

REPUBLIQUE ALGERINNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université Abbes Laghrour Khenchela  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département des Sciences de la Matière



***MEMOIRE***

Présenté Pour l'Obtention du diplôme de MASTER en physique  
Filière : physique des matériaux

**THEME :**

**Simulation des cellules solaires à base de silicium (Si) et à base  
d'Arséniure de gallium (GaAs) : Etude comparative**

**Présenté par :**

**MESSAI Boulaares**

**Membre de jury :**

**Mr. Baaouague Khaled**

**Mr. Lekmine Farid**

**L'encadreur :**

**Dr. KHEMISSI Saad Eddine**

**L'année universitaire : 2019/2020**



# *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire*  
*À mes parents qui ont toujours veillé à mon éducation*  
*A ma femme ; A mes enfants,*  
*Abdellah, Abderrahmane*  
*À mes frères et mes sœurs*  
*À ma famille*  
*À mes amis*  
*À tous ceux qui me sont très chers*

# *Remerciements*

*Je remercie en premier lieu **ALLAH** (الله) le tout puissant qui m'a éclairé le bon chemin et de m'avoir accordé la puissance, la volonté et la santé pour terminer ce travail.*

*Je souhaite exprimer ma gratitude à mon directeur de thèse, Professeur **Khemissi Saad Eddine** pour avoir accepté de diriger ce travail.*

*J'aimerais lui témoigner ma profonde reconnaissance pour sa disponibilité, ses qualités pédagogiques et scientifiques. Je voudrais lui avouer que, sans lui ce travail n'aurait jamais vu le jour.*

*Je ne pourrais jamais oublier le soutien moral, l'aide et l'encouragement de mon ami **DEROUICHE Abderrezak**, en un mot, merci pour son amitié précieux.*

*Je réserve une reconnaissance particulière à mes parents et ma femme, mes enfants ; mes frères et mes sœurs ainsi qu'à toute ma famille.*

*Enfin, je destine mes derniers remerciements et non des moindres pour leur dire toute ma reconnaissance- à mon frère **MESSAI Messaoud**, pour tout ce qu'ils ont fait pour moi.*

## **Liste des Tableaux**

|   |    |
|---|----|
| Tableau I.1 : Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire ..... | 41 |
| Tableau II-1 : Propriétés thermiques et mécaniques du silicium .....          | 40 |
| Tableau II.I : propriétés physico-chimiques principales du GaAs a 300 k ..... | 49 |
| Tableau III-1 : Paramètres de la cellule étudiée .....                        | 51 |
| Tableau III-2 : Paramètres d'excitation .....                                 | 51 |
| Tableau III-3 : Résumé des résultats obtenus .....                            | 54 |

## LISTE DES FIGURES

|  |    |
|--|----|
| Figure I.1: Schéma de fonctionnement d'une cellule solaire   | 3  |
| Figure I.2 : Schéma d'une cellule photovoltaïque   | 4  |
| Figure I.3 : Spectre solaire en fonction de différentes valeurs. Air Mass  | 6  |
| Figure I.4: Schéma des principaux processus de recombinaison dans un semi-conducteur   | 10 |
| Figure I.5 : Mécanisme de recombinaison Schokley-Read-Hall (SRH)   | 11 |
| Figure I.6 : Mécanisme de recombinaison Auger. L'excès d'énergie issu de la recombinaison peut être transféré à un électron (a) ou à un trou (b) | 13 |
| Figure I.10 : Dopage des semi-conducteurs  | 15 |
| Figure I.11 : Mouvement des électrons et des trous   | 15 |
| Figure I.12 : La jonction P-N  | 15 |
| Figure I.13: Jonction polarisée dans un sens direct  | 17 |
| Figure I.14: Jonction polarisée dans un sens inverse   | 18 |
| Figure I.15 : Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire  | 19 |
| Figure I.16: Caractéristiques I-V à l'obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque   | 21 |
| Figure I.17: Caractéristique I-V d'une cellule solaire   | 22 |
| Figure I.19: Création de pair électron trou par photo excitation   | 23 |
| Figure I.20: Caractéristiques I-V et P-V d'une cellule solaire   | 26 |
| Figure I.21: Une coupe transversale d'un module photovoltaïque   | 28 |
| Figure I.22 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques  | 28 |
| Figure I.23 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de np cellules identiques  | 29 |
| Figure I.24 : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de (np+ ns) cellules identiques   | 30 |
| Figure I.25 : La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température  | 31 |
| Figure I.26 : La caractéristique de $P=f(V)$ en fonction de température  | 31 |
| Figure I.27 : La caractéristique $I=f(V)$ en fonction de l'éclairement   | 32 |
| Figure I.28 : La caractéristique $P=f(v)$ en fonction de l'éclairement   | 33 |
| Figure II-1 : Fenêtre du logiciel PC1D   | 37 |
| Figure II-2 : Structure de bandes du silicium cristallin   | 40 |
| Figure II-3 : Maille cubique conventionnelle de la structure diamant   | 41 |
| Figure II-5 : Variation de la mobilité du silicium en fonction de la concentration des impuretés   | 43 |
| Figure II-6 : La mobilité des électrons et des trous dans le silicium en fonction de la température  | 44 |
| Figure II-7. : Résistivité du silicium en fonction de la concentration des impuretés à 300 K   | 45 |
| Figure II-8 : Coefficient d'absorption du silicium cristallin en fonction de l'énergie des photons   | 45 |
| Figure II-9 : Indice de réfraction réel ( $n_r$ ) du silicium cristallin en fonction de l'énergie des photons incidents                          | 46 |
| Figure II-10 : Réseau cristallin du GaAs (zinc de blende)  | 47 |
| Figure II-11 : Structure de bandes de GaAs   | 48 |
| Figure III-1 : Schéma représentatif de la cellule étudiée  | 49 |
| Figure III-2 : Caractéristique I-V de la cellule simulée à base de Si  | 51 |

|   |    |
|---|----|
| Figure III-3 : Caractéristique I-V de la cellule simulée à base de GaAs   | 52 |
| Figure III-4 : puissance de la cellule à base de Si   | 52 |
| Figure III-5 : puissance de la cellule à base de GaAs   | 53 |
| Figure III-6 : Effet de la température sur la caractéristique I(V) de la cellule Si   | 55 |
| Figure III-7 : Effet de la température sur la caractéristique I(V) de la cellule GaAs                                       | 55 |
| Figure III-8 : Effet de la température sur la caractéristique P(V) de la cellule Si   | 56 |
| Figure III-9 : Effet de la température sur la caractéristique P(V) de la cellule GaAs                                       | 56 |
| Figure III-10 : Influence de l'épaisseur d'émetteur sur la caractéristique I(V) de la cellule Si                            | 57 |
| Figure III-11 : Influence d'épaisseur de l'émetteur sur la caractéristique I(V) de la cellule GaAs                          | 58 |
| Figure III-12 : Influence d'épaisseur de l'émetteur de la base des cellules sur les caractéristique I(V) de la cellule Si   | 58 |
| Figure III-13 : Influence d'épaisseur de l'émetteur de la base des cellules sur les caractéristique I(V) de la cellule GaAs | 59 |
| Figure III-14 : Influence de dopage de l'émetteur sur les caractéristique I(V) de la cellule à base de Si                   | 60 |
| Figure III-15 : Influence de dopage de l'émetteur sur les caractéristique I(V) de la cellule à base de GaAs                 | 60 |

## Liste des abréviations

|                                  |  |                    |
|----------------------------------|--|--------------------|
| m                                | nombre d'air masse   | g                  |
| p                                | pression   | N/m <sup>2</sup>   |
| A                                | élévation du soleil sur l'horizon (90° au zénith)                                    | Degré              |
| z                                | Altitude   | Km                 |
| g                                | taux de génération   |                    |
| r                                | taux de recombinaison des porteurs   |                    |
| $E_t$                            | position énergétique des états de piège  |                    |
| $E_i$                            | niveau de Fermi dans S/C   |                    |
| $r_{n,p}$ (min et max)           | valeurs maximales et minimales de la durée de vie des électrons et des trous         |                    |
| R                                | recombinaison Auger  |                    |
| $C_{Aug.n}$<br>et<br>$C_{Aug.p}$ | coefficients Auger pour les électrons et les trous                                   |                    |
| S                                | surface d'un semi-conducteur   |                    |
| $R_{surf}$                       | taux de recombinaison en surface   |                    |
| $I_A$                            | courant direct dans la jonction  |                    |
| $I_s$                            | courant de saturation de la jonction   | (A)                |
| n                                | facteur de qualité de la diode ; sans dimension                                      |                    |
| $V_{th}$                         | potentiel thermique  | (V)                |
| K                                | constante de Boltzmann ( $1.38066 \times 10^{-23}$ J/K = $8.62 \times 10^{-5}$ eV/K) | eV/K               |
| T                                | température absolue, degrés Kelvin   | (K)                |
| q                                | charge absolue d'un électron   | (C)                |
| $I_{ph}$                         | Courant photo généré   | (A)                |
| $I_{obsc}$                       | Courant à l'obscurité  | (A)                |
| V                                | Tension aux bornes de la jonction  | (v)                |
| q                                | Charge élémentaire d'un électron , $1.602 \times 10^{-19}$ C                         | (C)                |
| $I_{cc}$                         | courant de court-circuit   | (A)                |
| $V_{CO}$                         | tension en circuit ouvert  | (V)                |
| FF                               | facteur de forme   |                    |
| $\eta$                           | rendement de conversion d'énergie  |                    |
| $E_g$                            | gap du semi-conducteur   |                    |
| $\Phi(\lambda)$                  | flux de photons, à la longueur d'onde $\lambda$ , reçu par la photopile              |                    |
| $R(\lambda)$                     | coefficient de réflexion à la longueur d'onde $\lambda$                              |                    |
| $R_s$                            | La réponse spectrale   |                    |
| $P_{in}$                         | puissance incidente  | mW/cm <sup>2</sup> |
| $P_m$                            | puissance maximale délivrée par la cellule   | mW/cm <sup>2</sup> |
| $n_p$                            | nombre des cellules en parallèle   |                    |
| $n_s$                            | nombre des cellules en série   |                    |

## **Introduction générale**

Récemment, les chercheurs se sont intéressés de nouveau aux matériaux semi-conducteurs, vu leurs larges utilisations dans la fabrication des dispositifs optoélectroniques ainsi que le processus de fabrication des cellules solaires [1,2].

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables et la plus utilisée. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique (solaire ou autre) en électricité. Elle utilise pour ce faire des convertisseurs photovoltaïques appelés cellules solaires qui représentent l'élément de base dans la conversion photovoltaïque.

L'utilisation des cellules solaires comme convertisseurs d'énergie solaire a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser, et par conséquent développer l'exploitation de cette source d'énergie renouvelable propre et qui n'émet pas de gaz à effet de serre, pour ces dernières raisons la branche solaire photovoltaïque mérite vraiment d'être mise à contribution.

L'expérience montre que le fonctionnement des cellules solaires dépend fortement de plusieurs paramètres ; internes et externes (lié à l'environnement du fonctionnement : éclairage, concentration, température, etc.).

L'étude de l'influence des différents paramètres physiques et technologiques sur le fonctionnement des photopiles solaires est possible à travers la connaissance de l'influence de chaque paramètre sur les caractéristiques I-V et P-V de la cellule.

Le travail, présenté dans ce mémoire, est une étude simulatrice par le logiciel PC1D de deux cellules solaires l'une à base de silicium et l'autre à base de l'arséniure de gallium.

Pour ce faire nous avons présenté ce manuscrit de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, nous avons consacré quelques notions de base dans le domaine de photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté dans une première partie, le logiciel de simulation PC1D, où les différentes versions de ce logiciel, ces domaines d'utilisation et son mode d'utilisation sont détaillés. La deuxième partie de ce chapitre est consacré à la présentation des propriétés physiques et chimiques des matériaux utilisés.

Le troisième chapitre, est consacré à la présentation des résultats de la simulation et leurs interprétations.

Enfin, une conclusion générale couronne ce mémoire pour récapituler nos analyses, nos résultats et nos commentaires.

## I.1 Introduction

Ce premier chapitre est réservé pour rappeler quelques notions générales sur le domaine de photovoltaïque. Tout d'abord, nous avons commencé par un petit historique sur le l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs, la présentation du rayonnement et l'énergie solaire, puis nous avons présenté des notions de base sur les cellules solaires et leurs caractéristiques ainsi que leurs principes de fonctionnement, et enfin, nous avons présenté brièvement la constitution du module et du panneau photovoltaïque.

## I.2 Historique

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des « impuretés».

C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites ainsi que dans tout site isolé [1].

Ci-dessous quelques points d'histoire [1]

**1839** : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

**1875** : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

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

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

**1973** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware (Etats-Unis).

**1983** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

### I.3 Définition d'une cellule solaire

La cellule photovoltaïque est un dispositif électronique destiné à transformer la lumière en électricité, sa structure se base sur une jonction **PN**, c'est-à-dire est composée de deux couches semiconductrices: une couche **P** et une couche **N**.

La cellule solaire est basée d'un semi-conducteur (le silicium par exemple), c'est un convertisseur instantané fournissant de l'énergie électrique s'il reçoit une énergie solaire sous forme de rayonnement. Se comporte alors comme en génération de courant continu. [2]

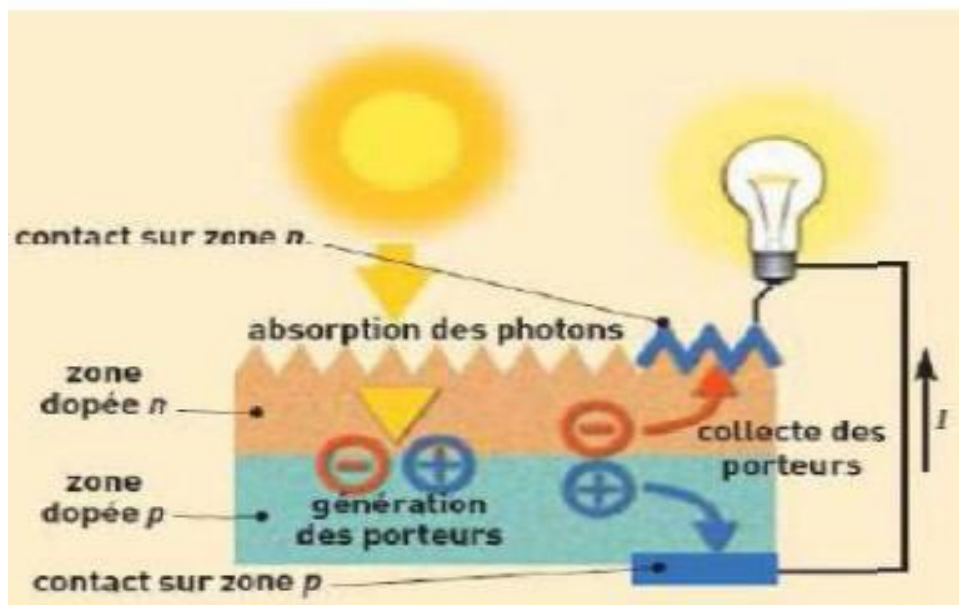


Figure I.1: Schéma de fonctionnement d'une cellule solaire [3]

#### I.3.1 L'effet photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [4]. La figure (1.2) illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée. Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12

% avec du silicium poly cristallin et enfin 7 à 8 % pour le silicium amorphe en films minces [5].

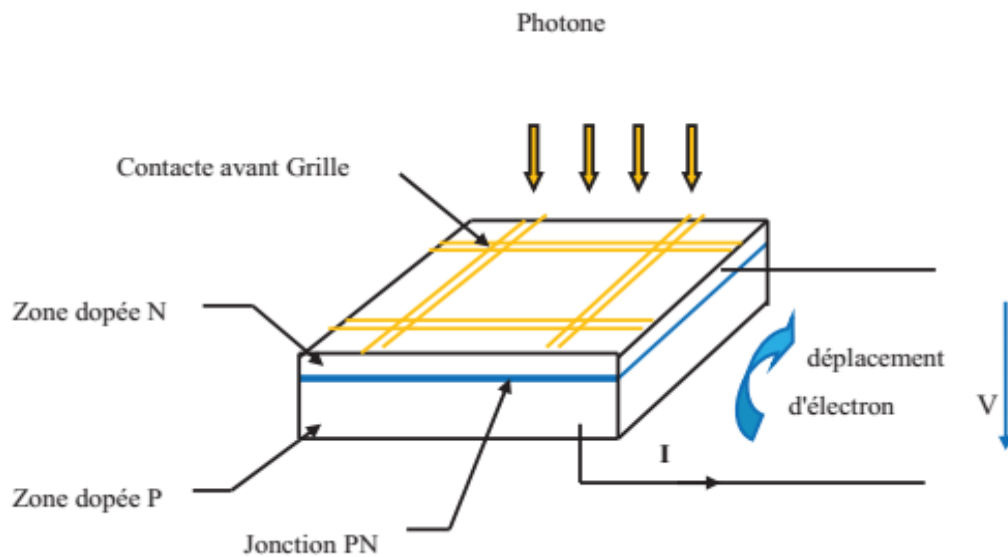


Figure I.2 : Schéma d'une cellule photovoltaïque [5]

#### I.4 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la planète terre pendant une heure et pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km, c'est ce que l'on appelle la constante solaire qui est égale à  $1367 \text{ W/m}^2$ . La partie d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air (AM) [6]. Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de  $1000 \text{ W/m}^2$  et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1) [7]. Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, et perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à  $1000 \text{ W/m}^2$  [7]. Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de  $0,22 \mu\text{m}$  à  $10 \mu\text{m}$ .

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement a :

- ❖ 9% dans la bande des ultraviolets (<0,4 μm).
- ❖ 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm).
- ❖ 44% dans la bande des infrarouges (>0,8 μm) [6].

#### I.4.1 Nombre d'air masse

Pour tenir compte de la position relative du soleil qui modifie l'épaisseur d'atmosphère traversée, on introduit le nombre d'air masse défini par [7] :

$$m = \frac{p}{1013} \times \frac{1}{\sin A} \times \exp\left(-\frac{z}{7.8}\right) \quad \text{I.1}$$

Avec :

p (N.m<sup>-2</sup>) : pression

A (degré) : élévation du soleil sur l'horizon (90° au zénith).

z (Km) : altitude.

Dans les conditions normales et au niveau de la mer, l'expression simplifiée suivante est utilisée :

$$m = (\sin A)^{-1} \quad \text{I.2}$$

Ainsi lorsque le soleil est au zénith, on dit que l'on a les conditions AM1 car les rayons lumineux traversent une épaisseur d'atmosphère unité (7.8 Km). Avec un soleil à 30° sur l'horizon, on obtient les conditions AM2. Hors atmosphère, à haute altitude, on définit les conditions AM0 (figure I.3).

La figure ci-dessous (I.3) représente le spectre solaire pour différentes valeurs de Air Mass, noté AM. Courbe 1: AM0, courbe 2: AM1, courbe 3: AM1.5 et courbe 4: AM2. L'indice après AM représente le nombre d'atmosphère traversé, AM0 est donc le spectre solaire hors atmosphère, AM2 est le spectre solaire ayant traversé 2 épaisseurs d'atmosphère (hauteur de 30° du soleil au-dessus de l'horizon). Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre 0,2 μm (ultra-violet) et 4 μm (infrarouge) avec un maximum d'énergie pour 0,5 μm. 97,5% de l'énergie solaire est comprise entre 0,2 μm et 2,5 μm. De 0,4 μm à 0,78 μm, le spectre correspond au domaine du visible. Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons. Le tableau I.1 donne les valeurs

énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux.

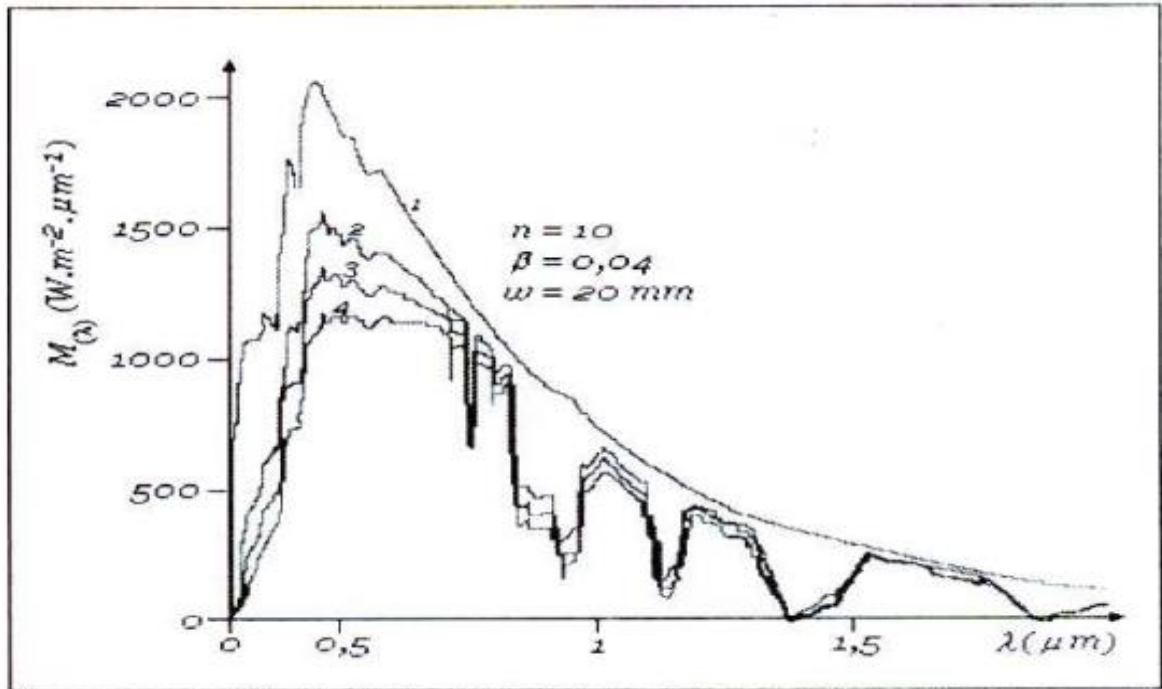


Figure I.3 : Spectre solaire en fonction de différentes valeurs. Air Mass [8]

| $\lambda(\mu m)$ | $E_{ph}(eV)$ | Zone               |
|------------------|--------------|--------------------|
| 0.2              | 6.2          | Ultra-violet       |
| 0.4              | 3.1          | Visible bleu       |
| 0.5              | 2.48         | Visible jaune-vert |
| 0.78             | 1.59         | Visible rouge      |
| 1                | 1.24         | Infrarouge         |
| 2                | 0.62         | Infrarouge         |
| 4                | 0.31         | Infrarouge         |

Tableau I.1 : Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire.

Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, faisant alors office de capteur, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons. Puis, l'énergie des photons

excite des électrons, qui sont ensuite collectés afin de constituer un courant électrique global [8].

#### I.4.2 Spectre solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0.2 à 4 microns. À la surface de la Terre, le spectre solaire n'est plus le même, car il est pondéré par l'absorption des molécules présentes dans l'atmosphère (O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, ...). En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols. Ainsi, la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge [8].

#### I.5 Génération – Recombinaison des porteurs de charge

On caractérise la création de porteurs dans le semi-conducteur par un paramètre qui mesure le nombre de porteurs créés par unité de volume et unité de temps,  $g'$  (cm<sup>-3</sup>s<sup>-1</sup>).  $g'$  résulte de la contribution de deux types de porteurs. La première est liée à une génération spontanée due à l'agitation thermique, que l'on caractérise par un paramètre noté  $g_{th}$ , c'est le taux de génération thermique, tandis que la seconde résulte d'une excitation extérieure, par exemple d'une excitation optique, d'une injection électrique, d'une irradiation par des particules, d'un champ électrique intense, ... ce type de génération est caractérisé par un paramètre  $g$ , qui est spécifique du processus mis en jeu.

Par ailleurs, la recombinaison des porteurs excédentaires est matérialisée par un paramètre  $r'$ , propre au matériau et fonction des processus la régissant.

Ainsi, la variation du nombre de porteurs par unité de volume et unité de temps, due aux processus de génération-recombinaison, s'écrit :

$$\left(\frac{dn}{dt}\right)_{gr} = g' - r' = g + g_{th} - r' \tag{I.3}$$

Parmi ces trois paramètres,  $g$ ,  $g_{th}$  et  $r'$ , le premier est fonction de l'excitation éventuelle du matériau, les deux autres sont spécifiques du matériau à une température donnée.

Il est habituel de regrouper ces derniers dans un même terme, qui représente leur différence, en posant  $r = r' - g_{th}$  ;  $r$  représente donc le bilan entre les recombinaisons et les générations thermiques.

L'équation (I.3) devient alors :

$$\left(\frac{dn}{dt}\right)_{gr} = g - r \quad \text{I.4}$$

$g$  et  $r$  sont respectivement appelés taux de génération et taux de recombinaison des porteurs.

La recombinaison d'un électron avec un trou, dans le semi-conducteur, peut se produire soit directement par la rencontre des deux particules, soit par l'intermédiaire d'une impureté, qui joue en quelque sorte le rôle d'agent de liaison [9].

### I.5.1 Génération de porteurs

L'excès de porteurs par rapport à l'équilibre est créé à l'aide d'un rayonnement. Soit  $\varphi_0(E)$  le flux de photon incidents d'énergie  $E$ , c'est-à-dire de longueur d'onde

$$\lambda(\mu m) = \frac{1.24}{E(eV)} \quad \text{I.5}$$

Si  $R(E)$  est le coefficient de réflexion du semi-conducteur pour le rayonnement d'énergie  $E$ , le flux de photons  $\varphi(E)$  transmis à la surface s'écrit:

$$\varphi(E) = (1 - R(E))\varphi_0(E) \quad \text{I.6}$$

Les photons sont absorbés au cours de leur propagation dans le matériau. On définit le coefficient d'absorption  $\alpha$  du matériau comme la variation relative de la densité de rayonnement par unité de longueur. Ainsi, si la densité de rayonnement varie de  $d\varphi$  sur une longueur  $dx$ ,  $\alpha$  est donné par:

$$\alpha(E, x) = -\frac{1}{\varphi(E, x)} \frac{d\varphi(E, x)}{dx} \quad \text{I.7}$$

$\alpha$  est positif lorsque  $d\varphi$  est négatif, c'est-à-dire lorsqu'il y a une absorption du rayonnement.

$$\frac{d\varphi(E, x)}{\varphi(E, x)} = -\alpha(E)dx \quad \text{I.8}$$

Ce qui implique  $\varphi(E, x) = \varphi_t(E)e^{-\alpha(E)x}$  I.9

Nous avons donc :

$$\varphi(E, x) = (1 - R(E))\varphi_0(E)e^{-\varphi(E)x} \quad \text{I.10}$$

Le flux absorbé s'écrit en fonction de la longueur d'onde :

$$\varphi(\lambda, x) = (1 - R(E))\varphi_0(\lambda)e^{-\alpha(\lambda)x} \quad \text{I.11}$$

Les photons d'énergie supérieure au gap du matériau entrant dans le semi-conducteur génèrent des paires électron-trous. Le nombre de paires électron-trous créées par seconde est égal au nombre de photons disparus. Le taux de génération de paires électron-trous est donc le taux de disparition des photons : [10]

$$g(\lambda, x) = -\frac{d\varphi(\lambda, x)}{dx} \quad \text{I.12}$$

Nous avons donc :

$$g(\lambda, x) = (1 - R(\lambda))\varphi_0(\lambda)\alpha(\lambda)e^{-\alpha(\lambda)x} \quad \text{I.13}$$

### I.5.2 Recombinaison

La génération dans les semi-conducteurs est le passage d'un électron de la bande de valence à la bande de conduction et des paires électron-trou sont créés. Cependant, la recombinaison est le processus inverse de la génération. Elle correspond aux mécanismes conduisant à la perte de paires électron-trou, avec l'énergie excédentaire émise sous forme de phonons ou de photons.

Expérimentalement, elle correspond à une durée de vie des porteurs minoritaires  $\tau$  capable d'être mesurée. Celle-ci correspond au temps moyen au bout duquel une paire électron-trou générée se recombine. La valeur de ce paramètre peut être déterminée, pour le silicium de type p ou n, à partir du taux de recombinaison  $V$ .

$$\tau = \frac{\Delta n}{V} \quad \text{I.14}$$

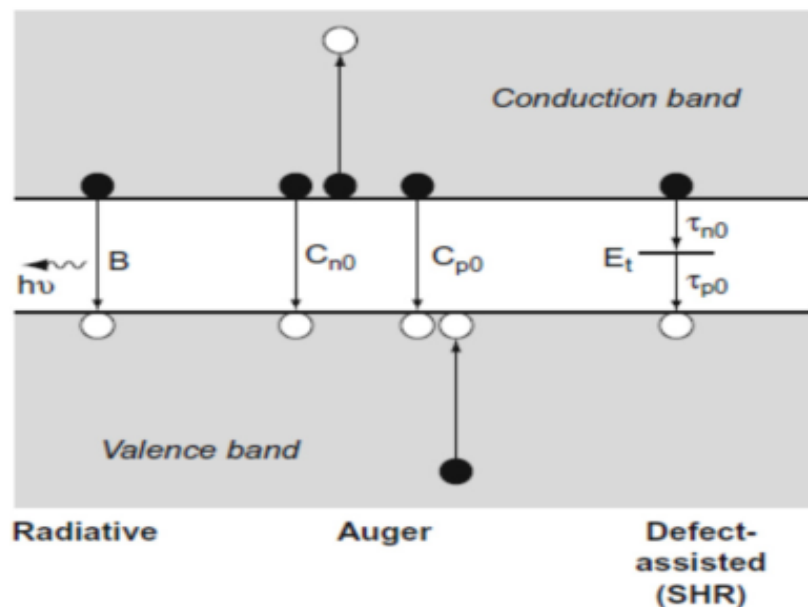
Où  $\Delta n$  ( $\Delta p$ ) est la densité d'électrons (de trous) en excès.

L'interprétation de la durée de vie n'est pas simple car il existe différents mécanismes de recombinaison intervenant simultanément en surface et en volume d'un échantillon. On définit

donc une durée de vie effective, qui tient compte de l'ensemble de ces mécanismes. En générale, c'est cette grandeur qui est mesurée.

Par définition, la recombinaison est le retour de l'électron de l'état excité à l'état initial ou de la bande de conduction vers la bande de valence, car il ne peut rester dans un état excité que pour un temps faible ( $t < 10^{-8} s$ ). Ce retour de l'électron de l'état excité vers l'état stable peut avoir lieu selon plusieurs façons :

- ❖ Recombinaison SRH (Schokley-Read-Hall)
- ❖ Recombinaison Auger
- ❖ Recombinaison Radiative
- ❖ Recombinaison en surface [11]



**Figure I.4: Schéma des principaux processus de recombinaison dans un semi-conducteur [12]**

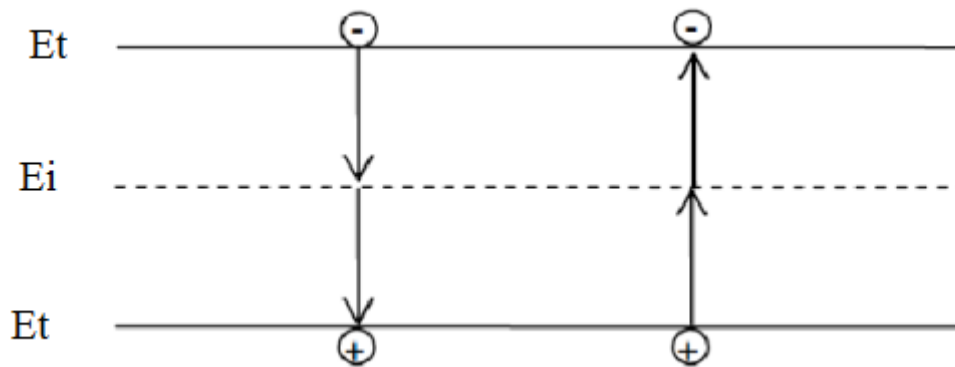
### I.5.2.1 Recombinaison SRH (Schokley-Read-Hall)

Le processus de recombinaison Schokley-Read-Hall est schématisé sur la figure I.5. Ce processus fait appel à des niveaux d'énergie voisins du milieu du gap (niveaux appelés pièges, dus à certains défauts cristallins ou à la présence de certaines impuretés dans le cristal) qui facilitent la recombinaison des porteurs par un mécanisme en deux étapes. Un électron de la bande de conduction va d'abord se relaxer sur un niveau d'énergie intermédiaire lié à un défaut. Ensuite, une deuxième relaxation va lui permettre de se recombinaison avec un trou de la

bande de valence. L'efficacité de ce processus dépend de la densité des niveaux profonds et par suite, de la qualité du matériau utilisé et de sa technologie d'élaboration. La recombinaison Schokley-Read-Hall est modélisée par:

$$R_{SRH} = \frac{pn - n_{ie}^2}{\tau_{p0} \left[ n + n_{ie} \exp\left(\frac{E_t - E_i}{KT_L}\right) \right] + \tau_{n0} \left[ p + n_{ie} \exp\left(\frac{-(E_t - E_i)}{KT_L}\right) \right]} \quad \text{I.15}$$

Ou :  $E_t$  est la position énergétique des états de piège,  $E_i$  est le niveau de Fermi dans le semi-conducteur intrinsèque,  $\tau_{n0}$ ,  $\tau_{p0}$  sont respectivement la dure de vie pour les électrons et les trous,  $n_{ie}$  est la concentration intrinsèque,  $k$  est la constante de Boltzmann et  $T_L$  la température en Kelvin.



**Figure I.5 : Mécanisme de recombinaison Schokley-Read-Hall (SRH)**

La dépendance de la dure de vie du modèle SRH avec la température est donnée par les deux relations de Klaassen's.

$$\tau_{n0}^{-1} = (\tau_{ksrhn}^{-1} + C_{ksrhn} \cdot n) \left( \frac{300}{T_L} \right)^{G_{ksrhn}} \quad \text{I.16}$$

$$\tau_{p0}^{-1} = (\tau_{ksrhp}^{-1} + C_{ksrhp} \cdot p) \left( \frac{300}{T_L} \right)^{G_{ksrhp}} \quad \text{I.17}$$

Où  $n$  est la concentration d'impureté totale.

Aussi la dépendance de la durée de vie avec le dopage est donnée par les relations de Scharfetter.

$$\tau_n(N) = \tau_{n.\min} + \frac{\tau_{n.\max} - \tau_{n.\min}}{1 + \left( \frac{N}{N_{n.ref}} \right)^\gamma} \quad \text{I.18}$$

$$\tau_p(N) = \tau_{p.\min} + \frac{\tau_{p.\max} - \tau_{p.\min}}{1 + \left( \frac{N}{N_{p.ref}} \right)^\gamma} \quad \text{I.19}$$

Où :  $\tau_{n.\max}$ ,  $\tau_{n.\min}$ ,  $\tau_{p.\max}$ ,  $\tau_{p.\min}$  sont les valeurs maximales et minimales de la durée de vie des électrons et des trous respectivement,  $N_{n.ref}$ ,  $N_{p.ref}$  est le niveau de référence du dopage pour lequel  $\tau(N_{n.ref}) = \frac{\tau_{n.\max} + \tau_{n.\min}}{2}$  et  $\tau(N_{p.ref}) = \frac{\tau_{p.\max} + \tau_{p.\min}}{2}$ ,  $\gamma$  est l'exposant.

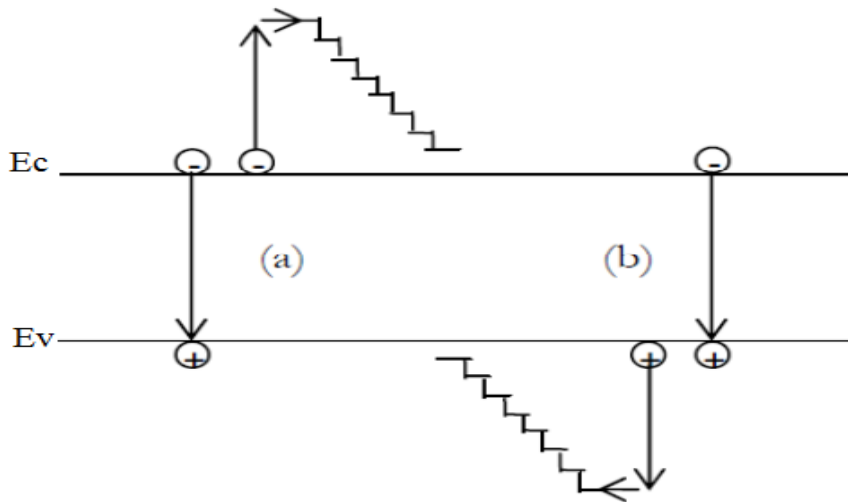
### I.5.2.2 Recombinaison Auger

Le processus de recombinaison Auger est représenté sur la figure (I.4). L'excès d'énergie issu de la recombinaison d'un électron de la bande de conduction et d'un trou de la bande de valence peut être transféré à une troisième particule libre, électron ou trou. Ces charges sont considérées comme des particules quasi libres, n'interagissant pas entre elles. La recombinaison Auger est modélisée en utilisant l'expression suivante :

$$R_{Auger} = C_{Aug.n} (pn^2 - nn_{ie}^2) + C_{Aug.p} (np^2 - pn_{ie}^2) \quad \text{I.20}$$

Où :  $C_{Aug.n}$  et  $C_{Aug.p}$  sont les coefficients Auger pour les électrons et les trous.

- La recombinaison est dite radiative ou avec émission de photons, si l'énergie des particules qui se recombinent est émise sous forme d'énergie de photons.
- Au type de la recombinaison non radiative appartient la recombinaison par effet Auger où l'énergie libérée par la recombinaison de deux particules est transférée à une troisième particule qui devient alors une particule « chaude ». Cette particule « chaude » cède son énergie supplémentaire au réseau au cours d'une série de collisions.



**Figure I.6 : Mécanisme de recombinaison Auger. L'excès d'énergie issu de la recombinaison peut être transféré à un électron (a) ou à un trou (b)**

### I.5.2.3 Recombinaison Radiative

La recombinaison radiative correspond à la recombinaison d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence, avec émission d'un photon d'énergie proche de celle du gap du matériau (processus inverse de la photo génération). Le mécanisme de recombinaison radiative est un processus dominant dans les semi-conducteurs à gap direct comme le GaAs. Pour le silicium à gap indirect, ce mécanisme est relativement rare du fait que cette transition ne peut avoir lieu qu'avec l'assistance d'un photon.

En plus de ces trois mécanismes l'énergie de recombinaison des particules peut être transférée au gaz électrique (recombinaison plasmique). Dans le cas où un électron et un trou forment d'abord un exciton, la recombinaison est dite excitonique.

L'évolution des processus de recombinaison radiative, photonique ou par effet Auger dépend du mécanisme de transition d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence.

Si l'électron et le trou recombinent par rencontre directe on dira que la recombinaison est intrinsèque ou inter bande. La recombinaison intrinsèque se manifeste principalement dans les matériaux à faible largeur de bande interdite, inférieur à 0,2 à 0,3 eV.

Lorsque la largeur de la bande interdite est supérieure à 0,5 eV, la recombinaison s'effectue par l'intermédiaire des niveaux localisés dans la bande interdite. Ces niveaux particuliers sont couramment appelés des niveaux-pièges de recombinaison.

#### I.5.2.4 Recombinaison en surface

La surface d'un semi-conducteur est un lieu où les recombinaisons sont particulièrement nombreuses, en raison des liaisons non satisfaites des atomes de surface et autres défauts caractéristiques à température ( $T=300^\circ\text{K}$ ). Les recombinaisons en surface avant et arrière inhérents aux densités de dopages selon la relation suivante :

$$S = S_0 \left( \frac{N}{N_{set}} \right)^\alpha \quad \text{I.21}$$

Avec :  $S_0$ ,  $N_{set}$  et  $\alpha$  dépendent du traitement de la surface et de la passivation. Par exemple pour une oxydation thermique d'une couche de silicium de type n,  $\alpha$  est de 1 et  $N_{set}$  est de  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

La passivation est l'ajout d'une couche de  $\text{SiO}_2$  en surface pour limiter les recombinaisons en surface et combler les liaisons cassées (en surface) lors de la découpe du semi-conducteur.

Le taux de recombinaison en surface est donné par l'expression suivante :

$$R_{surf} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_p^{eff} \left[ n + n_{ie} \exp\left(\frac{E_t - E_i}{KT_L}\right) \right] + \tau_n^{eff} \left[ n + n_{ie} \exp\left(\frac{-(E_t - E_i)}{KT_L}\right) \right]} \quad \text{I.22}$$

Où :

$$\frac{1}{\tau_n^{eff}} = \frac{1}{\tau_n^i} + \frac{d_i}{A_i} S_n \quad \text{I.23}$$

$$\frac{1}{\tau_p^{eff}} = \frac{1}{\tau_p^i} + \frac{d_i}{A_i} S_p \quad \text{I.24}$$

$\tau_n^{eff}$  est la durée de vie effective, les paramètres  $d_i$  et  $A_i$  sont la longueur et l'épaisseur de l'interface.  $S_n$  et  $S_p$  sont les vitesses de recombinaison pour les électrons et les trous respectivement par défaut,  $S_n = S_p = 0 \text{ cm/s}$ . [12]

### I.6 La jonction P-N

Une jonction P-N est créée en juxtaposant un semi-conducteur dopé P avec un semi-conducteur dopé N. On l'utilise dans de nombreux dispositifs électroniques.

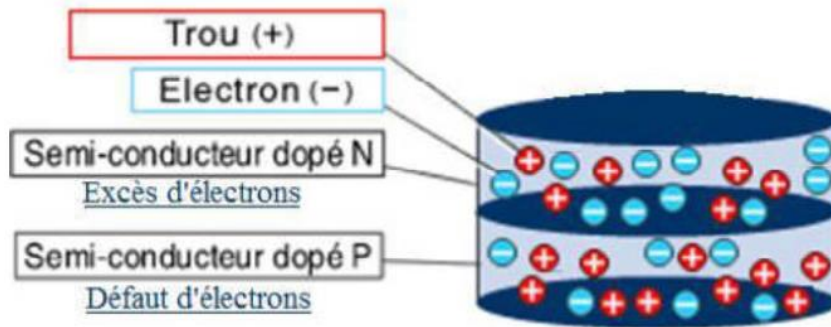


Figure I.10 : Dopage des semi-conducteurs [13]

Les électrons en excès de la région dopée N ont tendance à diffuser vers la région P (où ils sont minoritaires). Il en est de même pour les trous en sens inverse.

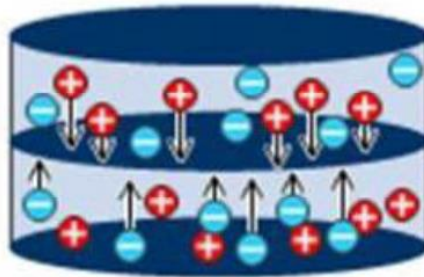


Figure I.11 : Mouvement des électrons et des trous [13]

Des ions positifs et négatifs se concentrent alors au voisinage de l'interface entre les deux régions, et forment une zone vide de porteurs (une zone isolante) dite la zone de charge d'espace (ZCE). Un champ électrique créant une barrière de potentiel au niveau de cette zone centrale.

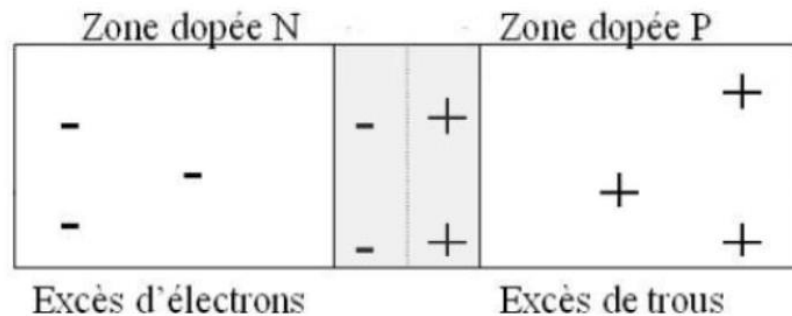


Figure I.12 : La jonction P-N

Le champ électrique à repousser les électrons vers la zone N et les trous vers la zone P. De ce fait, lorsque la zone dopée N est exposée au rayonnement lumineux, un électron de la couche de valence est arraché, laissant parallèlement un trou. Sous l'effet de champ électrique créé par la jonction P-N, l'électron diffuse à l'extrémité de la zone N, et le trou se déplace à l'extrémité de la zone P. Lorsque les deux faces de ces deux zones sont reliées par un conducteur, un courant se crée, car l'électron va combler le trou. Une cellule photovoltaïque est constituée d'une tranche dopée N posée sur une tranche dopée P. L'interface entre les deux tranches s'appelle la jonction P-N. La tranche dopée N correspondra à la partie de la cellule exposée au rayonnement solaire. [13]

### I.6.1 Polarisation de la jonction en direct

Si on polarise la jonction sous une tension directe  $V_{direct}$ , elle réduit la hauteur de barrière qui devient  $(V_{\phi} - V_{direct})$  entraînant une diminution de l'épaisseur de la Z.C.E (dans l'équation  $(W_0)$ ,  $V_{\phi}$  est remplacé par :  $V_{\phi} - V_{direct}$ ).

De nombreux électrons de la région N et de trous de la région P peuvent alors franchir cette barrière de potentiel et, se présentant alors dans un "milieu hostile" (P pour électrons et N pour les trous), ils sont recombinés (figure (I.13)). Cette recombinaison consomme près de la Z.C.E des trous dans la région P (des électrons dans la région N).

Pour rétablir l'équilibre, les trous de la région neutre P se mettent en mouvement vers la zone où se produit la recombinaison (déficit en trous). Les électrons de la région neutre N sont soumis à un phénomène analogue. C'est ce phénomène de recombinaison locale qui explique la circulation du courant direct  $I_A$  dans la jonction.

$$\text{Ce courant s'écrit: } I_A = I_0 \exp\left(-\frac{V_{\phi} - V_{direct}}{U_T}\right) \quad \text{I.29}$$

Sachant que le courant de saturation  $I_S$  correspondant aux porteurs minoritaires des zones N et P qui se présentent en bordure de la Z.C.E. On obtient le courant total qui circule dans la jonction :

$$I_A = I_S \left[ \exp\left(\frac{V_{direct}}{U_T}\right) - 1 \right] \quad \text{I.30}$$

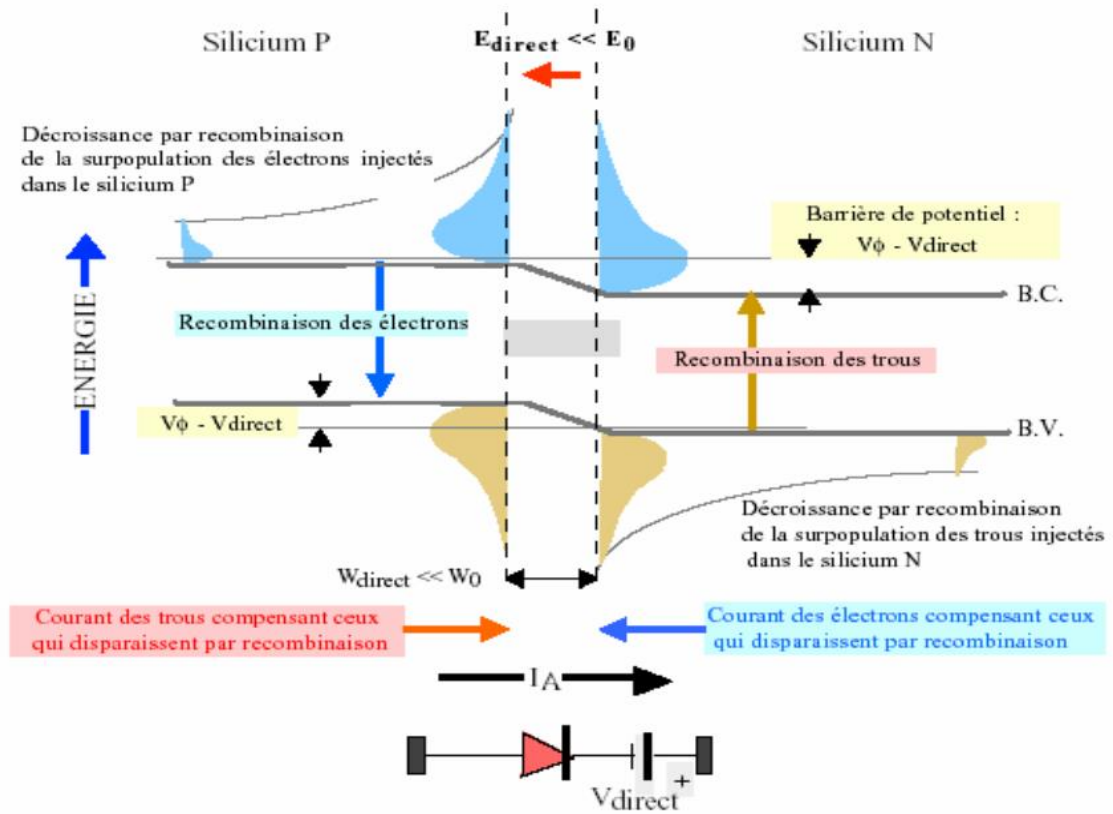


Figure I.13: Jonction polarisée dans un sens direct. [14]

### I.6.2 Polarisation de la jonction en inverse

Si on polarise la jonction en sens inverse la hauteur de barrière de potentiel entre les régions P et N est renforcée par la tension extérieure appliquée et devient  $V_{\phi} + V_{inv}$  et le champ électrique dans la zone de charge d'espace augmente.

Les porteurs majoritaires des régions N et P n'ont pas l'énergie nécessaire pour sauter cette barrière de potentiel. La jonction est alors traversée par le très faible courant de saturation  $I_S$ . Ce courant issu du phénomène d'ionisation thermique du silicium, dépend uniquement de la température.

La figure (I.14) nous montre l'origine du courant inverse de saturation  $I_S$  de cette jonction.

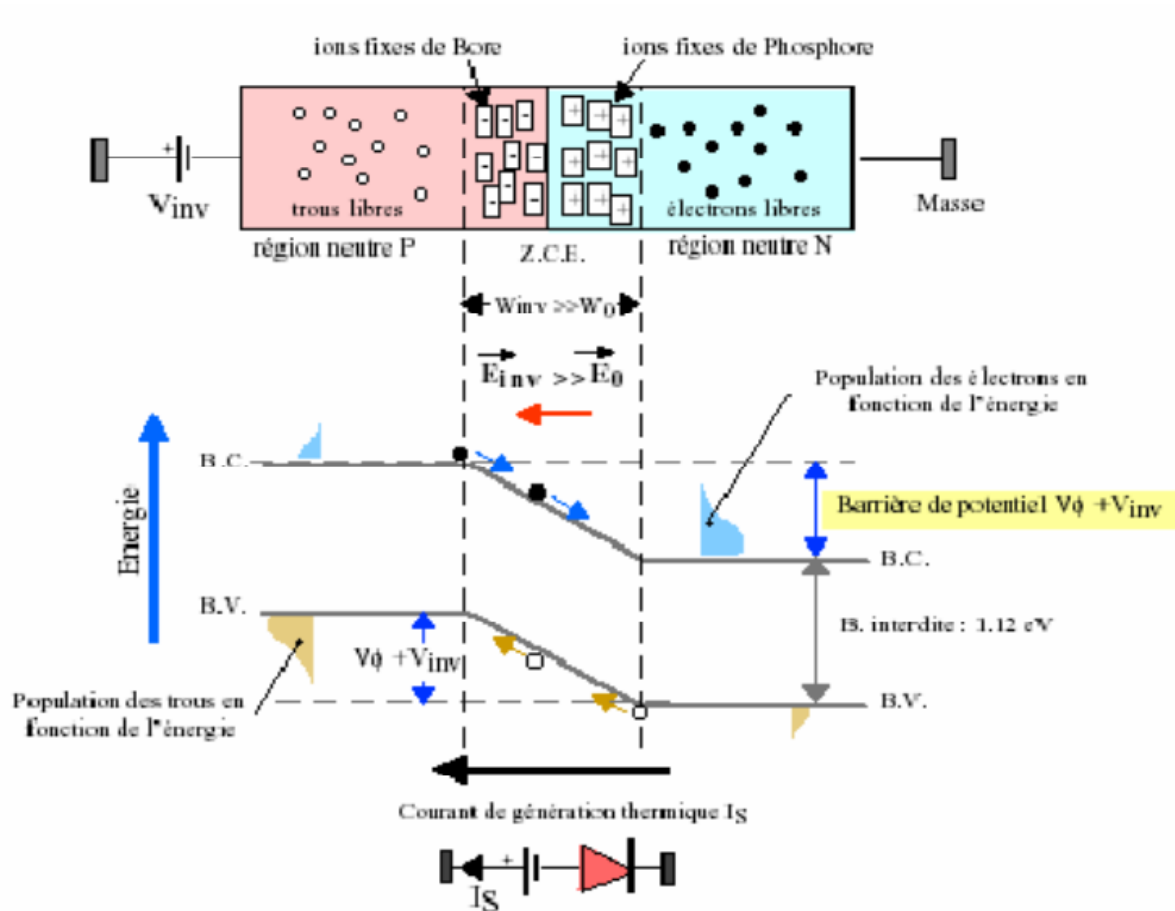


Figure I.14: Jonction polarisée dans un sens inverse [14]

## I.7 Caractéristiques électriques d'une cellule solaire

### I.7.1 Circuit électrique équivalent

Le circuit équivalent d'un système électrique est fréquemment utilisé afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques élémentaires (source, résistance, diode, bobine, condensateur, etc.).

L'expérience montre qu'à l'obscurité ; une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil  $V_s$ . Dans le cas d'une cellule idéale à l'obscurité, caractéristique I-V peut être représenté par la relation suivant :

$$I_{obs} = I_s \left[ \exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right]$$

I.31

Où

$I_s$  : le courant de saturation en Ampère (A).

$n$  : le facteur de qualité de la diode ; sans dimension.

$V_{th}$  : Le potentiel thermique en Volt (V) ; il est donné par :

$$V_{th} = \frac{KT}{q} \quad \text{I.32}$$

Où

$K$  : la constante de Boltzmann ( $1.38066 \times 10^{-23}$  J/K =  $8.61400 \times 10^{-5}$  eV/K).

$T$  : la température absolue en Kelvin (K).

$q$  : la charge absolue d'un électron en coulomb ( $1.60281 \times 10^{-19}$  C).

Sous éclairage, un terme  $I_{ph}$ , tenant compte du photo-courant généré est rajouté, On obtient le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclairage qui est représenté par l'équation suivante [15] :

$$I = I_{ph} - I_{obs} = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right] \quad \text{I.33}$$

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs et des fuites vers les bords ; qu'ils doivent être pris en considération et l'équation de la caractéristique I-V devient alors [15] :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad \text{I.34}$$

Et par conséquent le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle est représenté sur la figure (I.15) par un générateur de courant ( $I_{ph}$ ), une diode et deux résistances parasites ( $R_s$ ) et ( $R_{sh}$ ) Elle est liée à l'impédance des électrodes et du matériau ; il en résulte que la tension  $V$  aux bornes de la cellule est différente de la tension aux bornes de la jonction Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule [22].

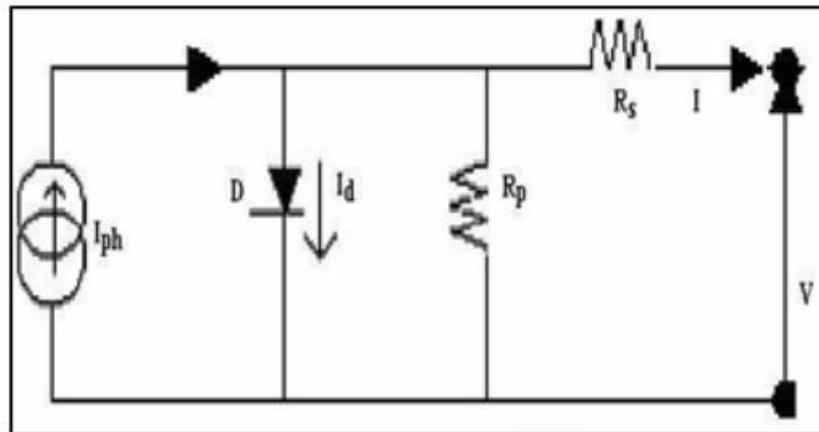


Figure I.15 : Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire [16].

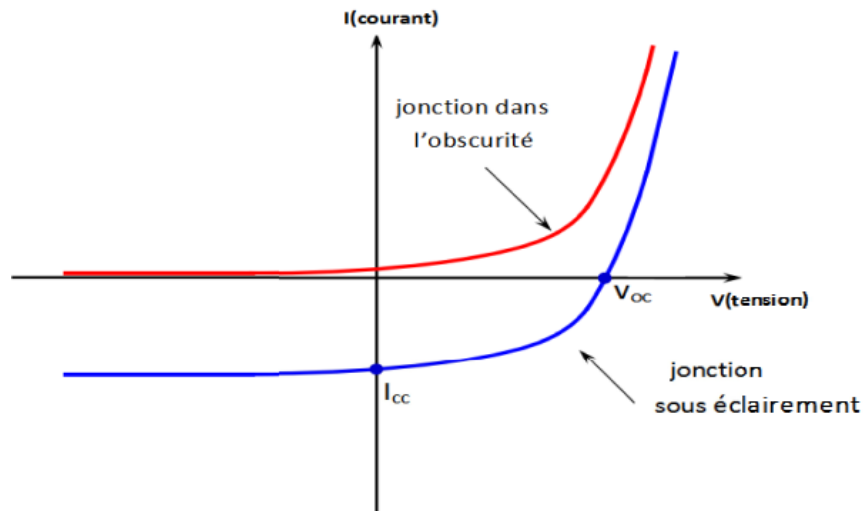
- ❖ Le générateur du courant ( $I_{ph}$ ) : il délivre le courant  $I_{ph}$  correspondant au courant photogène.
- ❖ La diode (D) : modélise la jonction P-N.
- ❖ La résistance série  $R_s$  : modélise les pertes résistives au sein de la photopile.
- ❖ La résistance parallèle  $R_s$  (résistance shunt  $R_{sh}$ ) correspond à une résistance de fuite entre les deux zones N et P de la jonction; il en résulte qu'une partie du courant  $I_{ph}$  sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge. Cette résistance devra être la plus élevée possible [2].

### I.7.2 Caractéristique courant-tension I-V d'une cellule solaire

Le courant délivré sur une charge (caractérisée d'une résistance de charge  $R_c$ ) par une cellule photovoltaïque éclairée, s'écrit :

$$I(V) = I_{ph} - I_{obsc}(V) \quad \text{I.35}$$

Avec  $I_{ph}$  : Courant photo généré et  $I_{obsc}$  : Courant à l'obscurité



**Figure I.16: Caractéristiques I-V à l'obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque.**

Pour une cellule photovoltaïque idéale, tout en considérant que la caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode, l'équation précédente est reprise sous la forme suivante :

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right] \quad \text{I.36}$$

Avec :

V : Tension aux bornes de la jonction.

$I_s$  : Courant de saturation de la jonction.

$q = 1.602 \times 10^{-19}$  C ; Charge élémentaire d'un électron.

$K = 8.62 \times 10^{-5}$  eV.K<sup>-1</sup> ; Constante de Boltzmann.

T : Température en degrés Kelvin.

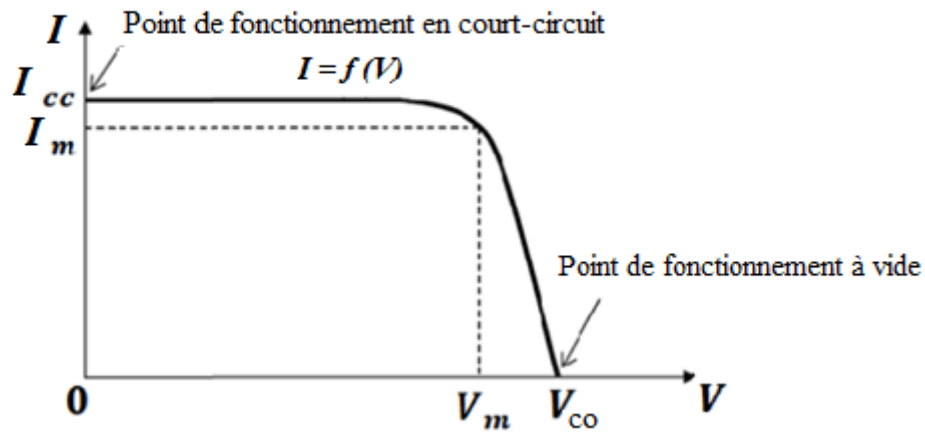


Figure I.17: Caractéristique I-V d'une cellule solaire [17]

Ainsi, dans une cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent : le courant d'éclairement et le courant d'obscurité qui résulte de la polarisation du composant.

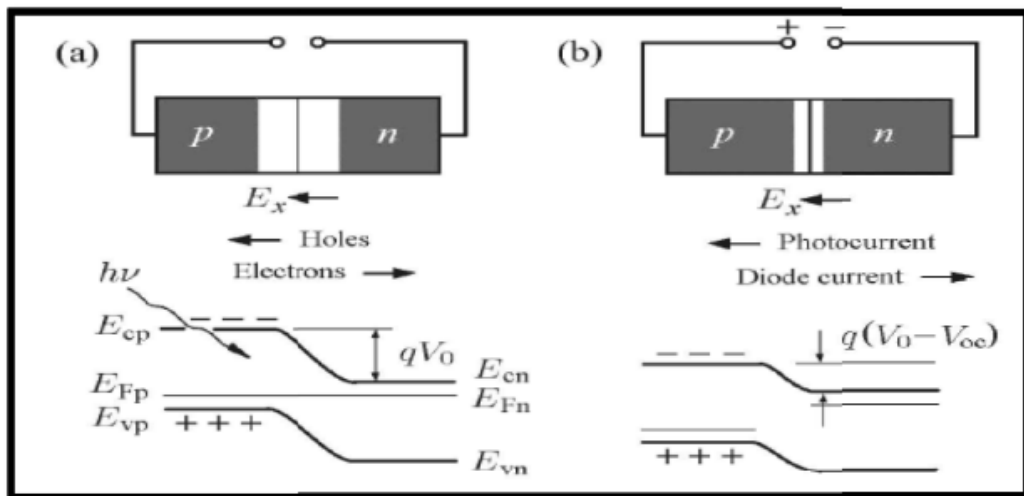


Figure I.18 : Diagramme des bandes et direction des courants dans une jonction P sous-direction des courants dans une jonction PN sous éclairage [18]

- a) Non polarisée.
- b) Polarisée en direct.

### I.8 Paramètres des cellules photovoltaïques

Une cellule solaire est constituée par une jonction PN, lorsque la surface libre est éclairée par des photons d'énergies supérieures à la largeur de la bande interdite  $E_g$ , peuvent exciter des paires électron-trou (figure I.19). Les électrons et les trous créés respectivement dans les régions

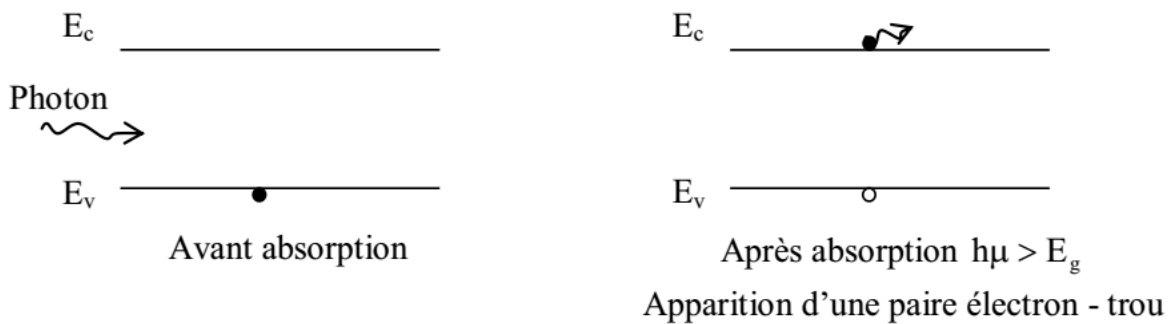
P et N diffusent et atteignent la zone de charge d'espace, accélérer par le champ électrique interne, ils traversent la zone de transition. La région N reçoit des électrons et se charge négativement ; la région P accepte des trous et se charge positivement. Si on relie les côtés de la jonction à une charge  $R_c$ , un courant « I » la parcourt et une différence de potentiel apparaît:

$$I = I_{ph} - I_d(V) \quad I.37$$

Avec :

$I_{ph}$  : le photo-courant ;

$I_d(V)$  : courant d'obscurité de la diode



**Figure I.19: Création de pair électron trou par photo excitation.**

Cette relation entre les trois grandeurs,  $I$ ,  $I_{ph}$  et  $I_d(V)$  représente la caractéristique courant tension permettant de déterminer quatre grandeurs caractéristiques principales du fonctionnement des cellules solaires [8] :

- ❖ Le courant de court-circuit  $I_{cc}$ .
- ❖ La tension en circuit ouvert  $V_{CO}$ .
- ❖ Le facteur de forme FF.
- ❖ Le rendement de conversion d'énergie  $\eta$ .

### I.8.1 Courant de court-circuit $I_{cc}$

Si les deux électrodes sont en court-circuit à travers un ampèremètre (à  $V=0$ ), les électrons drainés par un champ interne de la jonction vont donner naissance à un courant de court-circuit  $I_{CC}$  qui correspond au photo-courant généré par le rayonnement. Pour une distribution spectrale

donnée, ce photo-courant est proportionnel à l'irradiation du rayonnement incident et à la surface du front de la cellule. Il est donné par : [1]

$$I_{ph}(\lambda) = q\phi(\lambda)|1 - R(\lambda)|.R_s \quad \text{I.38}$$

$$I_{CC} = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_g} J_{ph}(\lambda) d\lambda \quad \text{I.39}$$

Avec :

$\lambda_g$  : où  $hc/E_g$  est le gap du semi-conducteur,

$\phi(\lambda)$  : Le flux de photons, à la longueur d'onde  $\lambda$ , reçu par la photopile,

$R(\lambda)$  : Le coefficient de réflexion à la longueur d'onde  $\lambda$ ,

$R_s$ : La réponse spectrale.

### I.8.2 Tension en circuit ouvert $V_{CO}$

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle positif et le pôle négatif sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule  $P = V \times I$  est nulle.

Dans le cas idéal, elle est déterminée à partir de l'équation de la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque par l'expression : [19]

$$V_{CO} = \frac{KT}{q} \ln \left[ \frac{I_{CC}}{I_S} + 1 \right] \quad \text{I.40}$$

Avec :

$I_S$  : courant de saturation.

### I.8.3 Facteur de forme FF

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée  $P_m$ ) pour un point de fonctionnement  $P_m (I_m, V_m)$  de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et  $I_{CC}$  et tension comprise entre 0 et  $V_{CO}$ ). Ce point

$P_M$  est obtenu en modifiant la valeur de la résistance externe, quand l'aire du rectangle défini par les axes  $Ox$ ,  $Oy$  et les droites  $x = I_m$  et  $y = V_m$  passe par un maximum. Le nom "Facteur de Forme" (Fill Factor) dérive de la représentation graphique. Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{cc}} \quad \text{I.41}$$

La puissance maximale délivrée à la charge est présentée par le rectangle hachuré [8]

$$P_m = V_m \times I_m \quad \text{I.42}$$

#### I.8.4 Rendement de conversion $\eta$

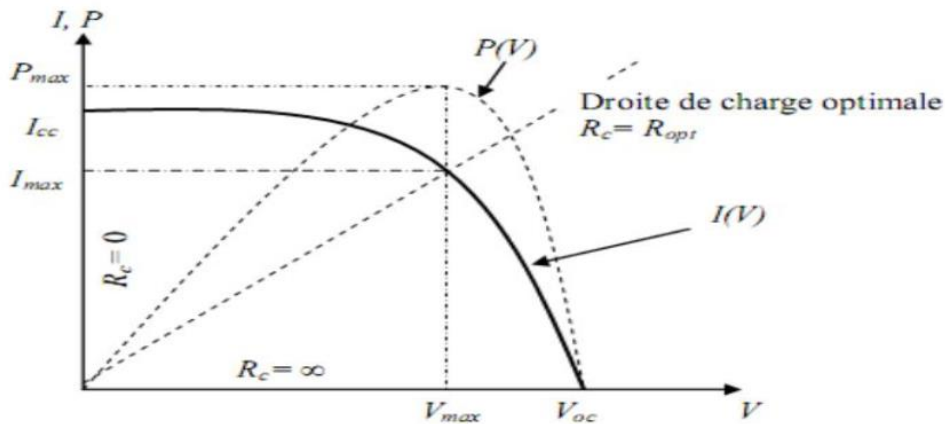
Le rendement  $\eta$ , des cellules solaires désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad \text{I.43}$$

$P_{in}$  : la puissance incidente est égale à la puissance solaire  $P$  solaire ( $P$  solaire = 100 mW/cm<sup>2</sup>).

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

A température et éclairage constants, le rendement d'une cellule solaire dépend de la charge dans le circuit électrique. En circuit ouvert ( $R_c = \infty$ ,  $I = 0$ ,  $V = V_{co}$ ) ou en court-circuit ( $R_c = 0$ ,  $I = I_{cc}$ ,  $V = 0$ ), aucune énergie n'est transmise à l'extérieur. Entre ces deux extrêmes, il existe une valeur optimale  $R_{opt}$  de la résistance de charge  $R_c$  pour laquelle la puissance fournie par la cellule solaire à la résistance de charge est maximale notée  $P_m$ .



**Figure I.20: Caractéristiques I-V et P-V d'une cellule solaire.[20]**

### **I.8.5 Point de la puissance maximale :**

L'utilisation optimale d'une photopile solaire consiste à alimenter une charge sous la tension maximale et à un courant maximal. En effet, suivant la formule :  $P=I \times V$ , pour que la puissance soit maximale : il faut être dans les conditions où le produit  $I \times V$  soit maximal : c'est le point de charge idéale de la photopile ou bien le point de puissance maximale. La puissance maximale est également fonction de l'éclairement STC (Standard Test Conditions) ( $1000\text{W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ , spectre solaire AM1.5), on parle alors de watts-crête (Wc) ou de puissance-crête.[21]

## **I.9 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque**

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

### **I.9.1 Les avantages [22,23]**

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages à savoir :

- Une haute fiabilité (elle ne comporte pas de pièces mobiles) qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. D'où son utilisation sur les engins spatiaux.

- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt.

- le coût de fonctionnement est faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni personnel hautement spécialisé.

- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

### **I.9.2 Les inconvénients [22.23]**

- la fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium est de 28%).

- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

### **I.10 Module Photovoltaïque**

Une cellule solaire typique au silicium produit une tension de puissance maximale d'environ 0,47 Volts aux conditions standards. Cette faible tension ne permet pas, en pratique, d'utiliser les cellules de façon individuelle. En général, les cellules solaires sont connectées en série et/ou parallèle pour produire une tension utile pour les applications pratiques.

Cette combinaison de cellules solaires forme ce qu'on appelle le module photovoltaïque. La production mondiale des modules PV connaît un grand essor ces dernières années. À titre d'illustration, la puissance globale installée dans le monde a augmenté de moins d'un GW en 2003 à plus de 7,2 GW en 2009 [24].

La plupart des modules photovoltaïques commercialisés contiennent 36 cellules connectées en série pour s'adapter à une tension de batterie de 12 V. On peut trouver aussi des modules contenant plus de 36 (72 et plus) [24].

La figure suivante représente une coupe transversale d'un module photovoltaïque, où nous pouvons observer le montage des cellules solaires constituant le module.

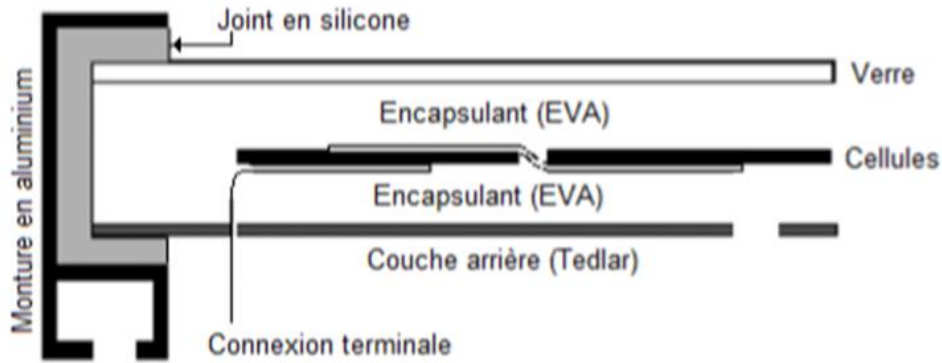


Figure I.21: Une coupe transversale d'un module photovoltaïque.

### I.10.1 Association des cellules photovoltaïques

#### I.10.1.1 Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. [25]

La figure I.22 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série  $n_s$  cellules identiques.

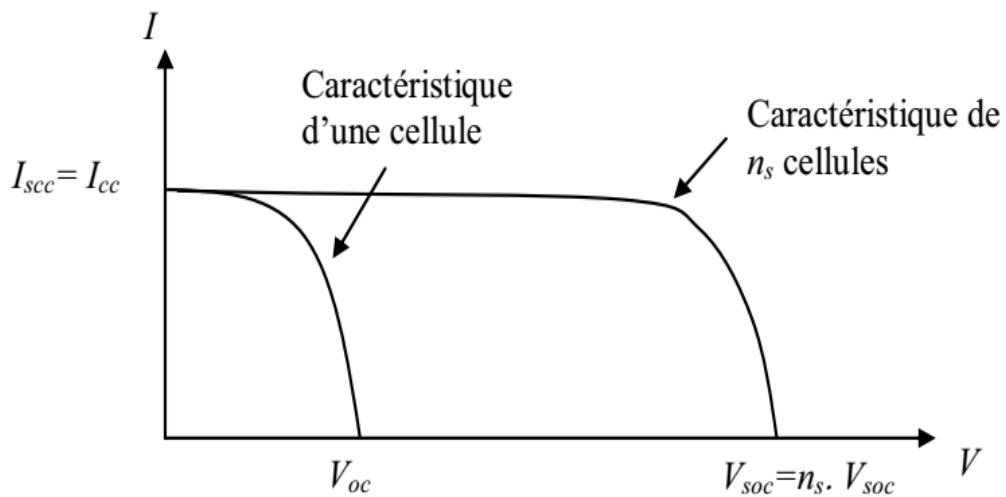


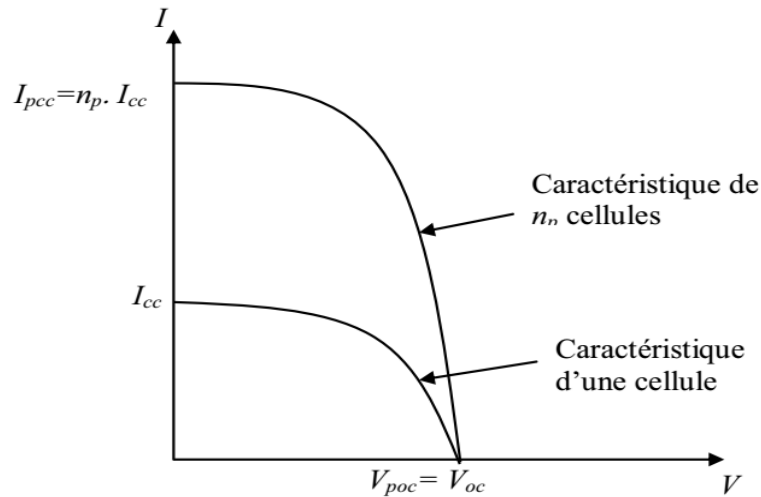
Figure I.22 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de  $n_s$  cellules identiques

#### I.10.1.2 Association en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules

sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. [25]

La figure I.23 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles  $n_p$  cellules identiques.



**Figure I.23 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de  $n_p$  cellules identiques**

### I.10.1.3 Association hybride (en série et en parallèle)

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations :

$$I_{CC}^t = n_p \cdot I_{CC} \quad \text{I.45}$$

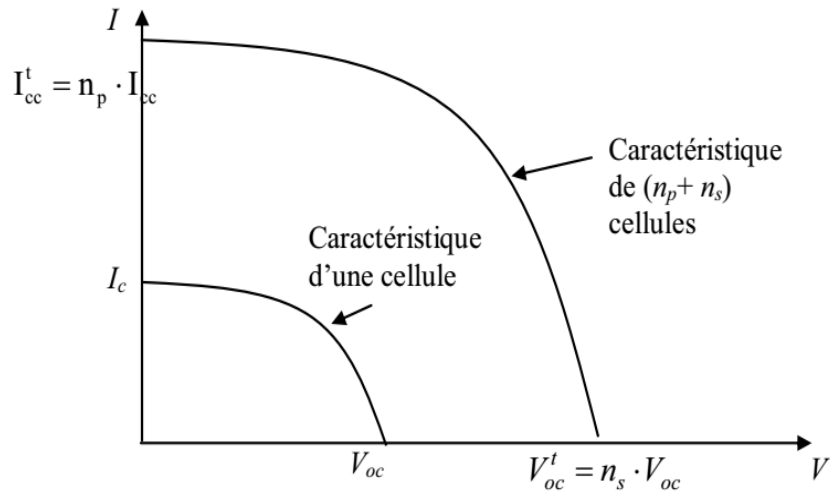
$$V_{OC}^t = n_s \cdot V_{OC} \quad \text{I.46}$$

Avec :

$n_p$  : nombre des cellules en parallèle,

$n_s$  : nombre des cellules en série.

La figure I.24 montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série  $n_s$  et en parallèle  $n_p$ , cellules identiques.



**Figure I.24 : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de  $(n_p + n_s)$  cellules identiques**

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit  $I_{cc}$  et de la tension à vide  $V_{co}$  sont plus ou moins importantes (figure I.24). La caractéristique d'un générateur photovoltaïque constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes) [26].

### I.11 Influence de la température

L'équation de Boltzmann donne [8,27] :

$$I_{sc} = I_0 \exp\left(\frac{q \cdot V_0}{KT}\right) \quad \text{I.47}$$

L'expérience montre que la tension de circuit ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule.

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques I-V et P-V (figure I.25 et I.26) d'un module photovoltaïque **SP75** pour un niveau d'ensoleillement  $G$  donné et pour différentes températures [8,27].

Pour la figure (I.25) Nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température

augmente la tension de circuit ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente figure (I.26).

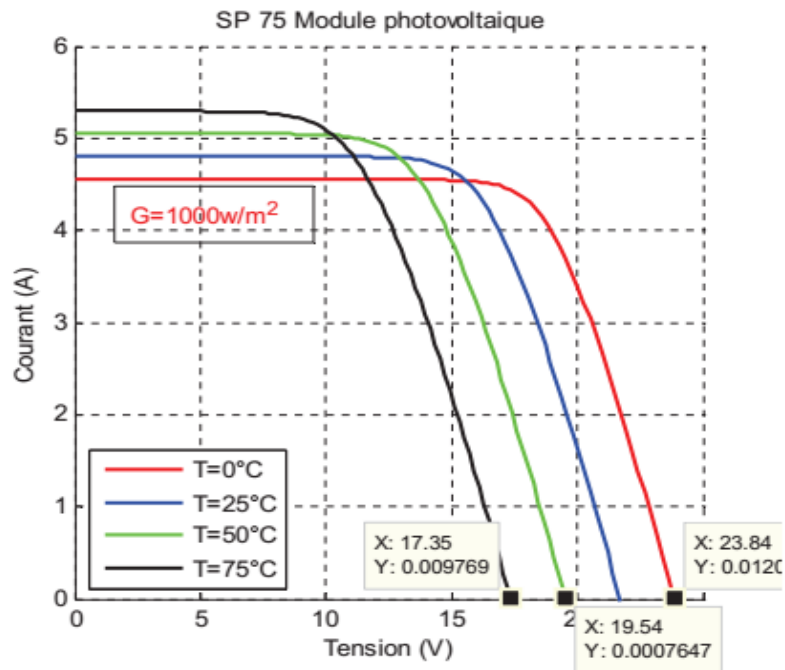


Figure I.25 : La caractéristique de  $I=f(V)$  en fonction de température [8,27]

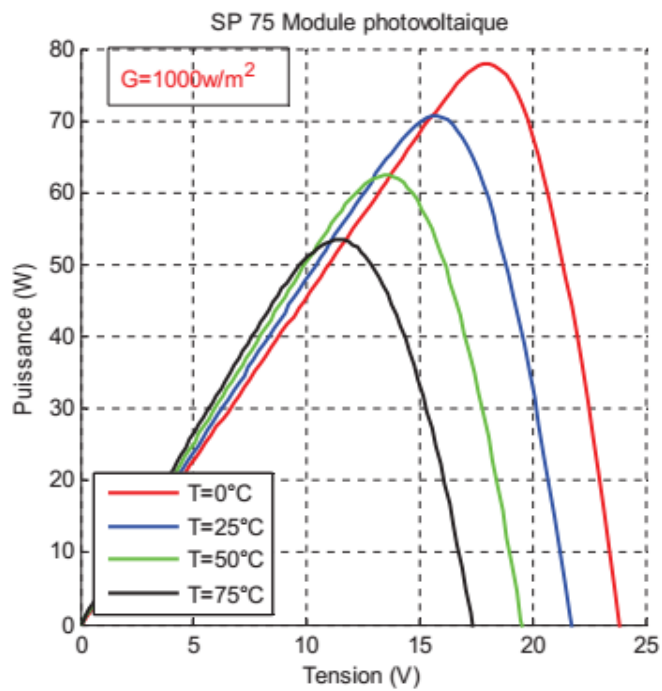


Figure I.26 : La caractéristique de  $P= f(V)$  en fonction de température [8,27]

### I.12 Influence de l'éclairement

Le même travail comme précédente, nous avons fixé la température pour différents éclairements figure (I.27 et I.28).

Pour la figure (I.27) on remarque que pour l'éclairement  $G=1000 \text{ w/m}^2$  le courant  $I_{sc}=4.8\text{A}$  et pour  $G=800\text{w/m}^2$  le courant  $I_{sc}=3.84\text{A}$  on peut voir que le courant subit une variation importante, quand l'éclairement augmente le courant de court-circuit est augmenté, mais par contre la tension varie légèrement. Ce qui se traduit par une augmentation de la puissance, lorsque l'éclairement est augmenté figure (I.28) [8,27].

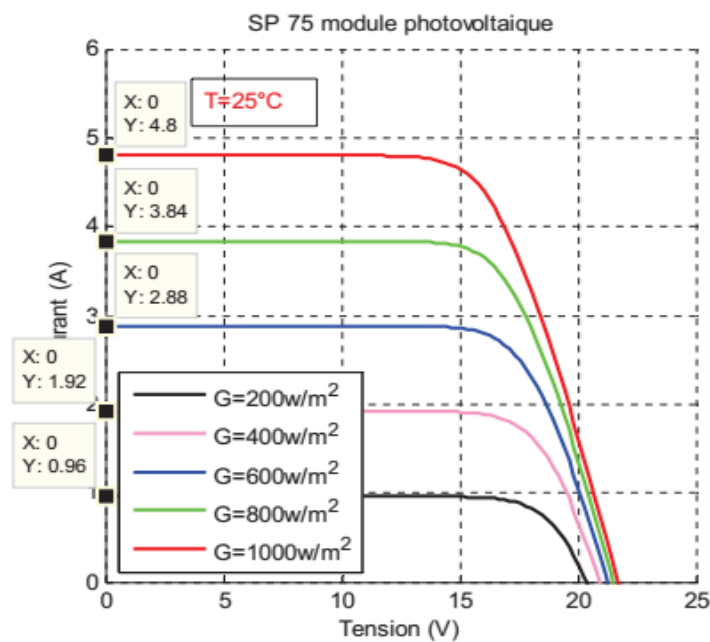


Figure I.27 : La caractéristique  $I=f(V)$  en fonction de l'éclairement [8,27]

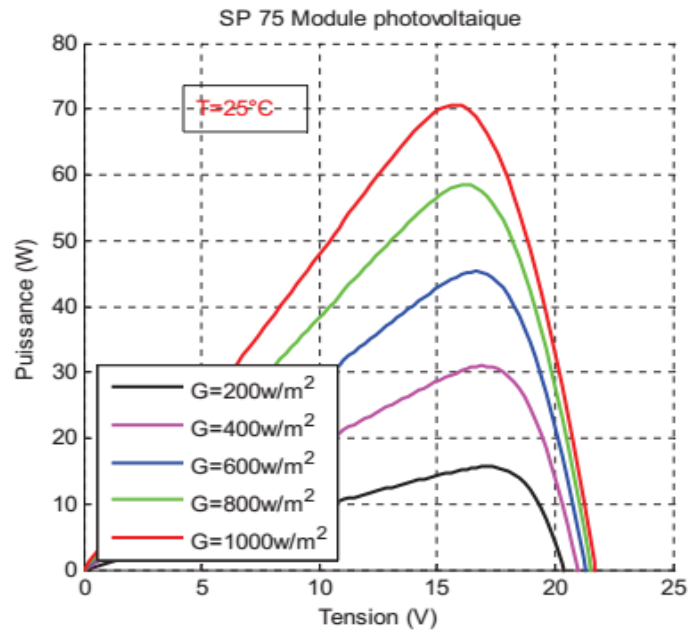


Figure I.28 : La caractéristique  $P=f(v)$  en fonction de l'éclairement [8,27].

## II.1. Introduction

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté dans une première partie, le logiciel de simulation PC1D, où les différentes versions de ce logiciel, ces domaines d'utilisation et son mode d'utilisation sont détaillés. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la présentation des propriétés physiques et chimiques des matériaux utilisés (le silicium dans ces différents types et l'Arséniure de Gallium) à partir de ces structures cristallines, ces propriétés électriques jusqu'à ces propriétés optiques et optoélectronique.

## II.2. Logiciel de simulation PC1D

### II.2.1. Différentes versions du PC1D

La première version du PC1D fut le premier programme à résoudre avec succès les équations complexes des composants à semi-conducteurs sur un PC, les versions antérieures résolvaient seulement les équations des porteurs minoritaires pour des régions à dopage uniforme, cependant, les versions récentes offrent les solutions de ces équations pour différents profils de dopage (Uniforme, Exponentiel, Gaussien, Eric) [28].

La deuxième version a été améliorée par le même programmeur (Paul A. Basaure), cette version a été rendue publique juste après son annonce à la conférence IEEE PVSC (Mars 1989). Cette version offrait la possibilité de modéliser les hétéro-structures. Plusieurs facteurs ont été ajoutés à cette version, telle que la texturisation des surfaces de cellules solaires.

La 3ème version a vu des améliorations numériques peu importantes, nous citons la rapidité et les critères de convergence. Elle a été distribuée en Octobre 1991.

La 4ème version qu'on a exploitée dans notre étude, est apparue en 1995, elle est plus développée que les versions antérieures (1, 2,3), la différence réside dans sa rapidité (vitesse de calcul), de meilleurs critères de convergence et de stabilité, le nombre d'itérations jusqu'à 200, le nombre des éléments a atteint 500, le nombre des régions 5, ainsi que la prise en compte de plusieurs éléments caractérisant les cellules solaires [28].

On trouve aussi dans cette version des corrections et des ajustements physiques, telles que modèle de mobilité des porteurs majoritaires, la correction de coefficient de recombinaison bande-a-bande (de  $9.5E-14$  jusqu'à  $9.5E-15$   $\text{cm}^3/\text{s}$ ), du rapport  $N_c/N_v$  (de 2.8 à  $1. E06$ ), et l'absorption par les porteurs libres, pour les niveaux de dopage élevés.

Parmi les avantages aussi de ce logiciel, la facilité d'interagir avec le simulateur grâce aux nombreuses boîtes de dialogue qui apparaissent au cours de l'utilisation du PC1D, la possibilité d'étudier les performances des cellules en fonction de plusieurs paramètres par le mode BATCH (12 paramètres à la fois). Grâce à ces améliorations et aux corrections tant physiques que numérique, cette version est capable d'offrir des très précis sous deux forme graphe et tableau en mode Batch [29].

### **II.2.2. Le simulateur PC1D**

Le PC1D est un simulateur solaire unidimensionnel pour Windows, crée initialement au laboratoire de Dr. Sandia National par Paul A. Basaure et son équipe en 1984, puis développé par Dr. Don Clugston à l'université de New South Wales (UNSW) en Australie. La première version a été publiée en décembre 1985. Le programme est devenu populaire grâce à son interface simple et souple, ce qui le rend facile a utilisé. Durant son exécution, seul le fichier PC1D.EXE est nécessaire pour les calculs. La base de données du PC1D contient un fichier help PC1D.HLP et quelques fichiers additionnels des paramètres physiques et quelques matériaux tels que le silicium (Si), le Germanium (Ge), l'InP et le GaAs. Il contient aussi les spectres solaires standards terrestres, spatiaux et diffus (AM0, AM1.5G et AM1.5D). Typiquement, le PC1D et utilisé pour modéliser les cellules solaires à base de Si, Ge et les cellules solaire à base de semi-conducteurs III-V [30].

#### **Fichier utilisé durant l'exécution du PC1D [30].**

Pour présenter une structure solaire sur PC1D, le simulateur utilise un ensemble de fichiers constitué de :

#### **Fichier \*.prm**

Ce fichier contient les informations concernant le design du matériau comme l'épaisseur des couches, les profils de dopage, la durée de vie du porteur et la vitesse de recombinaison

#### **Fichier \*.mat**

Ce fichier contient les informations correspondant aux propriétés électroniques du matériau comme la bande interdite, l'affinité électronique, la constante relative diélectrique et la mobilité.

### Fichier des paramètres optiques

Durant la simulation d'une structure solaire, deux types de fichiers sont nécessaires ; le fichier du coefficient d'absorption (\*.abs) et le fichier de l'indice de réfraction (\*.inr). Ces deux fichiers sont liés au fichier (\*.mat), ils contiennent les valeurs du coefficient d'absorption et l'indice de réflexion en fonction de la longueur d'onde incidente [30].

PC1D se base sur le calcul du potentiel électrostatique, et les niveaux de Fermi des électrons et des trous. Voici une liste de ces principaux paramètres :

- Epaisseur de la région,
- Type de matériau,
- Mobilité des porteurs,
- Constante diélectrique,
- Bande interdite,
- Concentration intrinsèque,
- Indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde,
- Coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde,
- Valeur du niveau de dopage,
- Diffusion en face avant pour l'émetteur et en face arrière pour le champ BSF,
- Recombinaison des porteurs s'exprimant à travers la durée de vie et la mobilité,
- Recombinaison en face avant et arrière [30].

### II.2.3. Aperçu du logiciel

La fenêtre du logiciel PC1D est présentée sur la Figure II-1, ce logiciel se divise en quatre parties, les trois parties sont pour la programmation ; où il faut introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation. La quatrième partie concerne les résultats de la simulation.

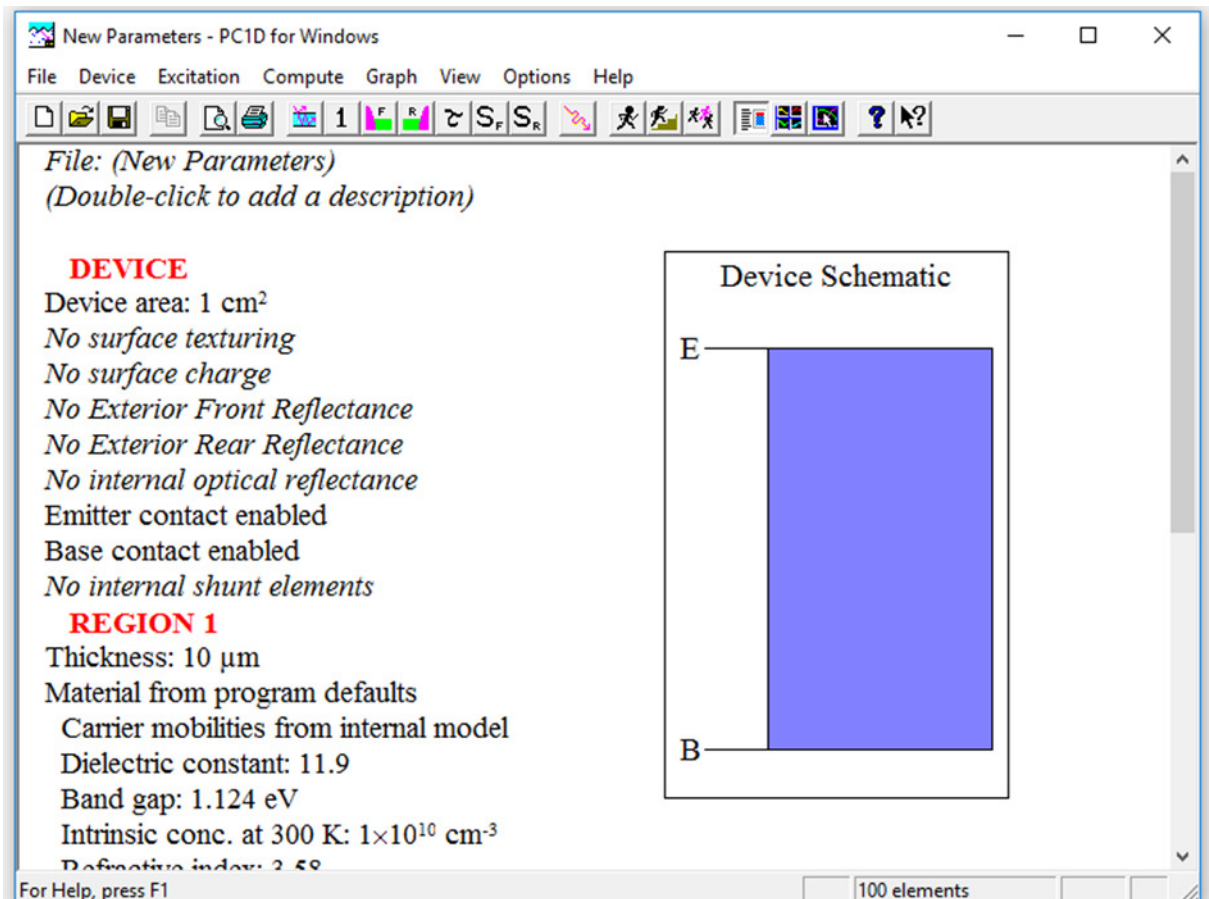


Figure II-1 : Fenêtre du logiciel PC1D.

#### II.2.4. Paramètres d'entrée du logiciel

##### Paramètres du dispositif

Les paramètres du dispositif (Device) à introduire sont classés par ordre d'apparition comme suit :

- La surface du dispositif,
- La texturisation (avant et/ou arrière),
- La densité de charge surfacique (avant et/ou arrière),
- La réflectance externe (avant et/ou arrière),
- La réflectance interne,
- Les résistances séries internes,
- Les résistances shunt internes.

##### Paramètres des régions

PC1D permet de créer plusieurs régions selon leurs géométries et leurs propriétés technologiques. Dans chaque région, les paramètres introduits sont les suivants :

- L'épaisseur du matériau,
- Le matériau utilisé : les paramètres qui le décrivent sont stockés dans des fichiers d'extension (\*.mat). Ils sont soit, fournis avec le logiciel pour les matériaux les plus utilisés comme le silicium, le germanium et l'arséniure de gallium, ou changés. Les paramètres placés dans ce fichier sont : les mobilités ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ ), le constant diélectrique relatif, l'énergie du gap (eV), l'indice de réfraction, la concentration intrinsèque ( $\text{cm}^{-3}$ ), le coefficient d'absorption optique ( $\text{cm}^{-1}$ ) et l'absorption des porteurs libres,
- Le type et la concentration du dopage (pour la base),
- Le profil de dopage des faces (avant et/ou arrière),
- Les durées de vie des porteurs dans le volume,
- Les vitesses de recombinaison (avant et/ou arrière).

#### **Paramètres d'excitation**

Selon les résultats recherchés, on choisit comme suit le type de fichiers d'excitation à introduire :

- Le fichier « One-Sun.exc » (intensité globale de tout le spectre d'un seul soleil : généralement celui d'AM1.5 Global) permet de simuler différentes caractéristiques (courant/tension-puissance/tension, etc...),
- Le fichier « Scan-qe.exc » (intensité de chaque longueur du spectre) pour simuler de la réponse spectrale. Ensuite, on choisit un mode d'excitation parmi trois qui sont le mode d'équilibre, stationnaire et transitoire. Les derniers paramètres à introduire sont les suivants :
- La température,
- Le circuit (résistance, tension),
- L'éclairement (intensité, fichier d'air masse).

#### **II.2.5. Résultats obtenus par le logiciel**

Après l'introduction de toutes les données nécessaires au matériau étudié, ainsi que la configuration de la cellule solaire, le simulateur permet d'obtenir les résultats suivants :

- La valeur du courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ),
- La valeur de la puissance maximale ( $P_m$ ),
- La valeur de la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ).

Ces résultats permettent de calculer le rendement de conversion ( $\eta$ ) ainsi que le facteur de forme (FF).

Le logiciel permet aussi, la visualisation des différentes courbes concernant : la distribution de la charge, du dopage, du champ et du potentiel électrique dans la cellule, ainsi que le diagramme des bandes d'énergie, les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) avec les trois courbes de réflectance du rendement quantique externe (EQE) et du rendement quantique interne (IQE) [31].

### II.2.6. Fonctionnement du PC1D

Le fonctionnement du PC1D nécessite plusieurs critères à respecter :

- Le choix des gammes de 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.

Ces critères sont nécessaires dans chaque simulation, mais ils ne sont pas suffisants [32].

### II.3. Matériaux utilisés (le silicium) [33]

Le silicium est le deuxième élément le plus abondant de la croûte terrestre après l'oxygène (O). Il constitue 26% de son poids. Dans le tableau périodique des éléments, il est situé dans la colonne IV.A (entre le carbone et le germanium) et la ligne III (entre l'aluminium et le phosphore). Ce matériau est un semi-conducteur à gap indirect de 1.12 eV à la température ambiante (Figure II-2). Sa densité intrinsèque des porteurs à  $T = 300K$  «  $n_i$  » est de  $8.59 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ .

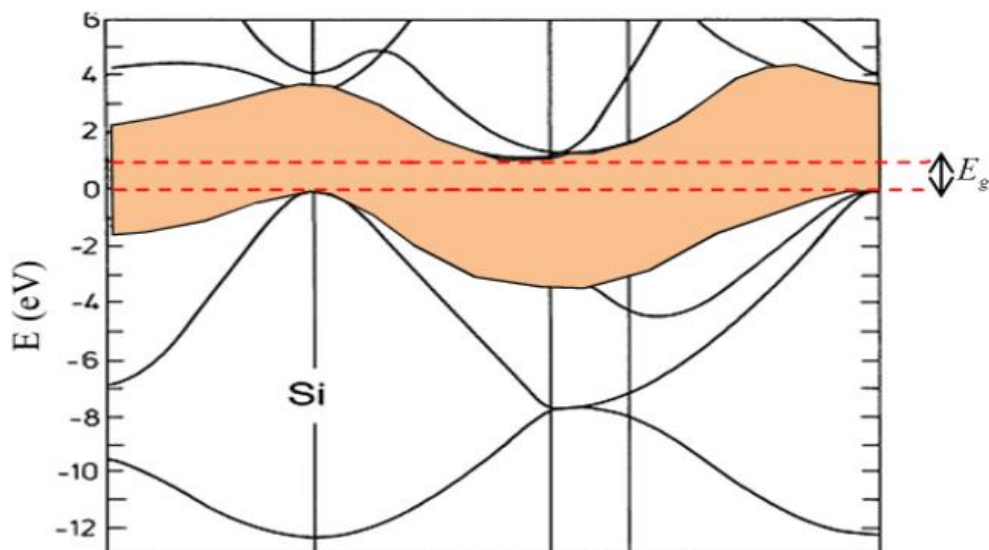


Figure II-2 : Structure de bandes du silicium cristallin [33]

Le silicium cristallise dans la structure « Diamant ». Dans la nature, il ne se trouve pas sous sa forme pure, mais sous forme de silice ( $\text{SiO}_2$ ) dans le sable de quartz. Les différentes propriétés thermiques et mécaniques sont rapportées dans le Tableau suivant.

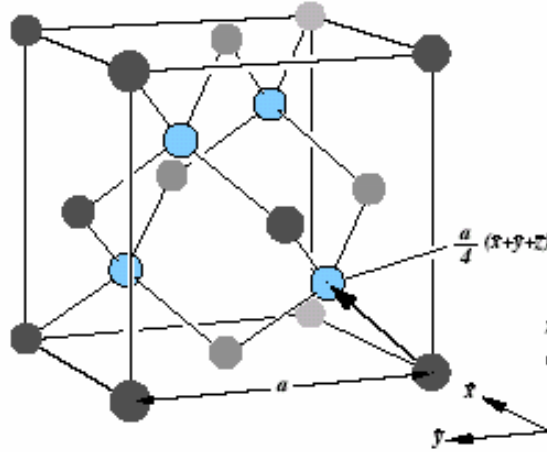
| Propriété   | Valeur               |
|---|----------------------|
| Masse atomique (g/mol)                            | 28.085               |
| Densité atomique (atome/cm <sup>3</sup> )         | $5.0 \times 10^{22}$ |
| Point de fusion (C)                               | 1414                 |
| Point d'ébullition (C)                            | 3270                 |
| Chaleur de fusion (kJ/g)                          | 1.8                  |
| Chaleur d'évaporation (kJ/g) (au point de fusion) | 16                   |
| Densité volumique (g/cm <sup>3</sup> à 25 C)      | 2.329                |
| Volume de contraction à la fusion (%)             | 9.5                  |

Tableau II-1 : Propriétés thermiques et mécaniques du silicium [33].

### II.3.1. Structure cristalline

Dans un cristal idéal du silicium, les atomes sont arrangés selon la structure diamant avec une distance interatomique  $d = 2.37 \text{ \AA}$  (figure II-3). La liaison entre les atomes les plus proches est de type covalent (angle de liaison  $109^\circ 28'$ ). A ce type de liaison correspond des

états électroniques qui sont couplés entre eux dont le potentiel périodique dans le cristal, conduisant à des bandes d'énergie permises et interdites pour les électrons, [34].



**Figure II-3 : Maille cubique conventionnelle de la structure diamant [34].**

### II.3.2. Le silicium poly cristallin

La structure du silicium polycristallin se situe entre celle du silicium monocristallin et celle du silicium amorphe. Elle est constituée de grains dont la taille varie de quelques centaines de nanomètres à quelques millimètres suivant les conditions d'élaboration, séparés entre eux par des joints de grains. Les joints de grains délimitant des grains d'orientations différentes constituent des zones désordonnées, souvent assimilées à du silicium amorphe.

Le désordre induit par les joints de grains et la distorsion des liaisons entre les atomes de silicium provoquent une distribution des états électroniques. Cela se traduit par l'apparition d'états localisés dans la bande interdite au niveau des bandes de conduction et de valence sous forme de queues de bande. Les liaisons pendantes (liaisons non satisfaites) introduisent quant à elles deux états électroniques au milieu du gap. Les grains peuvent être de différentes tailles. Leur qualité cristalline est fonction de la densité des défauts intra-granulaires parmi lesquels les dislocations, les sous joints et les joints de macles. En présence de ces défauts, la structure de bande du silicium peut être modifiée. D'autre part, les couches de silicium polycristallin ont un niveau de pureté moins élevé par rapport au silicium monocristallin. La présence d'impuretés telles que l'oxygène, le carbone et les métaux de transition, pouvant être incorporées dans la couche lors de la fabrication du silicium polycristallin, limite la longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans les applications telles que le photovoltaïque.

D'autres impuretés peuvent être introduites intentionnellement dans la couche pour le dopage ou la passivation des défauts. En fonction de la densité des défauts dans la couche, la densité d'états peut prendre différents aspects [35].

### II.3.3. Le silicium amorphe

Le silicium amorphe (a-Si) : c'est un matériau composé de silicium hydrogéné (état non cristallin) déposé sur un substrat de verre. D'un rendement moins bon que le cristallin (57%), le silicium amorphe (a-Si) est apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques. Le coût de la production est bien plus bas que celui des cellules cristallines. Les cellules amorphes peuvent fonctionner sous de très faibles éclairagements. Elles sont très bon marché par rapport aux autres types de cellules. Elles sont moins sensibles aux températures élevées. Elles présentent un rendement de conversion moyen de 5 % par module et de 14 % pour les cellules en laboratoire [35].

### II.3.4. Structure de bandes

La figure II-2 est une représentation de la structure de bandes du silicium monocristallin localisée autour de la bande interdite. La zone orangée représente la bande interdite, les bandes immédiatement au-dessus et en-dessous sont, respectivement, les bandes de conduction et de valence [36].

La figure II-2 montre que le silicium a un gap indirect. L'énergie de gap,  $E_g$ , décroît avec la température suivant la relation

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad \text{II.1}$$

Où :  $E_g(0) = 1.169 \text{ eV}$

$\alpha = 4,9 \cdot 10^{-4} \text{ eV/K}$

$\beta = 655 \text{ K}$

T : la température en kelvin

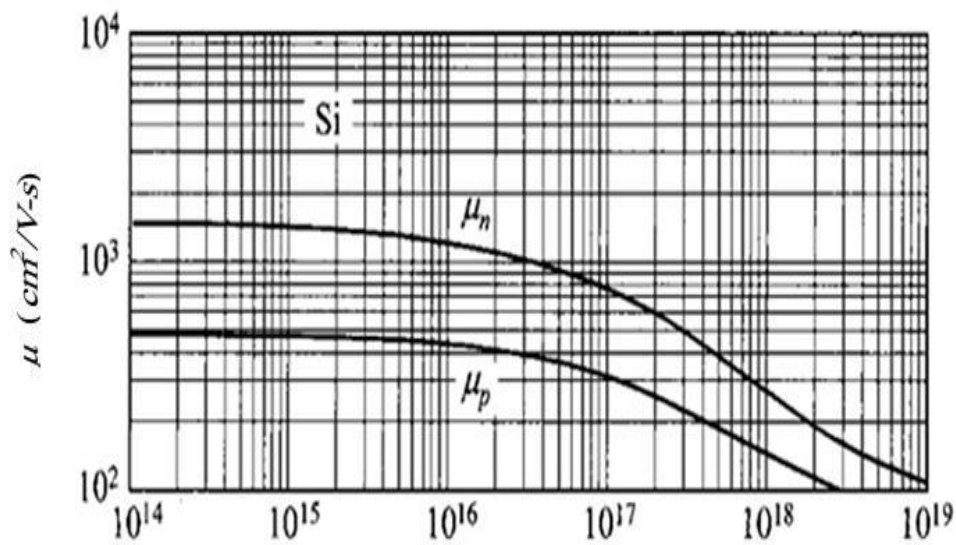
### II.3.5. La mobilité

La mobilité des semi-conducteurs est donnée en général par la relation suivante :

$$\mu = \left( \frac{1}{\mu_l} + \frac{1}{\mu_i} \right)^{-1} \quad \text{II.2}$$

Où  $\mu_l$  est la mobilité due à la présence des phonons acoustiques et  $\mu_i$  est la mobilité des impuretés ionisées

La figure (II-5) représente les mobilités mesurées du silicium en fonction de la concentration des impuretés à la température ambiante ( $T = 300\text{K}$ ). La mobilité diminue avec l'augmentation de la concentration des impuretés (à la température ambiante, les impuretés les plus superficielles sont ionisées).



**Figure II-5 : Variation de la mobilité du silicium en fonction de la concentration des impuretés [30].**

La figure II-6 montre l'effet de la température sur la mobilité pour des échantillons du silicium de type-N et de type-P. Pour les faibles concentrations d'impuretés, la mobilité est limitée par la dispersion des phonons et diminue avec la température. A la température ambiante, la mobilité varie comme  $T^{-0.1}$  et  $T^{-1.2}$  pour le silicium du type-N et du type-P, respectivement

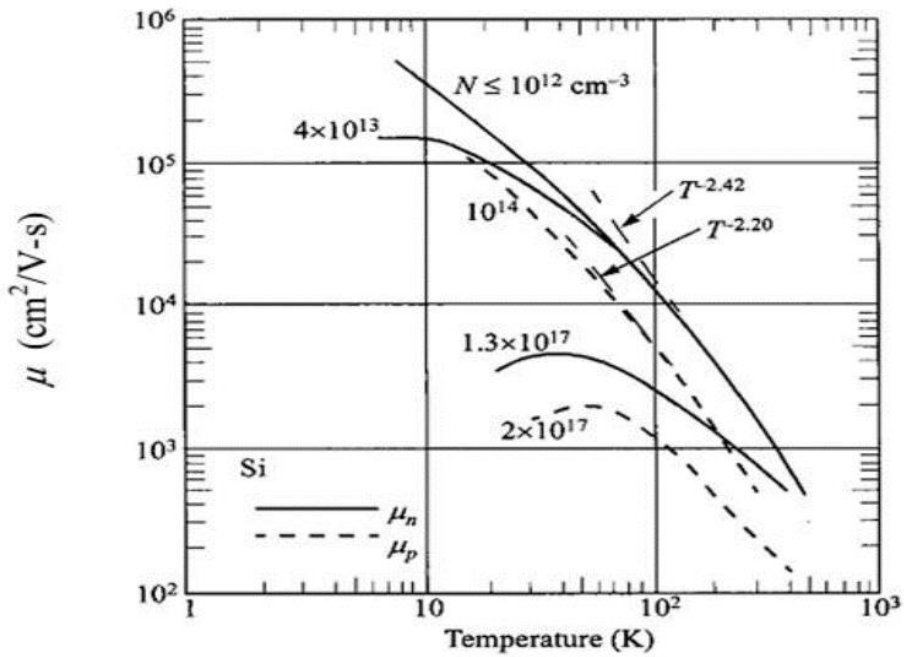


Figure II-6 : La mobilité des électrons et des trous dans le silicium en fonction de la température [30].

### II.3.6. La résistivité

La figure II-7 montre la résistivité du silicium mesurée (à 300 K) en fonction de la concentration des impuretés (phosphore pour le type-N et le bore pour le type-P). La résistivité n'est pas en relation linéaire avec la concentration, car la mobilité n'est pas une constante et elle diminue habituellement avec l'augmentation de la concentration des impuretés.

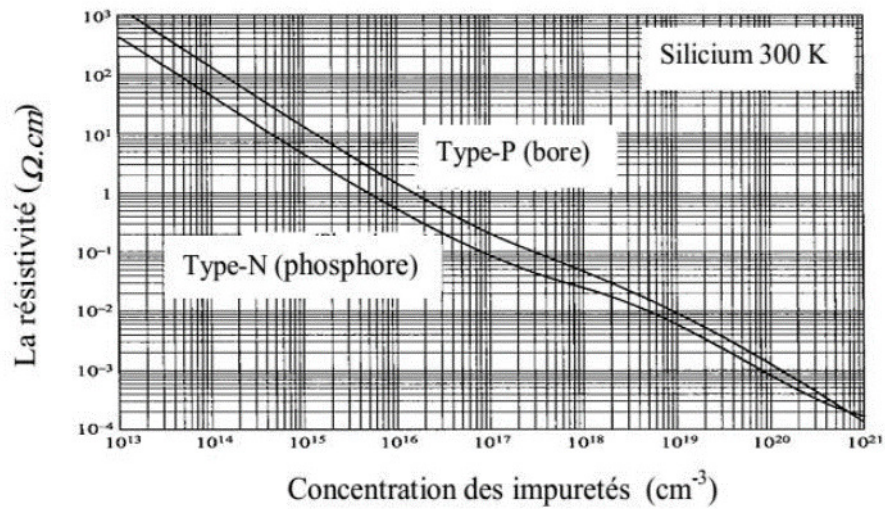


Figure II-7. : Résistivité du silicium en fonction de la concentration des impuretés à 300 K [41].

### II.3. 7. Les propriétés optiques

#### Coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption du silicium cristallin à température ambiante est illustré dans la figure II-8. L'absorption augmente rapidement juste au-dessus de 3 eV et passe par un maximum près de 3.5 eV. Il y a un pic relativement pointu près de 4.3 eV

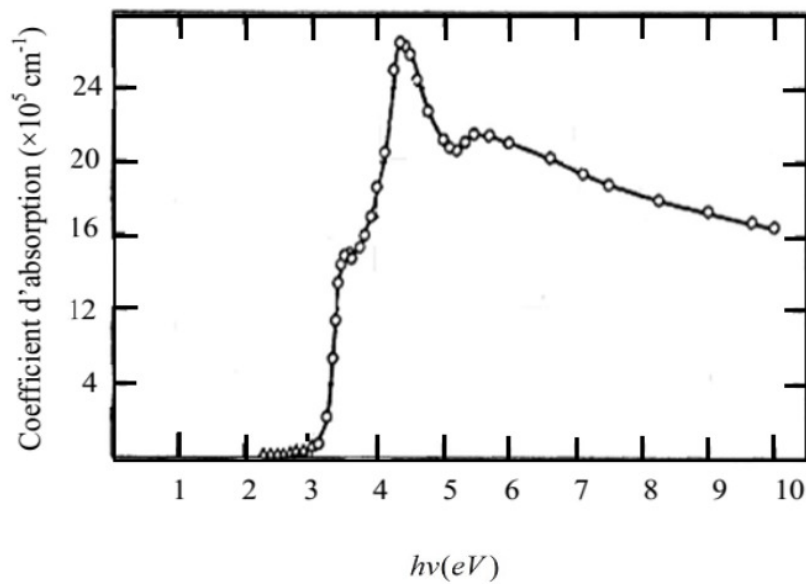


Figure II-8 : Coefficient d'absorption du silicium cristallin en fonction de l'énergie des photons [30].

Le silicium a un gap indirect. Son coefficient d'absorption pour une transition avec absorption d'un phonon est donné par

$$\alpha_a(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g + E_p)^2}{\exp\left(\frac{E_p}{K_B T} - 1\right)} \quad \text{II.13}$$

Le coefficient d'absorption du silicium pour une transition avec émission d'un phonon est :

$$\alpha_e(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g - E_p)^2}{1 - \exp\left(-\frac{E_p}{K_B T}\right)} \quad \text{II.14}$$

Où A est une constante indépendante de l'énergie de phonon.  $E_p$  est l'énergie de phonon. Puisque l'émission et l'absorption d'un phonon ne sont possibles qu'à la condition  $h\nu > E_g + E_p$ , alors, on aura un coefficient d'absorption additif comme suit :

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_e \quad \text{II.15}$$

### Indice de réfraction réel

La figure II-9 montre que l'indice de réfraction réel croît lorsque l'énergie des photons augmente. Il passe par un maximum situé autour de 3,4 eV ( $\lambda = 365 \text{ nm}$ ), puis décroît à un minimum situé à 10 eV ( $\lambda = 124 \text{ nm}$ ). L'indice de réfraction réel statique vaut 3,41.

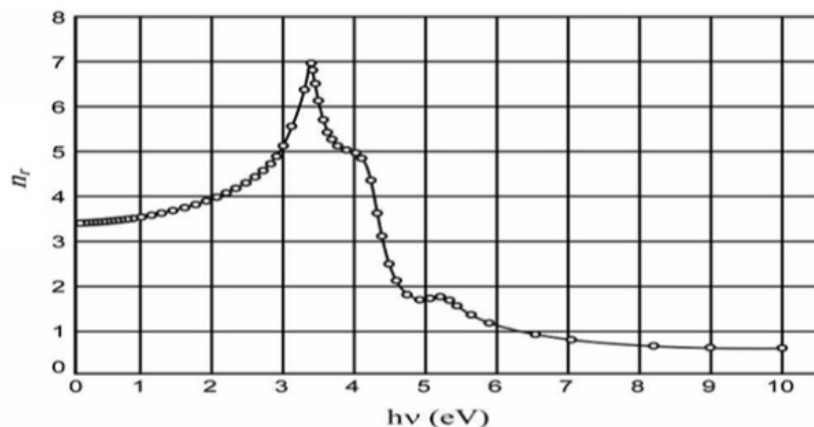


Figure II-9 : Indice de réfraction réel ( $n_r$ ) du silicium cristallin en fonction de l'énergie des photons incidents [37].

## II.4. Arsenic de gallium GaAs

Le GaAs est un semi-conducteur III-V complexe composé de deux éléments, le gallium (Ga) de la colonne III et l'élément de l'arsenic (As) de la colonne V du tableau périodique des éléments. Le GaAs a d'abord été créé par la société Goldschmidt en 1929, mais les premières propriétés électroniques de ce semi-conducteur ne furent démontrées qu'en 1952.

### II.4.1. Propriété cristalline

Le cristal GaAs est composé de deux sous-réseaux, chacun cubique à faces centrées (CFC) et décalé par rapport à l'autre par la moitié de la diagonale du cube. Cette configuration cristalline est connue sous le nom de blende de zinc et est représentée sur la figure :

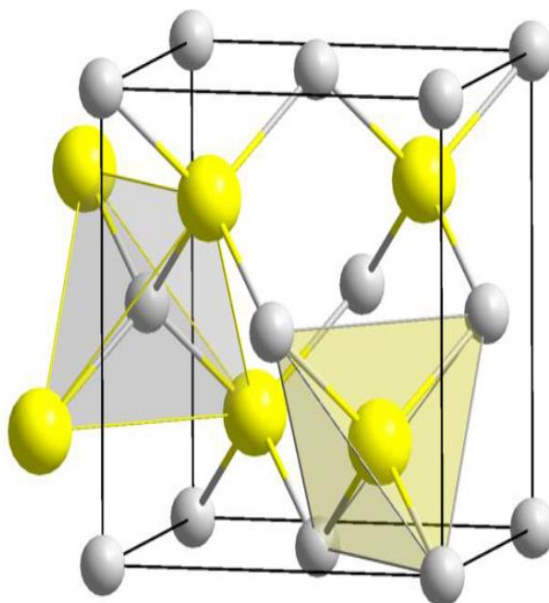


Figure II-10 : Réseau cristallin du GaAs (zinc de blende) [38].

### II.4.2. Structure des bandes d'énergie

La figure II-11 montre la structure de bande de l'arséniure de gallium, ce matériau a une bande interdite directe  $E_g = 1,42$  eV.

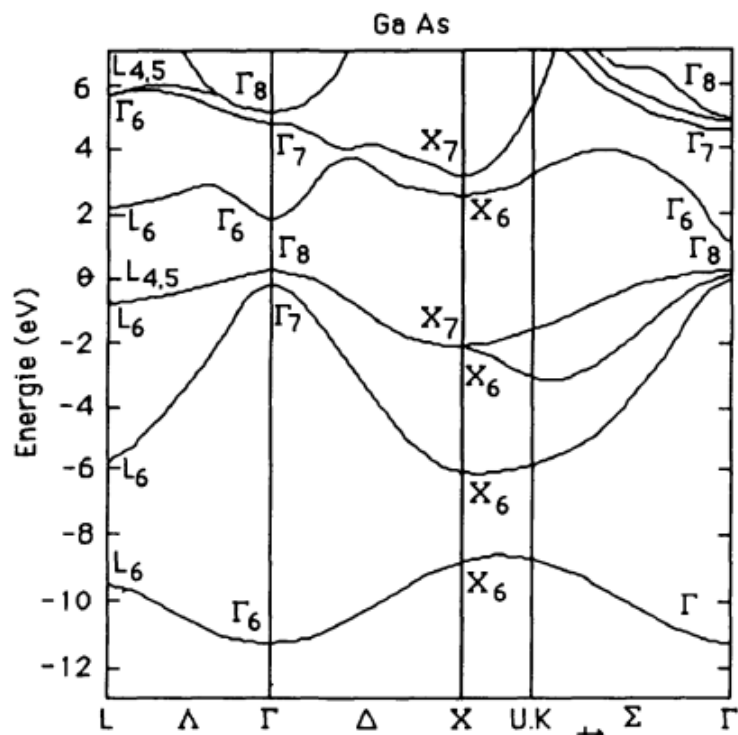


Figure II-11 : Structure de bandes de GaAs [32].

#### II.4.3. Propriétés physico-chimique du GaAs

| N° : | Propriétés                         | valeur                                      |
|------|------------------------------------|---|
| 01   | Structure cristalline              | Zinc blende                                 |
| 02   | Paramètre de maille                | 5.65 Å                                      |
| 03   | Densité                            | 5.32 g/cm <sup>3</sup>                      |
| 04   | Densité atomique                   | 4.5*10 <sup>22</sup> atomes/cm <sup>3</sup> |
| 05   | Masse molaire                      | 144.64 g                                    |
| 06   | Coefficient d'expansion thermique  | 5.8*10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>        |
| 07   | E <sub>g</sub> (eV)                | 1.42  |
| 08   | m* / m <sup>o</sup>                | 0.067                                       |
| 09   | Electricité (mv/cm)                | 0.4   |
| 10   | N <sub>i</sub> (cm <sup>-3</sup> ) | 10*10 <sup>10</sup>                         |
| 11   | V <sub>sat</sub> (cm/s)            | 1.0*10                                      |
| 12   | ε <sub>r</sub>                     | 12.5  |
| 13   | Θ <sub>k</sub> (w/cm.s)            | 0.54  |

Tableau II.I : propriétés physico-chimiques principales du GaAs a 300 k [33].

### III.1. Introduction

Ce troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats de la simulation et leurs interprétations. Tout d'abord nous avons présenté le mode des cellules simulé par le logiciel PC1D, on a basé sur la structure de la cellule, les paramètres physiques et géométriques ainsi que les paramètres de l'excitation lumineuse. Puis, on a fait une étude simulatrice des caractéristiques I-V et P-V de deux types de cellules solaires la première à base de silicium et la deuxième à base de l'arséniure de gallium GaAs. Enfin on a présenté l'effet de quelques paramètres physiques et géométrique sur la performance des cellules étudiées.

Le but de cette étude est la comparaison entre les deux cellules étudiées pour attribuer le meilleur rendement des cellules solaires étudiée.

### III.2. Présentation générale des cellules simulées

Dans cette étude nous avons simulé deux cellules solaires, la première à base de silicium et la deuxième à base de GaAs, les cellules sont de type ( $n^+p p$ ) dont le schéma équivalent est représenté dans la figure (III-1) et les paramètres sont regroupés dans le tableau (III-1).

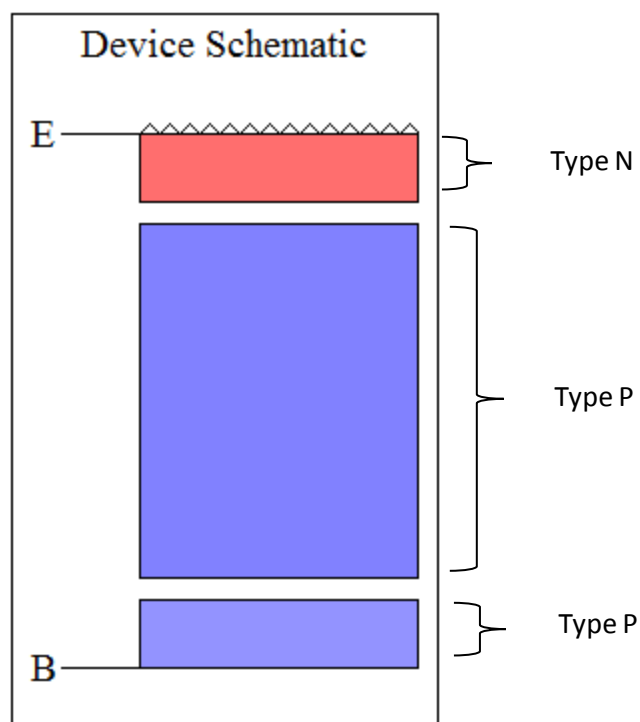


Figure III-1 : Schéma représentatif de la cellule étudié

| Paramètre  | Valeur                              |                      |
|--|-------------------------------------|----------------------|
|  | Si                                  | GaAs                 |
| Surface de la cellule                                  | S= 1 cm <sup>2</sup>                | S= 1 cm <sup>2</sup> |
| Épaisseur de texture                                   | W= 3 μm                             | W= 3 μm              |
| Angle de texture                                       | 54 degré                            | 54 degré             |
| Réflectance de texture                                 | 5%                                  | 5%                   |
| Indice de réfraction                                   | 3.58                                | 3.66                 |
| Énergie de bande                                       | 1.124 eV                            | 1.424 eV             |
| <b>Région 1</b>  |                                     |                      |
| Épaisseur de l'émetteur (N <sup>+</sup> ) « Région 1 » | W=1 μm                              |                      |
| Dopage de l'émetteur (N <sup>+</sup> )                 | 10 <sup>17</sup> cm <sup>-3</sup>   |                      |
| Taux de recombinaison                                  | Taux (n)= Taux (p) = 7.208 μs       |                      |
| Densité intrinsèque                                    | 1*10 <sup>10</sup> cm <sup>-3</sup> |                      |
| <b>Région 2</b>  |                                     |                      |
| Épaisseur de la base (P) « Région 2 »                  | W= 5 μm                             |                      |
| Dopage de la base (P)                                  | 10 <sup>16</sup> cm <sup>-3</sup>   |                      |
| Taux de recombinaison                                  | Taux (n)= Taux (p) = 7.208 μs       |                      |
| Densité intrinsèque                                    | 1*10 <sup>10</sup> cm <sup>-3</sup> |                      |
| <b>Région 3</b>  |                                     |                      |
| Épaisseur de collecteur (P <sup>+</sup> ) « Région 3 » | W= 1 μm                             |                      |
| Dopage de collecteur (P <sup>+</sup> )                 | 10 <sup>15</sup> cm <sup>-3</sup>   |                      |
| Taux de recombinaison                                  | Taux (n)= Taux (p) = 7.208 μs       |                      |
| Concentration intrinsèque                              | 1*10 <sup>10</sup> cm <sup>-3</sup> |                      |

**Tableau III-1 : Paramètres de la cellule étudiée**

Les paramètres d'excitation utilisés sont illustrés dans le tableau suivant :

| Paramètres        | Valeur                |
|-------------------|-----------------------|
| Mode d'excitation | Transitoire           |
| Température       | 25 °C                 |
| Puissance optique | 0.1 W/cm <sup>2</sup> |
| Spectre solaire   | Aml5g.spc             |

**Tableau III-2 : Paramètres d'excitation**

### III.3- Résultats de la simulation

#### III.3.1. Caractéristiques I-V

Les figures (III-2) et (III-3) représentent respectivement la caractéristique courante tension des cellules étudiées, la première pour la cellule à base de Silicium **Si** et la deuxième pour la cellule à base de l'arséniure de gallium **GaAs**. Les résultats sont obtenus par le logiciel PC1D et tracés à l'aide du logiciel Origine version 6.1, on rappelle que les paramètres de l'excitation ont les mêmes pour les deux cellules.

#### III.3.2. Puissance des cellules étudiée

Sur les figures (III-4) et (III-5) nous avons présenté la variation de la puissance des cellules simulées en fonction de la tension appliquée, ou nous observons que l'allure de cette puissance est correspondue à celui de la théorie, elle atteint sa valeur maximale à  $V = V_m$  et s'annule pour  $V = 0$  et  $V = V_{co}$  ( $I = 0$ ).

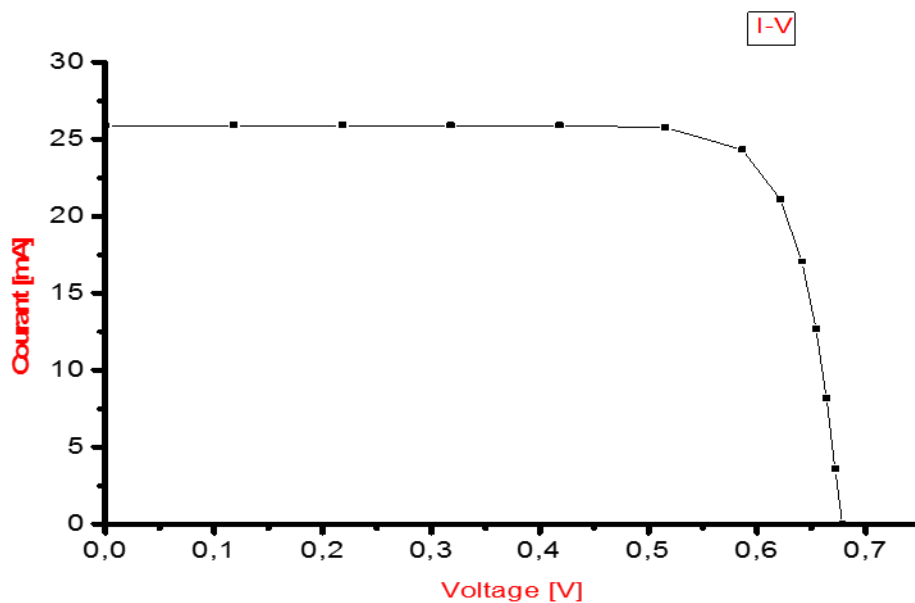


Figure III-2 : Caractéristique I-V de la cellule simulée à base de Si

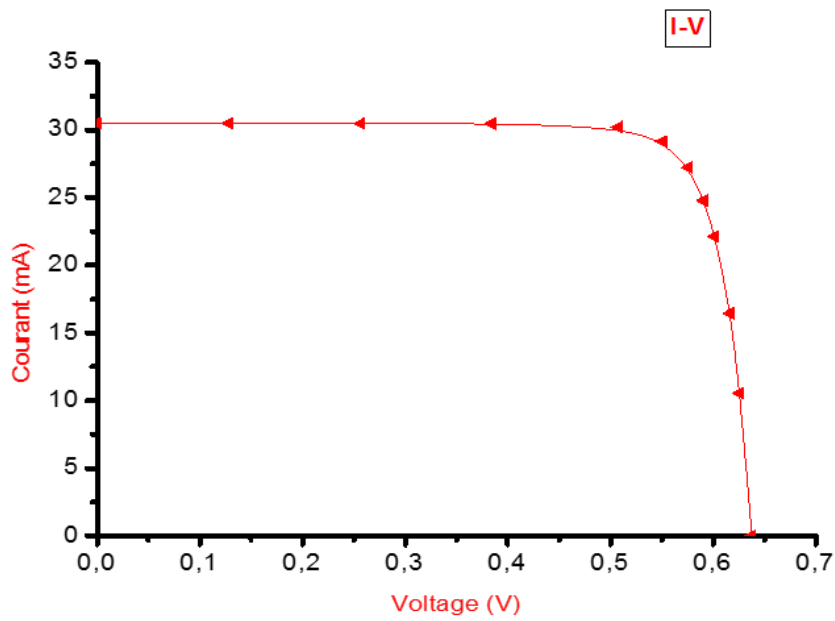


Figure III-3 : Caractéristique I-V de la cellule simulée à base de GaAs

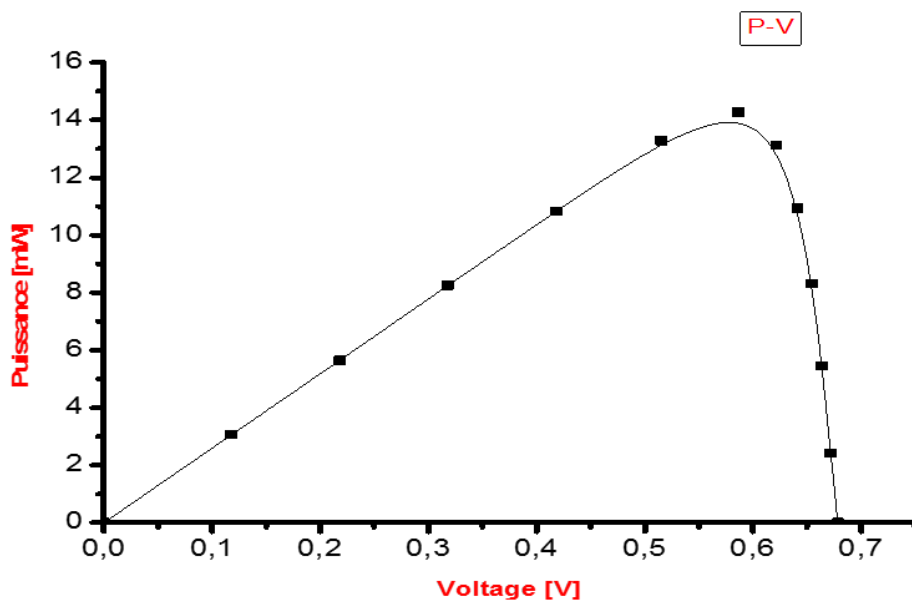


Figure III-4 : puissance de la cellule à base de Si.

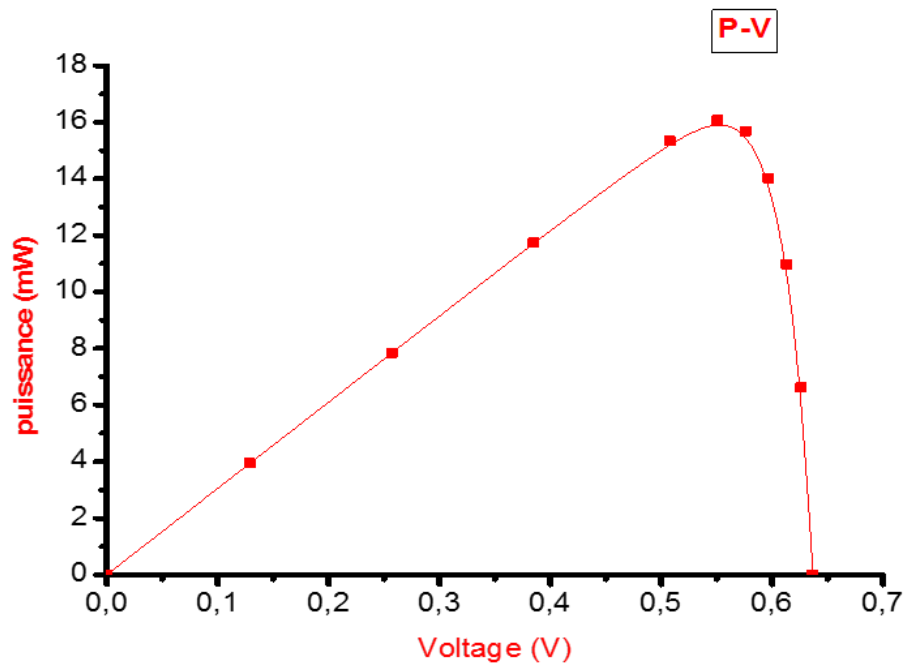


Figure III-5 : puissance de la cellule à base de GaAs.

Le tableau III-3 résume les caractéristiques essentielles des cellules simulées, ou nous avons vu que le courant produit par la cellule à base de **GaAs** ( $I = 30,5$  mA) est un peu important que celui produit par la cellule à base de **Si** ( $I = 26,25$  mA), ainsi que la puissance maximale, mais pour la tension du circuit ouvert de la cellule **GaAs** est moins que celle produite par la cellule **Si**.

| Cellule à base de | $I_{cc}$ (mA) | $V_{co}$ (V) | $P_{max}$ (mW) |
|-------------------|---------------|--------------|----------------|
| <b>GaAs</b>       | 30.5          | 0.6386       | 16.1           |
| <b>Si</b>         | 26.25         | 0.675        | 14.2           |

Tableau III-3 : Résumé des résultats obtenus.

### III.4. Influence des différents paramètres physiques et technologiques sur les caractéristiques I-V des cellules simulées

Pour présenter l'effet de quelques paramètres physique et technologiques (température, épaisseur, dopage, ...) sur le rendement des cellules solaire (la puissance maximale produite) à base GaAs et de Si. Nous avons présenté dans les paragraphes suivants la variation des caractéristiques I-V avec le paramètre étudié, l'étude a été faite pour les deux types de cellules simulées.

#### III.4.1. Effet de la température

Sur les figures III-6 et III-7, nous avons présenté l'effet de la température sur les caractéristiques I-V des cellules étudiées précédemment, ou nous avons vu que cet effet est n'est pas négligeable, par contre il est très important pour le silicium que celui du GaAs. On remarque aussi sur ces figures, que la tension du circuit-ouvert  $V_{co}$  est augmenté avec la diminution de la température, alors que le courant de court-circuit  $I_{cc}$  est reste invariable pour les deux cellules. On explique la diminution de la tension du circuit ouvert comme l'augmentation de la température entraine une augmentation de la concentration intrinsèque et ce dernier entraine une diminution de la tension de diffusion, mais le courant du court-circuit est dû à l'absorption du matériau et donc n'est pas affecté de la température.

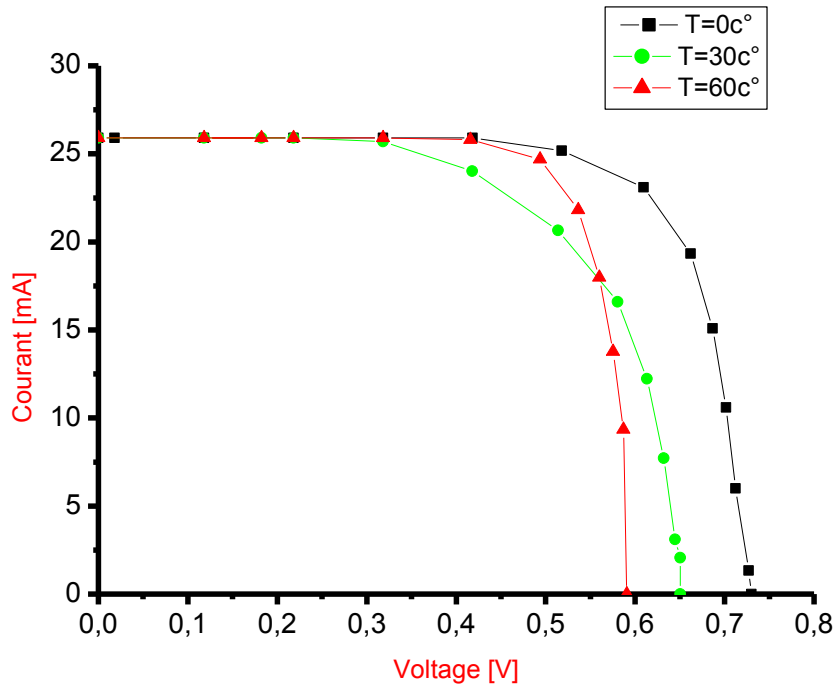


Figure III-6 : Effet de la température sur la caractéristique I(V) de la cellule Si.

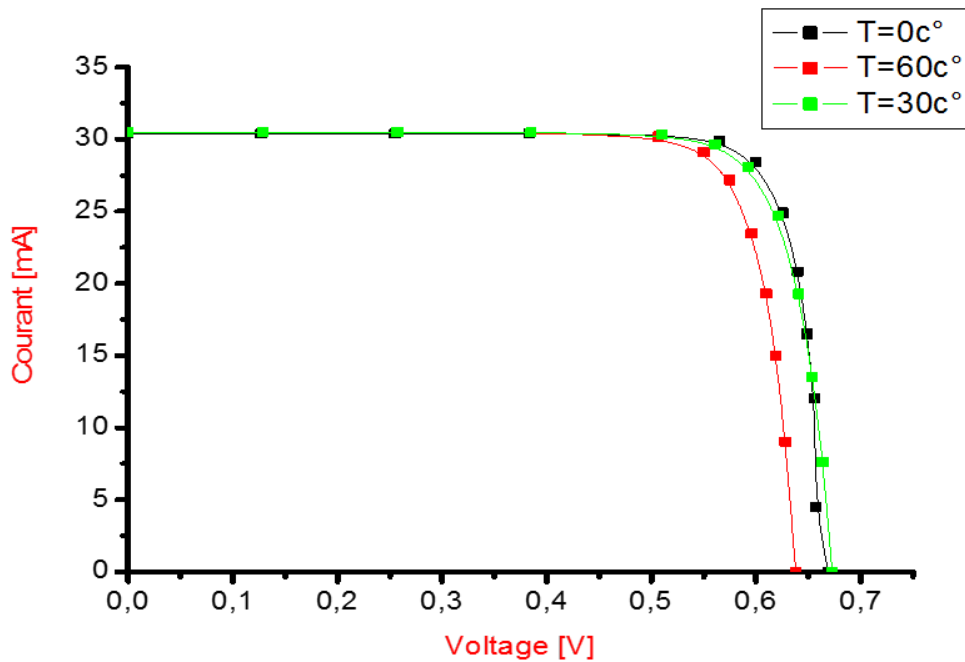


Figure III-7 : Effet de la température sur la caractéristique I(V) de la cellule GaAs.

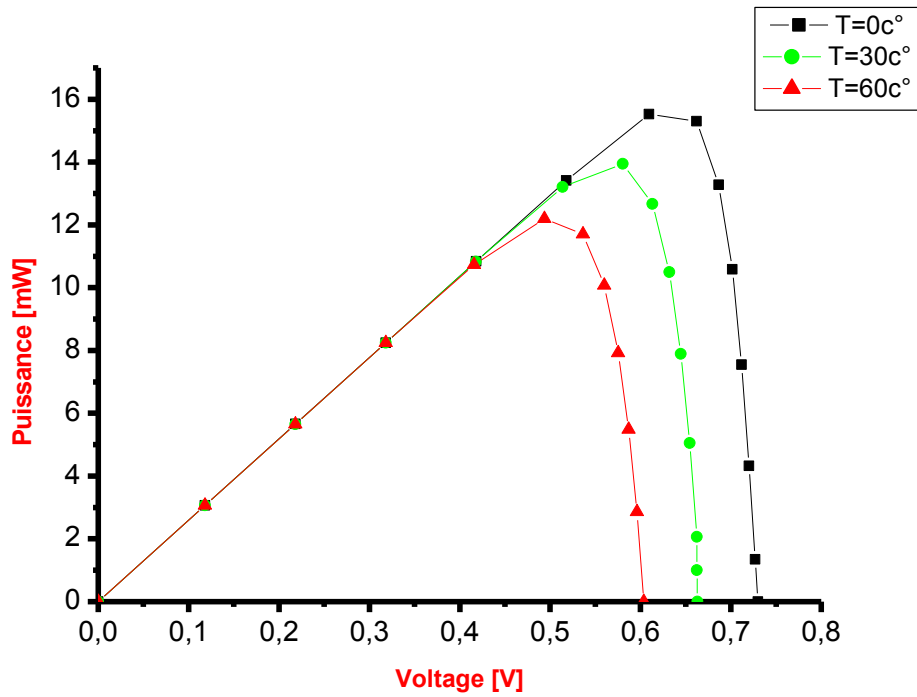


Figure III-8 : Effet de la température sur la caractéristique P(V) de la cellule Si.

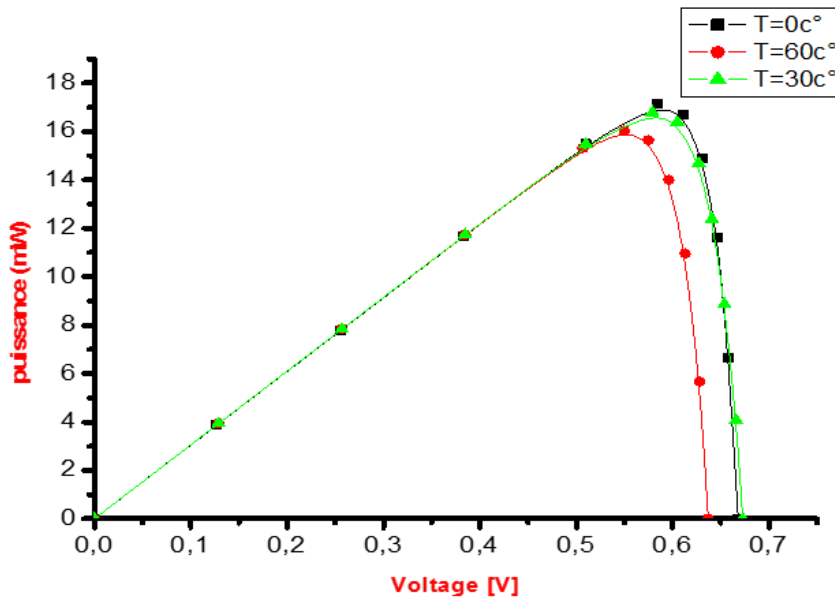


Figure III-9 : Effet de la température sur la caractéristique P(V) de la cellule GaAs.

### III.4.2 Influence de l'épaisseur d'émetteur

Les figures suivantes présente l'influence de l'épaisseur de la couche émetteur (la couche N) toujours sur les caractéristiques I-V des cellules, où nous avons vu que l'épaisseur de l'émetteur présente une influence positif sur le rendement des cellules, c'est à dire lorsque  $e$  augmente le courant augmente aussi, même effet pour la puissance maximale, et ça pour les deux cellules.

### III.4.3 Influence d'épaisseur de la base

Cette fois, nous avons également représenté sur les figures suivantes l'influence de l'épaisseur de la base (la couche P) sur les caractéristiques I-V des cellules étudiées, où nous avons vu que l'augmentation de l'épaisseur de la base présente une augmentation sur le courant de court-circuit mais une diminution de la tension de circuit ouvert.

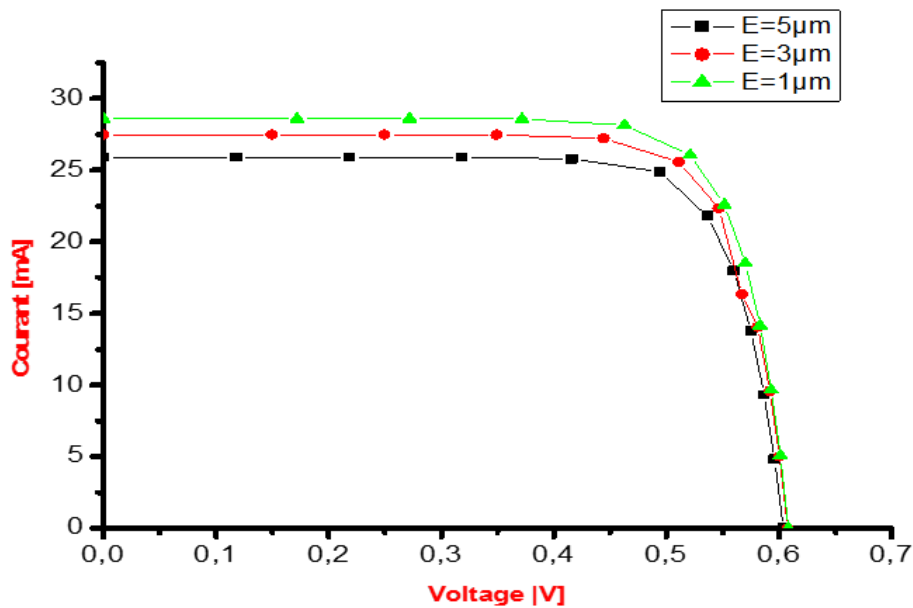


Figure III-10 : Influence de l'épaisseur d'émetteur sur la caractéristique I(V) de la cellule Si.

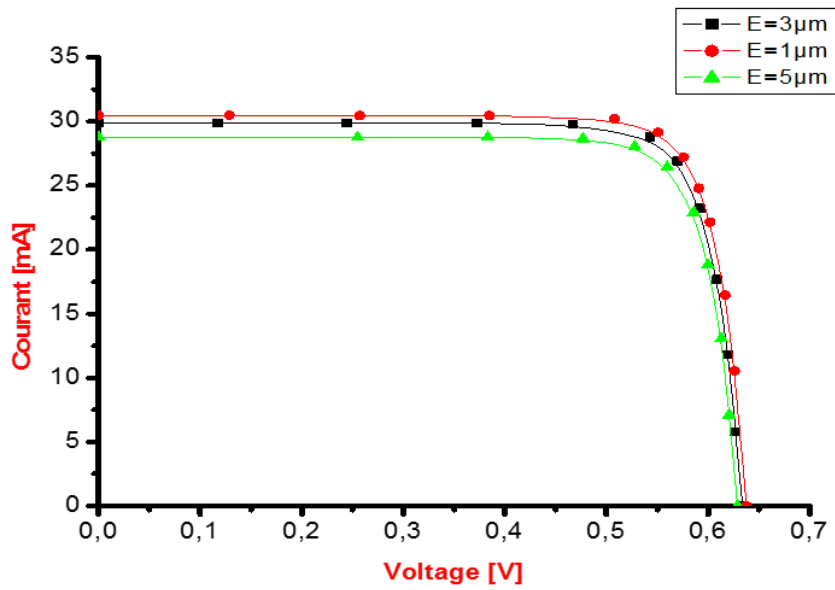


Figure III-11 : Influence d'épaisseur de l'émetteur sur la caractéristique I(V) de la cellule GaAs.

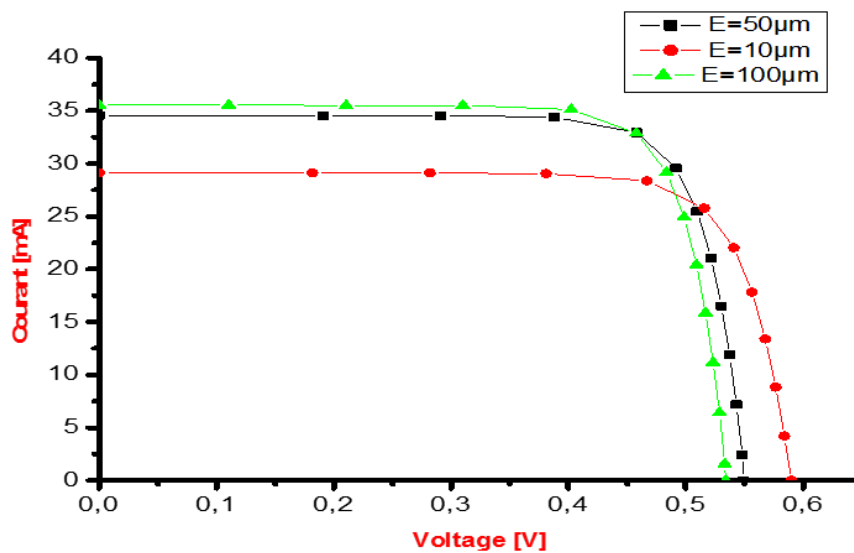


Figure III-12 : Influence d'épaisseur de l'émetteur de la base des cellules sur les caractéristique I(V) de la cellule Si.

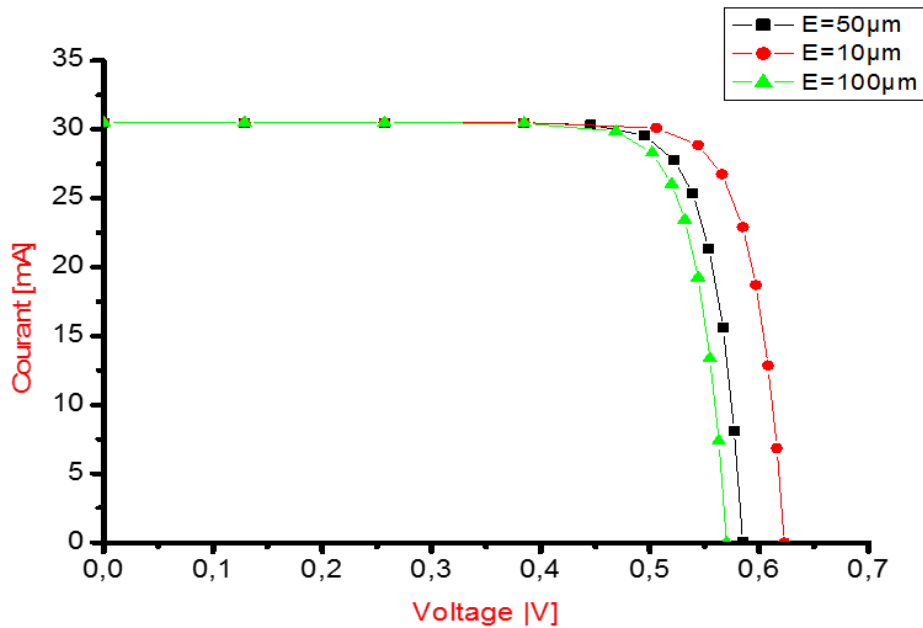


Figure III-13 : Influence d'épaisseur de l'émetteur de la base des cellules sur les caractéristique  $I(V)$  de la cellule GaAs.

#### III.4.4. Influence du Dopage

##### - Influence du dopage de l'émetteur

Les caractéristiques courant tension des cellules étudiées précédemment à la température 300 K avec différents dopages de l'émetteur sont représentées sur les figures 10-14 et 10-15. On nous avons vu qu'il n'y a pas de différence pour différents dopages pour Silicium. Par ailleurs on GaAs lorsqu'est fortement dopée on remarque qu'il y a une diminution du courant de circuit.

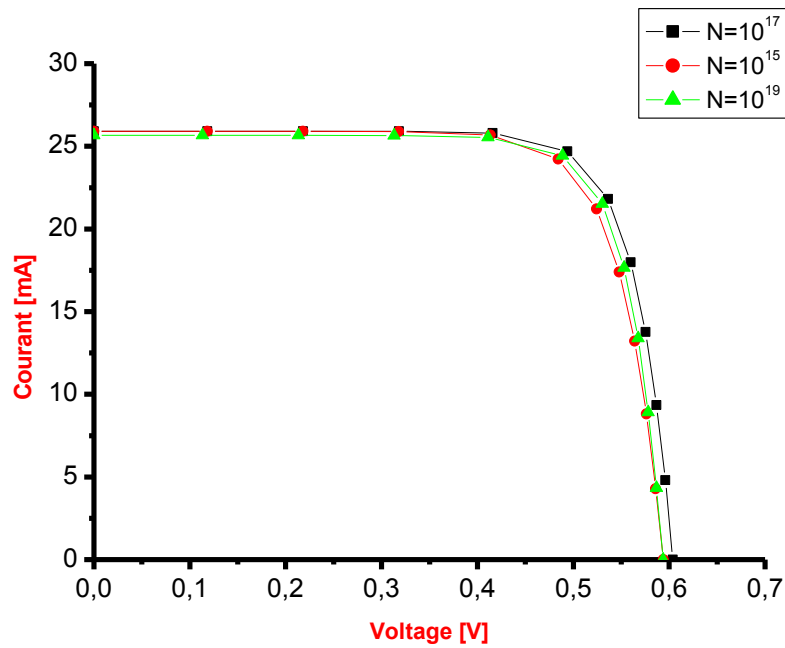


Figure III-14 : Influence de dopage de l'émetteur sur les caractéristique I(V) de la cellule à base de Si.

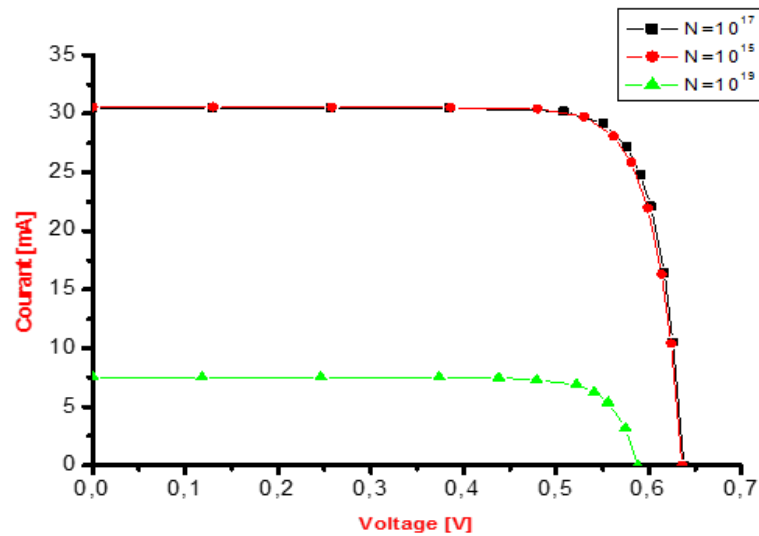


Figure III-15 : Influence de dopage de l'émetteur sur les caractéristique I(V) de la cellule à base de GaAs.

## **Conclusion**

Ce troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats de la simulation des caractéristiques I-V et P-V de deux types de cellules solaires la première à base de silicium et la deuxième à base d'arséniure de gallium GaAs ainsi que l'influence de quelques paramètres physique et technologiques sur la performance de ces cellules. Les résultats obtenus montrent l'importance de la simulation pour réaliser et fabriquer des composants optoélectroniques selon les besoins demandés.

## **Conclusion générale**

Dans ce mémoire, on a étudié les caractéristiques électriques de deux cellules solaires photovoltaïques à base de GaAs et de Si (silicium) par le simulateur PC1D. En raison des coûts élevés de l'expérimentation, les chercheurs se penchent de plus en plus vers l'outil de simulation numérique comme un moyen complémentaire essentiel dans la prédiction. L'analyse et l'interprétation des résultats. Le logiciel PC1D compte parmi les outils de simulation les plus simples dans l'étude des dispositifs électroniques et optoélectroniques.

Dans première chapitre nous avons rappelé sur quelques notions de l'énergie photovoltaïque et le rayonnement solaire. Ensuite nous avons présenté des notions générales sur les cellules photovoltaïques et leurs caractéristique I-V. alors que, le deuxième chapitre est réservé à la présentation du logiciel de simulation (PC1D) et un petit rappel sur quelques propriétés physique du GaAs et du Si.

Dans le troisième chapitre on a présenté les résultats de l'étude pour les deux cellules. Premièrement nous avons pris même propriétés technologiques pour les deux cellules dans les conditions normales telles que l'excitation et la température, puis nous avons représenté les résultats (caractéristique I-V et P-V) et leurs interprétations, deuxièmement on a étudié l'influence de certains paramètres physiques et technologiques sur la performance des deux cellules.

A partir du travail effectué dans ce mémoire et des résultats de la simulation obtenus dans le troisième chapitre, en peut dire que les cellules solaires à base du silicium et du GaAs restent toujours d'une importance major dans le domaine de photovoltaïque en particulier et les domaines des énergies renouvelables et de la production d'électricité en générale.

## Bibliographie (Référence)

- [1] S. M. SZE, Physics of Semi-conducteur Devices, John Wiley & Sons, 1981.
- [2] H. Mathieu, Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Masson, Paris, 1996.
- [3] A. Laugier et J.A. Roger, Les photopiles solaires, techniques et documentations, Paris (1981).
- [4] A. Labouret et M. Vilozz préface de Jean Louis Bal 'Energie solaire photovoltaïque', livre 4 édition, 2008.
- [5] B. Flèche - D. Delagnes 'Energie solaire photovoltaïque.doc', juin 2007, <http://www.scribd.com>.
- [6] R. Castagné et al., Circuits Intégrés en arséniure de Gallium., Physique, technologie et règles de conception. Masson et Cinet ENST Paris, (1989).
- [7] Bendjellouli Zakaria ( contribution à la modélisation d'une cellule solaire) Magistère Université de Bechar 2009
- [8] Salaheddine Bensalem (effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires ) magister, université Ferhat Abbas – setif, 2011.
- [9] H. Mathieu, Physique des Semi-conducteurs et des Composants Électroniques, 5ème édition (2004).
- [10] Benloucife Nisrine (Potentialités De Films De Silicium Polycristallin LPCVD Destines A L'étude D'une Cellule Solaire Multicouche ) Doctorat Université Des Freres Mentouri Constantine
- [11] Mechai Fazia (Etude Et Simulation Des Structures Photovoltaïques A Base De Chalcogenures De Métaux De Transition  $Mx_2$  ( $M = W, Mo; X = S, Se$ )) Magister Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou 2016
- [12] A. Mc. Evoy, T. Markvart and L. Castaner, (Particiale Handbook of photovoltaics Fundamentals and Applications, Second Edition ) Elsevier Ltd, 2012, ISBN: 978-0-12-3859334-1.
- [13] KEHOUL Nassim et KHENTACHE Kamal (Etude comparative des modèles d'une cellule photovoltaïque) Master Université Abderrahmane Mira Bejaia 2012
- [14] I. Sari-Ali, B. Benyoucef, B. Chikh-Bled, Etude de la jonction PN d'un semiconducteur à l'équilibre thermodynamique, Université Abou-Bakr Belkaïd, Tlemcen, Journal of Electron Devices, Vol. 5, 2007, pp. 122-126.
- [15] O. Harici et A. Othmane (Etude et évaluation des performances des concentrateurs et poursuit solaires) Mémoire d'ingénierie, Juin 2005.
- [16] K. Modélisation d'une cellule solaire avec étude expérimentale, Mémoire de fin d'étude (DES en physique), université de Tlemcen, 1998.
- [17] Korichi taki eddine (modélisation et commande d'un système photovoltaïque connecte au réseau électrique), mémoire de master, université Mohamed Boudiaf - m'sila, juin 2016.
- [18] Messaoudi Chahrazed ( méthode de détermination des paramètres d'une cellule solaire par excel : perspectives pour une cellule solaire bifaciale en silicium), master, université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2015.
- [19] Thomas Mambrini ( caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies ), thèse de doctorat, université Paris-Sud, école doctorale : STITS, 2014.
- [20] Ben Aicha Amina, Cherifi Souad, Frioua Chaima, (simulation numérique d'une cellule solaire tandem à couche mince) master université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued juin 2019.

- [21] Boukhers djamil (optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque applicatiou au pompage) ,magister , universite mentouri de constantine ,2007.
- [22] Daniel Lincot, „La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire,“, découverte n° 344 - 345 janvier - février (2007).
- [23] Loucas Tsakalakos, „Nanotechnology for photovoltaics,“, (Livre), Taylor and Francis Group, LLC, (2010).
- [24] Sadok Mohammed, « Détermination Des Paramètres, Performances Et Etude De La Dégradation Des Modules Photovoltaïques En Milieu Saharien », Thèse Doctorat, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen ,2011
- [25] Rapport de stage projet de fin d'études Ingénieur Technique Industrielle, Septembre 2006, Réalisation de Technique MPPT numérique, par Alain Bilbao Learreta, Université Virgile.
- [26] Contribution a l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie, université paul sabatier – toulouse III, decembre 2003.
- [27] L. ZAROUR ' Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau', Thèse Magister université de constantine, 2007
- [28] P. A. Basore et al., "PC-1D version 2 : Enhanced numerical solar cell modelling"., IEEE Photovoltaic Specialists Conf., (1988), 389.
- [29] Zohra Benmohamed, « Caractérisation Et Analyse Des Cellules Solaires A Base De Silicium Multi Cristallin », Thèse De Doctorat Université De Constantine, Derouiche abderrezek et Bouali Ammar «Des Cellules Solaires A Base De Silicium », Thèse De Master 2 physique des materiaux Université De Abbas Laghrour Khenchela,
- [30] Mekemeche abdelkader, « Modélisation a deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium a base de substrat de type n. étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes. », thèse de doctorat, l'université abdel hamid ibn badis de mostaganem ,2017
- [31] Boutarfa Ilham, « Simulation Des Cellules Solaires A Base De GaAs Et InP », Mémoire De Master, Université Abbas Laghrour Khenchela ,2014
- [32] A. WINTER, VERRES REFRACT., 36. (1982), 353. BREVET FRANÇAIS N° 1544060 (1967).
- [33] Khaled Amira, « Elaboration De Nouvelles Phases De Silicium En Couches Minces », These De Magister, Universite De Constantine, 2008
- [34] Zabardjade said-bacar « élaboration et caractérisations de silicium polycristallin par cristallisation en phase liquide du silicium amorphe »
- [35] S.M. SZE AND K. K. NG, PHYSICS OF SEMICONDUCTOR DEVICES, 3 ÉD, NEW JERSEY, WILEY, 2007.
- [36] Les Proprietes Des Semi-C Master Genie Microelectronique Ali Djafour
- [37] Onducteurs : Si-Ge-Sic-Gan-Gas Université De Mouloud Mammeri De Tizi Ouzou
- [38] préparation et propriétés optiques de couches minces d'arséniure de gallium et de tellure de cadmium par s. martinuzzi, m. perrot et j. fourny, institut d'énergie solaire, universite d'alger.

## Résumé

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches ont out conduit à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

Dans ce travail de simulation, nous utilisons le simulateur PC1D, pour étudier les performances des cellules solaires à base de GaAs et de Si. Pour obtenir un meilleur rendement énergétique. Par la suite nous intéressons à l'influence de la température, du dopage et de l'épaisseur des deux cellules (GaAs, Si) pour étudier l'influence de celles-ci sur le rendement électrique des cellules

## ملخص

يتغير الطلب العالمي على الطاقة بسرعة كما أن موارد الطاقة الطبيعية مثل اليورانيوم والغاز والنفط أخذة في التناقص بسبب الانتشار الواسع وتطور الصناعة في السنوات الأخيرة. لتلبية احتياجات الطاقة ، أدى البحث إلى الطاقة المتجددة. إحدى الطاقات المتجددة التي يمكن أن تلبى الطلب هي الطاقة الشمسية الكهروضوئية ، وهي نظيفة وهادئة ومتاحة ومجانية. وهذا يفسر سبب نمو استخدامه بشكل ملحوظ حول العالم

في هذه المحاكاة نستخدم برنامج PC1D لدراسة أداء الخلايا الشمسية القائمة على GaAs و Si. للحصول على مردود أفضل للطاقة . ونهتم بعد ذلك بدرجة الحرارة و شوائب و سمك الخليتين (GaAs, Si) لدراسة تأثير هذه الأخيرة على المردود الكهربائي للخلية الضوئية