

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ – BOUIRA -  
FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES APPLIQUEES**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**



**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MASTER**

**Domaine :** Sciences de la Matière

**Filière :** Physique

**Spécialité :** Physique des Matériaux

**Thème :**

**Sélection d'émetteurs pour cellules solaires efficaces en  
silicium via des simulations PC1D**

**Réalisé par :** MOKNINE Zahira & RABHI Yassine

**Soutenu le :** 06/07/2022

**Devant le jury composé de :**

M. KHEFFACHE S.	MCB	UAMOB	Président
M. MADI D.	Prof.	UAMOB	Encadreur
Mme. MAHDID S.	MAA	UAMOB	Co-encadreur
Mlle. BOUDAUD C.	MCB	UAMOB	Examineur
M. BOUHDJER L.	MCA	UAMOB	Examineur

Année Universitaire 2021/2022

*Avant de développer notre thématique de recherche, il est opportun de commencer avec des remerciements*

*D'abord, nous remercions Dieu le Tout-Puissant, qui nous a guidé et nous a accordé la patience et le courage de mener à bien ce modeste travail et le cheminement académique dans son ensemble jusqu'au niveau de la maîtrise (Master)*

*Ensuite, nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à nos encadrants à savoir Madame MAHDID Saïda et monsieur MADI Djamel, enseignants à la Faculté des Sciences et des Sciences Appliquée (F.S.S.A.) de l'université de Bouira, pour leurs encouragements et leurs conseils précieux tout au long de la réalisation de ce travail.*

*Aussi nous tenons à adresser nos remerciements aux membres de notre jury de soutenance :*

- Monsieur KHEFFACHE S. d'avoir présider le jury de notre soutenance,*
- Monsieur BOUHDJER L. et Melle BOUDAOU D. d'avoir aimablement accepté de prendre part au jury en tant qu'examineurs.*

*Egalement, nous exprimons notre gratitude à l'ensemble des enseignants du Département de Physique qui nous ont fait bénéficier de leurs connaissances et de leurs savoirs.*

*Enfin, nos vifs remerciements et reconnaissances sont exprimés envers nos parents, nos sœurs, nos frères et tous les membres de nos familles qui n'ont ménagé aucun effort pour nous soutenir.*

***Je dédie ce travail***

***A mes parents pour leurs amour, leurs  
encouragements et leurs sacrifices***

***A mes chères sœurs et mon cher frère***

***A tous les membres de ma famille***

***A mon ami Azeddine et tous mes amies et mes  
collègues***

***Et tous ceux qui m'aiment***

***Yassine RABHJ***

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail*

*A ma mère **Houria** pour son amour, ses  
encouragements et ses sacrifices*

*A mon père **Ali** pour son soutien, son affection et la  
confiance qu'il m'a accordé*

*A mes chères sœurs et mon cher frère pour leur  
encouragement permanent et leur soutien moral*

*A tous les membres de ma famille*

*A tous mes amies et mes collègues*

*Et tous ceux qui m'aiment*

*zahira*

## ملخص

الطريقة الأكثر جاذبية لتلبية متطلبات الطاقة هي من خلال قطاع الطاقة الكهروضوئية. هذا التحول المباشر للطاقة الشمسية إلى كهرباء يكون عبر خلية شمسية. يتم تقديم هذه الأخيرة على أنها تجاور لمنطقتين، واحدة مشحونة سلباً، تسمى الباعث، والأخرى ذات شحنة موجبة، تسمى القاعدة. من خلال تعريض سطح الباعث للشمس، يولد جزء من الفوتونات الممتصة شحنات كهربائية حرة في مناطق مختلفة من الخلية. إلا أنه قد تم التأكيد على أن خصائص الباعث تؤثر بشكل كبير على أداء الخلية الشمسية المصنوعة من السليسيوم أحادي البلورة. بالتالي، فإن التحليل العميق لتأثير نسبة الشوائب في الباعث وسمكه و معدل انعكاس الضوء على سطحه باستخدام برنامج معالجة المعلومات، سيجعل من الممكن الحصول على خلية شمسية عالية الكفاءة. في هذا السياق، تمكنا من اختيار باعث بسمك 1 ميكرومتر، ذو نسبة شوائب تقدر بـ  $10^{18}$  ذرة/سم<sup>3</sup> و معدل انعكاس للضوء على سطحه قدره 5%.

## Abstract

The most attractive way to satisfy energy demands is through the photovoltaic sector. This is the direct transformation of solar energy into electricity via a solar cell. This last one is presented as the juxtaposition of two regions, one of the N-type, called emitter, and the other of P-type, called base. By exposing the surface of the emitter to the sun, part of the absorbed photons generate electron-hole pairs in the different regions of the cell. However, it was confirmed that the characteristics of the emitter greatly influence the performance of a mono-silicon solar cell. Consequently, a depth analysis of the impact of the emitter doping level, its thickness and the reflection rate of light on its surface using PC1D simulation tool will make it possible to select a high efficiency cell. In this context, we managed to select an emitter with a thickness of 1  $\mu\text{m}$ , doped with  $10^{18}$  atoms. $\text{cm}^{-3}$  and presenting a reflection rate of 5%.

## Résumé

La voie la plus attirante pour répondre aux besoins énergétiques est celle de la filière photovoltaïque. Celle-ci est la transformation directe de l'énergie solaire en électricité via une cellule solaire. Cette dernière se présente comme étant la juxtaposition de deux régions, une de type N, appelée émetteur, et l'autre de type P, nommée base. En exposant la surface de l'émetteur au soleil, une partie des photons absorbés génèrent des paires électron-trou dans les différentes régions de la cellule. Cependant, il s'est avéré que les caractéristiques de l'émetteur influencent énormément les performances d'une cellule solaire en mono-silicium. En conséquence, une analyse approfondie de l'impact du niveau de dopage de l'émetteur, de son épaisseur et du taux de réflexion de la lumière en sa surface à l'aide d'outils de simulation, comme le PC1D, permettra de sélectionner une cellule à haut rendement. Dans ce contexte, nous sommes parvenus à sélectionner un émetteur d'épaisseur 1  $\mu\text{m}$ , dopé à  $10^{18}$  atomes. $\text{cm}^{-3}$  et présentant un taux de réflexion en sa surface de 5%.

## Liste des figures

Figures	Pages
<b>Chapitre I</b>	
<b>Figure I.1</b> : Structure du soleil .....	6
<b>Figure I.2</b> : Dates des saisons .....	6
<b>Figure I.3</b> : Coordonnées horizontales .....	7
<b>Figure I.4</b> : Coordonnées équatoriales .....	8
<b>Figure I.5</b> : Domaines du spectre électromagnétique .....	8
<b>Figure I.6</b> : Irradiance solaire en fonction de la longueur d'onde au sommet de l'atmosphère (appelée AM0) et au niveau de la mer (appelée AM1.5) .....	9
<b>Figure I.7</b> : Les diverses composantes du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre .....	10
<b>Figure I.8</b> : Masse d'Air AM .....	11
<b>Figure I.9</b> : Masse d'Air AM sur sol .....	12
<b>Figure I.10</b> : Rayonnement solaire sur une surface incline .....	12
<b>Figure I.11</b> : Moyenne annuelle d'ensoleillement dans le monde .....	13
<b>Figure I.12</b> : Les effets atmosphériques sur le rayonnement solaire source .....	14
<b>Figure I.13</b> : Rayonnement solaire à l'extérieur de l'atmosphère terrestre et rayonnement solaire atteignant la Terre .....	15
<b>Figure I.14</b> : Moyenne annuelle de l'irradiance Globale reçue sur une surface horizontale, période 1992-2002 .....	16
<b>Chapitre II</b>	
<b>Figure II.1</b> : Structure d'une cellule photovoltaïque .....	21
<b>Figure II.2</b> : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire à jonction P-N sous illumination .....	21
<b>Figure II.3</b> : Spectre d'absorption de silicium (Si) et de l'Arséniure de Galium (AsGa) en fonction de la longueur d'onde de la lumière .....	24
<b>Figure II.4</b> : Rendement quantique externe en fonction d'une cellule solaire en silicium .....	26
<b>Figure II.5</b> : Caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'une cellule photovoltaïque sous éclairnement .....	28
<b>Figure II.6</b> : Circuit équivalent à une cellule photovoltaïque sous éclairnement .....	28

**Chapitre III**

<b>Figure III.1</b> : Fenêtre affichée au démarrage du logiciel de simulation PC1D .....	39
<b>Figure III.2</b> : Fenêtre du logiciel PC1D dévoilant les paramètres de la cellule solaire de base utilisée pour la simulation .....	41
<b>Figure III.3</b> : 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 région de l'émetteur est de type N, ayant $5\ \mu\text{m}$ d'épaisseur et dopée à $1 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ ...	42
<b>Figure III.4</b> : Effet du niveau de dopage de de la région de l'émetteur sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire en silicium monocristallin .....	44
<b>Figure III.5</b> : Effet du niveau de dopage de de la région de l'émetteur sur la caractéristique P-V d'une cellule solaire en silicium monocristallin .....	44
<b>Figure III.6</b> : Effet du niveau de dopage de la région de l'émetteur sur le rendement quantique externe d'une cellule solaire en silicium monocristallin .....	45
<b>Figure III.7</b> : Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire en mono-silicium dans l'environnement PC1D .....	46
<b>Figure III.8</b> : Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur la caractéristique P-V d'une cellule solaire en mono-silicium dans l'environnement PC1D .....	47
<b>Figure III.9</b> : Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement quantique externe d'une cellule solaire en silicium monocristallin .....	48
<b>Figure III.10</b> : Effet du taux de réflexion de la lumière en face avant d'une cellule solaire en mono-silicium sur la caractéristique I-V dans l'environnement PC1D .....	49
<b>Figure III.11</b> : Effet du taux de réflexion de la lumière en face avant d'une cellule solaire en mono-silicium sur la caractéristique P-V dans l'environnement PC1D ....	49

<i>Introduction générale</i> .....	1
<b>CHAPITRE I : <i>Le gisement solaire</i></b> .....	4
<b>I.1</b> Introduction .....	5
<b>I.2</b> Généralités sur le soleil .....	5
<b>I.2.1</b> Le Système Terre – soleil .....	6
<b>I.2.2</b> La position du soleil .....	7
<b>a-</b> Système de coordonnées horizontales .....	7
<b>b-</b> Système de coordonnées équatoriales .....	8
<b>I.3</b> Le rayonnement solaire et les panneaux photovoltaïques .....	8
<b>I.3.1</b> La constante solaire .....	10
<b>I.3.2</b> Les différents types de rayonnements .....	10
<b>I.3.3</b> La masse d'Air .....	11
<b>I.3.4</b> Rayonnement solaire sur une surface inclinée .....	12
<b>I.3.5</b> Calcul de l'ensoleillement .....	13
<b>I.3.6</b> Les effets atmosphériques sur le rayonnement solaire .....	14
<b>I.4.</b> Gisement solaire en Algérie .....	16
<b>I.5</b> Conclusion .....	17
<b>I.6</b> Références bibliographiques .....	18
<b>CHAPITRE II : <i>Généralité sur la conversion photovoltaïque</i></b> .....	19
<b>II.1</b> Introduction .....	20
<b>II.2</b> Principe de la conversion photovoltaïque .....	20
<b>II.2.1</b> Physique de la jonction P-N .....	20
<b>II.2.2</b> Rendement quantique d'une cellule photovoltaïque .....	26
<b>II.2.3</b> Paramètres d'une cellule photovoltaïque .....	27
<b>II.2.4</b> Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque .....	28

<b>II.3 Mécanismes de recombinaison dans le silicium cristallin</b> .....	30
<b>II.4 Conclusion</b> .....	32
<b>II.5 Références bibliographiques</b> .....	33
<b>CHAPITRE III : <i>Simulateur PC1D, Résultats et Discussions</i></b> .....	34
<b>III.1 Introduction</b> .....	35
<b>III.2 Aperçu général du logiciel de simulation PC1D</b> .....	35
<b>a. Paramètres de la partie liée au dispositif (Device)</b> .....	36
<b>b. Paramètres de la région 1</b> .....	38
<b>c. Paramètres de la partie excitation</b> .....	38
<b>d. Partie résultats</b> .....	38
<b>e. La partie nommée « Device schematic »</b> .....	39
<b>III.3 Simulation PC1D et discussion des résultats</b> .....	39
<b>III.3.1 Effet du niveau de dopage de la région de l'émetteur</b> .....	43
<b>III.3.2 Effet de l'épaisseur de la région de l'émetteur</b> .....	45
<b>III.3.3 Effet du taux de réflexion de la face avant de la cellule</b> .....	48
<b>III.4 Conclusion</b> .....	50
<b>III.5 Références bibliographiques</b> .....	51
<i>Conclusion générale</i> .....	52

---

## ***Introduction générale***

---

La demande énergétique et le taux de consommation d'électricité ont considérablement augmenté avec l'urbanisation, les progrès technologiques et la croissance démographique [1]. Ils sont principalement assurés par les ressources énergétiques conventionnelles à base de combustibles fossiles [1,2]. L'utilisation de ces ressources conduit au réchauffement de la planète et au changement climatique, créant des impacts environnementaux négatifs. Par conséquent, pour réduire ces impacts, les ressources énergétiques renouvelables, telles que l'énergie solaire, l'éolienne, la marémotrice, la biomasse, l'hydroélectricité et la géothermie, sont considérées comme des sources alternatives de production d'énergie. Cependant, en plus des impacts environnementaux positifs, les sources d'énergie renouvelables ont également des impacts économiques et sociaux, ce qui en fait un choix durable [3].

Le photovoltaïque (PV), définit comme étant la conversion de la lumière du soleil en électricité à l'aide de cellules solaires, a progressé plus rapidement en tant que l'une des technologies les plus prometteuses pour résoudre les deux problèmes cités précédemment. Il est important de noter que le CO<sub>2</sub> et d'autres polluants ne sont pas impliqués dans la conversion PV, ce qui en fait un processus totalement vert. Bien que jouant un rôle de plus en plus important sur le marché de l'énergie, le PV est limité par son faible rendement énergétique. Par ailleurs, de tous les semi-conducteurs, le silicium (Si) est l'élément le moins cher, le plus abondant (26% de la croûte terrestre) et le plus uniformément réparti sur terre [4]. De plus, l'industrie Si-PV contrôle près de 90% du marché mondial [5].

Une cellule solaire à base du silicium monocristallin consiste à une jonction de deux régions : une de type N, dopée en atomes donneurs, appelée émetteur et la deuxième de type P, nommée base, dopée en atomes accepteurs. Ces deux régions sont séparées par une zone de charge d'espace (ZCE). La conversion s'effectue à travers l'exposition de la surface de l'émetteur au flux du rayonnement solaire. En conséquence, la formation de l'émetteur constitue une étape cruciale dans la fabrication des cellules solaires en silicium cristallin. Plusieurs techniques sont utilisées dans l'industrie photovoltaïque et la plus connue est basée sur la diffusion du phosphore à partir d'une solution solide déposée sur la surface de la base p par la technique Spin-On. Malgré que cette technique soit reproductible, économique et simple, elle présente l'inconvénient majeur d'avoir une région fortement dopée à proximité de la surface

qui induit une forte recombinaison des porteurs de charge libres. Pour limiter cet effet, une optimisation du niveau de dopage en phosphore est nécessaire. Ainsi, notre recherche consiste à l'étude, à travers le logiciel de simulation PC1D, les effets de quelques paramètres liés à la région de l'émetteur, à savoir son épaisseur, son niveau de dopage et le taux de réflexion de la lumière sur sa surface sur les performances des cellules solaires en silicium monocristallin. Pour ce faire, on se propose de présenter nos investigations via trois chapitres :

- Le premier chapitre donne l'occasion de présenter 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 seront aussi mis en évidence. Également, le gisement solaire que dispose l'Algérie sera cité afin d'identifier les zones les plus ensoleillées dans le but de prévoir à l'avenir un programme d'électrification via le solaire photovoltaïque.
- Le deuxième chapitre présente des notions de base de la filière photovoltaïque qui sous-tendent notre travail. Dans une première partie, nous discutons le principe de la conversion de l'énergie solaire en électricité, le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales et les différentes origines de la baisse de leur rendement. Nous étudierons ensuite les différents mécanismes de recombinaison des porteurs de charge et leur effet sur leur durée de vie effective. Enfin, nous rappelons les différentes technologies possibles pour réduire les pertes par recombinaison en surface.
- Le troisième chapitre est dédié aux observations issues de l'évaluation de l'impact du niveau de dopage de la région de l'émetteur de type N et de son épaisseur sur les grandeurs photovoltaïques de la cellule solaire en mono-silicium à l'aide du logiciel de simulation PC1D. Aussi, nous tenterons de comprendre l'ampleur de ses paramètres afin de concevoir une structure de cellule à haut rendement.

Pour finir, nous aménagerons ce mémoire par une conclusion générale et des recommandations sous formes de perspectives pour de futurs travaux de recherche dans le domaine photovoltaïque.

## **Références bibliographiques**

- [1] Madeti, S.R.; Singh, S., Monitoring system for photovoltaic plants: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 67, pp. 1180–1207 (2017).
- [2] Rezk, H.; Tyukhov, I.; Al-Dhaifallah, M.; Tikhonov, A., Performance of data acquisition system for monitoring PV system parameters. *Measurement* 104, pp. 204–211 (2017).
- [3] Panwar, N.; Kaushik, S.; Kothari, S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, pp. 1513–1524 (2011).
- [4] Ali, A.; Cheow, S. L.; Azhari, A. W.; Sopian, K.; Zaidi, S. H. *Results in Physics* 7, pp. 225–232 (2017).
- [5] Asim, N.; Sopian, K.; Ahmadi, S.; Saeedfar, K.; Alghoul, M. A.; Saadatian, O.; Zaidi, S. H. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 16, pp. 5834–5847 (2012).



CHAPITRE I :  
Le Gisement Solaire

## I.1 Introduction

Ce chapitre évoquera des généralités sur le Soleil, le gisement solaire mondiale et en particulier en Algérie, le rayonnement solaire et ses différents types. Et comme le rayonnement solaire traverse l'atmosphère terrestre avant d'atteindre le sol, donc il rencontre sur son chemin des masses d'aires et de la poussière atmosphériques, choses qui nous ont obligés d'y citer pour justifier l'existence de régions plus ou moins ensoleillées.

## I.2 Généralités sur le Soleil

Le Soleil est l'étoile du système solaire. Il faut environ 8 minutes pour que sa lumière atteigne la surface de la Terre [1]. C'est la seule étoile qui assure l'existence de la vie en fournissant à la Terre beaucoup d'énergie, ce qui permet l'existence d'eau liquide et la photosynthèse des plantes. Le Soleil est une étoile naine jaune pseudo-sphérique, équivalente à une énorme boule de gaz très chaud, composée de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments, dont la quasi-totalité est connue chimiquement [2]. Il représente 99,9% de la masse du système solaire. Le tableau I.1 regroupe les caractéristiques principales du Soleil.

Diamètre (km)	$1,39. 10^6$
Surface (km <sup>2</sup> )	$6,06. 10^{12}$
Volume (km <sup>3</sup> )	$1,41. 10^{18}$
Masse (kg )	$2. 10^{30}$
Masse volumique moyenne (kg/m <sup>3</sup> )	1408
Masse volumique au centre (kg/m <sup>3</sup> )	$1,5. 10^5$
Vitesse ( km/s)	217

**Tableau I.1** : Caractéristiques principales du Soleil [2, 3].

Le Soleil est constitué de différentes couches comme le montre la figure I.1. A l'intérieur du Soleil; un géant réacteur de fusion thermonucléaire continue. La principale réaction considérée la plus importante est la suivante :



Avec libération d'une énergie d'environ  $2,5. 10^{12}$  J/mol d'hélium

Le rayonnement du noyau interne n'est pas visible car il est fortement absorbé par une couche d'atomes d'hydrogène plus proche de la surface du Soleil. La chaleur est transférée à travers cette couche par convection. La surface du Soleil, appelée la photosphère, est à une température

d'environ 6000 K, se rapproche étroitement d'un corps noir. Les astronomes utilisent 5778 K pour classer le Soleil comme une étoile [1].

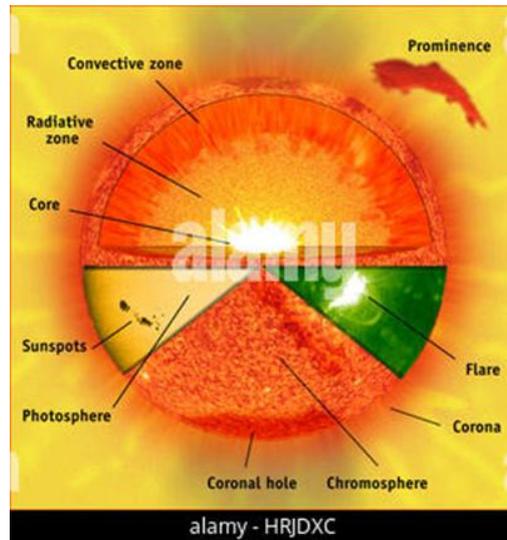


Figure I.1 : Structure du Soleil [4].

### I.2.1 Le Système Terre – Soleil

La terre, comme toutes les planètes du système solaire, décrit autour du Soleil une trajectoire légèrement elliptique, dont le Soleil Occupe l'un des foyers. La distance moyenne Terre-Soleil (appelé unité astronomique UA) est de 149.6 millions de km, avec une variation de  $\pm 1,7\%$ .

La terre passe par les deux extrémités du grand axe de l'ellipse deux fois dans l'année : le 3 janvier (la position la plus proche du Soleil 'Périhélie') et le 4 juillet (la position la plus éloignée du Soleil 'Aphélie') [2]. les dates des saisons diffèrent de l'hémisphère sud a l'hémisphère nord (voir la figure I.2) [5].

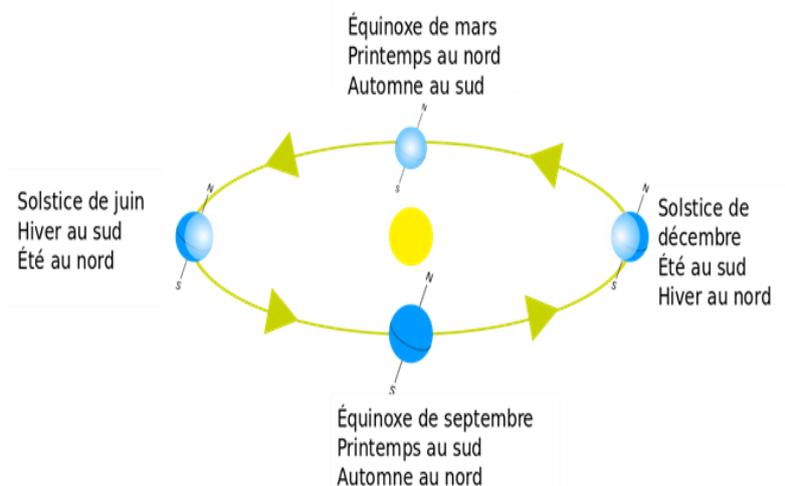


Figure I.2 : Dates des saisons [5].

### I.2.2 La position du Soleil

### a- Système de coordonnées horizontales

Les coordonnées horizontales sont la hauteur (h) et l'azimut (A). La hauteur varie de 0° (horizon) jusqu'à 90° (zénith) et l'azimut est un cercle divisé en 360° établi sur le plan horizontal à partir du Nord (N), ou du Sud (S), suivant les utilisateurs [6].

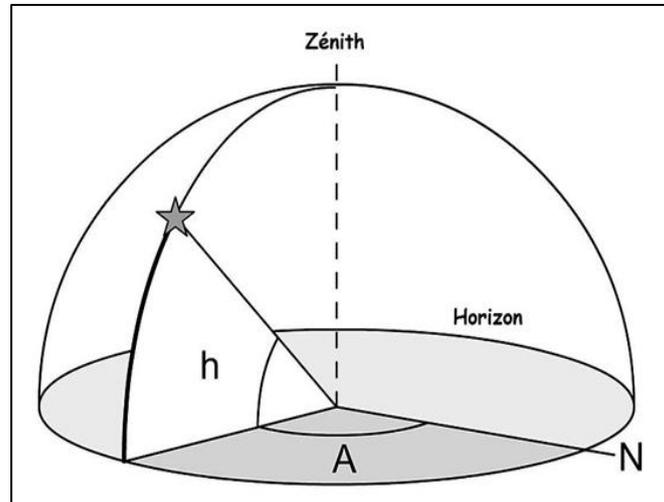


Figure I.3 : Coordonnées horizontales [6].

### b- Système de coordonnées équatoriales

Le système de coordonnées équatoriales utilise le plan de l'équateur terrestre comme plan de référence, le centre de la terre étant au centre du repère. C'est un système dont les valeurs sont indépendantes de la position de l'observateur [6].

Dans la figure I.4, la Terre est au centre. Le prolongement de son équateur sur la sphère céleste donne l'équateur céleste (cercle bleu). De même pour ses pôles nord et sud. L'écliptique (cercle jaune) est le plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil. L'intersection de l'écliptique avec l'équateur céleste définit deux points :

- Celui pointant dans la constellation des Poissons s'appelle 'le point vernal'.
- 'L'ascension droite', établie à partir du point vernal sur l'équateur céleste (ligne rouge horizontale)

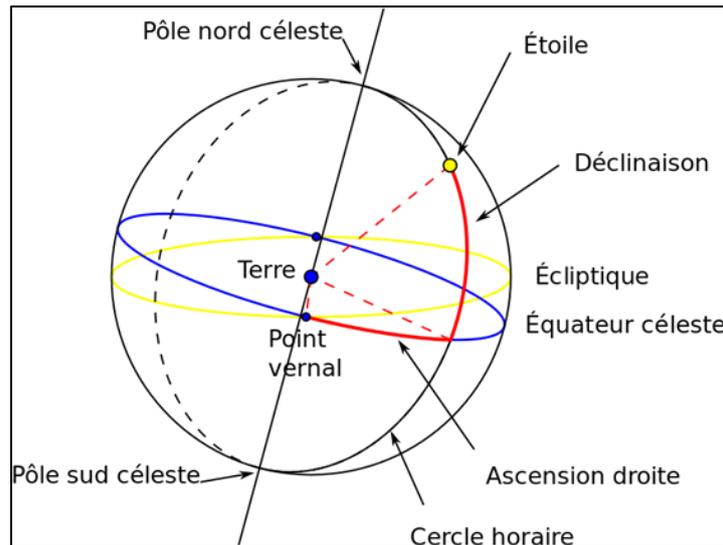


Figure I.4: Coordonnées équatoriales [6].

### I.3 Le rayonnement solaire et les panneaux photovoltaïques

La lumière du Soleil est une forme de " rayonnement électromagnétique " et la lumière visible que nous voyons est un petit sous-ensemble du spectre électromagnétique (figure I-5).

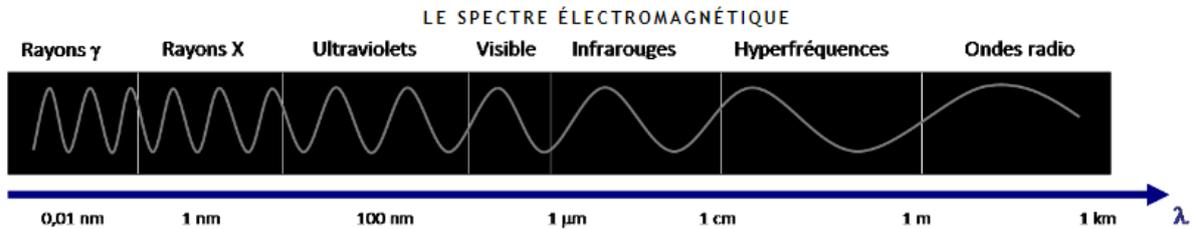
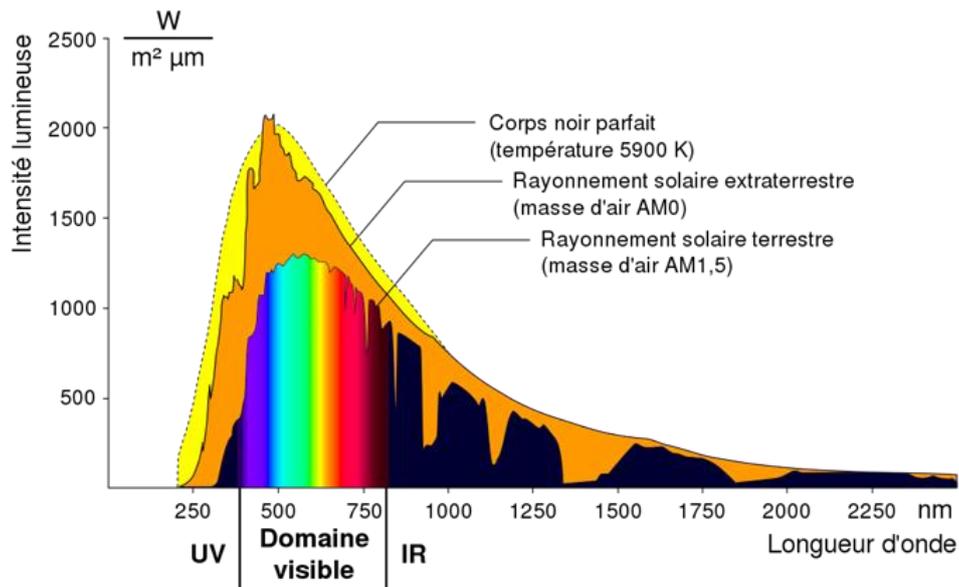


Figure I.5: Domaines du spectre électromagnétique [7].

Le Soleil émet un rayonnement à large spectre (assez proche de celui d'un corps noir), qui inclut le domaine visible par l'œil humain (représente environ 43 % de l'énergie reçue). Le graphe dans la figure I-6 représente le spectre d'irradiance solaire en fonction de la longueur d'onde au sommet de l'atmosphère (appelée AM0) et au niveau de la mer (appelée AM1.5). L'ensemble des sillons apparaissant dans le spectre visible forme les raies de Fraunhofer, tandis que le spectre au niveau de la mer présente des bandes d'absorption de l'atmosphère dans l'ultraviolet (notamment par l'ozone) et dans l'infrarouge (notamment par la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone).



**Figure I.6:** Irradiance solaire en fonction de la longueur d'onde au sommet de l'atmosphère (appelée AM0) et au niveau de la mer (appelée AM1.5) [8].

Il existe plusieurs caractéristiques clés de l'énergie solaire incidente qui sont essentielles pour déterminer comment la lumière solaire incidente interagit avec un convertisseur photovoltaïque :

- le contenu spectral de la lumière incidente.
- la densité de puissance rayonnante du Soleil.
- l'angle auquel le rayonnement solaire incident frappe un module photovoltaïque.
- l'énergie rayonnante du Soleil tout au long d'une année ou d'une journée pour une surface particulière. Nous notons que le Soleil peut être décrit comme un corps noir avec une température d'environ 6000 K [2].

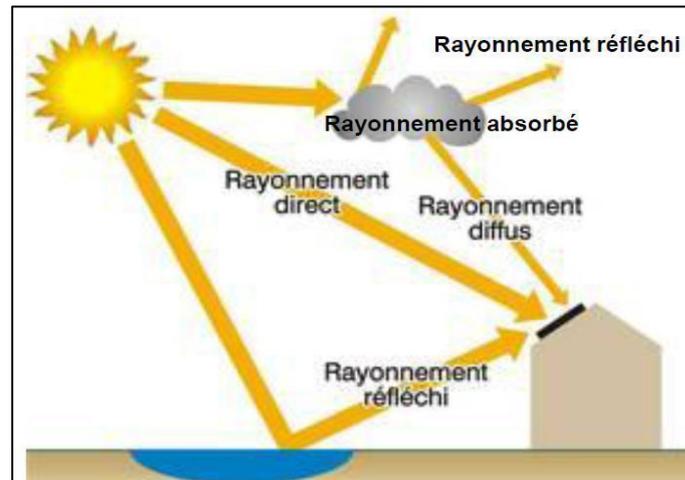
### I.3.1 La constante solaire

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. Cette dernière a été estimée à  $1370 \text{ W/m}^2$  par Claus Fröhlich et Christoph Wehrli du Centre Radiométrique Mondial de Davos (Suisse) [8].

### I.3.2 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 ( $\text{W/m}^2$ ). 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.7** : Les diverses composantes du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre [9].

- **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 [9].

- **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 [9].

- **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 [10]. Les trois rayonnements, direct, diffus et global notés respectivement, I, D et G, sont reliés par la relation suivante [10] :

$$G = I \times \sin(h) + D \tag{I.2}$$

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

### I.3.3 La masse d'Air

La masse d'air (Air mass en anglais) est la longueur du trajet que la lumière emprunte à travers l'atmosphère normalisée à la longueur du trajet le plus court possible (c'est-à-dire lorsque le Soleil est directement au-dessus). Elle est définie comme [11] :

$$AM = \frac{X}{Y} = \frac{1}{\cos\theta} \quad (I.3)$$

Où  $\theta$  est l'angle par rapport à la verticale (angle zénithal). (Figure I.8)

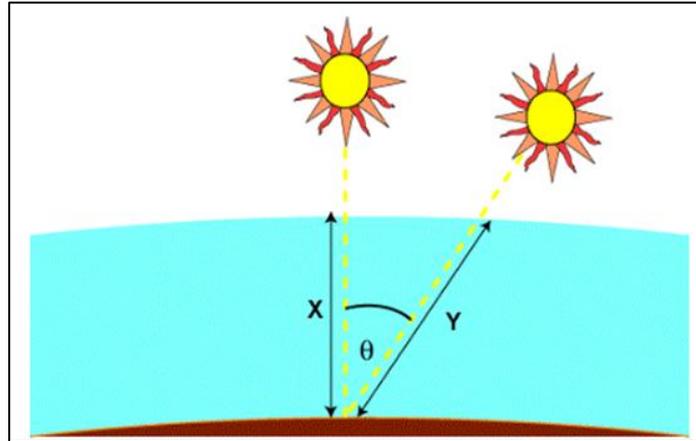


Figure I.8 : Masse d'Air AM [11].

Lorsque le Soleil est au-dessus de nos têtes, la masse d'air est de 1

Sur le sol, on peut simplement le déterminer à partir de l'ombre d'un poteau vertical.

(Figure I.9) [11].

$$AM = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2} \quad (I.4)$$

Les formules précédentes supposent que l'atmosphère est une couche horizontale plate, alors que l'atmosphère est courbée suivant la forme de la terre; pour cela on utilise une relation plus précise [11]:

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta) + 0,50572(96,0995 - \theta)^{-1,6364}} \quad (I.5)$$

Le spectre standard à la surface de la Terre est appelé AM1.5G (G signifie global : inclut à la fois le rayonnement direct et diffus) ou AM1.5 (qui inclut uniquement le rayonnement direct). Le spectre global est supérieur de 10 % au spectre direct. Le spectre standard en dehors de l'atmosphère terrestre est appelé AM0, ce spectre est généralement utilisé pour prédire les performances attendues des cellules dans l'espace.

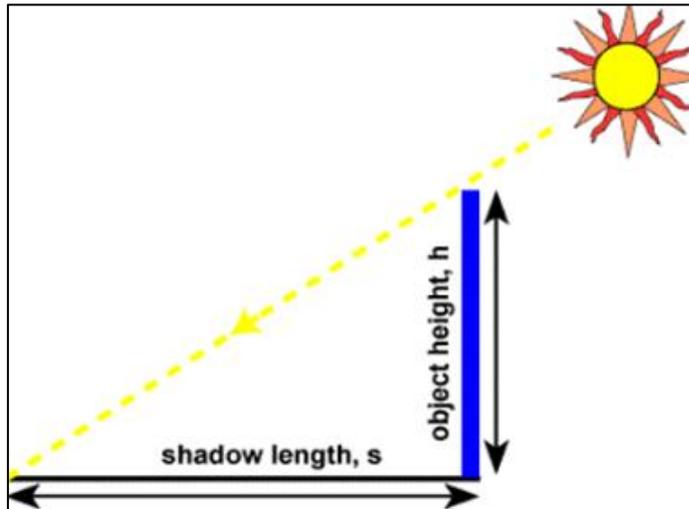


Figure I.9 : Masse d'Air AM sur sol [11].

### I.3.4 Rayonnement solaire sur une surface inclinée

Comme l'angle entre le Soleil et une surface d'un panneau photovoltaïque fixe change continuellement, la densité de puissance est inférieure à celle de la lumière solaire incidente (elles seront égales quand ils sont perpendiculaires l'un à l'autre) [12].

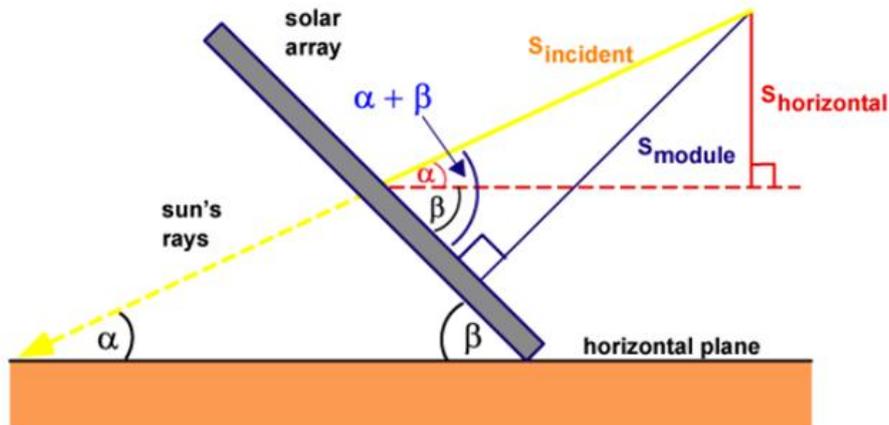


Figure I.10 : Rayonnement solaire sur une surface incline [12]

D'après la figure I.10, on peut écrire les relations entre le rayonnement incident  $S_{incident}$ , le rayonnement horizontal  $S_{horizontal}$  et le rayonnement perpendiculaire  $S_{module}$  comme suit [12] :

$$\sin \alpha = \frac{S_{horizontal}}{S_{incident}} \quad (I.6)$$

$$\sin(\alpha + \beta) = \frac{S_{module}}{S_{incident}} \quad (I.7)$$

Où :  $\alpha$  : l'angle d'élévation.

$\beta$  : l'angle d'inclinaison du module mesuré à partir de l'horizontale.

A partir des équations précédentes, nous obtiendrons [12] :

$$S_{module} = \frac{S_{horizontal} \sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha} \quad (I.8)$$

Pour un module à une inclinaison et une orientation arbitraire, l'équation devient [12] :

$$S_{module} = S_{incident} [ \cos \alpha \sin \beta \cos(\psi - \theta) + \sin \alpha \cos \beta ] \quad (I.9)$$

Où :  $\theta$ : l'angle d'azimut du Soleil.

$\Psi$  : l'angle d'azimut auquel le module fait face.

Un module photovoltaïque dans l'hémisphère sud sera orienté vers le nord avec  $\Psi = 0^\circ$  et un module dans l'hémisphère nord sera généralement orienté directement vers le sud avec  $\Psi = 180^\circ$ .

### I.3.5 Calcul de l'enseillement

Dans la conception d'un système photovoltaïque, il est essentiel de connaître la quantité de lumière solaire disponible à un endroit particulier à un moment donné. C'est-à-dire savoir l'irradiance solaire (puissance par surface à un instant donné) et l'insolation solaire (l'énergie délivrée par surface sur une période de temps). Les mesures sont réalisées à l'aide soit d'un pyranomètre (mesure du rayonnement global) et/ou d'un pyréliomètre (mesure du rayonnement direct). La durée d'enseillement, varie d'une région à une autre selon des facteurs géographiques à savoir la latitude, la longitude ainsi que les conditions climatiques tels que la nébulosité (couverture nuageuse) ou encore les précipitations comme il est donné sur la carte d'enseillement dans le monde (voir la figure I.11) [12].

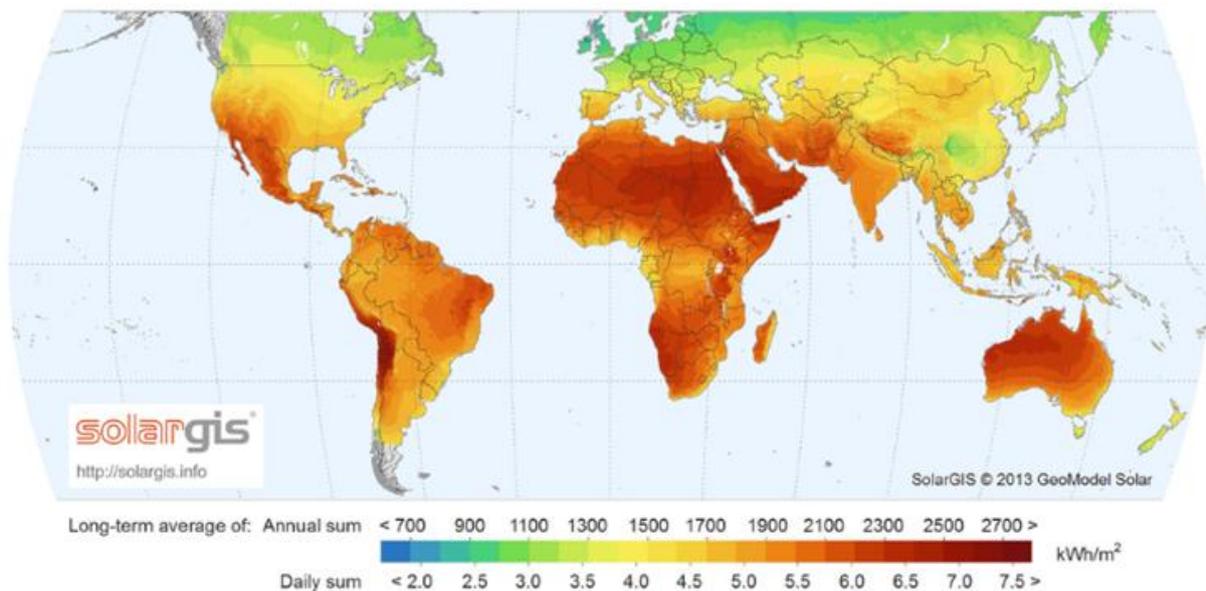


Figure I.11 : Moyenne annuelle d'enseillement dans le monde [13]

### I.3.6 Les effets atmosphériques sur le rayonnement solaire

Les effets atmosphériques ont plusieurs impacts sur le rayonnement solaire à la surface de la Terre. Les effets majeurs pour les applications photovoltaïques sont [14] :

- Une diminution de la puissance du rayonnement solaire due à l'absorption, la diffusion (de Rayleigh, par les aérosols et par les particules de la poussière) et la réflexion dans l'atmosphère;
- Une modification du contenu spectral du rayonnement solaire due à une plus grande absorption ou diffusion de certaines longueurs d'onde;
- L'introduction d'une composante diffuse ou indirecte dans le rayonnement solaire ;
- Les variations locales de l'atmosphère (telles que la vapeur d'eau, les nuages et la pollution).

Ces effets sont résumés dans la figure (I.12)

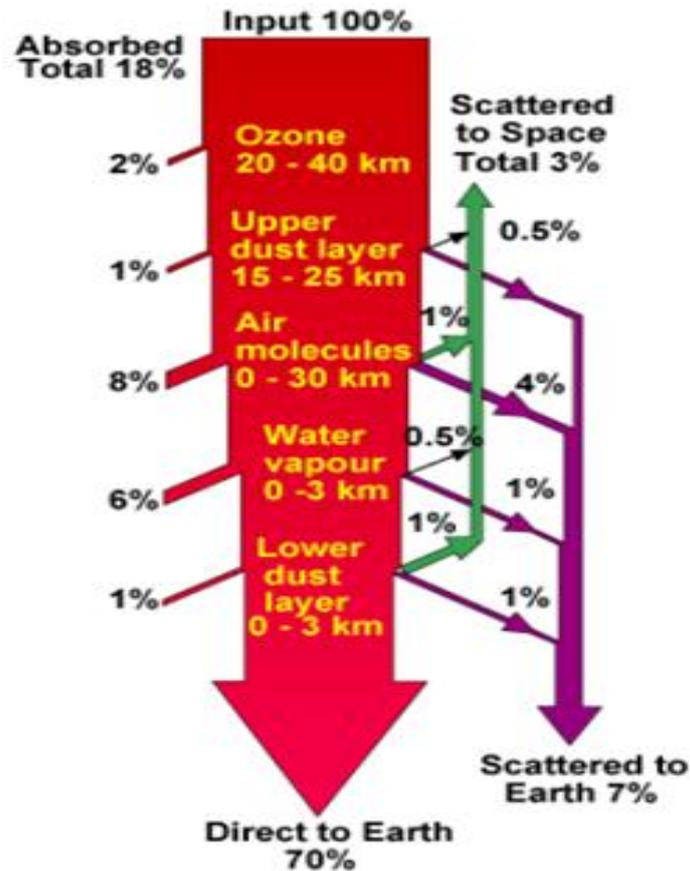
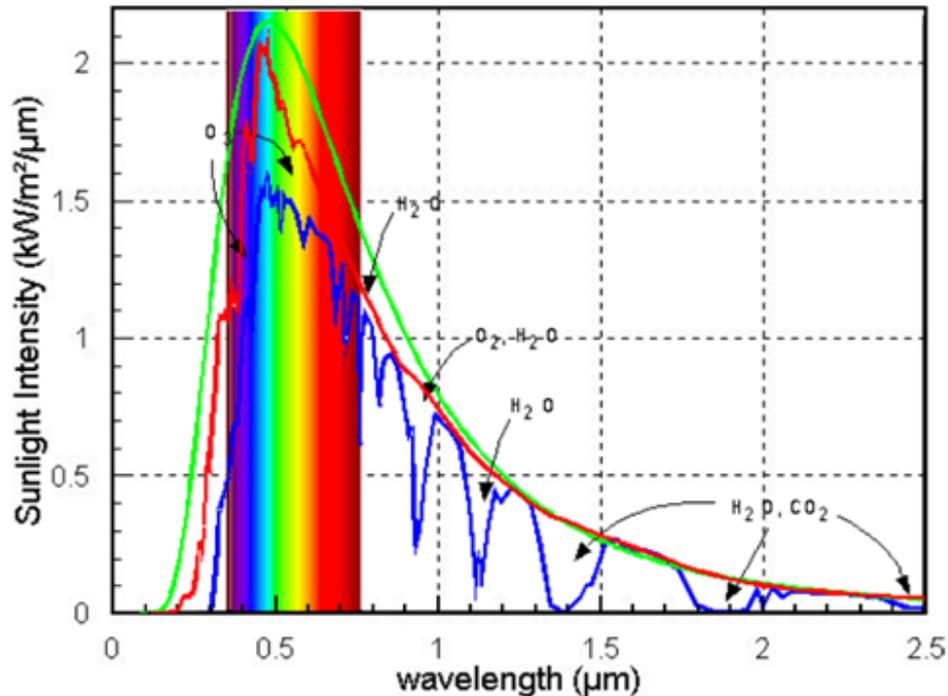


Figure I.12 : Les effets atmosphériques sur le rayonnement solaire source [14].



**Figure I.13** : Rayonnement solaire à l'extérieur de l'atmosphère terrestre et rayonnement solaire atteignant la Terre [14].

On remarque que 70% environ du rayonnement solaire seulement atteint le sol terrestre. Alors que l'absorption par des gaz spécifiques dans l'atmosphère modifie le contenu spectral du rayonnement solaire terrestre, ils ont un impact relativement mineur sur la puissance globale. Au lieu de cela, le principal facteur réduisant la puissance du rayonnement solaire est l'absorption et la diffusion de la lumière due aux molécules d'air et à la poussière. Ce processus d'absorption ne produit pas de creux profonds dans l'irradiation spectrale, mais provoque plutôt une réduction de puissance dépendant de la longueur du trajet à travers l'atmosphère [14].

#### I.4 Gisement solaire en Algérie

Étant donné que l'Algérie est située à côté de l'équateur et possède une longue bande côtière et des chaînes de montagnes long avec hauts sommets, il est probable que ce soit le pays africain et méditerranéen qui possède le plus grand potentiel d'énergies renouvelables au niveau régional, ainsi que les capacités les plus adaptées pour développer et exploiter ce potentiel. S'il y a des décisions politiques sages.

Les potentiels énergétiques sont liés à plusieurs types de sources, mais l'énergie solaire reste la plus importante en termes de disponibilité, notamment dans la région désertique qui représente la plus grande partie de la superficie du pays. Elle est aussi, sans aucun doute, la plus

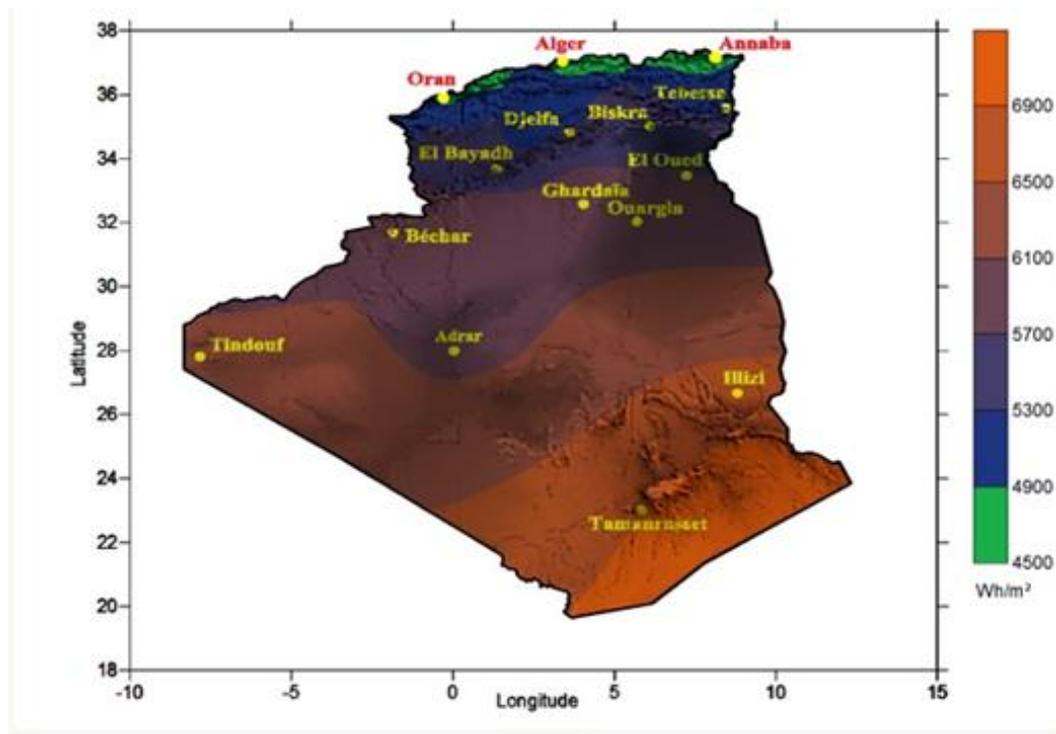
compétitive pour son développement. à l'avenir sous diverses formes . L'Algérie est en effet l'un des plus importants gisements d'énergie solaire au monde, avec un temps de séquestration de 2000 à 3900 heures par an, et une irradiation quotidienne de 3000 à 6000 W/m<sup>2</sup>, soit 10 fois la consommation mondiale [15].

La répartition du potentiel solaire en Algérie pendant une année est représentée dans le tableau I-2.

<i>Région</i>	Sahara	Hauts plateaux	Régions côtières
<i>Superficie %</i>	86	10	4
<i>Durée moyenne d'Ensoleilment ( h/an )</i>	3500	3000	2650
<i>Energie moyenne reçue ( kWh/(m<sup>2</sup>.an) )</i>	2650	1900	1700

**Tableau I.2** : Ensoleillement par régions climatiques en Algérie [16].

A l'occasion de la célébration de la journée du solstice d'été, journée la plus longue de l'année (le 20 juin 2013) le Centre de Développement des Energies Renouvelables (C.D.E.R.) diffusait une nouvelle carte de l'irradiation solaire globale en Algérie (figure I-14).



**Figure I.14** : Moyenne annuelle de l'irradiance Globale reçue sur une surface horizontale, période 1992-2002 [16].

## **I.5 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.

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.

## I.6 Références bibliographiques

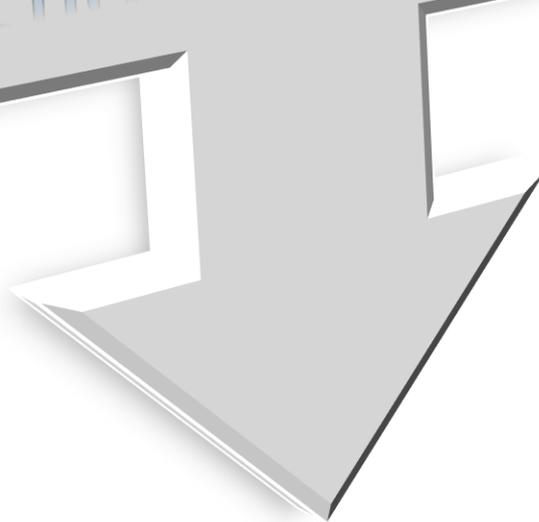
- [1] J. Liliensten et P.L. Blelly. «Du Soleil à la Terre Aéronomie et Météorologie de l’Espace». Collection Grenoble Sciences dirigée par Jean Bornarel. EDP sciences, 2000.
- [2] <https://solarsystem.nasa.gov> (consulté le 19 avril 2022).
- [3] M. Emilio, J.R. Kuhn, R.I. Bush, and I.F. Scholl. « Measuring the Solar Radius From Space During The 2003 And 2006 Mercury Transits». doi:10.1088/0004-637X/750/2/135. The Astrophysical Journal, 750:135 (8pp), May 2012.
- [4] [https://www.alamyimages.fr/photo-image-structure –du-soleil-135015732.html](https://www.alamyimages.fr/photo-image-structure-du-soleil-135015732.html).
- [5] M. Giraud. «La nature au fil des saisons» Allary éditions, ISBN : 2370731036, 9782370731036, 2016.
- [6] D. Savoie. «Cosmographie : comprendre les mouvements du Soleil, de la Lune et des planètes», Paris, Belin et Pour la science, coll, 1re éd, 127 p, 18,5 × 24,5 cm (ISBN 2-7011-4005-6), 2006.
- [7] <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/ued/envcal/html/rayonnement/1-rayonnement-electromagnetique/1-4-spectre-electromagnetique.html>.
- [8] Geophysical Research Letters, «A new, lower value of total solar irradiance : Evidence and climate significance». vol. 38, L01706, doi : 10.1029/2010GL045777, 2011.
- [9] N. Alouache. «Etude de l’effet des divers paramètres sur le rendement photovoltaïque d’une cellule solaire à base du mono-silicium». Mémoire de Master. Université de Bouira, 2018.
- [10] Th. Mambrini. «Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d’implantation et en fonction des différentes technologies. Météorologie». THÈSE DE DOCTORAT, Université Paris Sud – Paris XI, 2014.
- [11] F. Kasten et A.T.Young. «Tableaux de masse d'air optique révisés et formule d'approximation», Applied Optics, vol. 28, pages 4735–4738, 1989.
- [12] [https:// www.pveducation.org](https://www.pveducation.org).
- [13] (en) W.M. Haynes. CRC Handbook of Chemistry and Physics, vol. 97, CRC Press/Taylor and Francis, 2016, 2652 p. (ISBN 1498754287), « Solar irradiance at the Earth », p. 2403 (14-18).
- [14] C. Hu et R.M.White. « Cellules solaires : des systèmes de base aux systèmes avancés ». New York : McGraw Hill, 1983.
- [15] [https:// www.algerie-eco.com](https://www.algerie-eco.com) « energie-solaire-l’algerie-enfin-determinee-a-exploiter-son-enorme-potentiel » 2018.
- [16] [https://w w.w.cder.dz](https://www.w.cder.dz)

# CHAPITRE II :

## Généralité sur la

### Conversion

#### Photovoltaïque



## **II.1 Introduction**

Le soleil est une importante source d'énergie renouvelable qui pourrait être une alternative aux autres sources classiques afin de satisfaire les larges besoins d'énergie dans le futur. Toutefois, vu que le rendement de conversion de l'énergie solaire en électricité reste faible, cette énergie trouve tout son avantage dans des applications de petite et moyenne consommation dans des régions isolées et loin des lignes de distribution électrique. En conséquence, la communauté scientifique est appelée à entamer des recherches dans le but d'atteindre des rendements de conversion élevés et par la suite prévoir des applications à large utilisation. Dans ce contexte, ce chapitre est dédié à la présentation de notions de base de la filière photovoltaïque qui sous-tendent notre travail. Dans une première partie, nous discutons le principe de la conversion de l'énergie solaire en électricité, le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales et les différentes origines de la baisse de leur rendement. Nous manderons ensuite les différents mécanismes de recombinaison des porteurs de charge et leur effet sur leur durée de vie effective. Enfin, nous rappelons les différentes technologies possibles pour réduire les pertes par recombinaison en surface.

## **II.2 Principe de la conversion photovoltaïque**

### **II.2.1 Physique de la jonction P-N**

La description de fonctionnement d'une cellule solaire à base de silicium fait appel à la physique d'une jonction P-N à large surface et à épaisseur limitée, fabriquée sur une plaquette de structure mono-ou poly-cristalline (Figure II.1). La formation d'une cellule solaire nécessite la génération d'un émetteur type N sur un substrat de silicium de type P appelé base, un dépôt d'une couche antireflet et des contacts métalliques sur les deux faces avant et arrière pour la collecte des porteurs de charges.

L'ajout intentionnel d'impuretés à un semi-conducteur peut modifier considérablement ses propriétés électriques. Le processus d'ajout intentionnel d'impuretés dans un semi-conducteur intrinsèque (pur) pour modifier ses propriétés électriques est appelé dopage [1, 2]. Le nombre de porteurs de charge est directement proportionnel au niveau de dopage dans un semi-conducteur. La majorité des porteurs de charge dans les matériaux de type N sont des électrons chargés négativement tandis que dans les matériaux de type P, la majorité des porteurs de charge sont des trous chargés positivement.

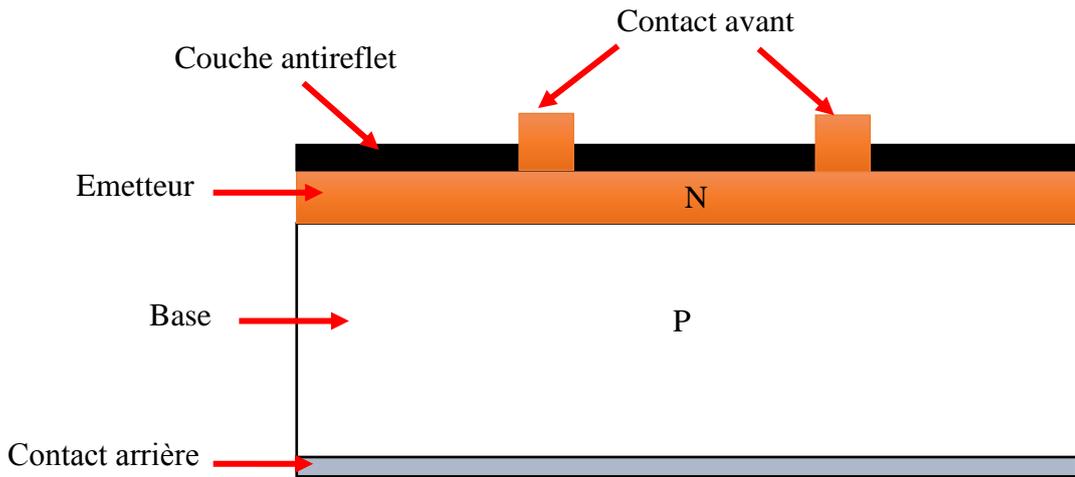


Figure II.1 : Structure d'une cellule photovoltaïque

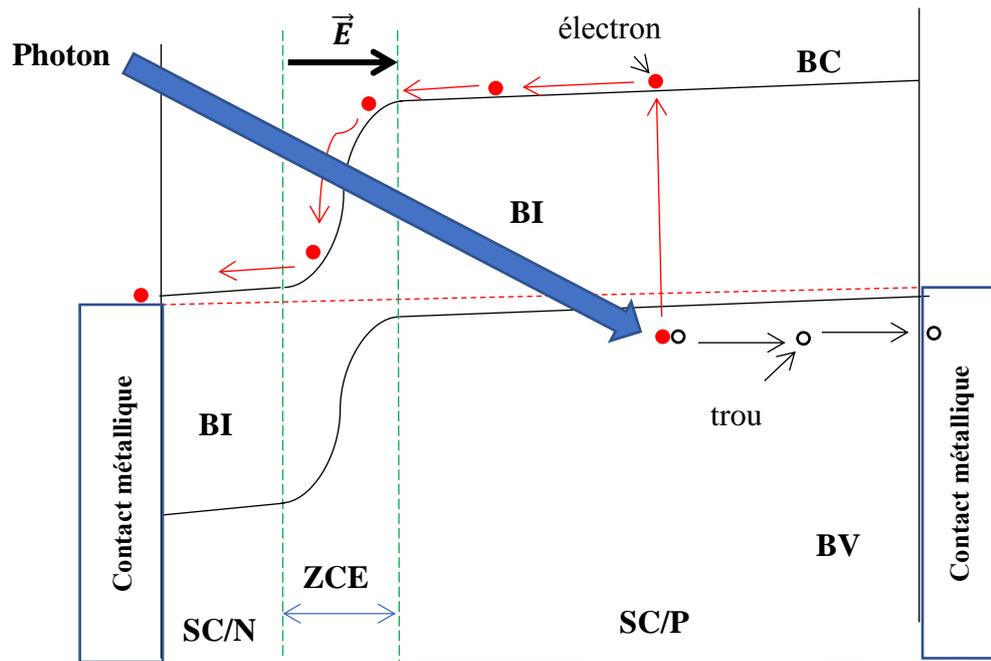


Figure II.2 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire à jonction P-N sous illumination.

SC/N : Semi-Conducteur type N (émetteur), SC/P : Semi-Conducteur type P (base)  
 BV : Bande de Valence, BI : Bande Interdite, BC : Bande de Conduction, ZCE : Zone de Charge d'Espace.

En raison de la différence des densités des porteurs de charge majoritaires et minoritaires à l'interface du silicium de type P et N, une région d'appauvrissement (zone de charge d'espace) est formée et un champ électrique  $\vec{E}$  est induit (voir figure II.2). Ce dernier peut influencer les mouvements des porteurs de charge minoritaires dans les régions P et N en raison du mécanisme de transport. En effet, les porteurs de charge minoritaires (trous) de la région N vont passer dans la région P suivant le sens de  $\vec{E}$  tandis que les électrons de la région P sont déplacés dans la région N, suivant un sens opposé à  $\vec{E}$ . Il en résulte un nombre plus élevé de porteurs de charge mobiles dans les deux régions, ce qui entraîne une probabilité plus élevée de collecte de ces charges par les contacts métalliques.

Le comportement dynamique des électrons et des trous est régi par l'ensemble des équations suivantes :

- Equations de continuité concernant les phénomènes de génération et de recombinaison des porteurs de charge [3] :

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

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

Où les indices  $n$  et  $p$  réfèrent aux électrons et trous, respectivement.  $G$ ,  $R$  et  $\vec{J}$  désignent respectivement le taux de génération, le taux de recombinaison et la densité de courant.

$e$  : La charge élémentaire de l'électron.

- Equation de poisson qui décrit la dépendance du champ électrique de la densité de charge (électrons, trous et dopants ionisés) [3] :

$$\text{div}\vec{E} = \frac{|e|}{\varepsilon} (N_d - N_a + p - n) \quad (II.3)$$

Où  $\vec{E}$  est le champ électrique,  $\varepsilon$  est la permittivité électrique,  $N_d$  est la densité volumique des atomes donneurs ionisés,  $N_a$  est la densité volumique d'atomes accepteurs ionisés,  $n$  et  $p$  représentent les concentrations des électrons et des trous, respectivement.

- Le courant dû à l'un des porteurs de charge est la somme du courant de conduction sous l'effet d'un champ électrique et du courant de diffusion [3] :

$$\vec{J}_n = |e|.n.\mu_n.\vec{E} + |e|.D_n.\overrightarrow{\text{grad}}(n) \quad (II.4)$$

$$\vec{J}_p = |e|.p.\mu_p.\vec{E} - |e|.D_p.\overrightarrow{\text{grad}}(p) \quad (II.5)$$

Où  $D_n$  et  $D_p$  sont les coefficients de diffusion, respectivement, des électrons et des trous.

$\mu_n$  et  $\mu_p$  sont, respectivement, les mobilités des électrons et des trous.

La relation d'Einstein relie les mobilités des porteurs aux coefficients de diffusion est [3] :

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k_B T}{|e|} \quad (II.6)$$

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

Les théories ondulatoires (équations de Maxwell) ou corpusculaires de la lumière nous permettent d'aborder les échanges entre la matière et le rayonnement lumineux. Conformément à la théorie corpusculaire, les quanta d'énergie associés au rayonnement lumineux s'appellent photons. Dans le cadre de la mécanique quantique, l'énergie de photon correspondant à une radiation donnée est reliée à sa longueur d'onde par la relation [3] :

$$E_{ph} = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{1,24 \text{ eV}}{\lambda} \quad (II.7)$$

$\nu$  est la fréquence de la radiation,

$\lambda$  est la longueur d'onde de la radiation en  $\mu\text{m}$ ,

$c$  est la vitesse de la lumière dans la vide,

$E_{ph}$  est l'énergie du photon en  $eV$ ,

$h$  est la constante de Plank.

Les photons d'énergies supérieures à celle de la bande interdite et arrivant sur un semi-conducteur créent des paires électron-trou par absorption selon la loi de Lambert-Bouguer donnée par [3] :

$$I(x) = I \cdot (1 - R) \cdot e^{-\alpha x} = I_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (II.8)$$

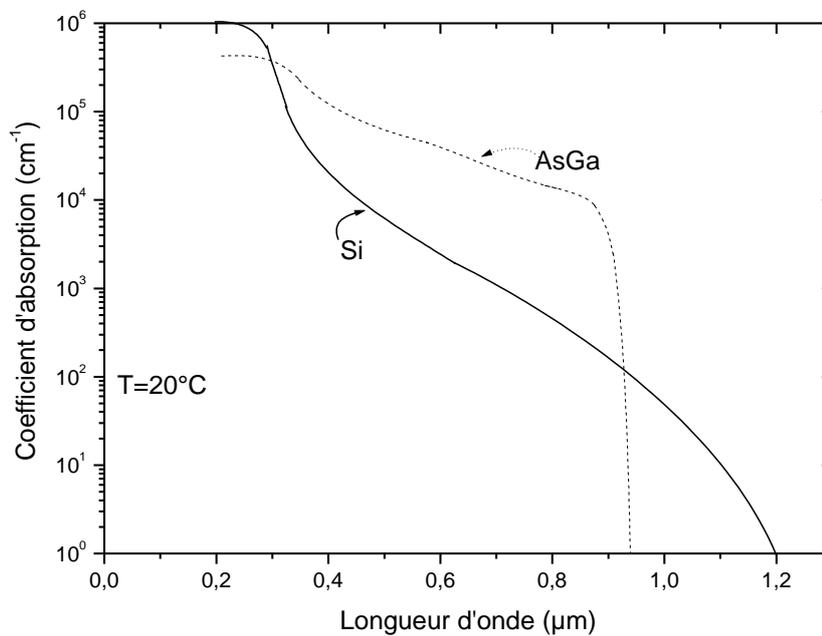
$x$  est la profondeur d'absorption du faisceau dans le matériau à partir de la surface du semi-conducteur,

$R$  est le coefficient de réflexion. Il représente la part, de l'énergie lumineuse incidente  $I$ , réfléchi à la surface du semi-conducteur,

$\alpha$  est le coefficient d'absorption. Il correspond au nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau pour chaque longueur d'onde.

La figure II.3 présente les spectres d'absorption de silicium et de l'arséniure de galium à température ambiante [4]. 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.7), on détermine un seuil d'absorption intrinsèque. Dans le cas du silicium,  $\lambda = 1,2 \mu\text{m}$  et dans celui de l'arséniure de gallium,  $\lambda = 0,93 \mu\text{m}$ . Pour les photons d'énergie inférieure à  $E_g$ , le coefficient d'absorption est négligeable et la radiation lumineuse traverse le 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, le réseau, ... Il résulte, de cette énumération de processus complexes intervenant sous certaines conditions du milieu ambiant, que le spectre d'absorption du semi-conducteur varie avec la température, la pression et les champs électrique et/ou magnétique [3].



**Figure II.3** : Spectre d'absorption de silicium (Si) et de l'Arséniure de Gallium (AsGa) en fonction de la longueur d'onde de la lumière [3].

La résolution des équations, citées précédemment, donnant la concentration des porteurs de charge  $n$  et  $p$  permet de déterminer la caractéristique courant-tension ( $I - V$ ) d'une jonction idéale sous obscurité [3] :

$$I = I_0 \left[ e^{\frac{|e|V}{mk_B T}} - 1 \right] \quad (II.9)$$

Avec :

$V$  est le potentiel aux bornes de la jonction.

$T$  : La température (K).

$I_0$  est le courant de saturation de la jonction. Il a deux composantes :

- Le courant de la diffusion des porteurs minoritaires qui parviennent à atteindre la zone de charge d'espace, et
- Le courant de génération thermique des paires électron-trou créé dans la ZCE.

En négligeant la recombinaison dans la ZCE, le courant de saturation, qui est la somme de celui de la base et de l'émetteur, est donné par [3] :

$$I_0 = |e| \left( \frac{p_{n_0} D_p}{L_p} + \frac{n_{p_0} D_n}{L_n} \right) = |e| \left( \frac{n_i^2 D_p}{N_D L_p} + \frac{n_i^2 D_n}{N_A L_n} \right) \quad (II. 10)$$

Où :

$p_{n_0}$  et  $n_{p_0}$  sont les densités, respectivement, des trous dans la région type N et des électrons dans la région type P.

$L_n$  et  $L_p$  sont respectivement les longueurs de diffusion des électrons et des trous.

$N_D$  : la concentration des atomes donneurs ionisés.

$N_A$  : la concentration des atomes accepteurs ionisés.

$n_i$  : la concentration des électrons (ou des trous) dans un semi-conducteur intrinsèque.

$m$  est le facteur d'idéalité de la jonction P-N. Il est compris entre 1 et 2. Ce facteur permet de quantifier les différentes composantes du courant lorsque la jonction est polarisée en direct [3] :

- ✓  $m = 1$  : le courant dû aux recombinaisons dans les régions N et P constitue le courant de diffusion des électrons et des trous.
- ✓  $m = 2$  : le courant dû aux recombinaisons dans la zone de charge d'espace constitue le courant de saturation.

Sous éclairage, le courant photo-généré est une somme de deux courants de porteurs majoritaires. Le premier est un photo-courant de génération, les paires électron-trou photo-générées sont séparées par le champ électrique interne de la jonction, chaque type de charge s'accélère vers la région où il est majoritaire. Le deuxième est un photo-courant de diffusion; les porteurs minoritaires diffusent dans la cellule sous un gradient de la concentration, s'ils atteignent la ZCE sans qu'ils se recombinent, ils la traversent pour atteindre la région où ils sont majoritaires. Ce photo-courant  $I_{ph}$  s'ajoute au courant d'obscurité et par conséquent la caractéristique  $I - V$  devient [3] :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\frac{|e|V}{mk_B T}} - 1 \right] \quad (II.11)$$

Où  $I_{ph}$  est la somme des courants dans les différentes régions de la cellule (base, ZCE, émetteur).

## II.2.2 Rendement quantique d'une cellule photovoltaïque

Le rendement quantique (QE) d'une cellule est le rapport du nombre de porteurs de charge collectés par la cellule solaire au nombre de photons, d'une énergie donnée, incidents sur la cellule solaire. Le rendement quantique peut être donné soit en fonction de la longueur d'onde, soit en fonction de l'énergie. Si tous les photons d'une certaine longueur d'onde sont absorbés et que les porteurs minoritaires résultants sont collectés, alors QE à cette longueur d'onde particulière est de l'unité. Le rendement quantique des photons dont l'énergie est inférieure à la largeur de la bande interdite est nul (voir la figure II.4).

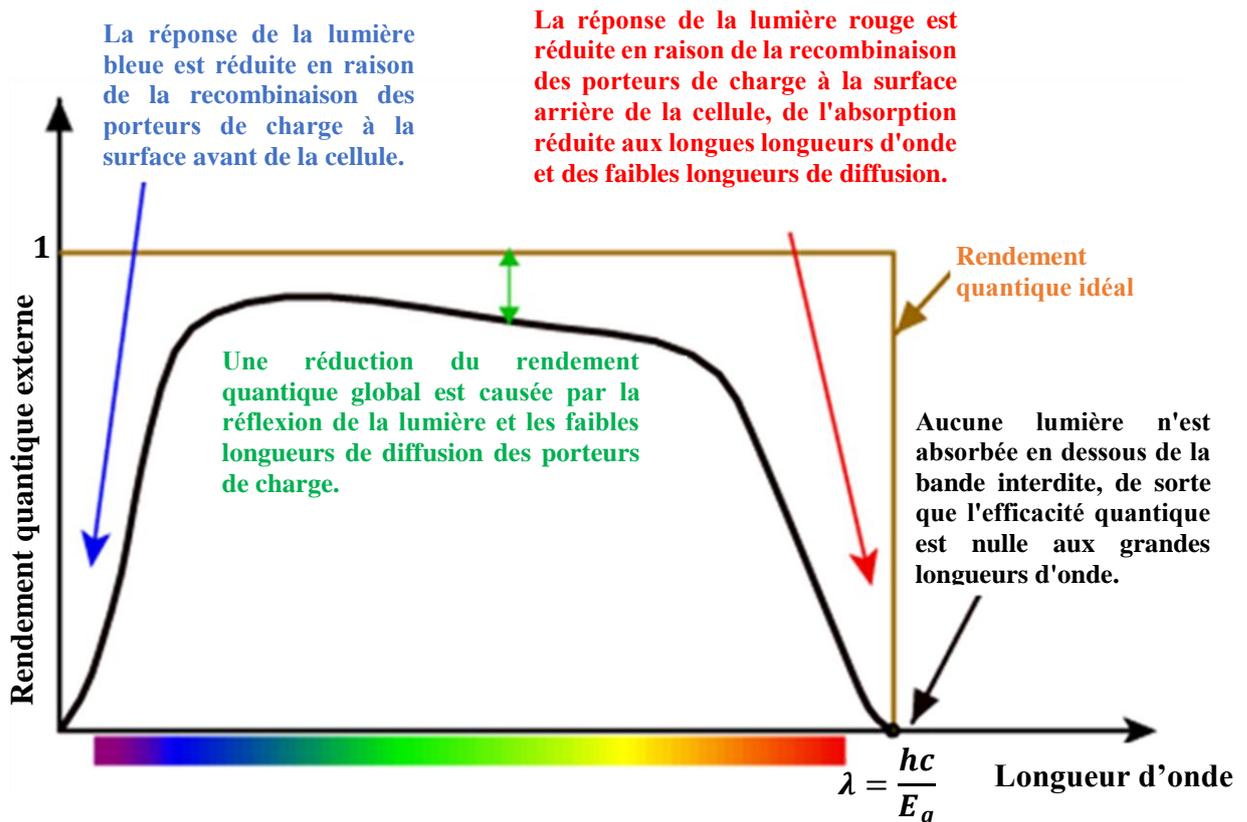


Figure II.4 : Rendement quantique externe en fonction d'une cellule solaire en silicium [5].

Alors que le rendement quantique d'une cellule idéale a la forme carrée, comme elle est illustrée ci-dessus, le QE de la plupart des cellules solaires est réduite en raison des effets de recombinaison. Les mêmes mécanismes qui affectent la probabilité de collecte affectent

également l'efficacité quantique [5]. Par exemple, la passivation de la surface avant affecte les porteurs générés près de la surface, et comme la lumière bleue est absorbée à une profondeur très proche de la surface, une vitesse de recombinaison élevée à la surface avant affectera la partie de la lumière bleue de QE. De même, la lumière verte est relativement absorbée en volume de la cellule solaire [5]. Dans ce cas, pour une faible longueur de diffusion des porteurs de charge, la probabilité de collecte de ces porteurs du volume de la cellule solaire réduira le rendement quantique dans la partie verte du spectre solaire. En conséquence, le rendement quantique peut être considéré comme la probabilité de collecte due au profil de génération des porteurs de charge pour une seule longueur d'onde, associée à une épaisseur de la cellule et normalisée au nombre incident de photons à cette longueur d'onde.

### II.2.3 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

La figure II.5 représente les caractéristiques courant-tension ( $I - V$ ) et puissance-tension ( $P - V$ ) d'une cellule photovoltaïque sous éclairage avec l'ensemble des points remarquables ( $V_{co}, I_{cc}, V_{max}, I_{max}, P_{max}$ ) permettent la détermination des grandeurs photovoltaïques caractéristiques [6].

Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  est obtenu à  $V = 0$ . Il définit la quantité  $G$  des paires électron-trou créés et qui traverse la jonction sans recombinaison. Il est contrôlé par les longueurs de diffusion des électrons et des trous,  $L_n$  et  $L_p$ , respectivement [6] :

$$I_{cc} = |e|.G.(L_n + L_p) \quad (II.12)$$

La tension en circuit-ouvert  $V_{co}$  est la tension pour laquelle  $I = 0$ . Dans le cas idéal, elle est déterminée par l'expression [6] :

$$V_{co} = \frac{k_B T}{|e|} \ln \left( \frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right) \quad (II.13)$$

Le facteur de forme est fonction des résistances série  $R_S$  et parallèle  $R_p$  ainsi que du facteur d'idéalité de la diode. Il est défini par le rapport de la puissance maximal  $P_M = V_M \cdot I_M$  et de la valeur du produit  $I_{cc} \cdot V_{co}$  [6] :

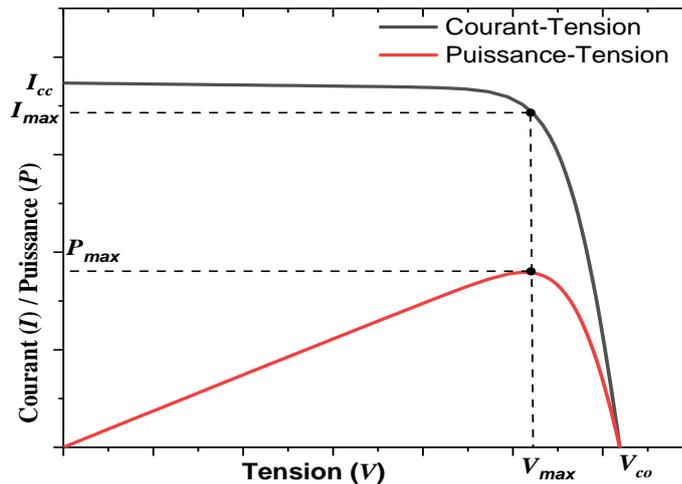
$$FF = \frac{V_M \cdot I_M}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (II.14)$$

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance maximale générée par la cellule et la puissance lumineuse qu'elle reçoit  $P_0 = P_i \cdot S$  [6] :

$$\eta = \frac{V_M \cdot I_M}{P_i \cdot S} \quad (II.15)$$

$S$  est la surface de la cellule solaire.

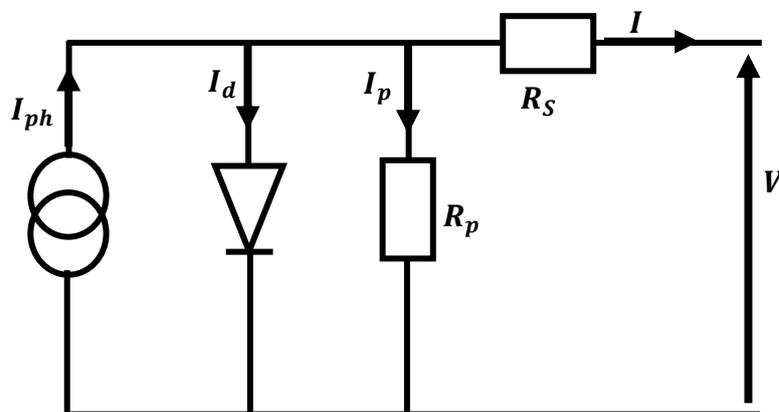
$P_i$  est la densité de puissance incidente reçue sur la surface de la cellule qui dépend des conditions météorologiques et la hauteur du soleil.



**Figure II.5 :** Caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'une cellule photovoltaïque sous éclairement [6].

## II.2.4 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

La détermination électrique simple du fonctionnement réel d'une cellule photovoltaïque sous éclairement est évoquée par un modèle à une diode [6, 7]. Son fonctionnement sous éclairement 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 d'une diode parcourue par des courants  $I_d$  (voir figure II.6).



**Figure II.6 :** Circuit équivalent à une cellule photovoltaïque sous éclairement [6].

La description de la caractéristique courant-tension en concordance avec le modèle à une diode est [7] :

$$I_d = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{|e| \cdot (V + IR_s)}{mk_B T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (II.16)$$

Où  $I_d$  est le courant d'obscurité de la diode et  $I_0$  le courant de saturation. Celui-ci traduit les pertes par recombinaison des porteurs minoritaires. Ces pertes peuvent être localisées en volume des régions quasi-neutres (N, P), aux surfaces avant et arrière de la cellule et au niveau de la zone de charge d'espace.

Les résistances série  $R_s$  et parallèle  $R_p$  introduites dans l'équation de ce modèle sont déterminées respectivement à partir de la pente  $\frac{\partial V}{\partial I}$  au voisinage de  $V_{co}$ , la tension de circuit-ouvert et de  $I_{cc}$ , le courant de court-circuit. Physiquement, la résistance série est dû essentiellement à la résistance du matériau semi-conducteur et à celle des contacts métal/semi-conducteur [8]. Par ailleurs, les mécanismes physiques responsables de l'apparition de la résistance parallèle sont complexes. Elle traduit la fuite des porteurs de charge via la surface latérale de la cellule photovoltaïque et la présence des défauts et/ou d'impuretés métalliques dans la jonction. Pour maximiser le rendement photovoltaïque, il est nécessaire que les résistances séries soient petites et que la résistance parallèle soit élevée. Les valeurs typiques d'une cellule au silicium à rendement proche de 25% valent  $0,1\Omega$  et  $10^3\Omega$  pour respectivement  $R_s$  et  $R_p$  [8].

Le facteur d'idéalité  $m$  de la diode varie en fonction de la nature de l'origine du courant de saturation  $I_0$  dominant. Il vaut 1 pour une diode modélisant la diffusion dans la base et l'émetteur et augmente lorsque les recombinaisons dans la zone de charge d'espace deviennent dominantes [7] :

- ( $1 < m < 2$ ) : le niveau piège est peu profond dans la zone de charge d'espace et dépend de la polarisation.
- ( $m = 2$ ) : 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.
- ( $2 < m < 4$ ) : 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.

### II.3 Mécanismes de recombinaison dans le silicium cristallin

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  $G_0$  et celui de recombinaison  $R_0$  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 [9] :

$$\begin{cases} n_0 = N_C \cdot \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_B T}\right) = N_D, & p_0 = n_i^2/n_0 & \text{semi-conducteur de type } n \\ p_0 = N_V \cdot \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right) = N_A, & n_0 = n_i^2/p_0 & \text{semi-conducteur de type } p \end{cases} \quad (II.17)$$

$E_F$ ,  $E_C$  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.

Sous une excitation optique constante, le système passe dans un nouvel état stationnaire où le taux total de génération  $G > G_0$  est équilibré par un taux de recombinaison total  $R > R_0$ , qui mène aux densités d'électrons  $n$  dans la bande de conduction et de trous  $p$  dans la bande de valence tel que  $n \cdot p \neq n_i^2$ . Comme l'équilibre thermique ne peut pas être atteint instantanément après la coupure de la source de génération, les densités excessives de porteurs  $\Delta n = n - n_0$  et  $\Delta p = p - p_0$  diminuent jusqu'à ce que le système atteigne de nouveau les concentrations  $n_0$  et  $p_0$ . Le taux de recombinaison  $U = R - R_0$  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  $\Delta n$  et leur durée de vie  $\tau$  [9] :

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = U = \frac{\Delta n}{\tau} \quad (II.18)$$

$U$  est le taux de recombinaison des porteurs de charge excédentaires en  $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ ,  $\Delta n$  est la concentration excédentaire des porteurs de charge en  $\text{cm}^{-3}$  et  $\tau$  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 [10].

- **La recombinaison Auger**

Il est le mécanisme le plus dominant dans le silicium lorsque le niveau de dopage est élevé [9, 10].

- **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' [9, 10]. 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 située 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  $\text{SiO}_2$  et/ou le dépôt d'une couche de nitrure de silicium ( $\text{SiN}$ ) [10].

## **II.4 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 origines. Aussi, nous avons évoqué la modélisation électrique aussi fidèle que précise du fonctionnement d'une cellule solaire sous éclairement et les différentes grandeurs photovoltaïques extraites et calculées à partir des caractéristiques courant-tension et puissance-tension.

## **II.5 Références bibliographiques**

- [1] S. Fonash. Solar Cell Device Physics, 2nd Edition. Elsevier (2010).
- [2] O. Isabella, K. Jäger, A.H.M. Smets, R. van S. A.C.M.M, and M. Zeman. Solar Energy : The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems. UIT Cambridge (2016).
- [3] M. SZE. Physics of semiconductors devices, 3<sup>ème</sup> Ed. Wiley, New York, (1997).
- [4] ASTM G. Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances : Direct Normal and Hemispherical on 37 Tilted Surface, ASTM International, West Conshohocken, PA (2012).
- [5] J.S. Hartman and M.A. Lind. Spectral Response Measurements for Solar Cells, Solar Cells, Vol. 7, pp. 147 – 157 (1982).
- [6] M. Orgeret. les piles solaires : le composant et ses applications, Ed. Masson, p. 1. (1985).
- [7] D. S. H. Chan, J. C. H. Phang. IEEE-TED ED-34, 286 (1987).
- [8] M. S. Swaleh and A. Green. Effect of shunt resistance and bypass diodes on the shadow tolerance of solar cell modules, Solar Cells, issue 2, pp. 183-198 (1982).
- [9] P.T. Landsberg. Recombination in semiconductors, Cambridge University Press (1991).
- [10] M.J. Kerr. Surface, Emitter and Bulk recombination in silicon and development of silicon nitride passivated solar cells, Thèse de Doctorat, Université Nationale d’Australie, Australie (2002).



CHAPITRE III :  
Simulateur PC1D,  
Résultats et Discussions

### **III.1 Introduction**

La recherche basée sur la simulation informatique est un domaine en plein essor pour le développement de cellules solaires à haut rendement. En effet, elle est devenue un moyen indispensable pour une représentation initiale du fonctionnement d'une cellule sans expérimentation. En conséquence, elle permet de gagner du temps et de l'argent. Dans ce contexte, de nombreux programmes informatiques ont été développés au cours de ces dernières années. Parmi eux, on cite le logiciel nommé PC1D (Personal Computer One Dimensional) qui permet d'envisager les performances d'une cellule photovoltaïque en silicium monocristallin sous éclairage à travers l'analyse appropriée de ses rendements quantiques interne (IQE) et externe (EQE) ainsi que de ses caractéristiques courant-tension et puissance-tension.

Une façon d'exploiter l'énergie solaire est d'utiliser des cellules photovoltaïques qui convertissent l'énergie véhiculée par le rayonnement incident en un courant électrique continu. Cette conversion est basée sur l'effet photovoltaïque engendré par l'absorption des photons. Une partie des photons absorbés génère des paires électron-trou qui devraient être achever aux contacts métalliques de la cellule grâce au champ électrique de la zone de charge d'espace (ZCE) de la jonction P-N. Ainsi, les paramètres responsables du rendement d'une cellule photovoltaïque sont les caractéristiques des régions de la cellule, en particulier celles de l'émetteur, de la base et de la ZCE.

Dans ce chapitre, nous présenterons les observations issues de l'évaluation de l'impact du niveau de dopage de la région de l'émetteur de type N et de son épaisseur sur les grandeurs photovoltaïques de la cellule solaire à l'aide du logiciel de simulation PC1D. Aussi, nous tenterons de comprendre l'ampleur de ses paramètres afin de concevoir une structure de cellule solaire à haut rendement.

### **III.2 Aperçu général du logiciel de simulation PC1D**

PC1D est un logiciel de simulation unidimensionnel dédié à la modélisation aussi fidèle que précise du fonctionnement des cellules photovoltaïques sous éclairage. Il est capable de résoudre les équations couplées non linéaires qui gouvernent les phénomènes physiques du dispositif étudié. En conséquence, il permet de simuler n'importe qu'elle

structure photovoltaïque et d'approcher les résultats expérimentaux sous des gains de temps et d'argent considérés faibles [1].

Le logiciel PC1D a été conçu par Paul A. Basore durant ses travaux de recherche à la faculté d'ingénierie électrique à l'université d'Iowa en Australie, et fut rendu public, pour la première fois, après l'avoir annoncé à la 18<sup>ème</sup> conférence sur le photovoltaïque IEEE PVSC (décembre 1985) [2]. Il comprend des fichiers de bibliothèque avec les paramètres des semi-conducteurs cristallins qui sont utilisés dans la technologie des cellules solaires comme AsGa, AlAsGa, Ge, Si, etc... Les données du spectre solaire sont également disponibles dans le logiciel [3, 4]. La fenêtre principale de PC1D est donnée à la figure III.1. Sur la fenêtre de démarrage du logiciel se distingue cinq parties essentielles [5]. 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 1 cm<sup>2</sup>.
- 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.
- 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 ( $\text{cm}^{-3}$ ), 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. Également, le logiciel renferme plusieurs spectres solaires standards, chacun d'eux spécifie l'endroit de l'étude, par exemple, dans l'espace, on choisit le spectre air-mass AM0 par contre sur la surface de la terre, il est à choisir air mass AM1.5.

## **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. Elle 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).

Après l'introduction de toutes les données nécessaires du matériau étudié, ainsi que la configuration de la cellule solaire, une icône nommé « Run » permet de lancer les calculs. Après quelques secondes, de nouvelles fenêtres s'ouvrent pour visualiser les différents résultats numériques et/ou graphiques désirés. Le fonctionnement du PC1D nécessite plusieurs critères à respecter, en particulier :

- Le choix des gammes des valeurs des différents paramètres n'est pas aléatoire, elles doivent être réalisables par la technologie.
- Pour des considérations numériques, les valeurs à introduire, doivent être comprises dans des intervalles bien déterminés.
- Pour une convergence rapide, il est indispensable de minimiser au maximum la taille des éléments finis, et choisir un nombre adéquat des itérations.
- Le bon choix des paramètres numériques.
- Une initialisation convenable des différents paramètres de la simulation.

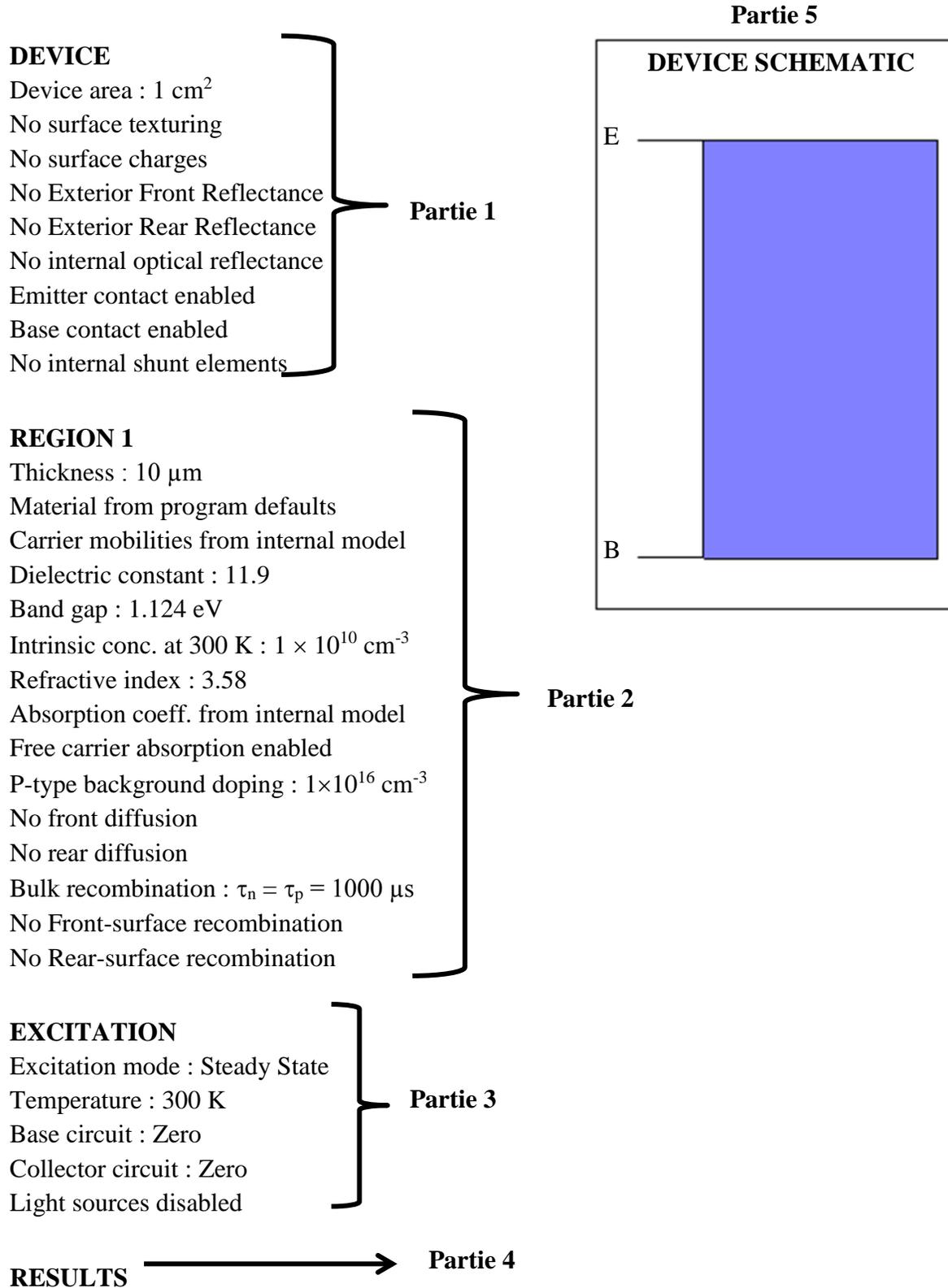


Figure III.1 : Fenêtre affichée au démarrage du logiciel de simulation PC1D

### III.3 Simulation PC1D et discussion des résultats

Dans cette étude, nous avons testé plusieurs simulations pour distinguer l'influence des divers paramètres sur le rendement des cellules solaires. Nous avons choisi d'utiliser le silicium comme matériau composant les cellules simulées car c'est le semi-conducteur le plus utilisé actuellement dans l'industrie photovoltaïque [6].

La cellule de base à partir de laquelle nous avons débuté nos simulations possède une épaisseur de 185  $\mu\text{m}$  et une surface de  $1\text{cm}^2$ . Aussi, une région d'émetteur de type N, étendue sur 5  $\mu\text{m}$  et dopée à  $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ . Les autres paramètres de la cellule sont montrés sur la figure III.2.

File : C:\Users\PI\Desktop\mémoire master 2022\PC1D5\Pvcell.prm.

#### DEVICE

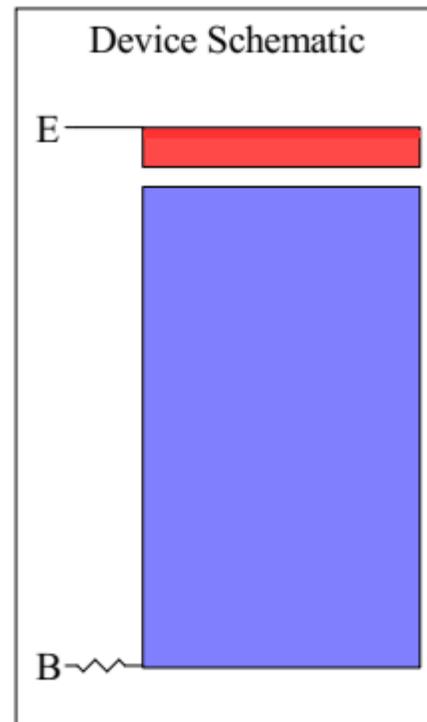
Device area :  $1 \text{cm}^2$   
 No surface texturing  
 No surface charges  
 Front Reflectance : 5%  
 No Exterior Rear Reflectance  
 Internal optical reflectance enabled  
 Front surface optically rough  
 Emitter contact enabled  
 Base contact :  $0.8 \Omega$   
 No internal shunt elements

#### REGION 1

Thickness : 5  $\mu\text{m}$   
 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  
 N-type background doping :  $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$   
 1st front diff.: N-type,  $2 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$  peak  
 No 2nd front diffusion  
 No rear diffusion  
 Bulk recombination :  $\tau_n = \tau_p = 30 \mu\text{s}$   
 No Front-surface recombination

#### REGION 2

Thickness : 180  $\mu\text{m}$   
 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 :  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$   
*No rear diffusion*  
Bulk recombination :  $\tau_n = \tau_p = 30 \text{ } \mu\text{s}$   
*No Rear-surface recombination*  
**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 :  $0.1 \text{ Wcm}^{-2}$   
**RESULTS**  
Short-circuit  $I_b$  : 0.0258 amps  
Max base power out : 0.0129 watts  
Open-circuit  $V_b$  : 0.6243 volts

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

Comme on peut le remarquer sur la figure III.2, pour la partie excitation, nous avons choisi le fichier « one-sun.exc ». En fait, il existe deux fichiers dans le logiciel PC1D qui contiennent des paramètres standards à utiliser lors de la simulation des cellules solaires. Ces deux fichiers sont :

1- Le fichier « one-sun.exc » qui nous donne les résultats suivants :

- La valeur du courant de court-circuit  $I_{cc}$ .
- La valeur de la tension en circuit-ouvert  $V_{co}$ .
- La valeur de la puissance maximale  $P_{max}$ .
- Les caractéristiques : courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V).

2- Le fichier « scan-qe.exc » qui nous renseigne sur les grandeurs suivantes :

- La valeur du courant de court-circuit  $I_{cc}$ .
- La valeur de la puissance maximale  $P_{max}$ .
- Les caractéristiques de la réflexion, du rendement quantique interne (IQE) et du rendement quantique externe (EQE) versus la longueur d'onde du spectre solaire.

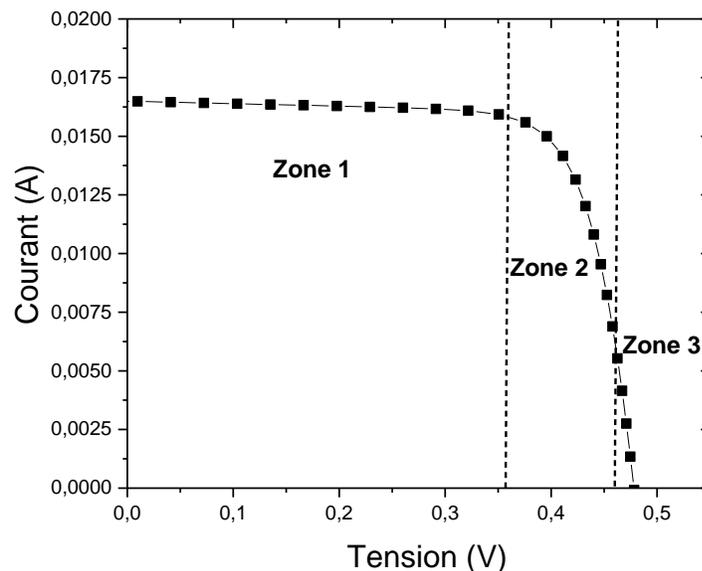
Pour l'excitation « scan-qe.exc », nous avons obtenu de la cellule de base simuler dans l'environnement PC1D, les valeurs des grandeurs photovoltaïques rapportées ci-dessous en tableau III.1.

Court-circuit $I_{cc}$	Tension en circuit-ouvert $V_{co}$	Puissance électrique maximale $P_{max}$
25,8 mA	624,3 mV	12,9 mW

**Tableau III.1:** Valeurs des grandeurs photovoltaïques issues de la simulation de la cellule de base dans l'environnement PC1D.

On peut facilement vérifier que ces valeurs peuvent être extraites directement de la courbe courant-tension de la figure III.3. Par ailleurs, cette dernière peut être décomposée en trois distinctes 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 I-V. Elle est caractérisé par un point où la cellule délivre une puissance électrique maximale.
- Zone 3 : elle se distingue par une variation du courant correspondant à une tension presque constante. Dans ce cas, la cellule est assimilée à un générateur de tension.

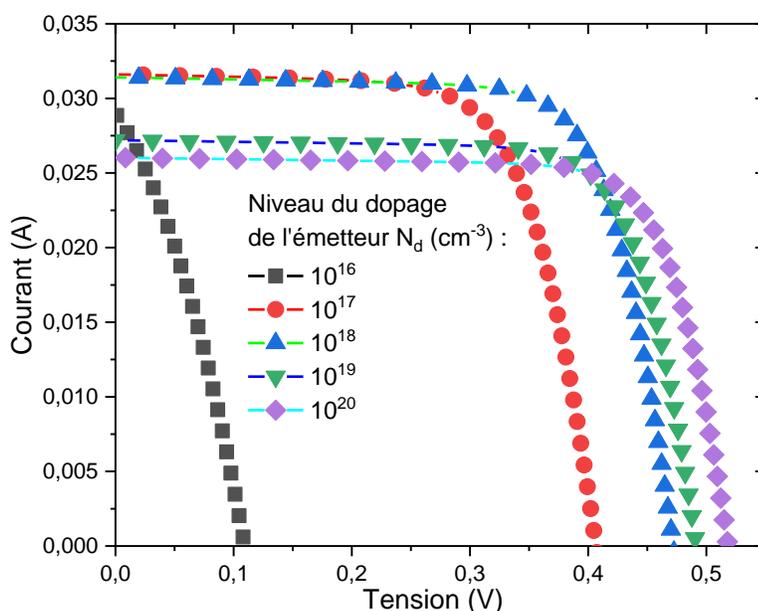


**Figure III.3 :** Courbe I-V découlant de la simulation avec le logiciel PC1D de la cellule solaire de base en silicium monocristallin sous éclaircment à  $T = 25^{\circ}\text{C}$ . La région de l'émetteur est de type N, ayant  $5 \mu\text{m}$  d'épaisseur et dopée à  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

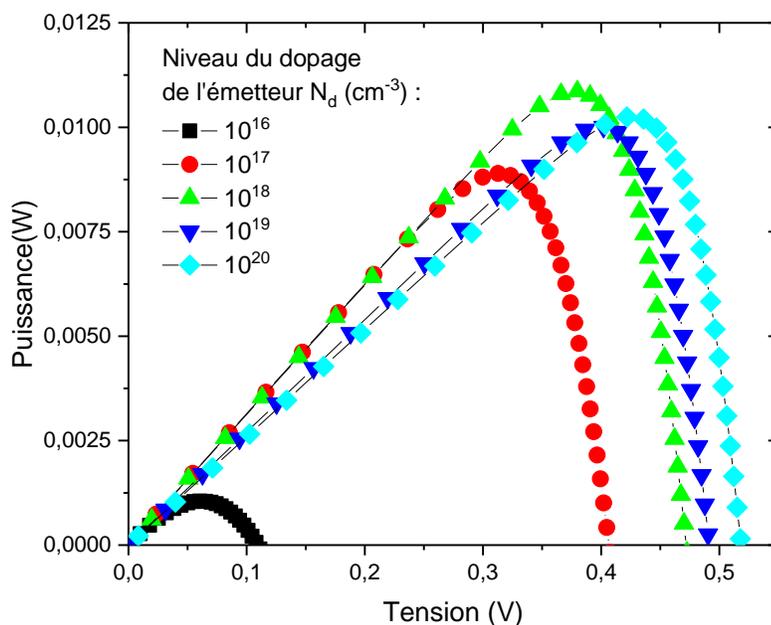
Afin d'atteindre des rendements photovoltaïques élevés, il est important de prendre en compte les paramètres les plus significatifs lors de l'élaboration des cellules solaires et ceux liés aux conditions climatiques. Pour cela, la suite de ce chapitre est consacrée à l'étude et l'analyse de l'effet des paramètres de l'émetteur sur les caractéristiques : courant-tension, puissance-tension ainsi que le rendement quantique externe d'une cellule solaire en mono-silicium sous éclairage. Pour ce faire, nous allons maintenir les mêmes paramètres de la cellule de base de la figure III.2 et nous allons faire varier à chaque fois un seul paramètre afin de mieux examiner son effet sur les caractéristiques de la cellule.

### III.3.1 Effet du niveau de dopage de la région de l'émetteur

Les caractéristiques I-V et P-V représentées, respectivement, sur les figures III.4 et III.5 sont obtenues pour des émetteurs non texturés, d'épaisseur 5  $\mu\text{m}$  et ayant différents niveaux de dopage en atomes donneurs  $N_d$ . Les valeurs de  $N_d$  ont été choisies de manière à obtenir des émetteurs dopés modérément ou fortement. Pour cela, la plage de variation de  $N_d$  était de  $10^{16}$  jusqu'à  $10^{20}$  atomes. $\text{cm}^{-3}$ . Remarquons sur les deux figures que le niveau du dopage de l'émetteur altère la forme des deux caractéristiques et contrôle les valeurs du courant de court-circuit  $I_{cc}$ , de la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  et de la puissance maximale  $P_{max}$ . De plus, la caractéristique I-V montrent clairement que la tension en circuit-ouvert  $V_{co}$  croît avec  $N_d$  tandis que le courant de court-circuit  $I_{cc}$  diminue. Cependant, en se référant à la figure III.5, on constate que la concentration de dopage de l'émetteur la plus favorable pour une conversion efficace de l'énergie solaire en électricité est  $N_{df} = 1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Dans ce cas, une puissance électrique maximale de l'ordre de 10,8 mW est délivrée par la cellule. Néanmoins, l'augmentation ou la diminution de  $N_d$  entraîne une détérioration des performances de la cellule.



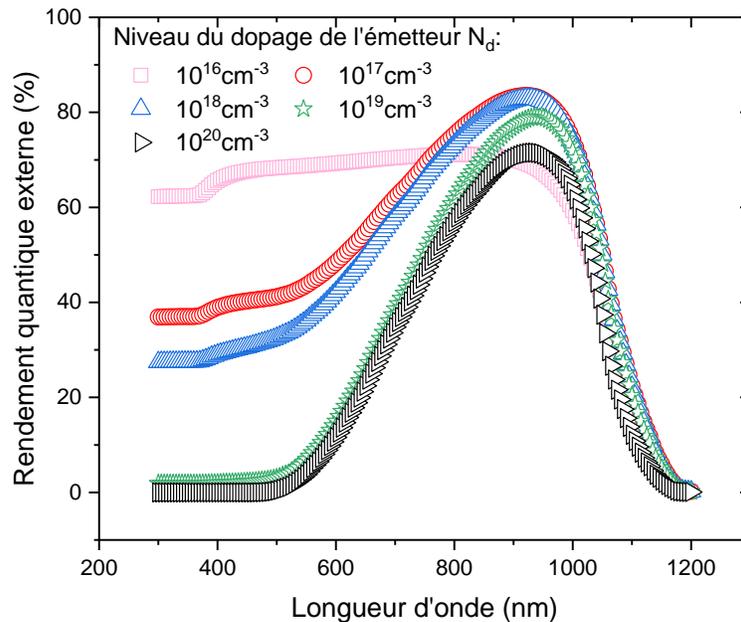
**Figure III.4 :** Effet du niveau de dopage de de la région de l'émetteur sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire en silicium monocristallin.



**Figure III.5 :** Effet du niveau de dopage de de la région de l'émetteur sur la caractéristique P-V d'une cellule solaire en silicium monocristallin.

D'après la littérature, il est évident que les propriétés de la région de l'émetteur influencent significativement le rendement photovoltaïque d'une cellule solaire en mono-silicium. En effet, une configuration d'un émetteur idéal vise à réduire (i) les pertes des porteurs de charge par recombinaison dans ladite région ainsi qu'à sa surface [7] et (ii) les

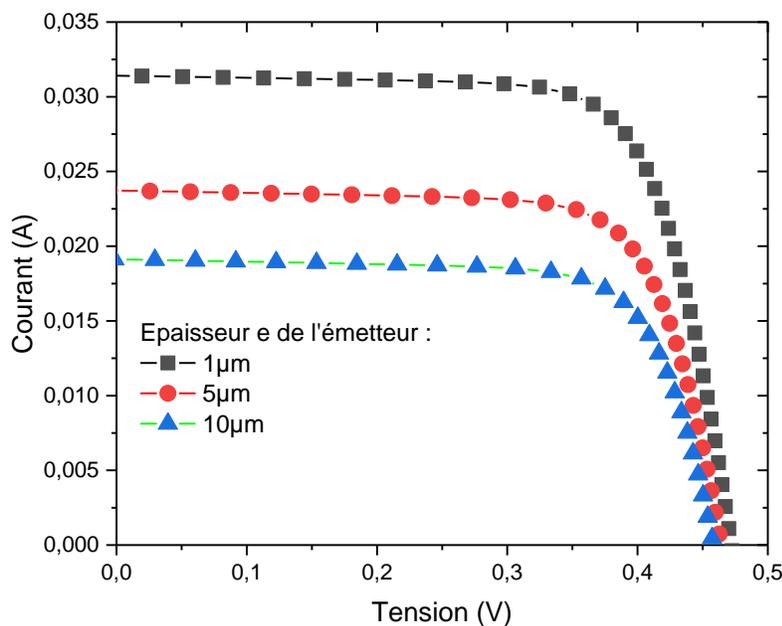
pertes résistives engendrées par la résistance série de la cellule ainsi que celle de ces contacts [8]. Cependant, ces deux types de pertes peuvent être constatées sur la courbe du rendement quantique externe (EQE) des cellules. En conséquence, pour expliquer les observations signalées sur les courbes courant-tension et puissance-tension, nous avons examiné l'effet du niveau de dopage  $N_d$  de l'émetteur sur EQE des cellules via le simulateur PC1D. Les résultats sont donnés à la figure III.6. Cette dernière montre que l'augmentation de  $N_d$  provoque une diminution de EQE dans la gamme des longueurs d'onde du bleu (300–500 nm). Ceci est un témoignage que le taux de recombinaison des porteurs de charge libres dans l'émetteur et sa surface est d'autant plus élevée que  $N_d$  est grand. Ce qui explique la détérioration de  $I_{cc}$  avec l'augmentation de  $N_d$  à la figure III.4. Néanmoins, l'amélioration de  $V_{co}$  est dû au fait que l'émetteur devient de plus en plus moins résistif au fur et à mesure que son niveau de dopage est élevé. En effet, dans la plage des longueurs d'onde de 700 nm à 1000 nm, on constate que le rendement quantique externe de la cellule ayant un émetteur dopé à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  est particulièrement élevé. Cependant, pour des niveaux de dopages supérieurs, la réponse spectrale se détériore. Ceci est probablement causé par des faibles longueurs de diffusion des porteurs de charge engendrées par le dopage élevé de l'émetteur.



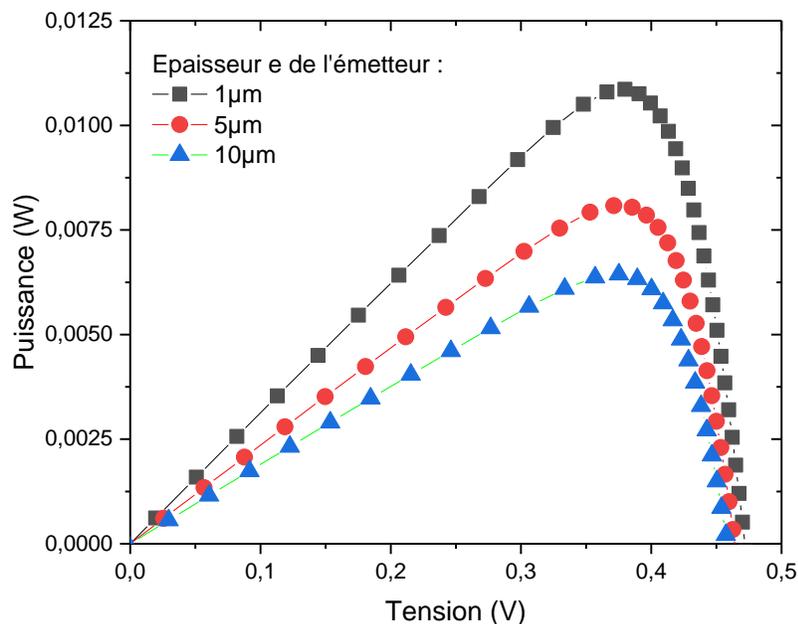
**Figure III.6** : Effet du niveau de dopage de la région de l'émetteur sur le rendement quantique externe d'une cellule solaire en silicium monocristallin.

### III.3.2 Effet de l'épaisseur de la région de l'émetteur

L'étude de l'effet de l'épaisseur  $e$  de l'émetteur sur les performances de nos cellules a été faite à travers l'analyse des caractéristiques I-V et P-V obtenues via le simulateur PC1D. En effet, nous avons agi sur l'émetteur de la cellule de base en fixant son niveau de dopage  $N_d$  à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  accompli par une variation de son épaisseur correspondant à  $e = 1 \mu\text{m}$ ,  $5 \mu\text{m}$  et  $10 \mu\text{m}$ . Les conséquences d'une telle démarche sont exposées sur les figures III.7 et III.8. Sur ces dernières, On peut constater que d'importantes altérations de  $I_{cc}$  et de  $P_{\max}$  sont enregistrées avec la croissance de l'épaisseur  $e$  de l'émetteur alors que  $V_{co}$  est faiblement affecté. Ainsi, on note des valeurs de l'ordre de 31,4 mA et 11 W pour une épaisseur de  $1 \mu\text{m}$  alors qu'elles sont de 19,1 mA et 6,4 W pour  $e = 10 \mu\text{m}$ . En conséquence, l'épaisseur de l'émetteur est un paramètre indispensable à prendre en compte pour atteindre des rendements de conversion considérables.

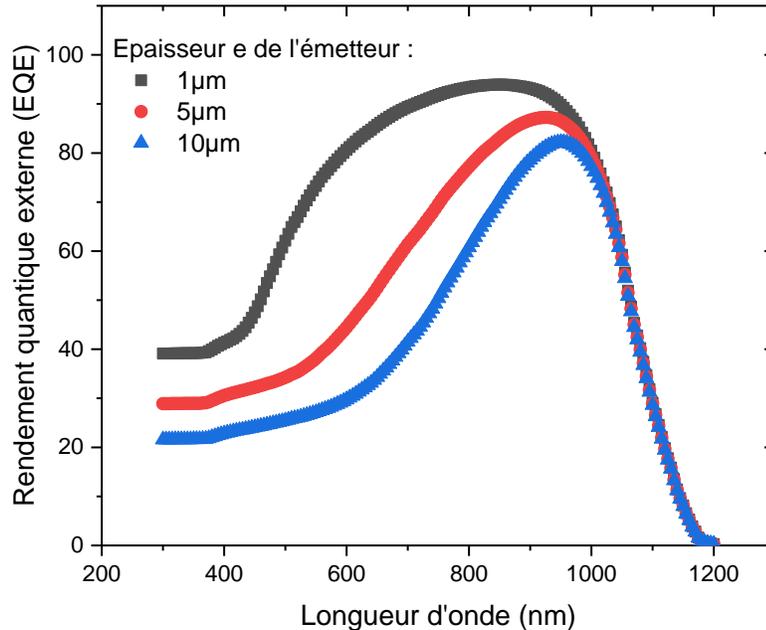


**Figure III.7** : Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire en mono-silicium dans l'environnement PC1D.



**Figure III.8** : Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur la caractéristique P-V d'une cellule solaire en mono-silicium dans l'environnement PC1D.

Pour pouvoir éclaircir les comportements observés sur  $I_{cc}$  et  $P_{max}$ , nous avons examiné les rendements quantiques externes des cellules ayant des épaisseurs  $e = 1 \mu\text{m}$ ,  $5 \mu\text{m}$  et  $10 \mu\text{m}$  dans l'environnement PC1D. On constate aisément sur la figure III.9, qui montre EQE en fonction de la longueur d'onde du flux lumineux, que dans la gamme des longueurs d'onde allant de 300 jusqu'à 900 nm, EQE se détériore avec la croissance de l'épaisseur  $e$  de l'émetteur. Rappelons que le rendement quantique est l'un des paramètres les plus cruciaux d'une cellule solaire. C'est le rapport du nombre de porteurs de charge collectés par la cellule solaire au nombre de photons incidents pour une longueur d'onde donnée [9]. La diminution de EQE indique une dégradation de la collecte des porteurs libres. Ainsi, EQE révèle la contribution des photons des différentes longueurs d'ondes dans  $I_{cc}$ . De plus, étant donné que l'éclairement des cellules, dans notre cas, se fait à travers l'exposition de l'émetteur à la lumière, alors son épaisseur affectera simultanément le nombre de porteurs de charges libres photogénérés et leurs distances parcourues jusqu'aux contacts. Vraisemblablement, un émetteur épais présentera une densité d'électrons photogénérés minime ainsi que de faibles longueurs de diffusion. Dans ce cas, on enregistrera un courant faible et des vitesses de recombinaison élevées dans la région de l'émetteur.

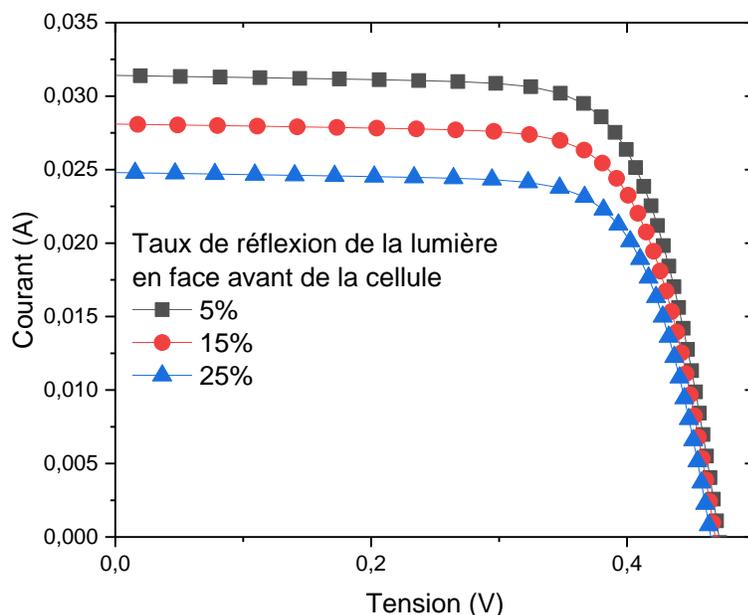


**Figure III.9 :** Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement quantique externe d'une cellule solaire en silicium monocristallin.

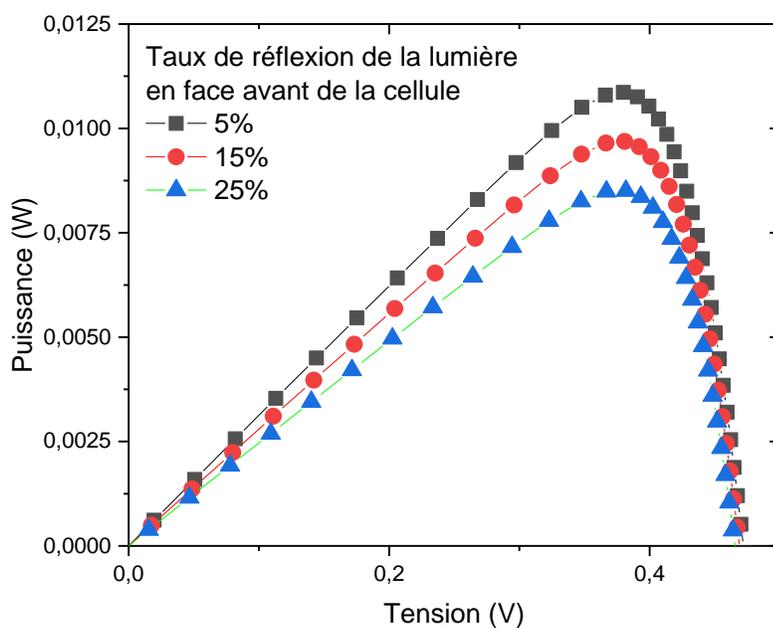
### III.3.3 Effet du taux de réflexion de la face avant de la cellule

Pour visualiser l'influence du taux de réflexion de la lumière sur la face avant de la cellule à l'égard des caractéristiques courant-tension et puissance-tension, nous avons fixé l'épaisseur de l'émetteur  $e$  à  $1 \mu\text{m}$  et son niveau de dopage  $N_d = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Les deux caractéristiques, illustrées sur les figures III.10 et III.11, montrent bien les variations importantes du courant  $I_{cc}$  et de  $P_{max}$  délivrés par les cellules comparées à des valeurs de  $V_{co}$  nettement constantes pour différent taux de réflexion. En effet, au fur et à mesure que la face avant de l'émetteur est réfléchissante, le flux de radiations lumineuses pénétrant en volume de la cellule devient insignifiant et par la suite des taux de génération de porteurs de charge libres faibles. En conséquence, une forte diminution des valeurs du courant et de la puissance électrique délivrés par la cellule confrontée à une tension en circuit-ouvert constante. Ainsi, on mesure des valeurs de  $I_{cc}$  de l'ordre de  $31,3 \text{ mA}$  et  $24,7 \text{ mA}$  pour respectivement des taux de réflexion de  $5\%$  et de  $25\%$ . Pour cela, le taux de réflexion de la face avant d'une cellule photovoltaïque est un paramètre important à considérer pour minimiser les pertes optiques surtout que le silicium monocristallin se distingue par un coefficient d'absorption faible [10]. Dans ce contexte, on propose d'étudier la texturation

ou le dépôt de couches antireflets (nitrure de silicium et/ou oxyde de silicium) comme une solution alternative aux pertes optiques au niveau de la face avant des cellules solaires à base du mono-silicium.



**Figure III.10** : Effet du taux de réflexion de la lumière en face avant d'une cellule solaire en mono-silicium sur la caractéristique I-V dans l'environnement PC1D.



**Figure III.11** : Effet du taux de réflexion de la lumière en face avant d'une cellule solaire en mono-silicium sur la caractéristique P-V dans l'environnement PC1D.

### **III.4 Conclusion**

Dans cette partie de ce mémoire, nous avons simulé des cellules solaires en mono-silicium sous éclairage dans l'environnement PC1D. Ce dernier est un logiciel qui permet de faire varier plusieurs paramètres physiques et technologiques afin d'étudier leurs impacts sur le rendement photovoltaïque de ces cellules. Dans ce contexte, cette étude est dédiée aux conséquences engendrées par la variation du niveau de dopage de l'émetteur, de son épaisseur et de son taux de réflexion de la lumière en sa face avant à l'égard de son efficacité à convertir de l'énergie solaire en énergie électrique. Les résultats obtenus citent l'importance de contrôler la concentration du dopant dans la région de l'émetteur ainsi que de le choisir moins épais. De plus, il est impératif de diminuer le taux de réflexion de la lumière en sa face avant éclairée et ceci à travers la texture ou l'ajout d'une couche antireflet. Relativement, les résultats de nos simulations favorisent un émetteur d'épaisseur  $1 \mu\text{m}$  dopé à  $10^{18}$  atomes donneurs. $\text{cm}^{-3}$  avec une face avant qui présente un taux de réflexion de lumière de l'ordre de 5%.

### III.5 Références bibliographiques

- [1] P. A. Basore, « PC1D installation manual and user's guide version 3.1 », Photovoltaic Technology Research Division Sandia National Laboratories, NM 87185, Sep.1991.
- [2] D.T. Rover, P.A. Basore and G.M. Thorson. "Solar cell modelling on personal computers," Proc. 18th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Las Vegas, pp. 703–709, 1985.
- [3] P.A. Basore. "Numerical Modelling of Textured Silicon Solar Cells Using PC-1D" IEEE Trans. On electrons Devices, ED-37 Issue 2, pp. 337 – 343, 1990.
- [4] A. Offiong. Assessing the Economic and Environmental Prospects of Standby Solar Powered Systems in Nigeria, Journal of Applied Sciences and Environmental Management, Vol 7, Issue 1, pp. 37– 42, 2003.
- [5] C.S. Naoki Solanki, R.R. Bilyalov, J. Poortmans et al. Free standing thin-film monocrystalline silicon (FMS) solar cells, 18th European Photovoltaic : Solar Energy Conference, Rome, Italy, 2002.
- [6] M.Y. Fateha, G.M. Eldalal et M.M. Soliman. Optimum design for bifacial silicon solar cells, Renewable Energy. 22, pp. 269-274 (2001).
- [7] N. Stem, M. Cid. Physical limitations for homogeneous and highly doped n-type emitter monocrystalline silicon solar cells. Solid-State Electron. 48, pp. 197–205 (2004).
- [8] C. Battaglia, A. Cuevas, S. De Wolf. High-efficiency crystalline silicon solar cells : Status and perspectives. Energy Environ. Sci. 9, pp. 1552–1576 (2016).
- [9] S. Chander, A. Purohit, A. Nehra, S. Nehra, M.A. Dhaka. study on spectral response and external quantum efficiency of mono-crystalline silicon solar cell. Int. J. Renew. Energy Res. (IJRER) 5, pp. 41–44 (2015).
- [10] 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).

---

## Conclusion générale

---

Ce travail de recherche est destiné à évaluer l'impact des paramètres de l'émetteur sur les performances des cellules photovoltaïques à jonction P-N en silicium monocristallin via le logiciel de simulation PC1D. Pour ce faire, la surface de l'émetteur, de type N, a été irradiée par un flux lumineux de longueur d'onde allant de 300 à 1200 nm. Ensuite, un examen attentif des caractéristiques courant-tension et puissance-tension a été opéré. Cependant, étant donné que le mono-silicium est un matériau qui présente un faible coefficient d'absorption, les rendements quantiques externes de nos cellules ont été aussi analysés. De l'ensemble des résultats issus de ce travail, nous pouvons confirmer que :

- Le niveau de dopage  $N_d$  la région de l'émetteur est un paramètre important à considérer lors de la formation de la jonction P-N puisqu'il éprouve d'une part des vitesses de recombinaison d'électrons libres élevées en son volume et en sa surface si  $N_d$  est élevé et d'autre part des pertes d'électrons à cause de la nature résistif de l'émetteur si le niveau de dopage est faible. En se référant à notre étude, une valeur de  $N_d$  de l'ordre de  $10^{18}$  atomes.cm<sup>-3</sup> est un compromis pour minimiser les deux types de pertes citées précédemment dans cette région. Un tel constat a été aussi observé sur les courbes du rendement quantique externe obtenues en examinant des cellules solaires ayant reçus des moyens et forts dopages.
- L'épaisseur de la région de l'émetteur est aussi un facteur qui peut affecter d'une manière néfaste l'efficacité d'une cellule solaire en mono-silicium. En effet, nous sommes en mesure d'attester que cette région, exposé aux radiations lumineuses, contrôle la profondeur de pénétration des photons et par la suite la densité des porteurs photo-générés. De plus, étant donné que les électrons libres se diffusent dans cette région pour aboutir aux contacts, alors il est préférable que son épaisseur soit fine. En conséquence, nous avons trouvé qu'un émetteur d'épaisseur  $1\mu\text{m}$  et dopé à  $10^{18}$  atomes.cm<sup>-3</sup> est plus prometteur pour atteindre des rendements de conversion énergétique élevés.
- Une surface en silicium, exposée au soleil, se traduit par des pertes optiques qui peuvent détériorer le rendement photovoltaïque des cellules solaires. Dans ce contexte, nous avons constaté qu'au fur et à mesure que la surface d'un émetteur

est moins réfléchissante, plus la puissance électrique délivrée par la cellule est meilleure. Ainsi, il est bien d'approfondir la recherche afin de tester la texturation et/ou l'ajout d'une couche antireflet à la surface avant des cellules solaires pour atténuer la réflexion d'une grande partie du spectre solaire.

- Enfin, il est à signaler qu'un émetteur idéal de type N en mono-silicium est obtenu pour un  $N_d$  de l'ordre de  $10^{18}$  atomes.cm<sup>-3</sup>, d'un micromètre d'épaisseur et ayant des taux de réflexion en face avant qui ne dépassent pas les 5%.