} - 18)$$

x est la profondeur d'absorption du faisceau dans le matériau à partir de la surface du semi-conducteur, R est le coefficient de réflexion et α est le coefficient d'absorption. Quand les photons incidents ont une énergie suffisante pour provoquer le transfert des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, des paires électron-trou peuvent se créer. L'énergie minimale nécessaire au photon incident pour provoquer la transition électronique dépend de la largeur de la bande interdite E_g du matériau. A partir de la relation (II-17), on détermine un seuil d'absorption intrinsèque et on trouve dans le cas du silicium, $\lambda = 1,1 \mu\text{m}$ et dans celui de l'arséniure de gallium, $\lambda = 0,86 \mu\text{m}$ (voir figure II.9) [38]. Pour les photons d'énergie inférieure à E_g , le coefficient d'absorption est négligeable et la radiation lumineuse traverse la matériau avec une atténuation quasiment nulle. D'autres types d'absorption interviennent encore dans le cristal : par les atomes d'impuretés (absorption extrinsèque), par les porteurs libres et le réseau cristallin.

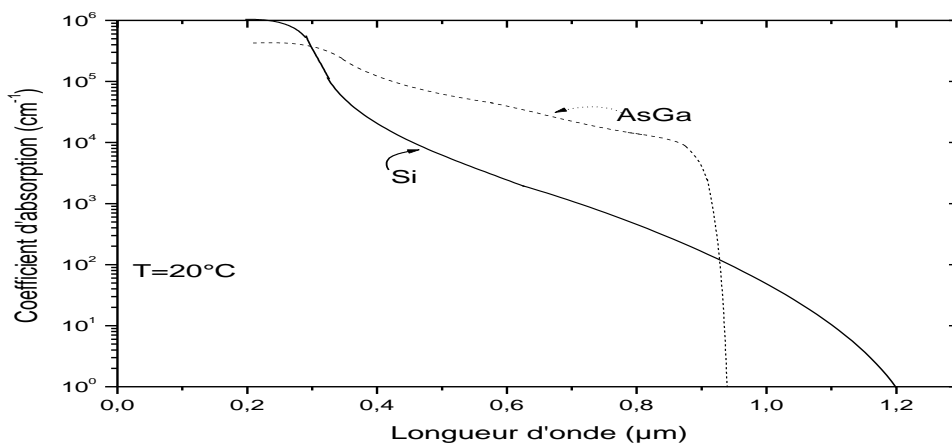


Figure II.9 : Spectre d'absorption de silicium (Si) et de l'Arséniure de Gallium (AsGa) en fonction de la longueur d'onde de la lumière [38]

Le taux d'absorption des photons dans le semi-conducteur (en photons.cm⁻³.s⁻¹) s'exprime par :

$$\beta = -\frac{\partial\phi(x,\lambda)}{\partial x} = \alpha(\lambda).\phi(x,\lambda) \quad (\text{II} - 19)$$

$\phi(x,\lambda)$ étant le flux de photons de longueur λ à la profondeur x de la surface (en photons.cm⁻².s⁻¹) et α est le coefficient d'absorption en cm⁻¹.

En tenant compte du rendement quantique $\gamma(\lambda)$, rapport entre le nombre de paires électron-trou créées et le nombre de photons absorbés, le taux de génération dans le volume (en porteurs libres.cm⁻³.s⁻¹), à la distance x de la face éclairée du matériau, s'écrit :

$$G(x,\lambda) = \beta.\gamma(\lambda) = \alpha(\lambda).\gamma(\lambda).[1 - R(\lambda)].\phi(0,\lambda).e^{-\alpha(\lambda)x} \quad (\text{II} - 20)$$

$\phi(0,\lambda)$ est le flux de photons à la surface du matériau.

Selon l'épaisseur du matériau, l'absorption de la lumière est plus ou moins variable. Le silicium cristallin à forte épaisseur (200 μ m) ne transmette pas de la lumière, contrairement aux dispositifs en couches minces à travers lesquels la transmission n'est pas négligeable. Pour diminuer cette transmission, il suffit de rendre rugueuse la face arrière ou d'appliquer à l'arrière d'un matériau une électrode présentant une propriété de réflexion adaptée (comme l'aluminium) qui piège la lumière dans le matériau [39].

Par opposition à l'absorption et à la transmission, la réflexion de la lumière sur une surface traduit l'ensemble des rayons qui émergent de l'interface du côté d'origine des rayons incidents. Elle peut être spéculaire ou bien diffuse suivant la nature de l'interface. Sur les interfaces irrégulières, la réflexion est dite diffuse. La lumière est réfléchiée dans un grand nombre de directions et l'énergie du rayon incident est redistribuée dans une multitude de rayons réfléchis. Par contre, la réflexion spéculaire est observée lorsque le rayon incident donne naissance à un rayon réfléchi unique [39]. En pratique, la réduction du taux de réflexion de la lumière se fait en jouant sur les indices de réfraction des matériaux traversés. Plus la différence des indices de réfraction est élevée de part et d'autre d'une surface, plus elle est réfléchissante. Par exemple, le silicium d'un indice de réfraction de 3,75, au contact direct avec l'air (d'un indice de réfraction égale à 1) réfléchit 33% de la lumière incidente, pourcentage trop élevé pour assurer un rendement acceptable de la conversion photovoltaïque. Le moyen de réduire ce taux de réflexion est d'intercaler entre le silicium et l'air un ensemble

de matériaux à indices de réfraction différents afin de diminuer le saut d'indice de réfraction entre l'air et le silicium [39].

II-8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons noté quelques aspects essentiels du silicium monocristallin, à savoir son état cristallin et ses différentes propriétés : cristallographiques, optiques et électriques. De plus, les bases théoriques des mécanismes de diffusion des porteurs de charges ainsi que les techniques et les étapes de son élaboration.

Chapitre III

L'aspect physique des cellules Photovoltaïques

III-1 Introduction

L'énergie photovoltaïque provient de la conversion directe du rayonnement solaire en électricité à travers un dispositif électronique mis en œuvre pour une telle tâche. Ce dernier se présente sous forme de modules composés d'un ensemble de cellules solaires connectées en série et/ou en parallèle suivant la puissance électrique recherchée. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants, notamment à base de silicium (Si). Elles sont généralement sous forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté.

Le principe de fonctionnement de ces dispositifs repose sur l'effet photovoltaïque découvert en 1839 par Antoine Becquerel. Cet effet est caractérisé par l'apparition d'une différence de potentiel entre deux électrodes métalliques d'une cellule placée sous éclairage. Si ces électrodes sont reliées à un circuit extérieur, un courant peut alors circuler. Pour assurer un bon rendement de conversion énergétique, le dispositif photovoltaïque doit permettre :

- L'absorption de l'énergie lumineuse incidente : le matériau doit donc bien absorber dans la gamme de longueurs d'onde émise par le soleil,
- La création de porteurs de charge libres : le matériau doit posséder une transition possible entre les niveaux énergétiques correspondant à l'état lié et à l'état libre,
- Le transport des charges libres à travers le substrat : la qualité cristalline et chimique du substrat doit être élevée,
- La collecte des porteurs de charge libres dans un circuit extérieur : le dispositif doit être muni de contacts électriques très peu résistifs.

Dans ce chapitre nous présenterons les notions de base qui sous-tendent notre travail. Dans une première partie, nous abordons les parties essentielles qui composent une cellule photovoltaïque enchainé par une discussion de son principe de fonctionnement. Nous discuterons ensuite les différents mécanismes de recombinaison des porteurs de charge minoritaires en surface et en volume de la cellule qui influencent énormément son rendement photovoltaïque. Enfin, on termine par les modèles mathématiques et les schémas électriques dédiés à la compréhension du fonctionnement réel des dispositifs photovoltaïques.

III-2 Structure d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est une plaquette souvent en silicium cristallin destinée à assurer la conversion de la lumière en énergie électrique par un processus appelé « effet photovoltaïque ». Elle est composée de deux couches de silicium, une dopée en atomes accepteurs par exemple le bore (appelée base et notée p) et l'autre fortement dopée en atomes donneurs comme le phosphore (appelée émetteur et notée n^+). Les deux régions n^+ et p sont séparées par une zone de charge d'espace (ZCE) caractérisée par une barrière de potentiel. Par ailleurs, pour des rendements photovoltaïques élevés, il est à signaler l'ajout d'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires et des contacts ou grilles conductrices pour une bonne récolte des porteurs de charges libres (voir figure III.1).

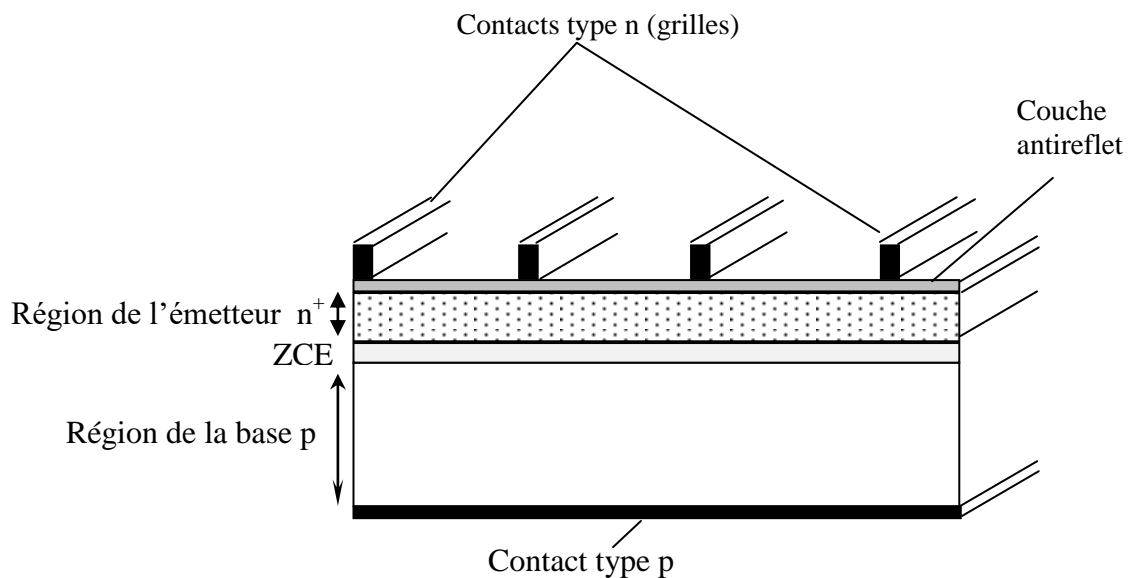


Figure III.1 : Structure classique d'une cellule photovoltaïque.

III-3 Principe de Fonctionnement d'une cellule solaire

La description du fonctionnement d'une cellule solaire fait appel à la physique d'une jonction pn à large surface et à épaisseur limitée, fabriquée sur une plaquette de silicium monocristallin. L'élaboration d'une cellule classique nécessite la formation d'un émetteur n^+ sur un substrat de silicium type p, le dépôt d'une couche antireflet (ARC, Anti-Reflection Coating) et des contacts métalliques sur les deux faces avant et arrière pour la collecte des porteurs de charge photogénérés. Lorsque la lumière est absorbée par la cellule solaire, des paires électron-trou sont générées dans le volume de substrat. Ils sont ensuite séparés par une barrière de potentiel de la zone de charge d'espace et collectés par les électrodes métalliques.

L'intensité lumineuse absorbée par le matériau semi-conducteur se caractérise par un taux de génération G . Celui-ci exprime la création de paires électron-trou par unité de volume et de temps. Le processus inverse correspondant à la disparition des paires électron-trou s'appelle la recombinaison notée R .

Une cellule photovoltaïque fonctionne en dehors de l'équilibre thermodynamique et répond aux conditions de faible injection des porteurs de charge dans le semi-conducteur (la concentration des porteurs photogénérés est faible devant celle des porteurs majoritaires). La propagation des porteurs minoritaires (des électrons dans la région de la base et des trous dans la région de l'émetteur) par conduction et diffusion surgit, accompagnée des phénomènes de génération et de recombinaison. L'équation de continuité rend compte de l'ensemble de ces processus. Elle permet de déterminer, en tout point du semi-conducteur et à chaque instant, la concentration de ces porteurs. Elle s'écrit :

- Pour les électrons, dans un semi-conducteur de type p :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n + \frac{1}{|e|} \operatorname{div}(\vec{J}_n) \quad (\text{III} - 1)$$

- Pour les trous, dans un semi-conducteur de type n :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R_p - \frac{1}{|e|} \operatorname{div}(\vec{J}_p) \quad (\text{III} - 2)$$

Où les expressions de \vec{J}_n et \vec{J}_p sont données par :

$$\vec{J}_n = |e| \cdot n \cdot \mu_n \vec{E} + |e| \cdot D_n \cdot \overrightarrow{\operatorname{grad}(n)} \quad (\text{III} - 3)$$

$$\vec{J}_p = |e| \cdot p \cdot \mu_p \vec{E} - |e| \cdot D_p \cdot \overrightarrow{\operatorname{grad}(p)} \quad (\text{III} - 4)$$

Dans un modèle unidimensionnel et en introduisant les relations (III-3) et (III-4) dans les expressions (III-1) et (III-2) on aura :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n + n \cdot \mu_n \cdot \frac{\partial E}{\partial x} + \mu_n \cdot E \cdot \frac{\partial n}{\partial x} + D_n \cdot \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \quad (\text{III} - 5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R_p - p \cdot \mu_p \cdot \frac{\partial E}{\partial x} - \mu_p \cdot E \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + D_p \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (\text{III} - 6)$$

En examinant ces dernières équations, nous voyons que trois paramètres physiques fondamentaux apparaissent dans les mécanismes de transport des porteurs minoritaires : la durée de vie τ , la mobilité μ et la constante de diffusion D . un autre paramètre, très utilisé quand on explique le fonctionnement des cellules solaires, s'appelle la longueur de diffusion L . Elle s'associe aux autres paramètres physiques par les relations :

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} \quad (\text{III} - 7)$$

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

La longueur de diffusion correspond au libre parcours moyen des porteurs excédentaires avant qu'ils se recombinent. Elle s'exprime communément en microns.

III-4 Recombinaison des porteurs de charge dans le silicium

La génération dans les semi-conducteurs est le processus dans lequel les paires électron-trou sont créées. L'énergie nécessaire pour la transition d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction est obtenue selon différents processus physiques : absorption thermique, champ électrique externe et absorption de photons par le semi-conducteur. Les paires électron-trou créées sont tôt ou tard recombinées. Le retour à l'équilibre se fait par émission de l'énergie en excès soit sous forme de photons, soit sous forme de phonons. Le taux de recombinaison est déterminé par les mécanismes physiques intervenants dans de tels phénomènes et par la concentration des porteurs de charge en excès présents dans le semi-conducteur. Dans cette partie, nous discutons les différents mécanismes fondamentaux de recombinaison aussi bien en volume qu'en surface qui se manifestent dans le silicium.

A l'équilibre thermique, les concentrations d'électrons n_0 dans la bande de conduction et des trous p_0 dans la bande de valence sont constantes ($n_0 \cdot p_0 = n_i^2$) où n_i est la densité des porteurs intrinsèque dans le semi-conducteur. Ceci traduit l'équilibre entre le taux de génération thermique et celui de recombinaison des paires électron-trou. Supposons que tous les atomes dopants sont totalement ionisés à la température ambiante, la concentration des électrons et des trous sont données par :

$$\begin{cases} n_0 = N_C \cdot \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_B T}\right) = N_D, & p_0 = n_i^2 / n_0 & \text{semi-conducteur de type n} \\ p_0 = N_V \cdot \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right) = N_A, & n_0 = n_i^2 / p_0 & \text{semi-conducteur de type p} \end{cases} \quad (\text{III} - 9)$$

N_D et N_A sont respectivement les concentrations des atomes donneurs et accepteurs. E_F , E_C et E_V représentent les niveaux énergétiques du niveau de Fermi, le bas de la bande de conduction et le haut de la bande de valence. N_C et N_V sont les densités effectives des états permis dans les bandes de conduction et de valence, respectivement.

Dans un état hors équilibre ($n \cdot p \neq n_i^2$), les concentrations des porteurs sont écrites sous la forme :

$$\begin{cases} n = n_0 + \Delta n = N_C \cdot \exp\left(-\frac{E_C - E_{Fn}}{k_B T}\right) \\ p = p_0 + \Delta p = N_V \cdot \exp\left(-\frac{E_{Fp} - E_V}{k_B T}\right) \end{cases} \quad (\text{III} - 10)$$

Δn et Δp les concentrations des porteurs en excès, E_{Fn} et E_{Fp} les quasi-niveaux de Fermi, respectivement pour les électrons et les trous.

Comme l'équilibre thermique ne peut pas être atteint instantanément après la coupure de la source de génération, les densités excessives de porteurs Δn et Δp diminuent jusqu'à ce que le système atteigne de nouveau les concentrations n_0 et p_0 . Le taux de recombinaison U qui décrit cet effet est une caractéristique des différents mécanismes de recombinaison dans le matériau. Il est souvent exprimé comme le rapport entre l'excédent de porteurs Δn et leur durée de vie τ :

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = U = \frac{\Delta n}{\tau} \quad (\text{III} - 11)$$

U est le taux de recombinaison des porteurs de charge excédentaires en $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$, Δn est la concentration excédentaire des porteurs de charge en cm^{-3} et τ est la durée de vie des porteurs de charge excédentaires en s.

Il existe trois processus de recombinaison dans les semi-conducteurs, à savoir :

- **La recombinaison radiative**

Elle est typiquement un processus dominant dans les semi-conducteurs à structure de bande directe où elle représente la base de fonctionnement des diodes luminescentes, sa contribution est considérée négligeable comparé à d'autres processus de recombinaison dans les semi-conducteurs à structure de bande indirecte, tels que le silicium [40].

- **La recombinaison Auger**

Il est le mécanisme le plus dominant dans le silicium lorsque le niveau de dopage est élevé [41]. L'excès d'énergie issu de la recombinaison d'un électron de la bande de conduction et d'un trou de la bande de valence peut être transféré à une troisième particule libre, électron ou trou, Ces charges sont considérées comme des particules quasi libres, n'interagissant pas entre elles [11].

La recombinaison via les défauts

Pour ce type de recombinaison, les porteurs de charge générés se recombinent à travers des états d'énergie intermédiaires dans la bande interdite du semi-conducteur. Ce mécanisme est largement connu sous le nom 'Shockley-Read-Hall, SRH recombination' [42]. C'est le mécanisme le plus probable à température ambiante dans les matériaux semi-conducteurs tel que le silicium. La recombinaison s'effectue par l'intermédiaire d'un centre de recombinaison qui peut être un défaut ou une impureté situé à un niveau proche du milieu de la bande interdite. Un tel défaut peut être occupé par un électron ou par un trou et ainsi interagir avec la bande de conduction et la bande de valence. La surface d'un substrat de silicium représente une discontinuité brusque dans la structure cristalline, qui a comme conséquence un grand nombre d'atomes de silicium partiellement liés. Comme n'importe quelle perturbation de périodicité, ces liaisons provoquent des niveaux recombinants actifs situés dans l'espace de la bande interdite près de la surface du semi-conducteur. En pratique, dans le cas de silicium à haute pureté, les méthodes de réduction de la vitesse de recombinaison en surface dans les dispositifs réels sont basées sur la croissance d'une couche d'oxyde thermique SiO_2 et/ou le dépôt d'une couche de nitrure de silicium (SiN).

III-5 Paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque

Rappelons qu'une cellule photovoltaïque est une jonction pn capable de transformer l'énergie absorbée du rayonnement solaire incident en énergie électrique. Lorsque la surface libre de cette jonction est illuminée, les photons d'énergie supérieure à la largeur de la bande interdite E_g (1,124eV pour le silicium à 300K) peuvent générer des paires électron-trou dans les régions quasi-neutres de l'émetteur et de la base. La figure III.2 représente une cellule photovoltaïque sous illumination reliée aux bornes d'une résistance de charge R_C .

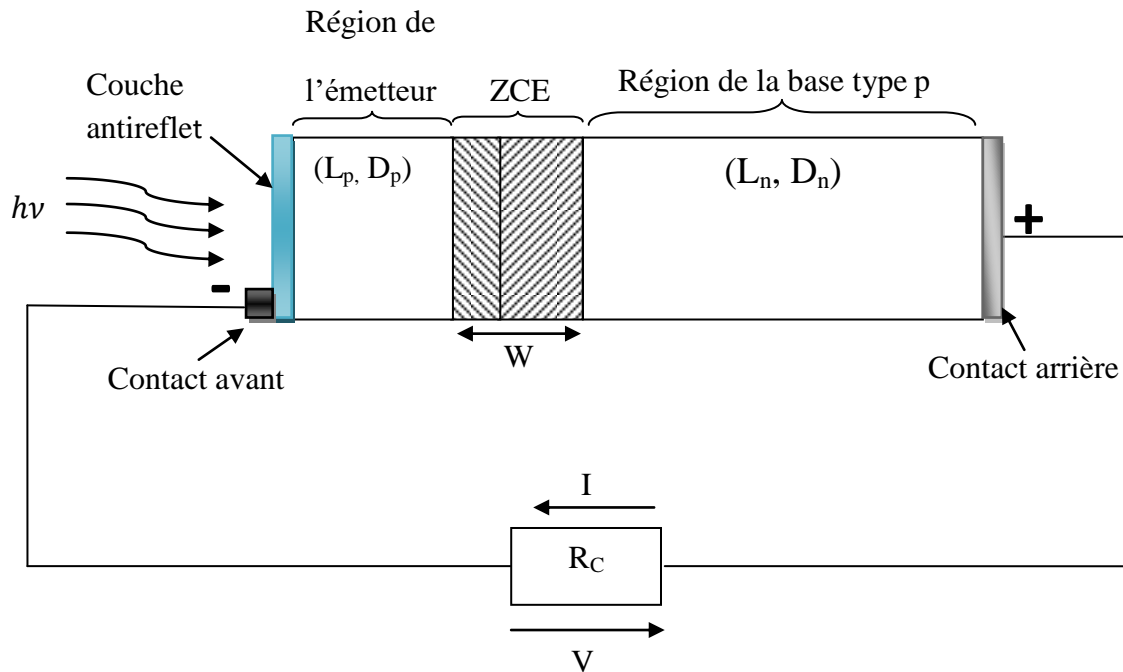


Figure III.2 : Cellule photovoltaïque sous illumination reliée à une charge R_C .

Les électrons et les trous créés respectivement dans les régions de l'émetteur et de la base diffusent et seuls atteignent la zone de charge d'espace (ZCE) les porteurs minoritaires libérés à une distance inférieure à leurs longueurs de diffusion L . Accélérés par le champ électrique interne, ils traversent la ZCE. La région de l'émetteur reçoit des électrons et se charge négativement alors que la région p accepte des trous et se charge positivement. Si nous relierons les côtés de la jonction à une résistance de charge R_C , un courant électrique I la parcourt et une différence de potentiel V apparaît entre ses bornes. Un schéma électrique idéal reflétant le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est donné en figure III-3 où on a :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{III} - 12)$$

Avec I_{ph} et I_d représentent respectivement le photocourant et le courant d'obscurité de la diode. Ce dernier est donné par la relation suivante :

$$I_d = I_0 [e^{(|e|V/k_B T)} - 1] \quad (\text{III} - 13)$$

I_0 est le courant de saturation de la diode, k_B est la constante de Boltzmann et T la température absolue du semi-conducteur.

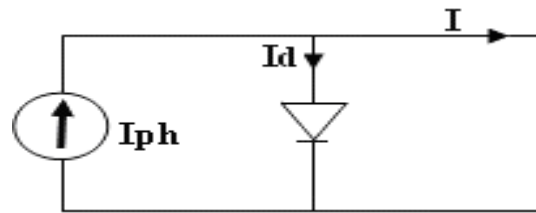


Figure III.3 : Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque [12].

La relation entre les trois grandeurs I , I_{ph} et $I_d(V)$ représente la caractéristique courant-tension (figure III.4 à droite) permettant de déterminer quatre grandeurs caractéristiques principales du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

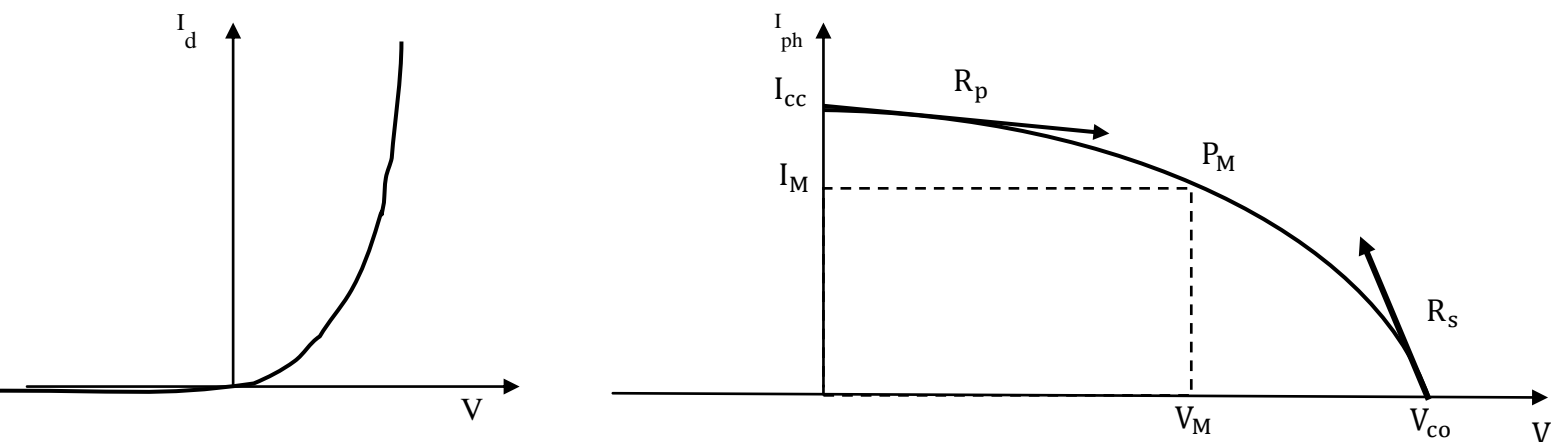


Figure III.4 : Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque à l'obscurité (à gauche) et sous illumination (à droite) [12].

a- Courant de court circuit

Le courant de court circuit I_{cc} d'une cellule photovoltaïque obtenu pour une tension nulle ($V = 0$), définit la quantité G des paires électron-trou créés et qui traverse la jonction sans recombinaison. Elle est contrôlée par les longueurs de diffusion des électrons et des trous, L_n et L_p , respectivement [12]:

$$I_{cc} = |e|.G.(L_n + L_p) \quad (\text{III} - 14)$$

B - Tension en circuit ouvert

La tension en circuit ouvert V_{co} d'une cellule photovoltaïque est la tension pour laquelle la diode à l'obscurité fournit un courant égal au courant de court circuit I_{cc} . Dans le cas idéal, elle est déterminée à partir de l'équation de la caractéristique courant - tension d'une cellule photovoltaïque par l'expression :

$$V_{co} = \frac{k_B T}{|e|} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right) \quad (\text{III} - 15)$$

c- Facteur de forme

Le facteur de forme met en évidence non seulement l'efficacité d'une cellule photovoltaïque mais aussi et surtout son vieillissement. Il est défini par le rapport de la puissance maximale $P_M = V_M \cdot I_M$ et de la valeur du produit $I_{cc} \cdot V_{co}$:

$$FF = \frac{V_M \cdot I_M}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{III} - 16)$$

d- Rendement de conversion photovoltaïque

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance maximale générée par la cellule et la puissance lumineuse qu'elle reçoit $P_0 = P_i \cdot S$:

$$\eta = \frac{V_M \cdot I_M}{P_i \cdot S} \quad (\text{III} - 17)$$

S est la surface de la cellule solaire.

P_i est la densité de puissance incidente reçue sur la surface de la cellule qui dépend des conditions météorologiques et la hauteur du soleil.

III-6 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

Le modèle de la cellule photovoltaïque sous éclairage est décrite par l'équation (III-12) n'est qu'une représentation simple du fonctionnement réel. Pour tenir compte des différentes limitations, la cellule photovoltaïque est représentée par un modèle à deux diodes. Son fonctionnement sous éclairage à une température donnée est équivalent à celui d'un circuit électrique comportant un générateur de courant I_{ph} , une combinaison des résistances série et parallèle (R_s, R_p) et de deux diodes parcourues par des courants I_{01} et I_{02} (voir figure III.5).

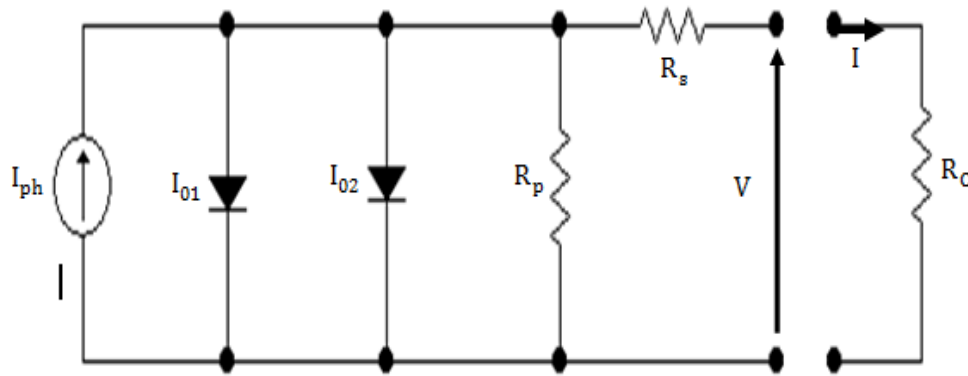


Figure III.5 : Circuit équivalent du modèle à deux diodes d'une cellule photovoltaïque [43].

La description de la caractéristique courant-tension $I(V)$ en concordance avec le modèle à deux diodes est :

$$I(V) = I_{ph} - I_{01} \left[\exp\left(\frac{e|V+IR_s|}{n_{01}k_B T}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp\left(\frac{e|V+IR_s|}{n_{02}k_B T}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (\text{III} - 18)$$

Où :

La première diode modélise la diffusion des porteurs de charge dans la base et l'émetteur de la cellule photovoltaïque. Le courant de saturation I_{01} traduit la recombinaison dans le volume des régions quasi-neutres et sur les deux surfaces arrière et avant ; il dépend des longueurs de diffusion des porteurs et des niveaux de dopage. Son facteur d'idéalité n_{01} vaut 1.

La deuxième diode modélise la génération et la recombinaison des porteurs de charge dans la zone de charge d'espace. Le courant de saturation I_{02} détermine les pertes par recombinaison via les centres de défauts situés dans la ZCE. Son facteur d'idéalité n_{02} varie en fonction de la nature, de la densité et de la distribution des défauts dans la ZCE [43]. n_{02} peut avoir l'une des valeurs suivantes :

- ($n_{02} = 1$) : la zone de charge d'espace est dépeuplée (cas idéal)
- ($1 < n_{02} < 2$) : le niveau piège est peu profond dans la zone de charge d'espace et dépend de la polarisation.
- ($n_{02} = 2$) : les centres de recombinaison sont distribués uniformément dans la zone de charge d'espace et sur un seul niveau au milieu de la bande interdite.
- ($2 < n_{02} < 4$) : les centres de recombinaison sont distribués de façon non uniforme avec une densité réduite au centre de la zone de charge d'espace par rapport à la surface.

La résistance série R_s est due principalement à la résistivité du matériau semi-conducteur et aux résistances des contacts métalliques. Elle doit être la plus petite possible.

La résistance parallèle R_p est connue sous le nom de résistance de court-circuit. Elle traduit la fuite des porteurs de charge les bords de la cellule photovoltaïque et la recombinaison induite par les impuretés métalliques. Celle-ci doit être vraisemblablement la plus élevée. Les deux résistances R_s et R_p sont déterminées respectivement à partir de la pente ($\partial V/\partial I$) au voisinage de V_{co} et de I_{cc} .

III-7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé les concepts physiques qui gouvernent les cellules photovoltaïques. En effet, nous avons fait passer en revue les parties constituantes d'une cellule photovoltaïque et notamment les fondements théoriques attestant son fonctionnement. Ensuite, nous avons accordé une attention particulière aux mécanismes de recombinaison des porteurs de charge minoritaires et leurs origine pour terminer avec les modèles mathématiques et les schémas électriques rendant compte des différents paramètres qui rentre en jeu lors du fonctionnement réel des dispositifs photovoltaïques.

Chapitre IV

Synthèse des résultats de la

Simulation avec le logiciel

PC1D

IV-1 Introduction

La simulation numérique ou informatique est la représentation initiative du fonctionnement d'un système ou d'un phénomène physique quelconque sans expérimentation. En raison du coût élevé de l'expérience, elle est devenue indispensable pour le développement des recherches notamment en photovoltaïque, gagnant ainsi du temps et de l'argent. Bénéficiant de l'essor remarquable de la technologie des semi-conducteurs et de la microélectronique en particulier, le développement d'outils de conception assisté par ordinateur permet de simuler une cellule solaire et d'en optimiser les paramètres physiques et technologiques préalablement à sa fabrication.

Le fonctionnement d'une cellule solaire est décrit par la résolution des équations de transport des porteurs de charges du semi-conducteur qui consiste à définir les conditions initiales et les conditions aux limites du problème ainsi que la création du domaine de simulation (maillage). En raison de la non-linéarité des modèles, la résolution du problème est souvent numérique itérative, car la résolution analytique est assez complexe sauf pour des cas plus simples.

Dans ce contexte, de nombreux programmes informatiques ont été développés au cours de ces dernières années afin de prétendre le fonctionnement des cellules solaires. Parmi eux, on cite le logiciel nommé PC1D (Personal Computer One Dimensional). Ce dernier permet la prise en compte pratiquement de tous les paramètres qui influencent les performances d'une cellule photovoltaïque à travers la caractéristique courant-tension. A partir des paramètres physiques et géométriques d'une cellule solaire à base du mono-silicium introduite dans le simulateur PC1D, l'étude des cellules solaires ainsi que le progrès de leurs performances sera l'objet de ce présent chapitre.

IV-2 Aperçu général du logiciel de simulation PC1D version 5.9

Le logiciel de simulation numérique PC1D est un programme informatique commercialisé qui résout les équations non linéaire entièrement couplées des phénomènes de transport des électrons et des trous dans les semi-conducteurs cristallins utilisés comme des matériaux de base des cellules photovoltaïques. Il a été développé au centre de recherche de micro-électronique de l'université « New South Wales de Sydney » en Australie en 1985 [44]. Il permet de simuler n'importe quelle structure photovoltaïque et d'approcher les résultats expérimentaux sous des gains de temps et d'argent considérés faibles [45].

La fenêtre principale du logiciel PC1D est donnée en figure IV.1. Elle comporte cinq parties énumérées sur la figure. Les trois premières sont destinées à la programmation où on peut introduire les paramètres non seulement des régions qui composent le dispositif mais aussi ceux de l'environnement où il se trouve en particulier l'excitation lumineuse et la température. La quatrième partie est utilisée pour dévoiler les résultats de la simulation. Une cinquième partie nommée « device schematic » donne un aperçu de la structure du dispositif qui change simultanément avec la variation de ses paramètres.

a. Paramètres de la partie liée au dispositif (Device)

Cette partie renferme les paramètres essentiels du dispositif. On trouve :

- Aire du dispositif : la surface du dispositif est très importante car elle influe sur le photo-courant d'une manière appréciable. Dans notre simulation nous avons choisi une surface de 100 cm².
- Texture en surface : une surface texturée est composée de micro pyramides dont les bases sont enracinées en profondeur avec un certain angle facial. La texturisation des surfaces donne lieu à une diminution importante des pertes du rayonnement incident par réflexion.
- Charges électriques en surfaces avant et arrière : les deux faces du dispositif sont considérées comme neutres, c.à.d. qu'il n'y a pas de barrière de potentielle aux surfaces.
- Réflectance optique interne : elle traduit les réflexions dites diffuse ou spéculaire du flux lumineux sur les surfaces avant et arrière du dispositif.
- L'effet des éléments qui peuvent court-circuiter le dispositif. Ils sont généralement liés aux impuretés métalliques qui peuvent se diffuser en volume du dispositif lors de son élaboration.

b. Paramètres de la région 1

C'est dans cette partie qu'on introduit les paramètres relatifs à la cellule solaire (type de matériaux utilisés, l'épaisseur, le dopage...etc.). On cite de part et d'autre :

- L'épaisseur de la cellule solaire : on y trouve les épaisseurs de la base et de l'émetteur. Ce dernier est considéré mince par rapport à la base. Dans le cas du silicium elle varie sur une dizaine de micromètres.

File: (New Parameters) 1 (able-click to add a description)

DEVICE

Device area: 1 cm²

No surface texturing

No surface charge

No Exterior Front Reflectance

No Exterior Rear Reflectance

No internal optical reflectance

Emitter contact enabled

Base contact enabled

No internal shunt element 2

REGION 1

Thickness: 10 μm

Material from program defaults

Carrier mobilities from internal model

Dielectric constant: 11.9

Band gap: 1.124 eV

Intrinsic conc. at 300 K: 1×10^{10} cm⁻³

Refractive index: 3.58

Absorption coeff. from internal model

Free carrier absorption enabled

P-type background doping: 1×10^{16} cm⁻³

No front diffusion

No rear diffusion

Bulk recombination: $\tau_n = \tau_p = 1000$ μs

No Front-surface recombination

No Rear-surface recombination 3

EXCITATION

Excitation mode: Steady State

Temperature: 300 K

Base circuit: Zero

Collector circuit: Zero

Light sources disabled 4

RESULTS

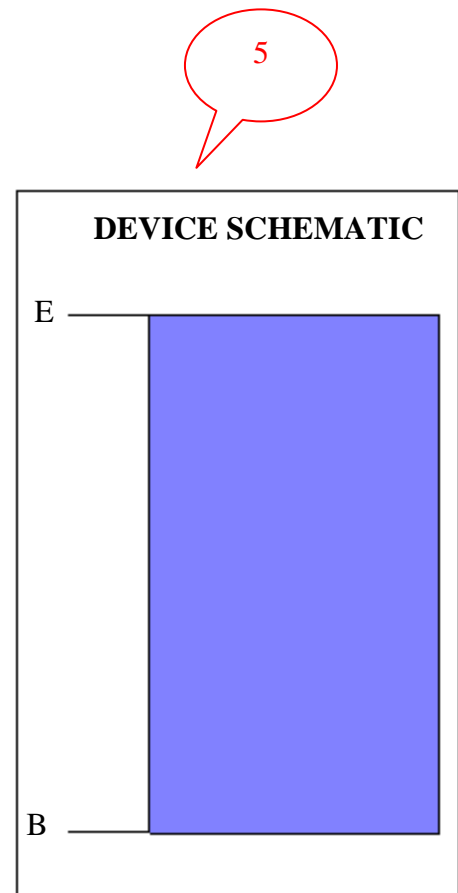


Figure IV.1 : La principale fenêtre du logiciel PC1D version 5.9.

- Le matériau utilisé pour former la cellule : des fichiers d'extension (*.mat) servent à stocker des paramètres du matériau tels que la mobilité, la constante diélectrique, l'énergie du gap (eV), la concentration intrinsèque (cm^{-3}), l'indice de réfraction, le profil, le type et la concentration du dopage.
- Les recombinaisons des porteurs de charge en volume, en faces avant et arrière de la cellule solaire.

c. Paramètres de la partie excitation

Cette partie renferme des fichiers qui rentrent dans la simulation de la caractéristique courant-tension (I-V) et autres caractéristiques comme la réponse spectrale. On y trouve également trois modes d'excitation à savoir l'excitation en mode équilibre et celles en modes transitoire et stationnaire. Aussi, la température T du milieu ambiant est arborée.

d. Partie résultats

Cette partie permet de visualiser des courbes comme celle du courant-tension (I-V) et d'extraire les valeurs des grandeurs photovoltaïques comme le courant de court-circuit I_{cc} et celle de la tension en circuit ouvert V_{co} .

e. La partie nommée « Device schematic »

Cette partie visualise la structure du dispositif photovoltaïque à simuler. Il peut changer instantanément dès qu'on fait varier les paramètres des parties liées au dispositif et à la région 1 (par exemple la modification des couleurs en fonction du type de dopage).

IV-3 Résultat de la simulation

Nous avons créé plusieurs simulations afin d'étudier l'effet des divers paramètres sur la courbe courant – tension d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin sous éclairage. La cellule de base à partir de laquelle nous avons débuté nos simulations possède une épaisseur de 300 μm et une surface de 100 cm^2 . Les autres données de la dite cellule sont montrées sur la figure IV.2.

La courbe courant-tension qui découle de la cellule de base, après simulation, est donnée en figure IV.3. Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à une cellule photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension (I-V). Une cellule photovoltaïque est donc à considérer comme une source de puissance. On s'aperçoit

alors de l'existence d'un point P_{Max} où la puissance se trouve être maximale. Il est sans aucun doute intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée.

File: C:\Users\madi\Desktop\mémoire master 2018\PC1D5\Pvcell.prm. This is a PC1D test problem. It is a 100cm^2 silicon solar cell with parameters typical of low-cost commercial products, including series resistance and shunt conductance. It has a shallow diffused emitter that has been pyramidally textured. The front reflectance is 10% across the solar spectrum. **DEVICE**

Device area: 100 cm^2
 Front surface texture depth: $3\text{ }\mu\text{m}$
No surface charge Exterior
 Front Reflectance: 10%
No Exterior Rear Reflectance
 Internal optical reflectance enabled
 Front surface optically rough
 Emitter contact enabled
 Base contact: $0.015\text{ }\Omega$
 Internal conductor: 0.3 S
REGION 1
 Thickness: $300\text{ }\mu\text{m}$
 Material from si.mat
 Carrier mobilities from internal model
 Dielectric constant: 11.9
 Band gap: 1.124 eV
 Intrinsic conc. at 300 K: $1 \times 10^{10}\text{ cm}^{-3}$
 Refractive index from si.inr
 Absorption coeff. from si300.abs
 Free carrier absorption enabled
 P-type background doping: $1.513 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$
 1st front diff.: N-type, $2.87 \times 10^{20}\text{ cm}^{-3}$ peak
No 2nd front diffusion
No rear diffusion
 Bulk recombination: $\tau_n = \tau_p = 7.208\text{ }\mu\text{s}$
 Front-surface recom.: $S_n = S_p = 1 \times 10^6\text{ cm/s}$
 Rear-surface recom.: $S_n = S_p = 1 \times 10^5$
EXCITATION
 Excitation from one-sun.exc
 Excitation mode: Transient, 16 timesteps
 Temperature: 25°C
 Base circuit: Sweep from -0.8 to 0.8 V
Collector circuit: Zero
 Primary light source enabled
 Constant intensity: 0.1 Wcm^{-2}
RESULTS

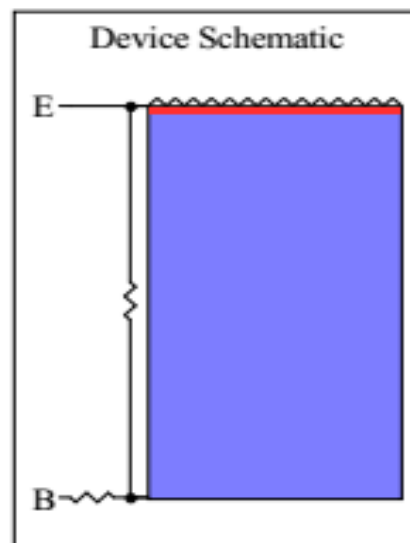


Figure IV. 2 : Fenêtre du logiciel PC1D dévoilant les paramètres de la cellule solaire de base utilisée pour la simulation

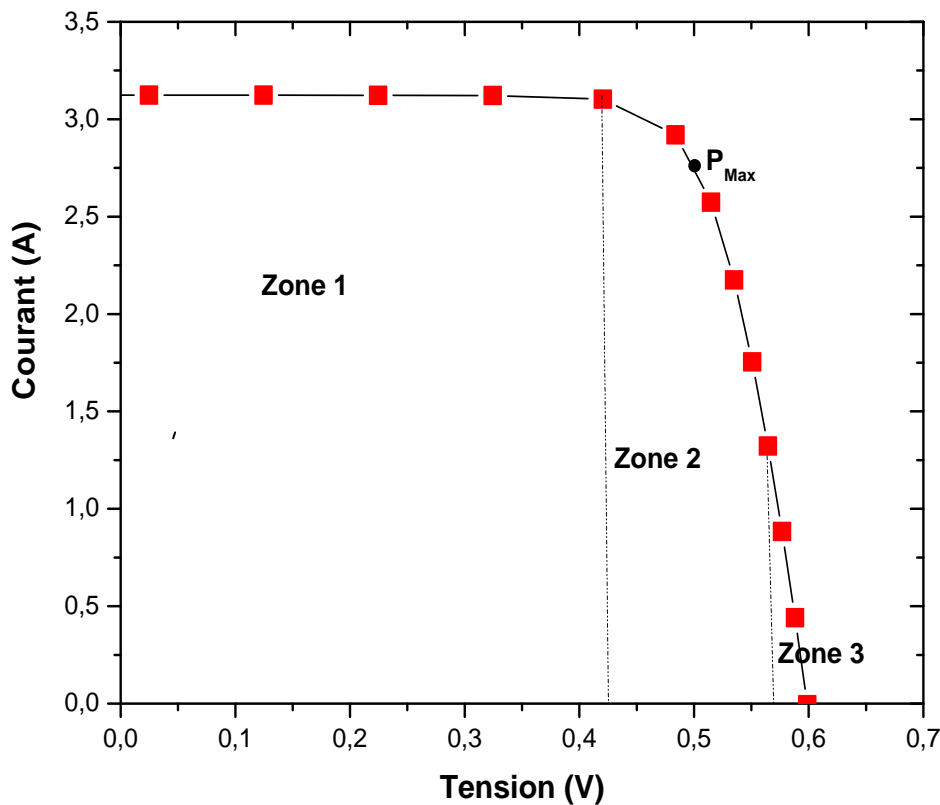


Figure IV.3 : Courbe I-V découlant de la simulation avec le logiciel PC1D de la cellule solaire de base en silicium monocristallin sous éclairement à $T = 25^{\circ}\text{C}$.

La courbe I-V de la figure IV.3 peut être décomposée en 3 zones :

- Zone 1 : le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- Zone 2 : elle correspond au coude de la caractéristique. Elle est la région intermédiaire entre les zones 1 et 3. Elle représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- Zone 3 : elle se distingue par une variation du courant correspondant à une tension presque constante. Dans ce cas, le générateur est assimilé à un générateur de tension.

Afin d'atteindre des rendements photovoltaïques élevés, il est important de prendre en compte les paramètres les plus significatifs lors de l'élaboration des cellules solaires et ceux liés aux conditions climatiques. Pour cela, la suite de ce chapitre est consacrée à l'étude et l'analyse de l'effet de divers paramètres sur la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire en mono-silicium sous éclairement. Pour ce faire, nous allons maintenir les mêmes

paramètres de la cellule de base de la figure IV.2 et nous allons faire varier à chaque fois un seul paramètre afin de mieux examiner son effet sur la caractéristique I-V.

A. Effet de l'éclairement

La caractéristique I-V donnée sur la figure (IV.3) est obtenue pour un ensoleillement de référence de 0.1 W/cm^2 et a une température de 25°C . L'éclairement et la température de la cellule vont modifier cette caractéristique non seulement dans sa forme générale mais aussi pour les valeurs du courant de court-circuit I_{cc} , de la tension en circuit ouvert V_{co} et la puissance maximale P_{Max} .

Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température ambiante à 25°C et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante pour découvrir son influence. Les caractéristiques I-V de la figure IV.4 montre bien la variation importante du courant I_{cc} de la cellule photovoltaïque comparée à celle de la tension V_{co} pour différent niveaux d'éclairement. En effet, à fur et à mesure que l'éclairement diminue, une forte diminution du courant est bien confrontée avec une faible variation de la tension. En conséquence, l'éclairement est un paramètre indispensable à prendre en compte pour une conversion photovoltaïque considérable.

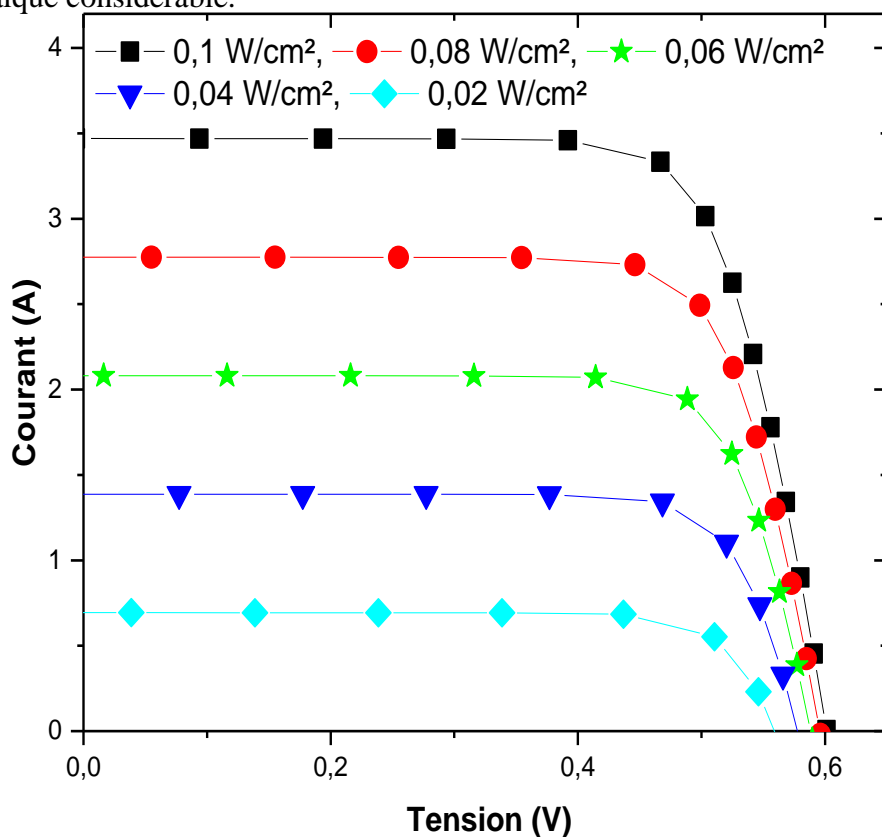


Figure IV.4 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin à $T = 25^\circ\text{C}$.

B. Effet de la température

Pour différentes valeurs de température (T) allant de 25°C jusqu'à 45°C et un éclairement de 0.1 W/cm^2 , nous avons procédé à analyser les courbes I-V découlant de la simulation. Les résultats sont donnés en figure IV.5. On constate clairement que lorsque la température de la cellule croît, la tension de circuit ouvert V_{co} décroît fortement. Néanmoins, le courant de court circuit I_{cc} croît légèrement avec la température.

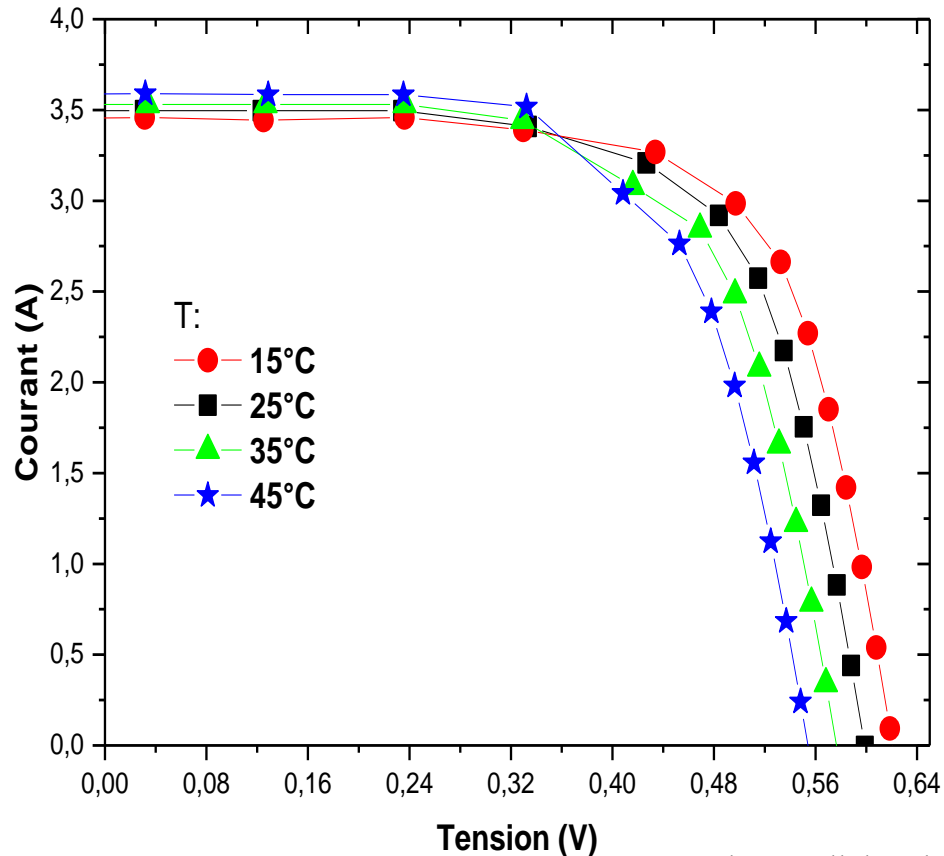


Figure IV.5 : Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin.

A. Effet de la texture de la face avant de la cellule solaire

Le principe de la texturation consiste à diminuer le pourcentage de la lumière réfléchi par la face avant du silicium. En pratique, la texturation est réalisée par une gravure chimique de la face éclairée sous forme de V. La figure IV.6 montre l'effet de la texturation de la face avant de la cellule solaire sous éclairement sur la caractéristique I-V à $T=25^{\circ}\text{C}$ et un éclairement de 0.1 W/cm^2 . On remarque qu'une cellule texturée donne lieu à un courant électrique nettement plus élevée que celui délivré par une cellule solaire non texturée tandis que la tension se trouve paisiblement invariable. Ce constat se trouve aussi valable pour une forte texturation.

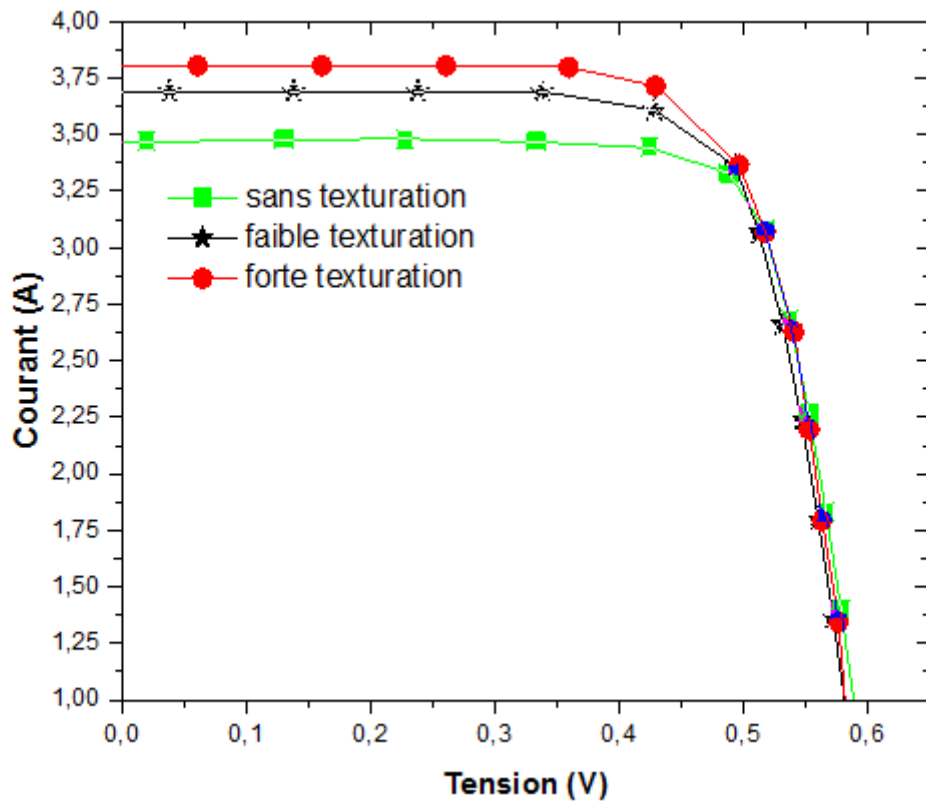


Figure IV.6 : Effet de la texture de la face avant d'une cellule solaire en mono-silicium sur la caractéristique I-V sous un éclairage de 0.1W/cm^2 et une température de 25°C .

B. Effet du niveau de dopage du lingot de silicium monocristallin

Le silicium intrinsèque (dépourvu de toutes impuretés susceptibles de modifier la densité des porteurs libres) a sa bande de valence presque totalement pleine et sa bande de conduction presque totalement vide. Dans cet état, c'est un piètre conducteur électrique. En fait, on peut affirmer qu'à température ambiante, il est quasiment un isolant. C'est pourquoi on a recours à une étape technologique indispensable à la conception des composants électroniques : le dopage. Le procédé de dopage consiste en l'introduction contrôlée des atomes dopants de type accepteurs et de concentration N_A dans le silicium pour obtenir un lingot de silicium monocristallin de type p. Sur ce dernier, on réalise une diffusion thermique des atomes donneurs de concentration N_D afin de créer la jonction PN. Ces éléments dopants vont introduire des porteurs de charges libres qui vont pouvoir améliorer les propriétés électriques du semi-conducteur mais néanmoins sans altérer ses propriétés optiques et sans développer le phénomène de recombinaison Auger. Dans cette partie de notre étude, l'effet du niveau de dopage N_A en volume du lingot de silicium sur la caractéristique courant – tension d'une cellule solaire à base du silicium monocristallin est donné à la figure IV.7. On remarque clairement qu'à fur et à mesure que le niveau du dopage N_A augmente, le courant de

court-circuit diminue et la tension en circuit ouvert reste inchangée. De plus, la diminution de I_{cc} devient plus prononcée dès que le niveau de dopage atteint 10^{17} atomes. cm^{-3} comparée à l'ordre de grandeur 10^{16} où la variation est minimale.

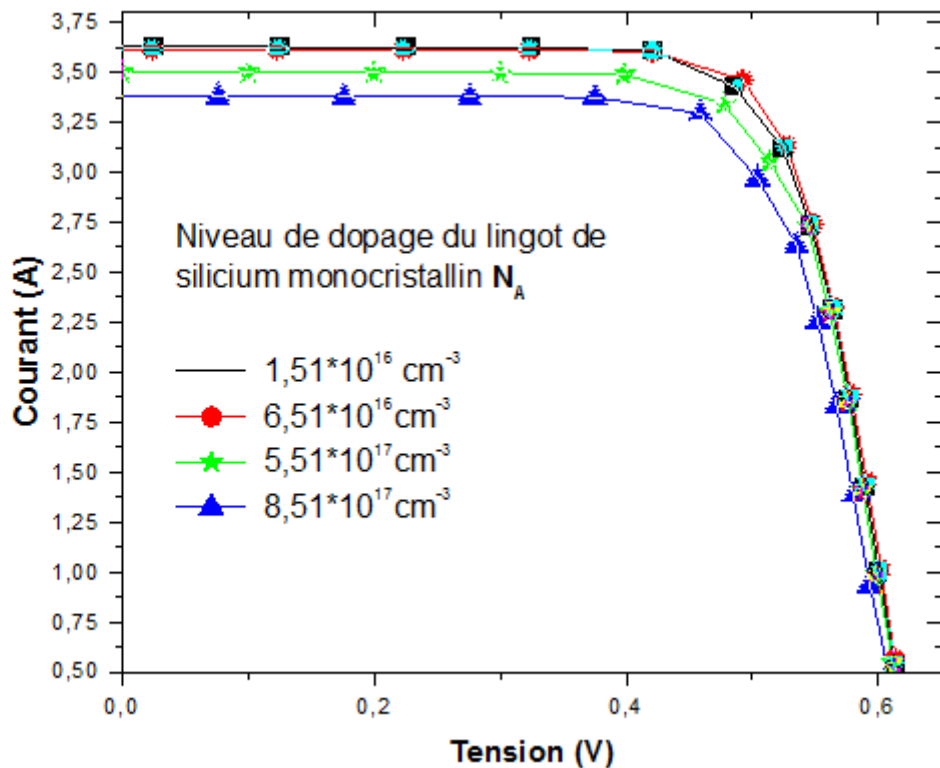


Figure IV.7 : Effet du niveau de dopage en surface avant d'une cellule solaire à base du mono-silicium sur la caractéristique I-V à $T=25^\circ\text{C}$, un éclairement de $0.1\text{W}/\text{cm}^2$ et une forte texturation de la face avant.

C. Effet de l'épaisseur du lingot du silicium monocristallin

Parmi les matériaux utilisés pour les applications photovoltaïques, le silicium monocristallin se distingue d'un point de vue optique par un coefficient d'absorption bien plus faible comparée au silicium amorphe où quelques microns d'épaisseur suffisent pour absorber l'essentiel du spectre solaire. En conséquence, l'utilisation du mono-silicium nécessite des épaisseurs bien plus importantes typiquement supérieures à $400 \mu\text{m}$ pour des cellules solaires commerciales [46].

La figure IV.8 reflète l'effet de l'épaisseur e du lingot de silicium monocristallin sur la caractéristique courant – tension d'une cellule solaire sous éclairement. On peut voir que la variation de e de 100 à $900 \mu\text{m}$ entraîne une augmentation simultanée du courant et de la

tension délivrés par la cellule. Une telle augmentation est plus remarquable sur les valeurs du courant de court circuit comparée à celles de la tension ouvert.

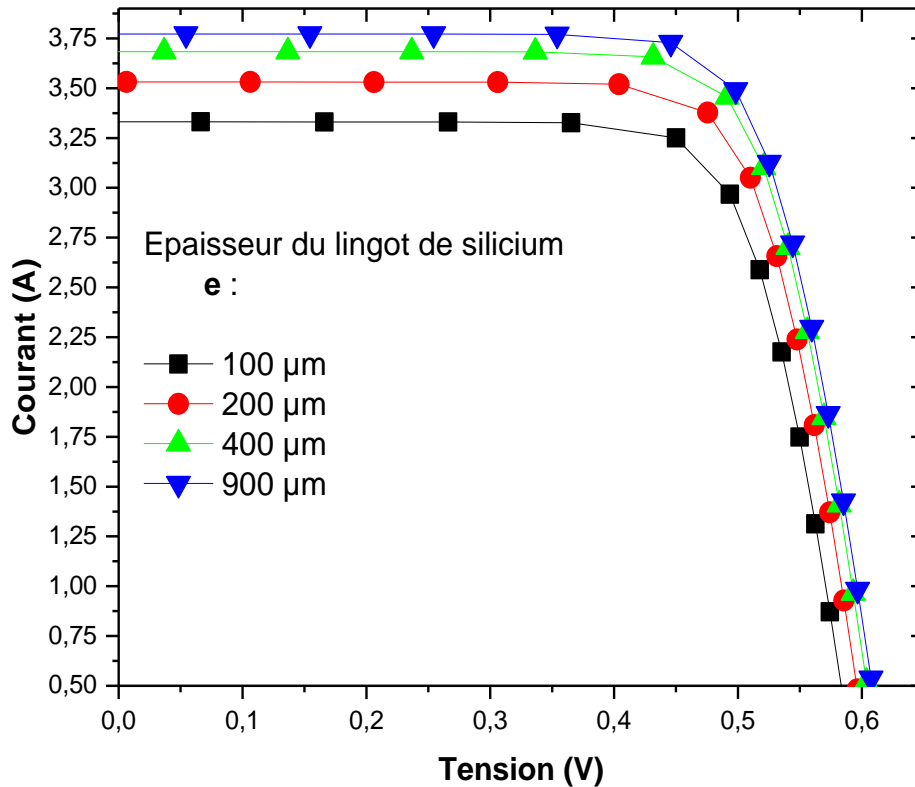


Figure IV.8 : Effet de l'épaisseur du lingot de silicium monocristallin sur la caractéristique courant –tension d'une cellule solaire à $T = 25^{\circ}\text{C}$, un éclairement de $0.1\text{W}/\text{cm}^2$, $N_A = 1.51 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et une forte texturation de la face avant.

D. Effet de la durée de vie des porteurs de charge libres en volume de la cellule solaire

Le transport des porteurs minoritaires dans une cellule photovoltaïque est habituellement décrit par une caractéristique appelée durée de vie τ . Sous éclairement, les électrons excédentaires générés diffusent dans le volume du silicium de type p pour parcourir une distance moyenne L_n qui lui correspond un temps moyen τ_n avant qu'ils ne soient recombinés. En conséquence, la durée de vie des porteurs de charges libres (τ_n pour les électrons et τ_p pour les trous) est parfaitement appropriée pour l'appréciation des pertes par recombinaison dans une cellule photovoltaïque.

En observant la caractéristique courant-tension de la figure IV.9 issue de la simulation d'une cellule solaire en mono silicium sous éclairement, nous constatons qu'à fur et à mesure que la durée de vie des porteurs de charges libres augmente se traduit par une amélioration des propriétés électrique de la cellule. En effet, une croissance nettement des valeurs du

courant de court circuit et celles de la tension en circuit-ouvert au détriment d'un taux de recombinaison des porteurs de charge faible.

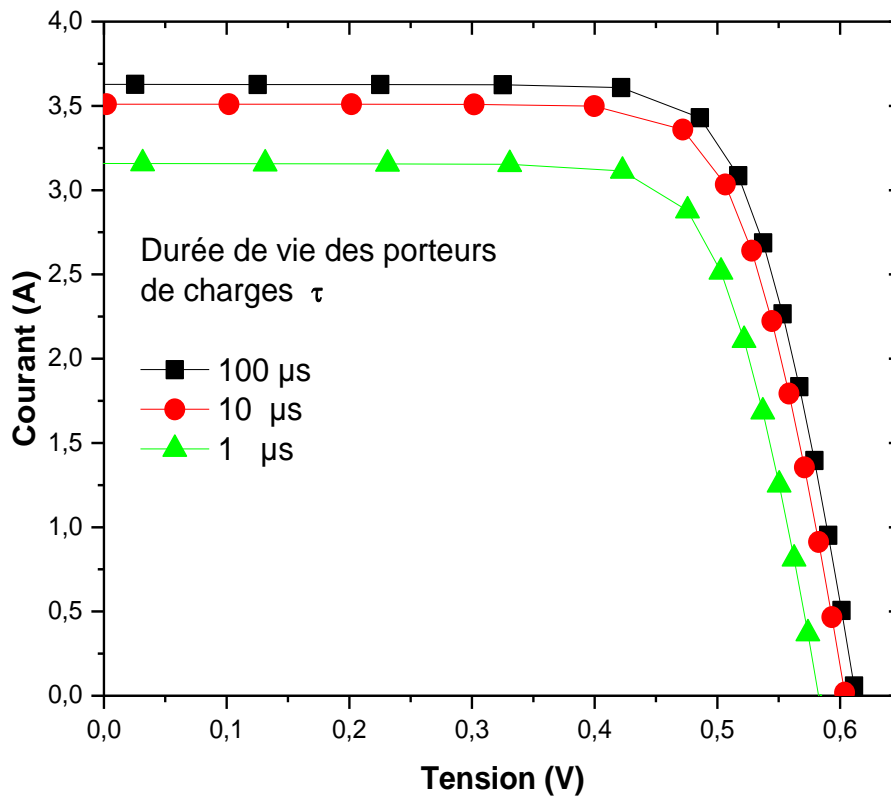


Figure IV.9 : Influence de la durée de vie des porteurs de charge libres en volume d'un lingot de silicium monocristallin d'épaisseur 300 μm sur la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire sous éclairage à $T = 25^{\circ}C$, un éclairage de $0.1 W/cm^2$, $N_A = 1.51 \times 10^{16} cm^{-3}$ et une forte texturation de la face avant.

IV-4 Discussion des résultats obtenus

Dans la suite de ce paragraphe, nous allons tenter d'expliquer les résultats issus de nos simulations avec le logiciel PC1D dont la cellule photovoltaïque est en silicium monocristallin. Bien évidemment, ceci ne peut se faire qu'à travers une comparaison entre les résultats issus de la cellule de base décrite en figure IV.3 avec ceux issus de l'effet de chaque paramètre et progressivement nous allons tirer des conclusions sur les paramètres les plus significatifs à prendre en compte lors de l'élaboration des cellules solaires et notamment ceux liés aux conditions climatiques.

Nous débuterons par l'effet de l'éclairage où nous avons constaté que l'augmentation de la densité du flux lumineux qui arrive sur la surface éclairée de la cellule donne lieu à un déplacement de la caractéristique I-V suivant l'axe des courants alors que la tension en circuit ouvert reste peu sensible à cette perturbation. Ceci s'explique simplement par le fait que

l'éclairement est responsable du taux de génération des porteurs de charge libres au sein de la cellule solaire et que la relation du courant avec l'éclairement est linéaire tandis que celle de la tension en circuit-ouvert est logarithmique (voir les relations III-14 et III-15 du chapitre III). Nous avons également constaté que la croissance de la température de fonctionnement de la cellule donne lieu à une amélioration légère du courant tandis qu'il dégrade la tension délivrée par la cellule. Ce comportement s'explique comme suit : si la température de la cellule augmente, le taux de génération des porteurs de charge libres augmente à cause de la diminution de la largeur de la bande interdite E_g du semi-conducteur qui à son tour favorise le passage facile des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction. Néanmoins, une baisse de la largeur de E_g entraîne une diminution de la tension en circuit ouvert à cause de l'augmentation du courant de saturation de la diode I_0 qui à son tour croît exponentiellement avec T et avec la concentration des porteurs minoritaires générés par l'agitation thermique. Egalement, la diminution du pourcentage de la lumière réfléchi par la face avant du silicium monocristallin engendre des taux de génération de porteurs de charge libres datant plus élevés que la surface est fortement texturée, ce qui donne lieu à une amélioration du courant électrique délivré par la cellule solaire.

Pour l'effet du niveau de dopage du lingot de silicium monocristallin avec des atomes accepteurs, nous avons enregistré que son augmentation affecte négativement les performances de la cellule solaire. Cela peut s'exprimer par le fait que l'élévation du niveau de dopage N_A à partir d'une certaine valeur donne lieu à des vitesses de recombinaison Auger élevées des porteurs de charge libres dans la cellule solaire au lieu d'améliorer ses propriétés électriques. Aussi, l'épaisseur du lingot de silicium est un facteur important à considérer car il est le siège de la génération des porteurs de charge libres. En effet, à fur et à mesure que son épaisseur augmente, la densité des porteurs de charge générée par la lumière augmente et tant que la durée de vie de ses porteurs est assez élevée pour qu'ils atteignent le circuit externe, on constatera une amélioration de la puissance électrique délivrée par la cellule solaire. Dans le cas contraire où la durée de vie des porteurs photogénérés est courte, on aura une dégradation du courant et de la tension délivrés par la cellule solaire ; ce qui est en bonne concordance avec les résultats obtenus aux figures IV.8 et IV.9.

IV-5 Conclusion

Dans cette partie de ce mémoire, nous avons exécuté une simulation d'une cellule solaire en mono-silicium sous éclairage grâce au logiciel PC1D où nous avons constaté que les paramètres climatique et technologique ont un impact important sur son efficacité de

convertir l'énergie solaire en énergie électrique. Les résultats conclus de notre étude citent l'importance de se mettre sous un éclairement élevé mais néanmoins à une température de fonctionnement de la cellule solaire proche de celle de l'ordinaire. Également, la mise en œuvre d'une cellule solaire impose qu'il faut d'abord prendre en considération la méthode d'élaboration du silicium monocristallin afin de minimiser la densité des défauts au sein du matériau semi-conducteur et par la suite contrôler son niveau de dopage. Ces deux derniers facteurs peuvent donner lieu à des pertes considérables de porteurs de charge photogénérés dus aux phénomènes de recombinaison. Enfin, un choix adéquat de l'épaisseur du silicium monocristallin est nécessaire pour ne pas altérer la durée de vie des porteurs minoritaires dans le dispositif photovoltaïque. Aussi, il est à signaler la nécessité de minimiser les pertes optiques que ce soit à travers une texturation de la face éclairée de la cellule ou probablement avec l'ajout d'une couche antireflet afin de ne pas perturber ses propriétés cristallographiques.

Conclusion générale

Ce travail est destiné à contribuer à l'évaluation de l'impact des paramètres relatifs à l'environnement et à la technologie de fabrication des cellules solaires en mono silicium sur la conversion photovoltaïque à travers l'analyse de la caractéristique courant – tension issue du logiciel de simulation PC1D.

Après un rappel des principales notions du rayonnement solaire, des propriétés cristallographiques, optiques et électriques du silicium monocristallin et les notions de base qui soutiennent la conversion photovoltaïque, à savoir le fonctionnement et les caractéristiques principales des cellules solaires, nous avons défini dans l'environnement de PC1D des données relatives à une cellule de référence pour laquelle tout changements de paramètre donne lieu à une variation de la caractéristique courant – tension, qui découle après simulation, suivant les axes de courant et/ou de tension.

De l'ensemble des résultats issus de ce travail, nous pouvons confirmer ce qui suit :

- L'éclairement est un paramètre important puisque sa variation contamine le courant électrique par une augmentation ou une diminution très significative. La température aussi affecte l'efficacité d'une cellule solaire à convertir l'énergie solaire en électrique et en général, il faut que la température de son environnement soit autour de celle de l'ordinaire.
- La texturation de la face éclairée améliore d'avantage le courant électrique délivrée par une cellule solaire et pour cela on peut prédire que l'ajout d'une couche antireflet est probablement mieux recommandé dans le but d'élever le rendement photovoltaïque sans affecter les propriétés cristallographiques de la surface.
- Le niveau du dopage du lingot de silicium est aussi un paramètre à surveiller puisque le matériau est le siège de la conversion photovoltaïque qui peut être affecté par son niveau de dopage à travers les pertes de porteurs de charge libres suite au phénomène de recombinaison. Par ailleurs, l'élévation de l'épaisseur du lingot de silicium renforce le rendement photovoltaïque non seulement à travers l'agrandissement du volume dédié à la création des paires électron-trou mais probablement avec la réduction de la vitesse de recombinaison Auger suite à la diminution du niveau de dopage en sein de la cellule solaire. Enfin, une durée de vie des porteurs minoritaires d'autant plus importante se traduit par un

rendement photovoltaïque de plus en plus appréciable. En pratique, ce constat traduit des dopages optimaux du silicium monocristallin et d'une passivation efficace des défauts que ce soit en volume ou en surface de la cellule solaire.

Références bibliographique

- [1] www.wikipedia.dz
- [2] M. Ansoumane Camara «Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateur » thèse de doctorat, université paris est créteil 2011
- [3] S .Souad « Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire »Mémoire magistère en physique, Université Mentouri Constantine 2010.
- [4] J, Bonal; P, Rossetti. Les énergies alternatives, Omniscience. (2007).
- [5] k. Helali « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative » Mémoire Magister en électrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2012.
- [6] Revue mensuelle de l'Armée Nationale Populaire, Etablissement des publications militaires El Djeich, N° 560, EPM Alger, (Algérie) 2010.
- [7] C. Carreau, M. Dufour, M. Gibilisco, « les énergies renouvelables dans l'habitat », Revue de l'habitat de France, (France) 2001.
- [8] M. Mouhamed « Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique en Algérie » Mémoire Magister en génie mécanique, Université Hassiba Benbouali de chelef 2011.
- [9] B.Mohammed « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome », Centre universitaire de Bechar, 2008.
- [10] A.Kettaf.W.Ladj « Analyse avec le logiciel de simulation PC1D de l'effet des paramètres liés à la région de l'émetteur sur le rendement photovoltaïque d'une cellule solaire à base de silicium» Mémoire master en physique des matériaux et nanomatériaux, Université Akli mohand oulhadj Bouira 2017
- [11]Y. Marouf, « Modélisation des cellules Solaires un InGan en utilisant Atlas silvaco» Mémoire de Magister en Electronique, Université Mouhamed Khider- Biskra 2013.
- [12] M. Orgeret, « Les piles solaires : le composant et ses applications» Ed. Masson: p. 8-20, Paris, (France) 1985.
- [13] C. Carreau, M. Dufour, M. Gibilisco, « les énergies renouvelables dans l'habitat », Revue de l'habitat de France, (France) 2001.

- [14] M. SZE, « Physics of semiconductor devices », 3^{ème} Ed. Wiley, New York, (U.S.A.) 1997.
- [15] F.Z.Kessaissia « Characterization de module photovoltaïque de différentes technologies » Memoir de Magister en électronique, Université Hassiba Benbouali de Chelf 2013.
- [16] S. Bentouba, A. Slimani et M.S. Boucherit, " Le pompage photovoltaïque : un outil de développement des régions du sud d'Algérie", Revue des énergies renouvelables CER'07, Oujda, pp. 109-112, 2007
- [17] B. Chikh-Bled, I. Sari-Ali, B. Benyoucef, " Méthode de dimensionnement optimal d'une installation photovoltaïque", Revue internationale d'héliotechnique, N° 41, pp. 24-30, 2010.
- [18] www.cder.dz
- [19] M. Madani, "Réalisation des couches antireflets dans les cellules solaires à couches minces ", Mémoire de magister, Université de Tlemcen, 2006.
- [20] F. Jay « Nouveau substrats de silicium cristallin destinés aux cellules photovoltaïque à haut rendement – cas du silicium thermiques liés à l'oxygène pour les cellules à hétérojonction de silicium», these de doctorat, Université Grenoble alpes 2016.
- [21] F. Shimura, Crystals defects in, semiconductor silicon crystal technology, Academic press, INC. (1989) pp.54-77, DOI: 10.1016/B978-0-12-640045-8.50007-0
- [22] E. Scheil, Z. Metallk. (1942) 34, 70
- [23] Y. Yatsurugi, N. Akiyama, Y. Endo, T. Nozaki, Concentration, solubility, and equilibrium distribution coefficient of nitrogen and oxygen in semiconductor silicon, Journal of electrochemical society (1973) 120, 7, pp.975-979
- [24] J. R. Carruthers, K. Nassau, Non mixing Cells due to Crucible Rotation during Czochralski Crystal Growth, Journal of Applied Physics (1968) 39, pp.5205-5214, DOI: 10.1063/1.1655943
- [25] J. C. Chen, Y. Y. Teng, W. T. Wun, C. W. Lu, H. Chen, C. Y. Chen, W. C. Lan, Numerical simulation of oxygen transport during the CZ silicon crystal growth process, Journal of Crystal Growth (2011) 318, pp.318–323, DOI:10.1016/j.jcrysgr.2010.11.145
- [26] W. Lin, D. W. Hill, Oxygen ségrégations in Czochralski silicon growth, Journal of Applied Physics (1983) 54, 1082 (1983); doi: 10.1063/1.332115
- [27] N. Machida, Y. Suzuki, K. Abe, N. Ono, M. Kida, Y. Shimizu, The effects of argon Gas flow rate and furnace pressure on oxygen concentration in Czochralski-grown silicon crystals, Journal of Crystal Growth (1998)186, pp.362-368
- [28] T. Carlberg, T. B. King, A. F. Witt, Dynamic oxygen equilibrium in silicon melts during crystal growth by the Czochralski Technique, journal of electrochemical society (1982) 189, 1, pp.189-193.

- [29] S. Maeda, K. Terashima, Macroscopic Uniformity of Oxygen concentration in Czochralski Silicon Crystals Closely Related to Evaporation of SiO from the Free Surface of Melts, *Journal of The Electrochemical Society* (2003) 150, 5, pp. G319-G326, DOI: 10.1149/1.1566023
- [30] U. Gösele, T.Y. Tan, Oxygen diffusion and thermal donor formation in silicon, *Applied Physics A* (1982) 28, pp.79-92, DOI : 10.1007/BF00617135
- [31] G. Pensl, M. Schulz, K. Hölzlein, W. Bergholz, J. L. Hutchison, New Oxygen Donors in Silicon, *Applied Physics A : solids and surfaces* (1989) A 48, pp.49-57, DOI : 10.1007/BF00617763
- [32] B. G. Gribov, K. V. Zinoviev, Preparation of high-purity silicon for solar cells, *Inorganic Materials* (2003) 39, 7, pp. 653–662, DOI: 10.1023/A:1024553420534
- [33] B. Cecceroli, O. Lohne, Solar grade silicon feedstock, in *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2nd edition (ed A. Luque, S. Hegedus), John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK (2011) pp.161-163, DOI: 10.1002/9780470974704
- [34] B. Cecceroli, S. Pizzini, Processes, in *Advanced Silicon Materials for Photovoltaic Applications* (ed S. Pizzini), John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, DOI: 10.1002/9781118312193.ch2
- [35] P. Woditsch, W. Koch, Solar grade silicon feedstock supply for PV Industry, *Solar Energy Materials & Solar Cells* (2002) 72, pp.11–26, DOI: 10.1016/S0927-0248(01)00146-5
- [36] A.Nadri « Modélisation de la microstructure des grains dans le silicium multicristallin pour le photovoltaïque, Université de Grenoble 2012
- [37] H. Mathieu, « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », 5^{ème} Ed. Masson, Paris, (France) 1998.
- [38] M. SZE, « Physics of semiconductor devices », 3^{ème} Ed. Wiley, New York, (U.S.A.) 1997.
- [39] F. Schuurmans, « Surface passivation of silicon by PECVD silicon nitride », Doctorat Thesis, University of Utrecht, (Utrecht) 1989. A.Nadri « Modélisation de la microstructure des grains dans le silicium multicristallin pour le photovoltaïque, Université de Grenoble
- [40] K. M. John, « Surface, emitter and bulk recombination in silicon and development of silicon nitride passivated solar cells », Doctorat Thesis, The Australian National University, p. 228, (Australie) 2002.
- [41] J. Dziewior and W. Schmid, *Appl. Phys. Lett.* 31 (5), 346 (1978).
- [42] W. Shockley and W.T. Read, *Phys. Rev.* 87, 835 (1952).
- [43] D. S. H. Chan, J. C. H. Phang, *IEEE-TED ED-34*, 286 (1987).

[44] P. A. Basore et al., "PC-1D version 2: Enhanced numerical solar cell modelling"., IEEE Photovoltaic Specialists Conf., (1988), 389.

[45] N. Bedda, « Etude des propriétés physiques des semi-conducteurs : simulation des cellules solaires à base de Si et GaAs », Université El-Hadj Lakhder de Batna, (Algérie) 2011.

[46] S. Bourdais "Etude du Dépôt et des Propriétés Physiques du Silicium Polycristallin obtenu par le procédé RTCVD sur Substrats de Mullite. Application aux Cellules Photovoltaïques en Couches Minces" Thèse de Doctorat - Université Louis Pasteur de Strasbourg (2000).

Résumé

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale. Différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule solaire. Elles sont dues, dans la plus part des cas, à la nature et aux propriétés du matériau semi-conducteur ainsi que à la technologie de fabrication de la cellule solaire et l'excitation de son environnement d'activité. L'objectif de ce travail est de contribuer à l'évaluation de l'impact des paramètres relatifs à l'environnement et à la technologie de fabrication des cellules solaires en monosilicium sur la conversion photovoltaïque à travers l'analyse de la caractéristique courant – tension issue du logiciel de simulation PC1D. Les résultats conclus de notre étude citent l'importance de se mettre sous un éclairage élevé avec texturation de la face éclairée mais néanmoins à une température de fonctionnement de la cellule solaire proche de celle de l'ordinaire. Aussi, la mise en œuvre de la cellule pour un bon rendement photovoltaïque impose qu'il faut prendre en considération la méthode d'élaboration du silicium monocristallin et le contrôle efficace de l'épaisseur et du niveau de dopage.

Abstract

In practice, the conversion of light energy into electrical energy is not total. Different losses influence the performance of solar cell. They are due, in most cases, to the nature and properties of the semiconductor material as well as to the manufacturing technology of the solar cell with the excitation of its activity environment. The objective of this work is to contribute to the evaluation of the impact of the parameters related to the environment and to the manufacturing technology of monocrystalline silicon based solar cells on the photovoltaic conversion through the analysis of the current-voltage characteristic from the PC1D simulation software. The results concluded from our study state the importance of setting under a high illumination condition with texturing of the illuminated face but nevertheless the temperature environment of the solar cell has to be close to that of the ordinary. Also, the achievement of the cell for a high photovoltaic performance requires that we must consider the method of development of monocrystalline silicon and the effective control of the thickness and doping level.

ملخص

من الناحية العملية، فإن تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية ليس كاملاً. عوامل مختلفة تؤثر على الأداء الجيد للخلايا الشمسية. هذا يعود عامة إلى خصائص مادة أشباه النواقل وكذلك تكنولوجيا التي استعملت من أجل صناعة الخلايا الشمسية وكذلك تأثير محيط توأجدها أثناء نشاطها. الهدف من هذه الدراسة هو الإسهام لتقييم تأثير العوامل المتعلقة بالبيئة و العوامل التي تخص تكنولوجيا صناعة الخلايا الشمسية على المردود الضوئي من خلال تحليل منحني التيار بدلالة الجهد وذلك باستعمال برنامج معالجة المعلومات. النتائج التي توصلنا إليها تشير إلى أهمية توفير إضاءة عالية مع العمل على تقليل نسبة الأشعة المنعكسة من وجه الخلية المضاءة زيادة إلي توفير درجة حرارة عمل الخلية قريبة من تلك العادية. أيضا ، يتطلب الأخذ بعين الاعتبار طريقة تطوير السيليكون أحادي البلورة والتحكم الفعال في مستوى السماكة ونسبة الشوائب التي تم إضافتها إلى الخلية الشمسية.