

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*  
*Université Ibn Khaldoun – Tiaret*



*Faculté des Sciences de la Matière*  
*Département de Physique*

## **Mémoire**

*Présenté par :*

*Mr. HAID Slimane*

*Pour obtenir le diplôme de*

## **Master**

**Filière : Physique**

**Spécialité: Technologie et physique des couches minces nano structurées**

**Sujet :**

**Etude d'une cellule photovoltaïque à base de silicium (Si)  
et silicium germanium (Si/Ge)**

**Soutenu le : 01 juin 2015**

**Devant le jury:**

- |                          |            |              |                 |
|--------------------------|------------|--------------|-----------------|
| • M. O. HAMADOUCHE Nadir | MCB        | Président    | <i>u.Tiaret</i> |
| • M. LARABI Abdelkrim    | MAA        | Examineur    | <i>u.Tiaret</i> |
| • M. DEHBI Abdelkader    | Professeur | Encadreur    | <i>u.Tiaret</i> |
| • M. YESREF Djamel       | enseignant | Co-Encadreur | <i>u.Tiaret</i> |

## Remerciements

*Ce travail a été réalisé dans laboratoire de génie physique, département de physique, faculté des sciences de la matière, université ibn Khaldoun- Tiaret.*

Tous d'abord, Je remercie **ALLAH** le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail et la chance d'étudier et de suivre le chemin de la science et notre grand salut sur notre prophète **MOHAMMED** que le salut soit sur lui.

Je tiens à remercier mon directeur de mémoire, monsieur **DEHBI Abdelkader**, Professeur à l'Université Ibn Khaldoun-Tiaret- pour sa patience et ces précieux conseils et ses encouragements apportés dans mes démarches et pour m'avoir fait bénéficier de ces compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.

Il m'est agréable d'exprimer ma profonde reconnaissance à monsieur **YESREF Djamel** enseignant à l'Université Ibn Khaldoun-Tiaret, pour son aide et pour ses encouragements, de son expérience dans l'orientation et la direction de ce travail.

J'exprime mes sincères remerciements à monsieur **OULED HAMADOUCHE Nadir**, maître de conférence à l'Université Ibn Khaldoun- Tiaret, qui m'a fait l'honneur de présider le Jury de ce mémoire.

Je remercie sincèrement monsieur **LARABI Abdelkrim MAA** à l'Université Ibn Khaldoun- Tiaret, de m'avoir fait l'honneur d'être membre du jury de ce travail.

Mes sincères remerciements sont adressés à mes parents.

Enfin, j'adresse mes vives reconnaissances à tous les membres de laboratoire de génie physique. Aussi j'adresse mes reconnaissances à tous les enseignants de département de physique, sans oublier mes collègues avec qui je passe mon parcours d'étude dans la spécialité de technologie et physique des couches minces nanostructures.

## ملخص

استهلاك الطاقة ضروري من اجل التقدم الاجتماعي والاقتصادي، وهذا الاعتدال يتطلب ضرورة التمكن من الاستغلال الامثل لهذه الطاقة، معرفة كيفية توليد هذه الطاقة ومعرفة استغلالها بطريقة اقتصادية، ايضا يجب ان يكون هناك توازن بين انتاج الطاقة واستغلالها وبالتالي يجب ان يدخل الانسان في منطق الاقتصاد في الطاقة الكهربائية ورفع اسهم الطاقات المتجددة.

تحويل الطاقة الشمسية الى طاقة كهربائية هي تحويل الطاقة الكهرومغناطيسية (طاقة الفوتونات الضوئية) الى طاقة كهربائية (تيار مستمر) ، هذه الطاقة الكهرومغناطيسية هي الاشعة الضوئية.

في هذا العمل قمنا بمحاكاة خليتين شمسيتين باستعمال برنامج PC1D الاولى هي عبارة عن خلية مؤسدة من مادة السليسيوم وحيد البلورات اما الخلية الثانية فهي نفس الخلية الاولى فقط نظيف مادة الجرمانيوم تحت مادة السليسيوم وحيد البلورات بمعنى محاكاة خلية شمسية مؤسدة من مادتي السليسيوم وحيد البلورات و مادة الجرمانيوم (خلية متعددة البنيات) بهدف استنتاج تأثير مادة الجرمانيوم على مردودية الخلية الشمسية المؤسدة من مادة السليسيوم وحيد البلورات

**الكلمات المفتاحية** : محاكاة، خلية شمسية، المرودية، السليسيوم وحيد البلورات، الجرمانيوم، PC1D

## Résumé

La consommation d'énergie est nécessaire au développement social et économique. Ces médiocrités rappellent l'extrême importance de la maîtrise énergétique : savoir créer de l'énergie, savoir l'économiser aussi, il y a un compromis entre la production et la consommation et par suite il faut entrer dans une logique forte d'économies d'énergie et augmenter nettement la part des énergies renouvelables.

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique en énergie électrique continue. Cette énergie électromagnétique est le plus souvent le rayonnement solaire.

Dans ce travail, nous avons simulé deux cellules solaires. La première est une cellule à base de silicium mono cristallin, la deuxième comme la premier mais en ajoute le germanium sous le silicium c'est -à-dire une cellule hétéro structure à base de silicium germanium, dans le but d'un voir le comportement d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin après l'ajout de germanium, autrement dit l'impact de germanium sur la cellule solaire à base de silicium.

**Mots clés** : simulation, cellules solaires, silicium monocristallin, germanium, rendement.PC1D.

# Tableau de matière

INTRODUCTION GENERAL .....	1
CHAPITRE I: GENERALITE SUR LES CELLULES PHOTOVOLTAIQUE .....	3
I.1-Introduction .....	3
I.2-Héstorique de photovoltaïque .....	3
I.3 - Structure des cellules photovoltaïques.....	4
<i>I.3.1- Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque.....</i>	<i>5</i>
<i>I.3.1.1- la couche principale .....</i>	<i>5</i>
<i>I.3.1.2- texturation de la couche.....</i>	<i>6</i>
<i>I.3.1.3 -Couche antireflet .....</i>	<i>7</i>
<i>I.3.1.4- Contacts face avant et arrière .....</i>	<i>8</i>
<i>I.3.1.5-Champ électrique arrière (BSF).....</i>	<i>8</i>
I.4- les différentes structures des cellules photovoltaïques .....	9
<i>I.4.1- Structure d'une cellule photovoltaïque à haut rendement (PERL).....</i>	<i>10</i>
<i>I.4.2- Les cellules multi-jonctions à haut rendement .....</i>	<i>11</i>
<i>I.4.3- la structure BSF .....</i>	<i>12</i>
<i>I.4.4- cellule tandem solaire.....</i>	<i>13</i>
<i>I.4.5- cellule solaire de type Schottky.....</i>	<i>14</i>
<i>I.4.6- cellule solaire de types structure MIS.....</i>	<i>15</i>
<i>I.4.7- les concentrateurs solaires .....</i>	<i>16</i>
I.5- la conversion photovoltaïque .....	17
<i>I.5.1- L'absorption de la lumière .....</i>	<i>18</i>
<i>I.5.2 - Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques – génération optique .....</i>	<i>20</i>
<i>I.5.3 conditions standards .....</i>	<i>22</i>
<i>I.5.4- La collecte des charges - Jonction p-n .....</i>	<i>24</i>
I.6- principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	25
<i>I.6.1- Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....</i>	<i>25</i>
<i>I.6.2- Caractéristiques électriques et les paramètres d'une cellule photovoltaïque .....</i>	<i>27</i>

CHAPITRE II : THEIORIE GENERAL DES SEMI-CODUCTEURS.....	30
II 1 Introduction .....	30
II.2- Structure des semi-conducteurs.....	32
II.3- Caractéristiques de la structure de bandes d'énergie .....	34
II.3.1- Les trous .....	34
II.3.2- Masse effective des électrons .....	35
<i>II.3.2 .a. Cas d'un semi-conducteur à gap direct</i> .....	36
<i>II.3.2 .b. Cas d'un semi-conducteur à gap indirect</i> .....	37
II.3.3- Masse effective des trous .....	38
II.4 Semi-conducteurs intrinsèques .....	41
II.5- Semi-conducteur extrinsèque .....	43
II.5.1- Semi-conducteur de type n .....	43
II.5.2- Semi-conducteur de type p .....	44
II.5.3 Loi d'action de masse.....	45
II.6. COURANTS DANS LE SEMICONDUCTEUR .....	46
II.7. GENERATION ET RECOMBINAISON DES PORTEURS.....	47
II. 7.1.-Recombinaison en volume de type radiatif .....	48
II.7.2- Recombinaison en volume de type Auger.....	48
II.7.3- Recombinaison par piège .....	48
<i>II.7.3. a. Recombinaison en volume de type RSH</i> .....	49
<i>II.7.3.b. Recombinaison en surface</i> .....	50

CHAPITRE III : LES PROPRIETES DE SILICIUM, GERMANIUM ET LOGICIEL DE SIMULATION PC1D .....	51
III.1 INTRODUCTION.....	51
III.2- la structure cristalline .....	52
III.3- propriétés physiques du silicium et germanium (Si et Ge) .....	54
<i>III.3.1- Hauteur de la bande interdite</i> .....	54
<i>III.3.2 La conductivité</i> .....	55
<i>III.3.3-notation de masse effective</i> .....	56
<i>III.3.4- Tableau des propriétés physiques du Si et Ge</i> .....	57
III.4- Les étapes pour obtenir un silicium de qualité électronique .....	57
<i>III.4.1. Réduction de la silice</i> .....	57
<i>III.4.2- Purification du silicium</i> .....	57
<i>III.4.3- Procédure de Czochralski</i> .....	58
<i>III.4.4-La fusion de zone</i> .....	59
<i>III.4.5- Préparation des plaquettes</i> .....	60
III.6- LOGICIEL DE SIMULATION : PC1D.....	60
III.6 .1- Introduction.....	60
III.6.2- Le simulateur PC1D.....	61
III.6.3 L'environnement de PC1D.....	62
III.6.4 -Les paramètres du dispositif (Device).....	63
III.6.5- Les paramètres des régions.....	63
III.6.6- Les paramètres d'excitation.....	64
III.6.7- Les résultats.....	64

CHAPITRE IV: SIMULATION DE LA SELLULE SOLAIRE A BASE DE SILICIUM(Si) ET DE SILICIUM GERMANIUM. (Si/Ge) .....	65
IV.1.Introduction.....	65
IV.2. Simulation de la cellule photovoltaïque à base de silicium (Si).....	66
<i>IV.2.1. Structure simulée et paramètres</i> .....	66
IV.2.1.1. Structure simulée.....	66
IV.2.1.2. Paramètres de la structure simulée .....	67
<i>IV.2.2. Exploitation des résultats de la simulation</i> .....	68
IV.2.2.1.Influence de l'épaisseur de la cellule sur le rendement.....	69
IV.2.2.2.Influence du l'épaisseur de l'émetteur n+ sur le rendement.....	70
IV.2.2.3.Influence du dopage de l'émetteur n+ sur le rendement .....	71
IV.2.2.4.Influence du dopage de la base p sur le rendement .....	72
IV.2.2.5.Influence du taux de recombinaison (la durée de vie) sur le rendement .....	73
IV.2.2.6.Influenc de dopage de la BSF sur le rendement.....	74
IV.2.2.7.Influenc de l'épaisseur de la BSF sur le rendement .....	75
IV.2.3.8 Influence de la recombinaison en surface avant sur le rendement .....	76
IV.2.2.9. Caractérisation I-V .....	77
IV.3. Simulation d'une cellule solaire à base de silicium germanium .....	79
<i>IV.3.1 structure simulée et paramètres</i> .....	79
IV.3.1.1 paramètres de la cellule simulée.....	79
IV.3.1.2. structure simulée .....	80
<i>IV.3.2. Exploitation des résultats de la simulation</i> .....	81
IV.3.2.1.Influence de l'épaisseur de germanium sur le rendement, $I_{CC}$ , $V_{CO}$ .....	81
IV.3.2.2.Influence de dopage de germanium sur le rendement, $I_{CC}$ , $V_{CO}$ .....	83
IV.4 - Comparaison avec les autres recherches .....	85
IV.5 - Conclusion .....	86
CONCLUSION GENERALE .....	87

## INTRODUCTION GENERAL

Les sources d'énergie conventionnelles telles que le nucléaire ou les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) sont issues de stocks limités de matières extraites du sous-sol de la terre. Chacune d'elles provoque des dégâts à long terme plus ou moins importants sur l'environnement: pollution atmosphérique, changement climatique, contamination radioactive.... A l'opposé, les sources d'énergie renouvelables ont recours à des flux naturels qui traversent de façon plus ou moins permanente la Biosphère. Comme elles n'utilisent qu'une infime partie de ces flux, elles sont inoffensives pour l'environnement naturel aussi bien localement que globalement, et elles le seront éternellement. Toutes les énergies renouvelables sont issues directement ou indirectement du soleil.

La surface du soleil se comporte comme un corps noir à la température d'environ 5800 °K. Ceci conduit à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de 0,5  $\mu$  m pour une puissance d'environ 60 MW/m<sup>2</sup>, soit un total de  $9,5 \cdot 10^{25}$  W. En tenant compte de la surface apparente du soleil et de la distance entre celui-ci et la terre, cela conduit à un éclairage moyen dans l'année de 1,36 kW/m<sup>2</sup> hors atmosphère.

Cette irradiation est pondérée par divers facteurs à la surface de la terre : absorption par les molécules des différentes couches de l'atmosphère, conditions climatiques, latitude du lieu d'observation et saison, et donc le spectre solaire à la surface de la terre concerne le domaine du visible et du proche infrarouge. [1] C'est-à-dire une énergie solaire qui touche la terre représente en tout environ 1 540 000 000 000 000 000 kWh/an (1 540 péta kWh/an). C'est 15 000 fois plus grand que la consommation d'électricité mondiale et cette énergie peut être utilisée essentiellement de trois façons. Il convient donc de faire la différence entre :

**Chaleur passive :** Il s'agit de la chaleur que nous recevons naturellement du soleil. Cet élément peut être pris en compte dans la conception des bâtiments afin de réduire les besoins en chauffage.

**Solaire thermique :** Technologie utilisant l'énergie du soleil pour fournir de l'eau chaude (ou du chauffage) aux maisons et aux piscines.

**Energie photovoltaïque (PV) :** Technologie utilisant l'énergie du soleil pour fournir l'électricité alimentant appareils électriques et éclairage. [2]

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière, Le matériau le plus connu et le plus utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïque (PV) est le silicium, soit monocristallin ou poly cristallin ou amorphe.

Ce travail est composé de quatre chapitres :

**Chapitre I :** Dans ce chapitre, nous présentons en premier lieu l'historique de photovoltaïque et les constituants de base d'une cellule photovoltaïque, Ensuite les différentes structures des cellules photovoltaïques. Puis nous présentons le phénomène de conversion photovoltaïque. On termine par la description du principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

**Chapitre II :** Dans ce chapitre nous donnons les notions fondamentales des semi-conducteurs, dans lequel nous présentons la structure des semi-conducteurs et structure de bande des deux principaux semi-conducteurs. Puis nous donnons le courant dans le semi-conducteur et les différents types de recombinaison en surface et en volume dans la cellule solaire.

**Chapitre III :** Dans ce chapitre, nous présentons en premier lieu la structure cristalline et les propriétés physiques du silicium et du germanium aussi les différents types de silicium et les étapes à suivre pour obtenir du silicium de qualité électronique, Ensuite nous présentons quelques Propriétés générales de l'alliage Si Ge. Enfin nous présentons le PC1D, qui peut être considéré comme l'un des simulateurs puissants qui ont joué un rôle indéniable dans la compréhension des dispositifs photovoltaïques, afin de mieux comprendre les phénomènes physiques internes existants dans une cellule solaire.

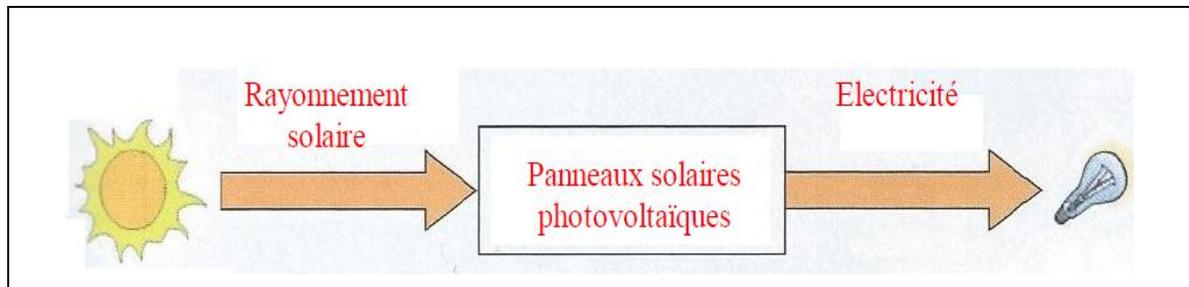
**Chapitre IV :** Dans ce chapitre, nous avons fait deux travaux, le premier est basé sur la simulation d'une cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin et dans le deuxième travail, seulement en ajoutant le germanium sous le silicium et en variant seulement l'épaisseur et la concentration de germanium ajouté.

Et **L'objectif principal** de notre sujet de travail est l'élaboration d'un modèle pour la simulation numérique et l'optimisation du fonctionnement des cellules photovoltaïques à base de silicium germanium pour diminuer le coût grâce à la consommation minimale de la matière première à partir de l'assemblage de deux matières comme le silicium et le germanium avec la conservation de la même efficacité pour la cellule à base de silicium monocristallin et aussi pour diminuer le coût avec l'augmentation de l'efficacité de conversion de la cellule.

# CHAPITRE I: GENERALITE SUR LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUE

## I.1-Introduction

Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière. Le suffixe « Volt » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Donc le mot Photovoltaïque (PV) signifie littéralement électricité lumineuse. Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau sans aucune pièce mobile de machinerie, sans bruit, sans pollution et sans combustible.



Le principe photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839 et a été expliqué par Albert Einstein en 1905. [3]

## I.2-Historique de photovoltaïque

- En 1839, Antoine-César Becquerel constate les effets électriques que produisent les rayons solaires dans une pile.
- En 1905, Einstein découvre que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique.
- L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante. Le domaine spatial a besoin d'une énergie sans combustible embarqué. La recherche s'intensifie sur le photovoltaïque.
- En 1954 est créée par les laboratoires BELL la première cellule photovoltaïque avec un rendement de 4%.
- Le spatial devient le banc d'essai de la technologie photovoltaïque. Les coûts de fabrication élevés des cellules et leurs rendements médiocres ne leur permettent pas encore une exploitation à grande échelle. Il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque. [4]

### I.3 - Structure des cellules photovoltaïques

La première structure de cellule solaire était très simple. Elle était incapable d'offrir des performances élevées et de délivrer une puissance satisfaisante aux charges. Elle avait aussi beaucoup d'inconvénients telle que des pertes importantes du charge soit par réflexion, soit par les contacts ohmiques ou par recombinaison. Cette structure a subi plusieurs modifications. La structure actuelle tend à optimiser les performances de la structure classique. Elle est constituée de plusieurs couches, l'élément de base de ces structures est la jonction P-N, elle joue le rôle principal dans le dispositif solaire. et elle est le siège de génération des porteurs et de leurs séparations. Pour que la pile solaire soit utile, et pour que l'électricité qu'elle produise passe convenablement dans la charge, la grille doit avoir une forme spéciale afin que la surface active de la cellule ne soit pas occultée. [5]

La structure simple d'une cellule solaire est représentée dans la figure I-1.

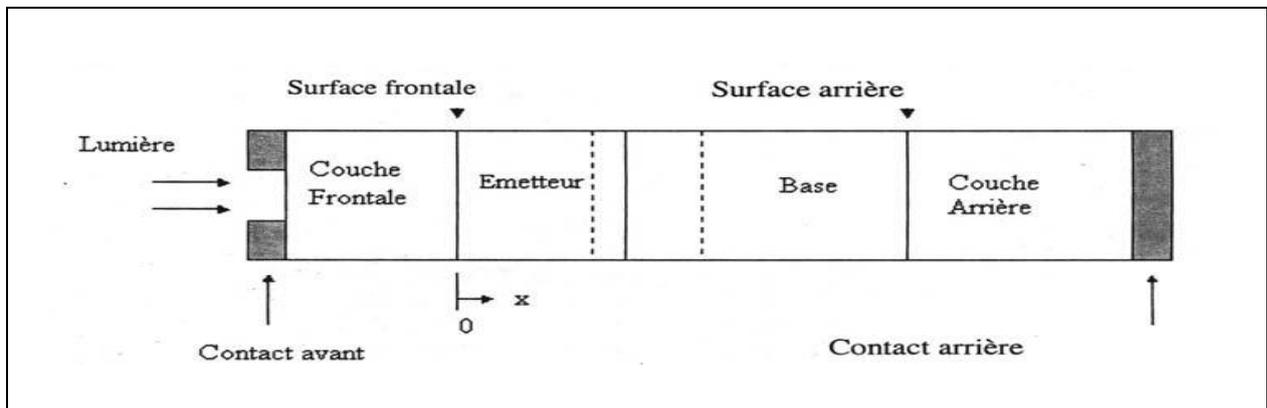


Figure I-1 : structure simple d'une cellule solaire.

### ***1.3.1- Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque***

#### ***1.3.1.1- la couche principale***

Les technologies utilisées par les fabricants sont différentes, mais les caractéristiques de base des composants d'une cellule sont communes. La structure de ces cellules se compose d'une jonction n-p peu profonde (environ  $0.3\mu\text{m}$  de la surface) pour une épaisseur moyenne d'environ  $250\mu\text{m}$ . La partie supérieure du semi-conducteur dopé  $n^+$  est appelée l'émetteur et la partie inférieure du semi-conducteur dopé p située à la zone de charge d'espace (ZCE) appelée une base.

Dans le but de diminuer la recombinaison des porteurs minoritaires sur la face avant, et d'augmenter la tension de circuit ouvert, les deux faces présentent une couche de dioxyde de silicium couche de passivation. La passivation consiste donc à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau.

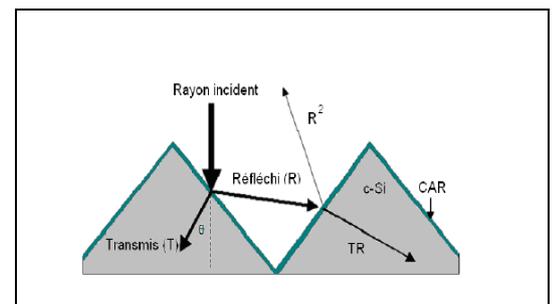
Notons que diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont le dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) et le nitrure de silicium hydrogéné ( $\text{SiN}_x:\text{H}$ ).[\[6\]](#)

### I.3.1.2- texturation de la couche

La texturation de la surface de la couche est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. La longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisées, les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique. [7]

La figure I-2 présente le principe de réflexions multiples propre à la texturation. Le relief de la surface entraîne une baisse de la réflexion en face avant : un rayon arrivant à incidence normale (par rapport au plan de la cellule) sur une pyramide sera réfléchi sur la face d'une pyramide adjacente, cette double réflexion sur les pyramides diminue le coefficient de réflexion totale. D'autre part, un rayon d'incidence normale sera transmis dans la cellule avec un angle de réfraction  $\theta$  différent de  $0^\circ$ . Le trajet de ce rayon au sein de la surface sera donc augmenté d'un facteur  $1/\sin\theta$  par rapport au cas d'une surface plane et perpendiculaire à l'éclairement, ce qui aura pour effet d'augmenter la part de photons absorbés par le matériau. Pour finir, la texturation de la surface entraîne un piégeage plus important de la lumière pénétrant dans la cellule. Sur la face arrière de la cellule, il existe un angle d'incidence critique  $\theta_c$  à partir duquel le rayon est totalement réfléchi et prolonge son trajet au sein du semi-conducteur, augmentant là aussi l'absorption des photons. En appliquant la loi de Descartes, on trouve que cet angle vaut  $17^\circ$  dans le cas du silicium dans l'air. Ce phénomène est particulièrement important dans le cas des cellules de faible épaisseur, et peut être renforcé par une texturation de la face arrière et/ou une couche antireflet sur cette même face Figure I-2. [7]

**Figure I.2:** Représentation schématique du principe des réflexions lumineuses sur une surface texturée



Il y a plusieurs procédés pour texturer la surface d'une couche :

- attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides).
- texturation mécanique (laminage à froid sous un peigne dentelé).
- texturation laser. [1]

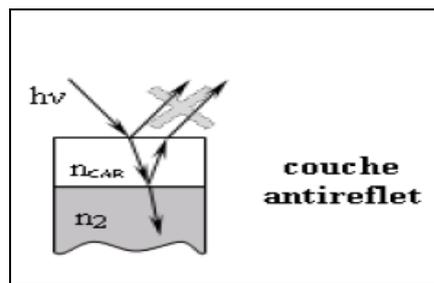
### I.3.1.3 -Couche antireflet

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une couche antireflet (CAR) est utilisée. Le principe des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces ( figure I-3). Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à :

$$d_{CAR} = \frac{(2.N+1).\lambda}{4.\eta_{CAR}} \quad N = 1, 2, 3 \dots \dots \dots \quad (I.1)$$

On obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et CAR/semi-conducteur. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux diélectriques différents).

On utilise différents matériaux pour les couches anti-reflètes tels que: l'oxyde de titane ( $TiO_2$ ), dioxyde de silicium ( $SiO_2$ ) ainsi que : le sulfure de zinc ( $ZnS$ ), ( $MgF_2$ ) et  $SiN_x$  [1]



**Figure I-3:** schéma de la couche antireflet

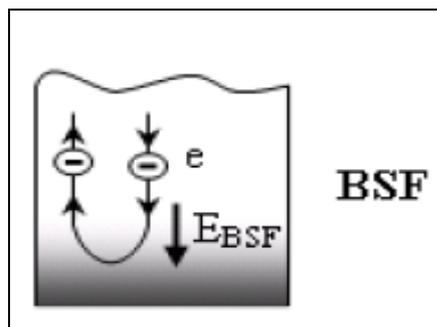
### *1.3.1.4- Contacts face avant et arrière*

Les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter les charges de porteurs photo générés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique  $I=f(V)$  du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement.

Différents procédés sont utilisés pour réaliser les contacts. Dans le cadre des cellules photovoltaïques industrielles en silicium multi-cristallin, les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, on utilise la technique de pulvérisation cathodique et l'évaporation pour déposer ces contacts métalliques. [1]

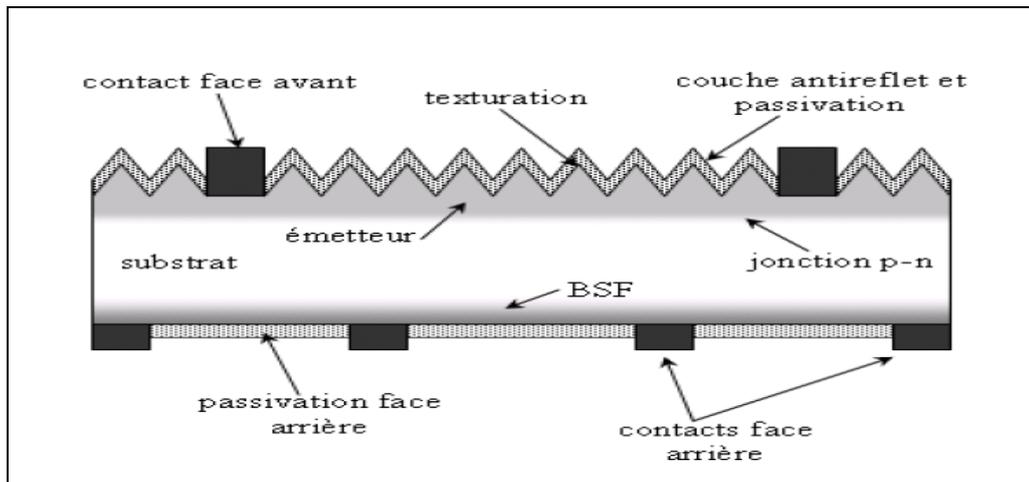
### *1.3.1.5-Champ électrique arrière (BSF)*

Le champ électrique arrière ou Back Surface Field (BSF) consiste à créer une barrière de potentiel sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base (figure I-4). Ceux-ci sont donc tenus à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée. Le BSF fait encore l'objet de nombreuses recherches car l'épaisseur des plaques est constamment réduite afin de réaliser une économie de matière première. [1].



**Figure I-4** : représentation schématique du Champ électrique arrière BSF

La structure globale d'une cellule photovoltaïque avec contacts sur les deux faces est présentée sur la figure I-5.



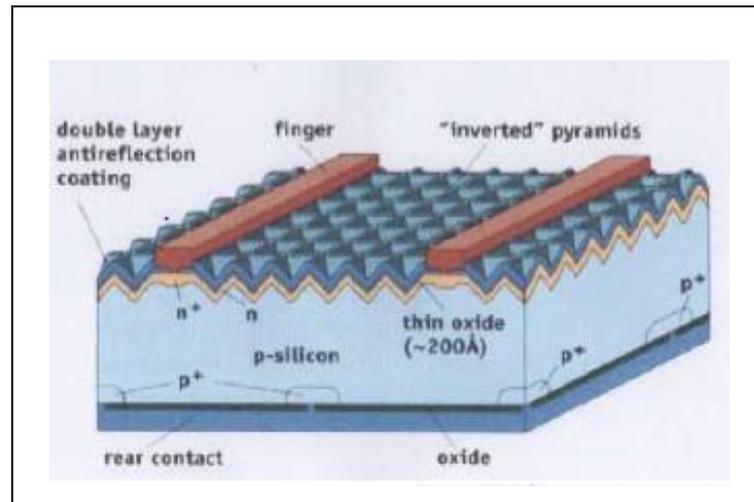
**Figure I-5 :** Représentation schématique d'une cellule photovoltaïque.

#### I.4- les différentes structures des cellules photovoltaïques

Les dispositifs photovoltaïques récents tendent à convertir convenablement le maximum de l'énergie lumineuse en électricité et réduire efficacement les pertes électriques et optiques, et optimiser les propriétés des surfaces. Les structures photovoltaïques liées aux exigences technologiques et industrielles, doivent se rapprocher d'une cellule idéale et minimiser les pertes dans les contacts ohmiques, de la réflexion et la recombinaison (amélioration de la qualité cristalline). Dans cette optique, la technologie photovoltaïque a vu plusieurs variantes au niveau des structures solaires ces dernières années grâce aux méthodes d'élaboration et aux techniques de dépôt et du traitement thermique. [8]

### *1.4.1- Structure d'une cellule photovoltaïque à haut rendement (PERL)*

La nouvelle structure PERL (Passivated Emitter with Rear, Locally diffused) a pour but de minimiser au maximum les pertes résistives afin d'optimiser les performances électriques des cellules solaires. Les pertes résistives de la structure PERL ont pu être réduites à 50%, ce qui a permis aux photopiles d'atteindre des performances de l'ordre de 24% pour le silicium, la figure (I-6) représenter un schéma descriptif de la cellule PERL. [5]



**Figure I-6** : schéma descriptif de la structure d'une cellule solaire à haut rendement (PERL) [9]

### 1.4.2- Les cellules multi-jonctions à haut rendement

Les cellules PV multi-jonctions sont à la base d'associations de plusieurs matériaux semi-conducteurs de la colonne III-V (GaAs, AlGaAs, InGaAs, etc), elles ont été mises au point depuis les années 60 présentant des rendements très élevés, supérieurs parfois à 40%. Elles ne sont pas connues du grand public à cause de leur coût de fabrication (fabrication sous ultra vide, croissance très lente, problème de casses et de défauts aux interfaces). Le développement des cellules à haut rendement a été motivé en priorité par les applications spatiales. [7]

Un dernier avantage à signaler pour ces cellules est leur robustesse vis-à-vis des radiations et des impacts. Au cours du temps, ces cellules ont démontré qu'il était possible d'avoir des générateurs d'énergie qui vieillissent très bien et qui peuvent produire de l'énergie même en ayant subi quelques détériorations. Le rendement des modules commercialisés contenant des cellules multi-jonction actuellement avoisine les 30% pour un spectre AM<sub>0</sub>.

Certaines recherches se concentrent sur l'amélioration des technologies de fabrication pour en baisser le coût et les adapter aux besoins terrestres. Ils se frottent principalement aux problèmes d'interfaces et de passage de petits volumes de fabrication à des grandes quantités.

Aujourd'hui, les véhicules de courses terrestres ou bateaux en utilisent pour assurer leur autonomie. Mais cela reste des cellules beaucoup trop chères pour des applications domestiques. [10]

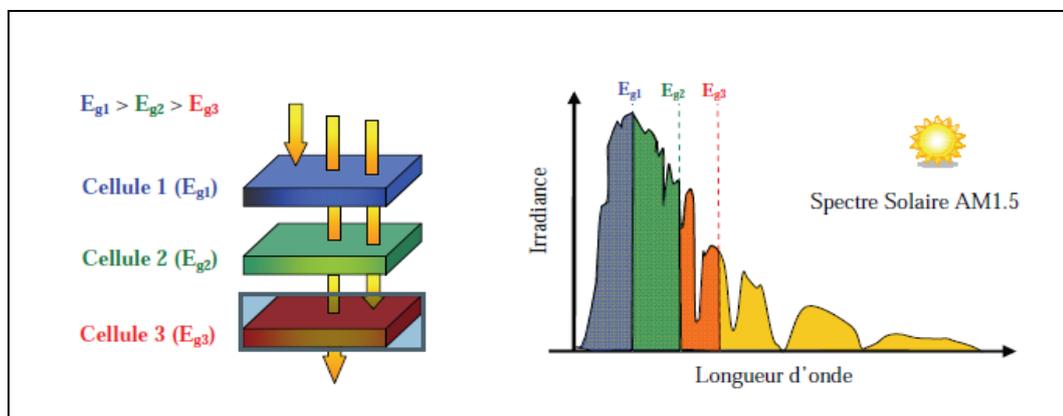


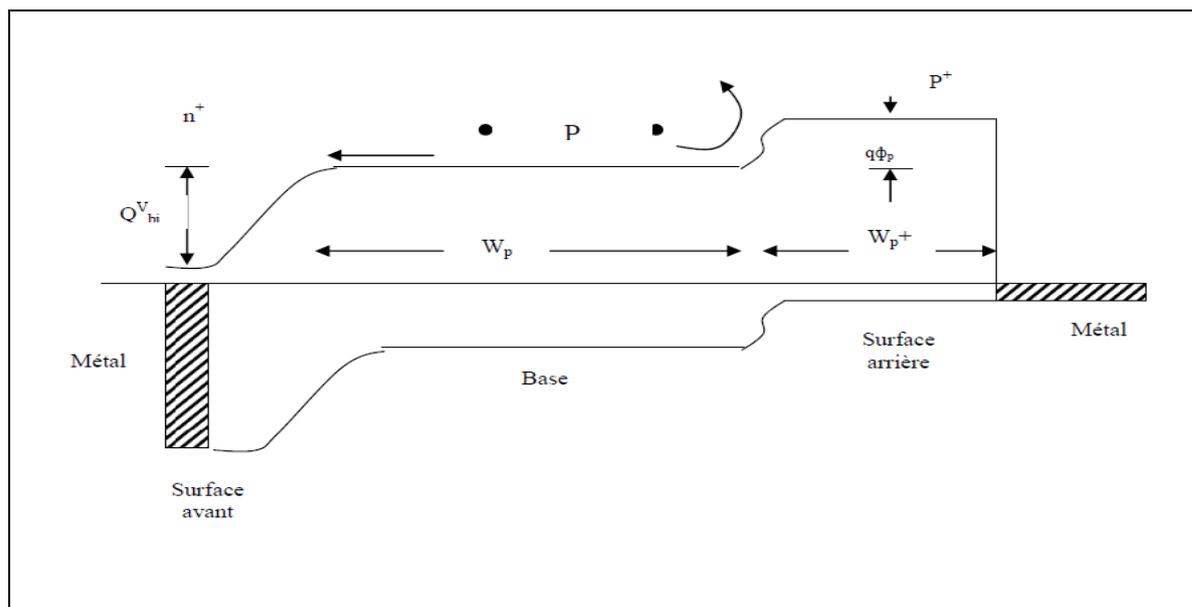
Figure I-7 : schéma descriptif de la cellule à hétérojonction [10]

### I.4.3- la structure BSF

L'interface joue un rôle très important dans la détermination des propriétés optoélectroniques des cellules solaires, parmi ces interfaces le contact face arrière, est un contact ohmique ayant une grande vitesse de recombinaison.

Afin de collecter les paires électron- trou créées par les radiations des grandes longueurs d'onde du spectre solaire, la configuration à champ arrière « BSF » « Back Surface Field ». (Figure I-8) a été proposée. Ce champ améliore les caractéristiques électriques de la cellule solaire, en particulier, la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  par réduction du courant d'obscurité  $I_{obs}$ . En effet, les porteurs devenus minoritaires après leurs injection dans la zone arrière diffèrent en s'éloignant de la zone de déplétion, le champ électrique arrière « BSF » les repousse vers la jonction.[11]

Dans une cellule solaire « BSF » par exemple au silicium, la longueur de diffusion et la durée de vie des porteurs minoritaires en excès dans les régions de base sont augmentées. [5]

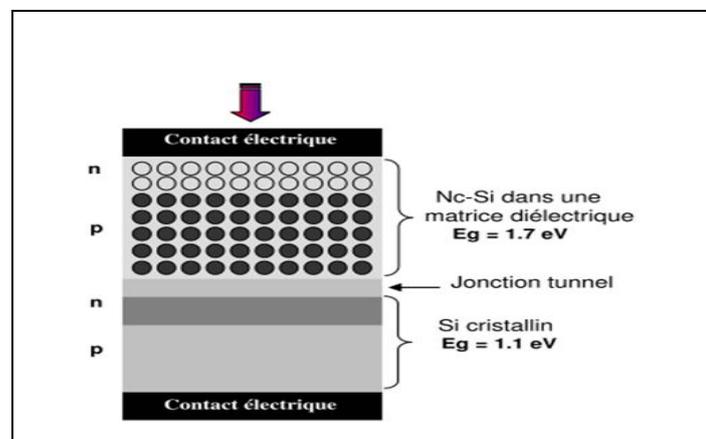


**Figure I-8** : Diagramme énergétique d'une cellule solaire à couche BSF

#### 1.4.4- cellule tandem solaire

Une cellule multi jonction (ou cellule tandem), composée d'une succession de matériaux semi-conducteurs de gap décroissant, permet de collecter efficacement le rayonnement incident avec une conversion photovoltaïque convergeant vers l'idéal pour un empilement infini. Une infinité de cellules opérant indépendamment conduirait en effet à un rendement de 86.8 %. Des cellules à double ou triple jonction (GaInP /GaAs/Ge) ont été développées pour les applications spatiales, avec des rendements approchant les 30 %. Cependant, pour les applications terrestres, ces matériaux sont à la fois trop chers et très peu abondants. [11]

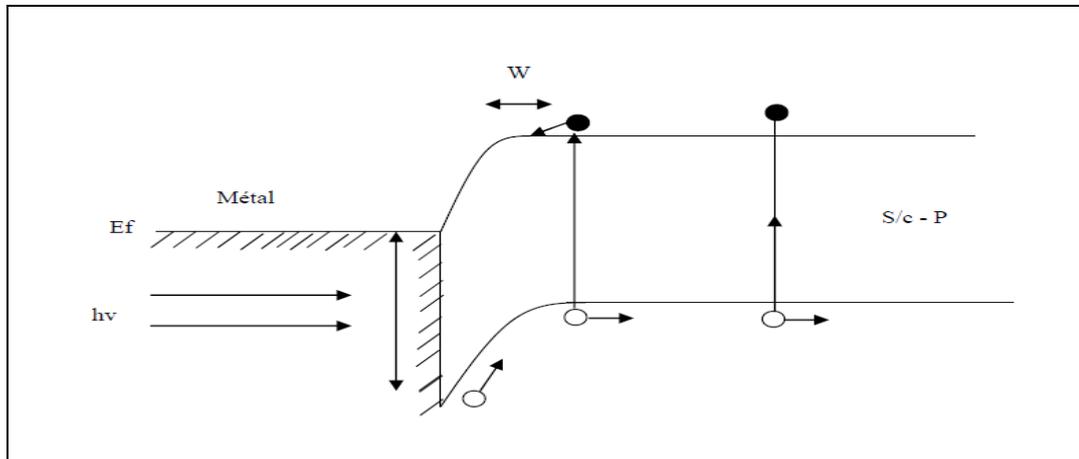
Récemment, **Conibeer et al.** ont proposé de réaliser des cellules tandem uniquement à base du silicium, matériau abondant, peu cher et non toxique susceptible de se diversifier pour se présenter sous la forme d'un matériau à largeur de bande interdite moyenne (1.1 eV) et assez grande (1.7 eV). En effet, les nanostructures de silicium de très petite dimension (inférieure à quelques nanomètres) présentent, du fait du confinement quantique, un gap supérieur à celui du silicium. Cette perspective a conduit au concept de cellule tandem "tout silicium" permettant une augmentation significative de la tension délivrée par rapport à la simple jonction (Figure.I.9). Le rendement maximal serait en effet de 42.5 % dans le cas d'une double jonction (1.7 eV/1.1 eV) et de 47.5 % pour une triple jonction (2 eV/1.5 eV /1.1 eV).



**Figure I. 9** : représentation schématique de la structure d'une cellule tandem "tout silicium" à deux jonctions [12]

### 1.4.5- cellule solaire de type Schottky

Le dépôt d'un métal convenablement choisi en couche mince sur le silicium conduit à des cellules de type Schottky. Le diagramme énergétique de ce type de cellules sous illumination est montré sur la figure I-10.



**Figure I-10 :** Diagramme énergétique d'une Cellule solaire de type Schottky

La couche métallique doit être très mince pour permettre à la lumière de passer au travers le semi-conducteur. Le photo-courant résultant a trois composantes. En effet, la lumière d'énergie «  $h\nu > \phi_B$  » peut être absorbée dans le métal et excite des trous au-dessus de la barrière dans le semi-conducteur. Les rayonnements de courtes longueurs d'onde sont absorbés dans la région de déplétion dans le semi-conducteur et ceux de longues longueurs d'onde sont absorbés dans la région neutre, créant des paires électron-trou comme dans la jonction « P-N ».

Les avantages de la jonction Schottky sont :

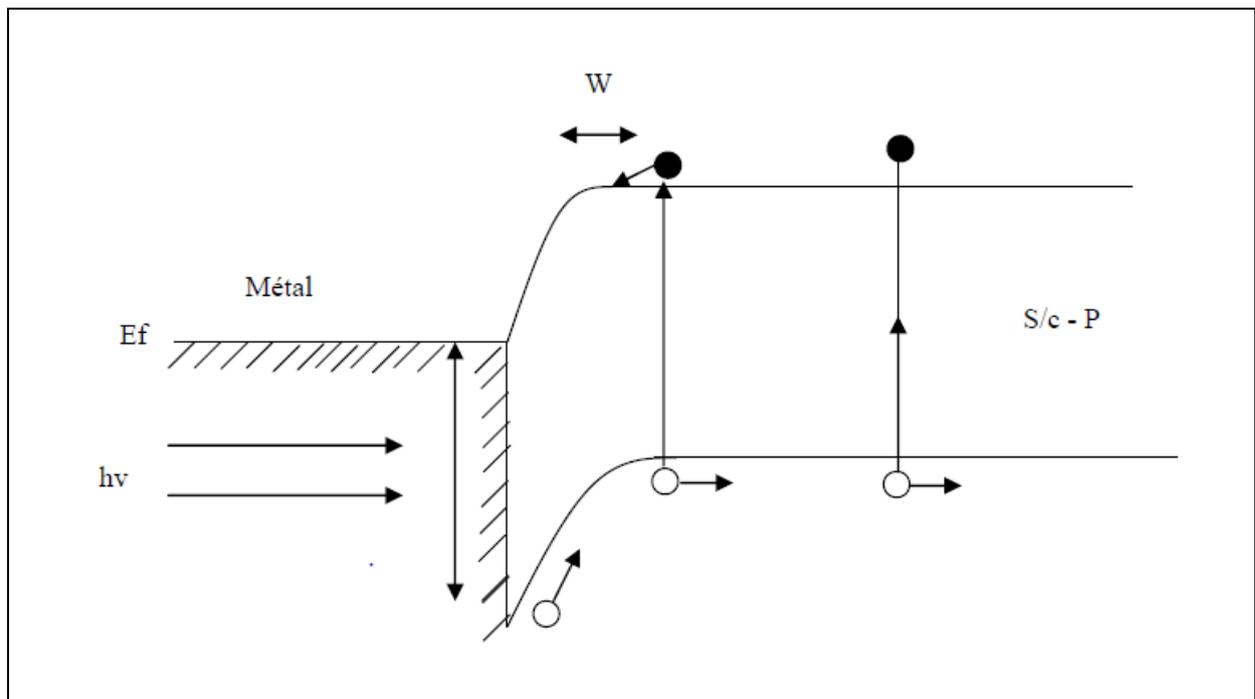
- 1- Traitement à basses températures (aucune diffusion à haute température n'est exigée).
- 2- Adaptation au silicium poly cristallin et aux piles solaires en couches minces.
- 3- résistance élevée aux radiations due au champ électrique élevé près de la surface.
- 4- Fort courant de charge et bonne réponse spectrale. [12]

### 1.4.6- cellule solaire de types structure MIS

Rappelons, tout d'abord, qu'il est plus judicieux de parler de structure CIS (Conducteur, Isolant, Semi-conducteur), car le conducteur peut être un métal, un oxyde conducteur, un semi-conducteur ou un électrolyte. Cependant, l'appellation MIS est la plus répandue dans la littérature. [6]

Dans ce type de cellule, un film isolant très mince 0,2 nm est formé entre le métal et le substrat semi-conducteur. L'isolant est obtenu soit par oxydation superficielle du silicium (thermiquement ou chimiquement par le  $(\text{NO}_3\text{H})$ , soit par dépôt de  $(\text{SiO}_2)$  en atmosphère contrôlée. Puisque l'oxyde peut être formé à basses températures et aucun procédé de diffusion n'est impliqué, on s'attend à ce que cette structure fabriquée sur des substrats poly cristallins ou amorphes fournisse une solution rentable pour des applications terrestres.

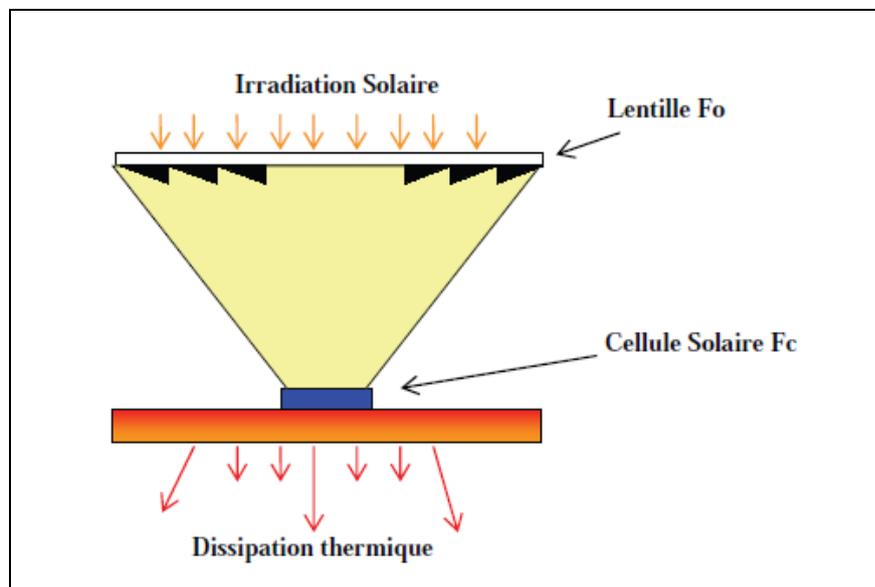
Un rendement de 18% est obtenu par cette structure dans la condition AM1. [12]



**Figure I-11** : Diagramme énergétique d'une Cellule solaire de type structure MIS.

### I.4.7- les concentrateurs solaires

En utilisant des concentrateurs solaires, certains pensent pouvoir baisser les prix (moins de surface de cellule utilisée) et prendre une place dans le marché conventionnel terrestre. Ainsi, si on compare le meilleur rendement sans concentrateur d'une triple jonction GaInP/GaAs/Ge atteignant les 32%, cette même cellule arriverait à 40.7% avec concentrateur. On peut même envisager des rendements encore plus importants avec des cellules complexes de 4 à 6 jonctions voire plus. L'idée basique du concentrateur photovoltaïque (CPV) est de réduire le prix de revient d'un système PV en focalisant les rayons lumineux sur une cellule solaire de surface  $F_c$  par le biais d'une lentille optique de surface  $F_o$ . Le ratio de concentration  $C$  est approximativement  $C=F_o/F_c$  comme indiqué en **Figure I-12**. [10]



**Figure I-12** Schéma de principe d'un concentrateur photovoltaïque

## I.5- la conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable.

Les trois grandes familles de matériaux sont les métaux, les isolants et les semi-conducteurs. Leur interaction avec un rayonnement est différente pour chacun. Quand un photon interagit avec un électron, il lui transfère intégralement son énergie cinétique.

Dans un métal, tous les niveaux au-dessus du niveau de Fermi sont libres mais l'électron excité revient directement dans son état initial en transformant l'énergie en chaleur. Il n'est pas possible de convertir l'énergie reçue autrement qu'en chaleur.

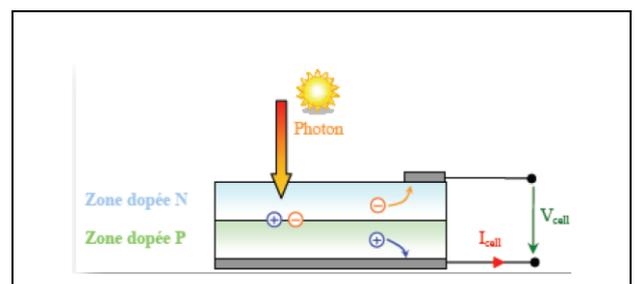
Dans un isolant, un photon interagit avec un électron seulement s'il peut lui donner une énergie supérieure au gap  $E_g$  du matériau, pour atteindre les premiers états libres situés au moins 5 eV plus haut (soit une longueur d'onde inférieure à 250 nm). Le rayonnement solaire ne peut donc pas être absorbé par un isolant. [13]

Dans un semi-conducteur, la bande interdite  $E_g$  étant de 0.5 à 2 eV, un photon d'énergie adéquate pourra promouvoir un électron de la bande de valence (BV) vers la bande de conduction (BC).

Elle met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés :

- L'absorption de la lumière dans le matériau et création des excitons (électron-trou).
- Dissociation des charges.
- La collecte des charges [14]

**Figure I.13** Schéma de principe de la conversion photoélectrique



### 1.5.1- L'absorption de la lumière

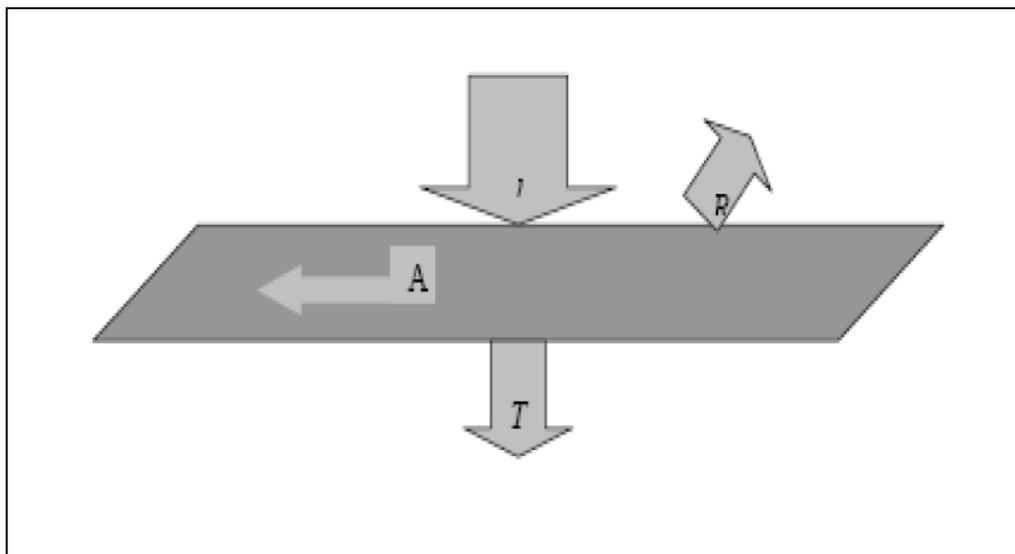
La lumière se compose de photons, (quantum d'énergie), chacun, porteur d'une énergie dépendante de sa longueur d'onde (ou couleur du rayon).

Ces photons peuvent pénétrer dans certaines matières, et même passer à travers les objets transparents pour notre œil et laissent passer la lumière visible.

Les théories ondulatoires (équations de Maxwell) ou corpusculaires de la lumière nous permettent d'aborder les échanges entre la matière et le rayonnement lumineux. Conformément à la théorie corpusculaire, les quanta d'énergie associés au rayonnement lumineux s'appellent photons.

Plus généralement, un rayon lumineux qui arrive sur un solide peut subir trois événements optiques :

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



**Figure I.14 :** Schéma des différents phénomènes optique.

Dans le cadre de la mécanique quantique, l'énergie du photon correspondant à une radiation donnée est reliée à sa longueur d'onde par la relation :

$$E_p = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} \quad (\text{I.2})$$

$\nu$ : Fréquence de la radiation.

$\lambda$ : Longueur d'onde de la radiation.

$C$  : Vitesse de la lumière.

$E_p$  : Énergie du photon en ev.

$h$  : Constante de Planck.

Quand un matériau absorbe de la lumière, l'énergie subit une loi exponentielle décroissante, car la part qui reste à absorber diminue au fur et à mesure que l'on pénètre dans la matière. Si  $E_{inc}$  est l'énergie incidente, l'énergie restante à la profondeur  $d$  s'écrit :

$$E = E_{inc} e^{-\alpha d} \quad (\text{I.3})$$

Donc l'énergie absorbée dans l'épaisseur  $d$  est égale à :

$$E_{abs} = E_{inc} - E_{inc} e^{-\alpha d} = E_{inc} (1 - e^{-\alpha d}) \quad (\text{I.4})$$

Le coefficient d'absorption  $\alpha$  dépend du matériau et de la longueur d'onde de l'énergie incidente : [11]

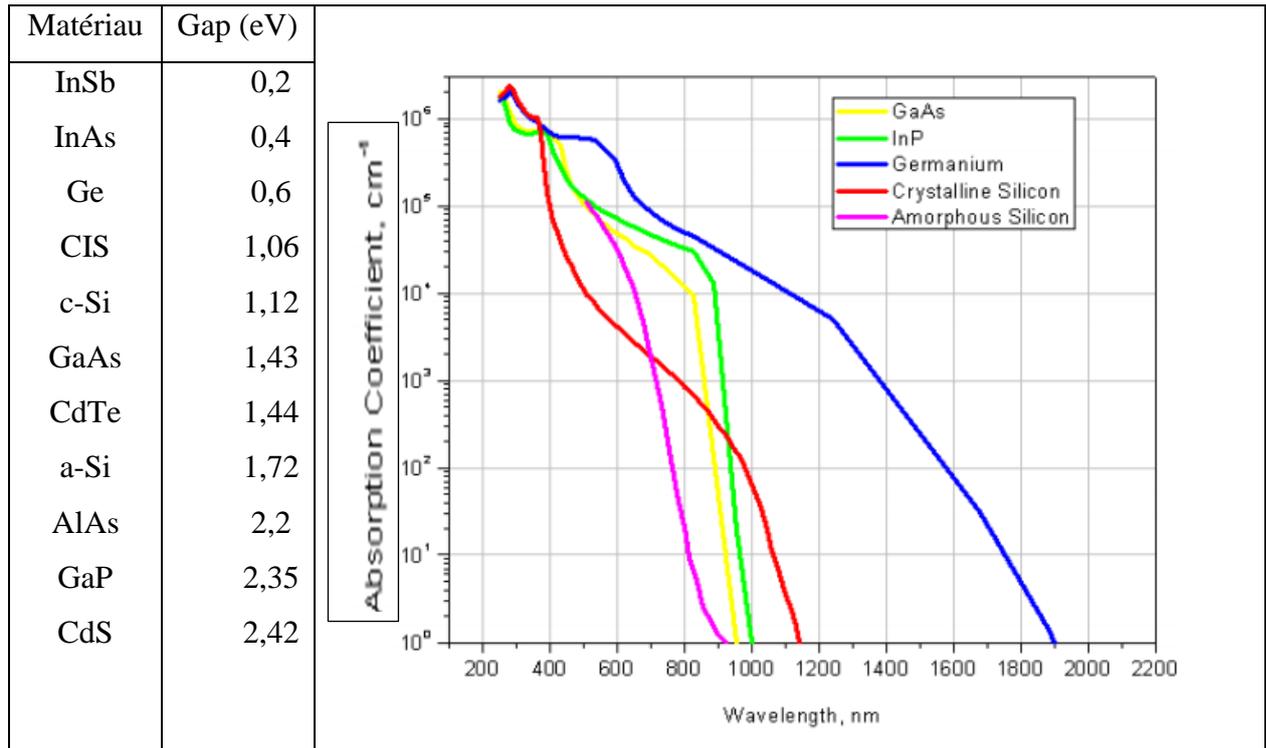
Matériau	coefficient d'absorption ( $\alpha$ ) ( $\text{cm}^{-1}$ )
Silicium cristallin	$4.6 \cdot 10^3$
Silicium amorphe	$2.5 \cdot 10^4$
germanium	$6.5 \cdot 10^5$

**Tableau 1.1** : Coefficient Absorption optique ( $\alpha$ ) de quelques matériaux semi-conducteurs

(À la longueur d'onde  $\lambda = 600 \text{ nm}$  )

Quand les photons incidents ont une énergie suffisante pour provoquer le transfert des électrons de la bande de valence sur la bande de conduction, des paires électrons-trous peuvent se créer. Ce phénomène est appelé le mode d'absorption intrinsèque. [13]

- Absorption du rayonnement par les matériaux semi-conducteurs [11]



**Figure I-15** : Absorption du rayonnement par les matériaux semi-conducteurs

### *1.5.2 - Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques – génération optique*

On va s'intéresser maintenant à la lumière absorbée dans le matériau photovoltaïque et expliquer comment son énergie est convertie en électricité. Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont des électrons, charges négatives élémentaires, contenus dans la matière semi-conductrice, tout solide en effet, est constitué d'atomes qui comprennent chacun un noyau (constitué de protons et de neutrons) est un ensemble d'électrons gravitant autour.

Les photons absorbés vont tout simplement transférer leurs énergies aux électrons périphériques (les plus éloignés du noyau), leur permettant ainsi de se libérer de l'attraction de leur noyau, ces électrons libérés sont susceptibles de produire un courant électrique si on les attire ensuite vers l'extérieur. [8]

En régime permanent, l'électron libre laisse un trou qui se traduit par une charge positive, si cet électron est attiré au dehors, c'est l'électron d'un atome voisin qui va venir combler ce trou, laissant un nouveau trou, lui-même comblé par un électron voisin et ainsi de suite, on génère ainsi une circulation de charges élémentaires, d'électrons dans un sens, et de trous dans l'autre sens, ce qui donne un courant électrique.

Si une intensité  $I_i(\lambda)$  incidente sur une surface de coefficient d'absorption  $\alpha(\lambda)$  et de coefficient de réflexion  $R(\lambda)$  est absorbée et devient à une profondeur  $x$  selon la loi de Bouguer-Lambert :

$$I(\lambda, x) = I_i(\lambda)(1 - R(\lambda))e^{-\alpha(\lambda)x} = I(\lambda, 0)e^{-\alpha(\lambda)x} \quad (\text{I. 5})$$

On encore, le flux incident de photons de longueur d'onde ( $\lambda$ ) devient à la profondeur  $x$  le flux  $\phi(\lambda, x)$  selon :

$$\phi(\lambda, x) = \phi_i(\lambda)(1 - R(\lambda))e^{-\alpha(\lambda)x} = \phi(\lambda, 0)e^{-\alpha(\lambda)x} \quad (\text{I. 6})$$

On : définit le taux d'absorption volumique des photons ( $\lambda, x$ ) (photons/cm<sup>-1</sup>/s) par :

$$A(\lambda, x) = \frac{\partial \phi(\lambda, x)}{\partial x} = \alpha(\lambda)\phi(\lambda, x) \quad (\text{I. 7})$$

Pour qu'il y ait génération optique des paires électrons-trous, il faut que les photons soient d'énergie  $\geq E_g$ .

De plus comme les principales radiations exploitables du spectre solaire sont situées dans le visible et le proche infrarouge entre 0.4 $\mu$ m et 1.6  $\mu$ m, on comprend facilement que les seules transitions possibles auront des énergies comprise entre 0.7ev et 3ev, ce qui conduit à privilégier les matériaux semi-conducteurs dont le gap se situe dans cette gamme d'énergie.

Un rapport entre le nombre de paires électrons-trous générées et le nombre de photons absorbés. [8]

C'est le rendement quantique  $\gamma(\lambda, x)$  soit en  $x$   $G(\lambda, x)$  le taux de génération volumique de paires pour une onde monochromatique, On a :

$$\frac{G(\lambda, x)}{A(\lambda, x)} = \gamma(\lambda, x) \quad (\text{I. 8})$$

Les photons absorbés pourront générer ainsi des paire électron-trou ( $e^- e^+$ ) provoquant l'effet photovoltaïque dans des conditions appropriées. La génération optique des paires ( $e^- e^+$ ) est le phénomène le plus important sur lequel repose le fonctionnement des photopiles, et le taux de génération volumique  $G(\lambda, x)$ , étant proportionnel à  $\alpha(\lambda)$ , ce dernier sera très important en conversion photovoltaïque. [8]

Dans un métal, les électrons peuvent absorber l'énergie des photons et passer à un niveau d'énergie supérieur, puis par thermalisation retourner très rapidement (après quelques picoseconde) à

l'état initial, on ne peut utiliser les métaux pour la conversion puisque l'énergie est perdue en énergie thermique lorsqu'elle est absorbée, sinon elle est réfléchi.

Dans un isolant, il ne peut y avoir de circulation de courant, il reste forcément comme déjà indiqué les semi-conducteurs dont le gap idéal se situe autour de 1.35 eV (la largeur de bande interdite dans les semi-conducteurs est  $0.6 \text{ eV} < E_g < 2 \text{ eV}$  de plus la durée de vie des porteurs ainsi générés est bien supérieur à celle des électrons dans un métal.

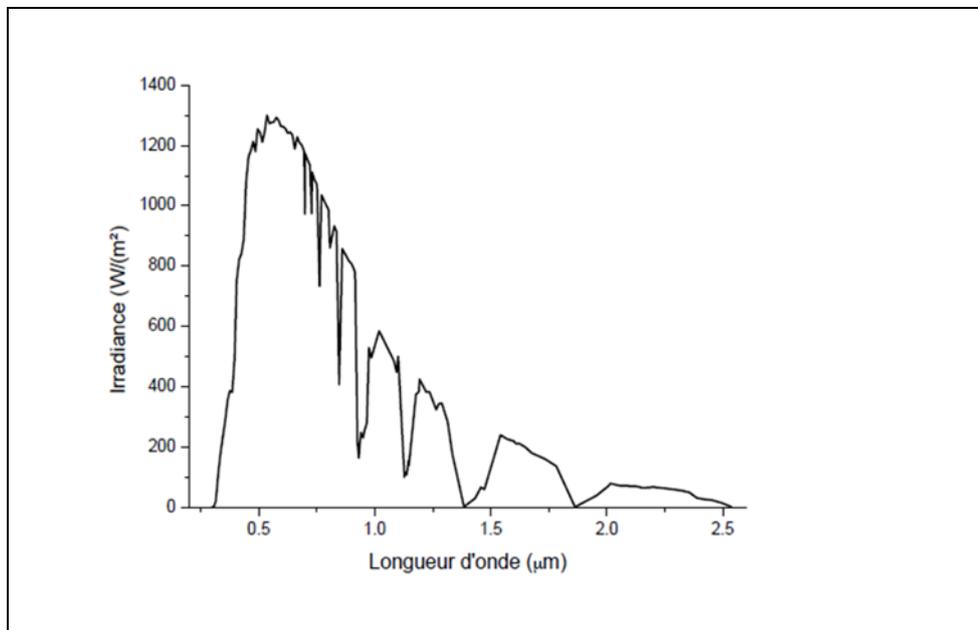
Ceci laisse beaucoup plus de temps pour séparer les électrons des trous, combattre les recombinaisons électrons-trous et générer un courant électrique, tout ceci sous l'influence d'un champ électrique. Ce champ sera disponible grâce à une jonction p-n ou une hétérojonction métal. [13].

### ***1.5.3 conditions standards***

Etymologiquement, le mot photovoltaïque dérive du grec ancien « *photos* qui signifie lumière, et du terme « *volta* » qui fait référence au physicien Alessandro Volta, premier à avoir découvert le procédé de la pile en 1800. Une cellule photovoltaïque sera donc dans son sens le plus général, un dispositif qui, exposé à la lumière, générera un courant électrique.

La source d'énergie, le soleil, est un nuage interstellaire qui se condense sous l'effet de la gravité, dont la température est de l'ordre de  $10^7$  degrés Kelvin en son centre et environ  $6000^\circ \text{ K}$  à sa surface. Le flux énergétique constant produit par des réactions thermonucléaires qui prennent forme à sa surface traverse l'atmosphère terrestre, qui est alors considérée comme un filtre. Le flux lumineux qui frappe la Terre est donc considérablement amoindri par rapport à celui qui est émis par le soleil. Pour caractériser la part d'énergie reçue en fonction de l'épaisseur de l'atmosphère traversée on utilise le nombre de masse d'air (AM). Ainsi, lorsque le soleil est au zénith, le flux reçu au niveau de la mer est de l'ordre de  $1300 \text{ W/m}^2$ . Ce flux est défini comme le rayonnement solaire pour une masse d'air de 1 (AM1). Le rayonnement traverse l'atmosphère sur une épaisseur de 7.8 kilomètres. Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, le rayonnement lumineux traversera une plus grande quantité atmosphérique, ce qui lui fera perdre une plus grande quantité d'énergie. Ainsi, avec un soleil à  $30^\circ$  sur l'horizon, on définit les conditions AM2. Hors atmosphère, à haute altitude, on définit les conditions AM0. Les conditions AM0 sont utiles pour les applications spatiales. Le spectre standard de la lumière du soleil équivalent à un flux continu de  $1000 \text{ W/m}^2$  est défini comme étant AM1.5, c'est-à-dire que le rayonnement aura parcouru une distance 1,5 fois supérieure au parcours minimal du rayonnement du soleil dans l'atmosphère. On peut écrire AM1.5G pour discuter du rayonnement global, incluant le rayonnement direct et le rayonnement diffus, on écrit AM1.5D pour indiquer uniquement le rayonnement direct. La Figure I-16 reporte le spectre du rayonnement de référence utilisé comme base

dans l'industrie pour définir les conditions de test des panneaux photovoltaïques (AM1.5G). Si l'on analyse le flux solaire, 46% du rayonnement se situe dans le visible, 49% dans le proche infrarouge et le reste du rayonnement est dans l'ultraviolet.



**Figure I-16 :** Spectre solaire énergétique normalisé (AM1.5G)

### 1.5.4- La collecte des charges - Jonction p-n

La jonction PN constitue l'élément de base de toutes les cellules, et présente le module élémentaire dont dépend le fonctionnement d'un grand nombre de dispositifs à semi-conducteurs.

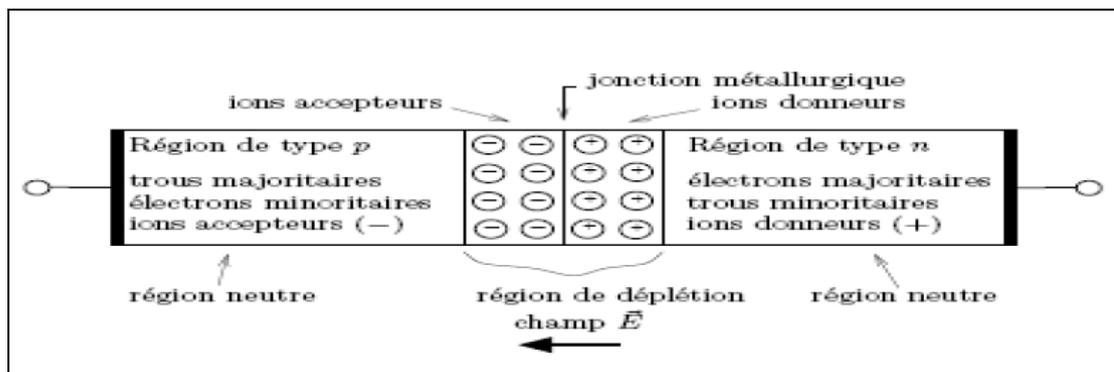
Cette structure simple est constituée d'une base en c-Si de type p dopée  $n^+$  localement pour former l'émetteur. La différence de concentration d'électrons entre la zone dopée  $n^+$  et celle de type p entraîne une tension de diffusion  $V_D$  à la jonction des deux zones de conductivité opposée. La tension de diffusion provoque un champ électrique intrinsèque à la jonction, dans une zone appelée ZCE (Zone de Charge d'Espace).

A l'équilibre, cette zone désertée de porteurs libres est présente essentiellement dans la région la moins dopée. Sa largeur varie en moyenne entre 0.1 et 1 micron en fonction du profil et du niveau de dopage.

On distingue alors, dans la jonction p/n, deux zones :

- Les zones neutres (émetteur et base) où il ne règne aucun champ électrique.
- La zone charge d'espace

A la jonction, le champ électrique intrinsèque permet l'accélération des porteurs minoritaires vers la zone où ils sont majoritaires. Ainsi, les électrons de la base de type p sont accélérés vers la zone d'émetteur dopée  $n^+$ . [13]



**Figure I.17 :** Schéma d'une Jonction p-n à l'équilibre

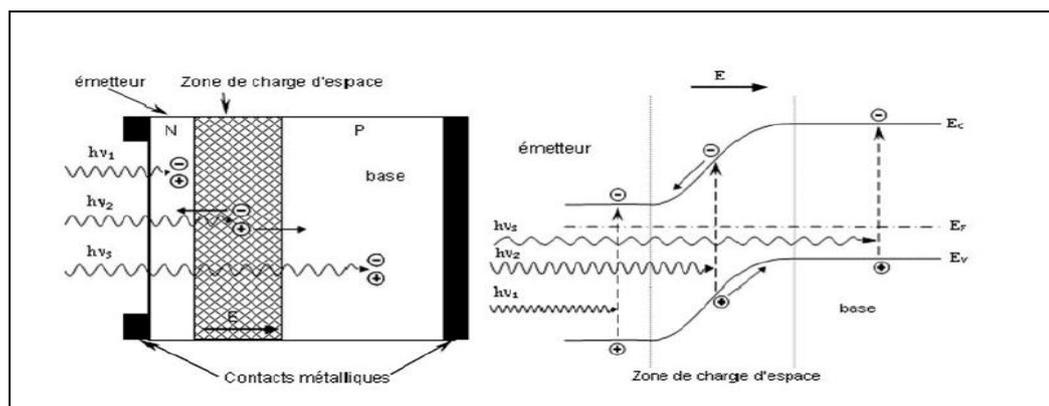
## I.6- principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

### I.6.1- Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

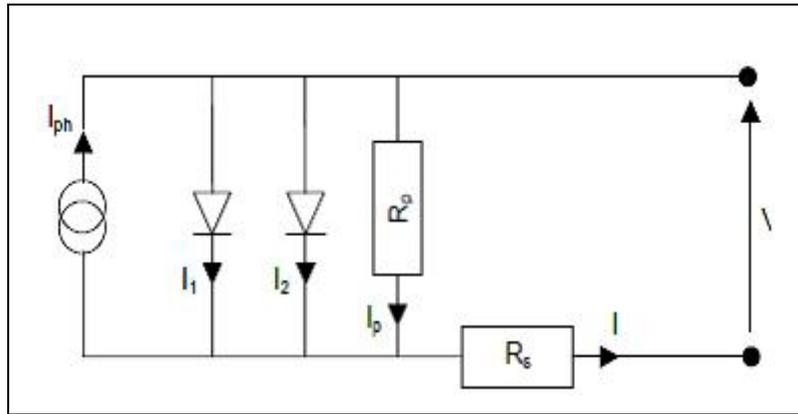
Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- création des paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur.
- collecte des particules générées dans le dispositif. [14]

Afin de collecter les charges générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire (Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n). D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la **figure I-18**.



**Figure I.18** : Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque.



**Figure I.19** : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle. [15]

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace.

- Dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un photo courant de diffusion.
- dans la zone de charge d'espace, les paires électrons / trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura un photo-courant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photo-courant résultant  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse. [13]

### ***1.6.2- Caractéristiques électriques et les paramètres d'une cellule photovoltaïque***

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit :

$$I(v) = I_{ph} - I_{obsc}(v) \quad (I.9)$$

Avec  $I_{ph}$  : densité de courante photogénèse.  
 $I_{obsc}$ : densité de courant d'obscurité.

Pour une cellule photovoltaïque idéale, l'équation (I.9) peut être écrite sous la forme suivante :

$$I(v) = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{qv}{kT}\right) - 1 \right) \quad (I.10)$$

Avec  $I_s$  : courant de saturation de la diode.

$q$ : charge élémentaire.

$k$  : constante de Boltzmann.

$T$  : température.

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

La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode. Sous éclairement, la caractéristique a l'allure présentée sur la figure I.18.

A partir de la caractéristique  $I(v)$  de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule notamment : [13]

- a) **Le courant de court-circuit  $I_{cc}$**  d'une cellule photovoltaïque obtenu pour une tension  $V=0$ , caractérise la quantité des paires électrons trous créés qui traverse la jonction sans être recombinées et ce entre les longueurs de diffusion des électrons et trous :

$$I_{cc} = qG(L_n + L_p) \quad (I.10.a)$$

Avec :  $G$  est la quantité des paires électrons trous

$L_n$  : longueur de diffusion des électrons,  $L_p$  : longueur de diffusion des trous.

- b) **La tension de circuit ouvert  $V_{co}$**  : La tension de circuit ouvert, Sous obscurité ( $I=0$ ), la cellule fournit un courant égale au courant de court-circuit  $I_{cc}$  pour une tension, appelée tension en circuit ouvert  $V_{co}$  : [16]

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1\right) \quad (\text{I. 10. b})$$

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

$$FF = \frac{P_M}{V_{co} I_{cc}} = \frac{V_M I_M}{V_{co} I_{cc}} \quad (\text{I. 11})$$

Avec :

**$I_m$**  : courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

**$V_m$**  : tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

d) Le rendement  $\eta$  de conversion (efficacité) exprimé en pourcentage, 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  $P_{inc}$  : [13]

$$\eta = \frac{P_M}{P_{inc}} = \frac{FF V_{co} I_{cc}}{P_{inc}} \quad (\text{I. 12})$$

e) Le rendement quantique : noté EQE (external quantum efficiency), appelé aussi IPCE (incident photon to current conversion efficiency), est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents.

Ce rendement ne prend pas en considération les photons réfléchis et transmis. Il est donné par la relation suivante : [13]

$$EQE = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \times \frac{E_{ph}(\lambda)}{e} = \frac{hc}{e} \times \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)\lambda} = 1.24 \times \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)\lambda} \quad (\text{I. 13})$$

Avec:

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

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

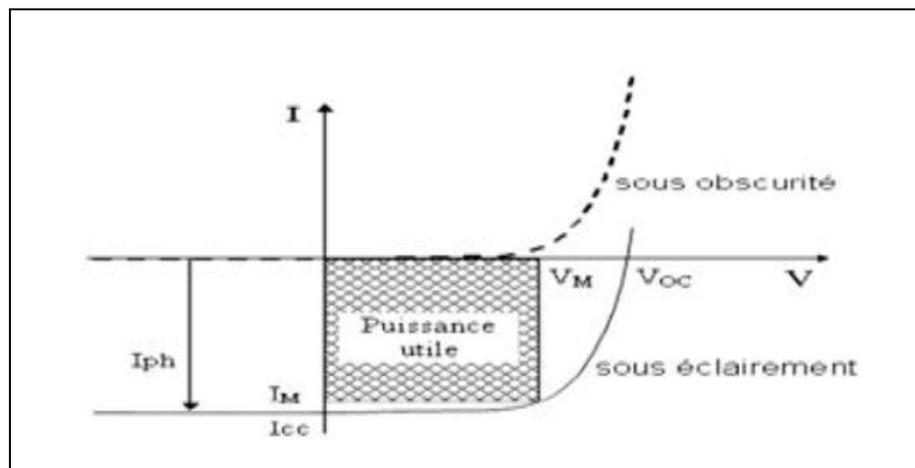
**$\lambda$**  : est la longueur d'onde monochromatique (nm).

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

**$c$**  : est la vitesse de la lumière ( $m \cdot s^{-1}$ ).

**$e$**  : la charge électronique.

**$E_{ph}$**  : l'énergie du photon



**Figure I.20 :** Caractéristiques  $I=f(V)$  sous obscurité et sous éclaircissement d'une cellule photovoltaïque

## CHAPITRE II : THEORIE GENERAL DES SEMI-CODUCTEURS

### II 1 Introduction

Dans le modèle classique, un matériau est isolant s'il ne contient pas d'électrons mobiles c'est-à-dire leur résistivité  $\rho$  est très important varié de  $10^{10}$  à  $10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$ . comme le verre, diamant, silice  $\text{SiO}_2$ , soufre, et polystyrène. S'il y a des électrons libres c'est-à-dire leur résistivité  $\rho$  est faible de l'ordre de  $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$  ces sont les métaux (conducteurs) comme (Ag, Cu, Al, Ni, W, Fe, ...). Donc entre les isolants et les métaux (conducteurs) se trouvent les semi-conducteurs (s-c) dont la résistivité  $\rho$  varie de  $10^{-3}$  à  $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$  comme (Ge, Si, GaAs, GaN, CdS,...).

- *Dans le cas des métaux :*

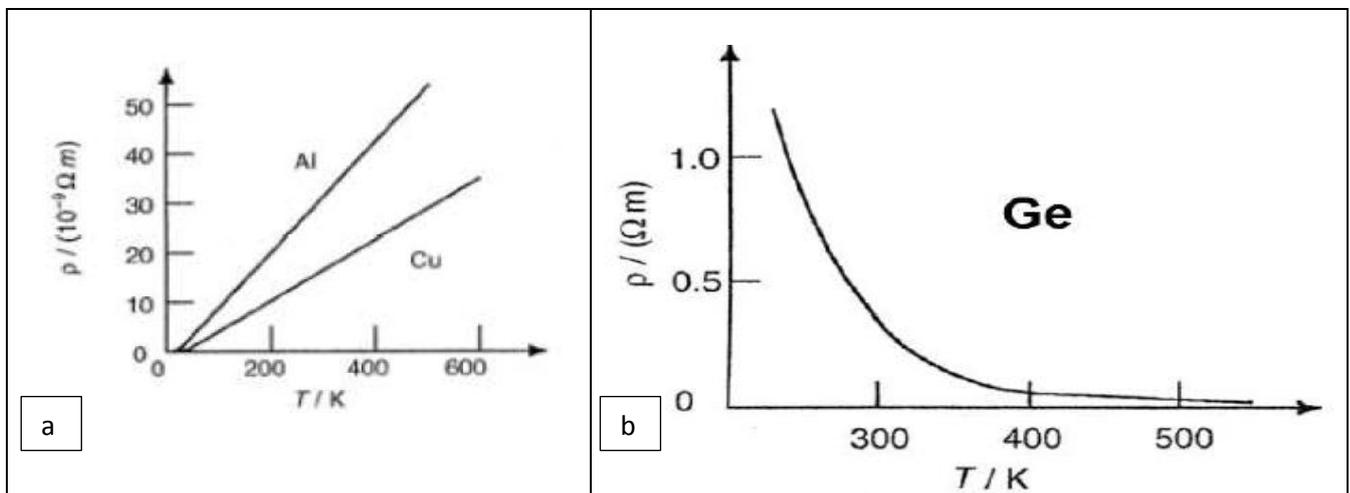
1. la résistivité d'un métal augmente avec la température (la figure III.1.a donné, à titre d'exemple, la variation de la résistivité avec la température de deux métaux : l'aluminium et le cuivre). En effet, dans un métal, le mouvement thermique des atomes gêne le déplacement des électrons ;

2. la résistivité d'un métal comprend en fait trois composantes :  $\rho = \rho_T + \rho_i + \rho_D$  avec :

$\rho_T$  = contribution de l'agitation thermique ;

$\rho_i$  = contribution des impuretés, de l'ordre du  $\mu\Omega \cdot \text{cm}/\%$  d'impureté ;

$\rho_D$  = contribution des défauts atomiques. [17]



**Figure III.1 :** Variation typique de la résistivité avec la température dans le cas des métaux(a) et dans le cas d'un semi-conducteur (b)

Quoique chaque atome d'aluminium donne trois électrons de conduction, alors que celui de cuivre en donne un seul, on remarque (figure II.1.a) qu'à une température donnée, la résistivité  $\rho_{\text{Al}}$  est plus grande que  $\rho_{\text{Cu}}$ . Cela est dû au fait qu'il est plus facile d'exciter des phonons dans Al parce que les atomes de cet élément sont plus légers que ceux de Cu.

- *Dans le cas des semi-conducteurs :*

1. la résistivité d'un semi-conducteur diminue lorsque la température augmente (la figure II.1.b donne l'allure de la variation de la résistivité du germanium avec la température).
2. La résistivité peut varier considérablement en présence d'impuretés (atomes étrangers de faible concentration on parle alors de dopage du matériau), ou de défauts structurels.
3. à la température absolue ( $T = 0 \text{ K}$  ou  $-273,16 \text{ °C}$ ), un semi-conducteur se comporte comme un isolant.

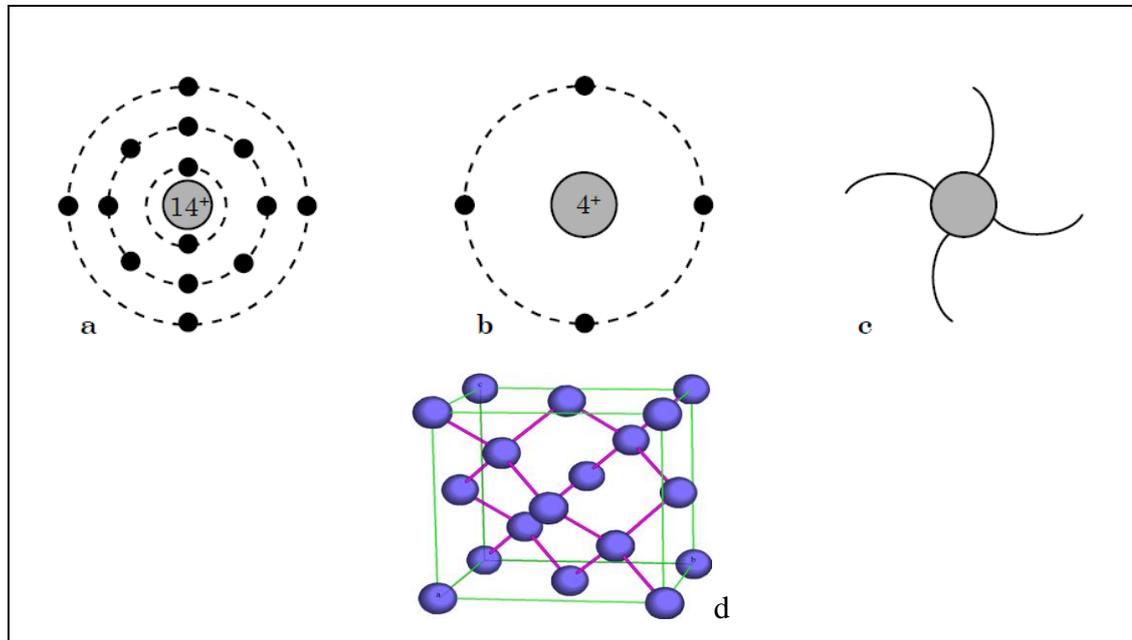
Et le tableau ci-dessus donne les Valeurs de la résistivité et de la conductivité électriques de matériaux isolants, semi-conducteurs et métalliques.

Matériau	Résistivité $\rho(\Omega.cm)$	Conductivité $\sigma(\Omega^{-1}.cm^{-1})$
Soufre (S)	$2.0 \times 10^{17}$	$0.5 \times 10^{-17}$
Diamant (C)	$1.0 \times 10^{14}$	$1.0 \times 10^{-14}$
Verre	$0.1 \times 10^{11}$	$10.0 \times 10^{-11}$
Bore (B)	$17.0 \times 10^5$	$5.9 \times 10^{-7}$
Silicium (Si)	$0.35 \times 10^5$	$2.90 \times 10^{-5}$
Germanium (Ge)	$10.0 \times 10^{-4}$	$0.1 \times 10^4$
Gadolinium (Gd)	$1.4 \times 10^{-4}$	$0.7 \times 10^4$
Mercure (Hg)	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^4$
Acier inoxydable	$0.75 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^4$
Zinc (Zn)	$59.0 \times 10^{-7}$	$16.9 \times 10^4$
Cuivre (Cu)	$17.0 \times 10^{-7}$	$59.0 \times 10^4$
Argent (Ag)	$16.0 \times 10^{-7}$	$63.0 \times 10^4$

**Tableau II.1 :** Valeurs de la résistivité et de la conductivité électriques de matériaux isolants, semi-conducteurs et métalliques. [17]

## II.2- Structure des semi-conducteurs

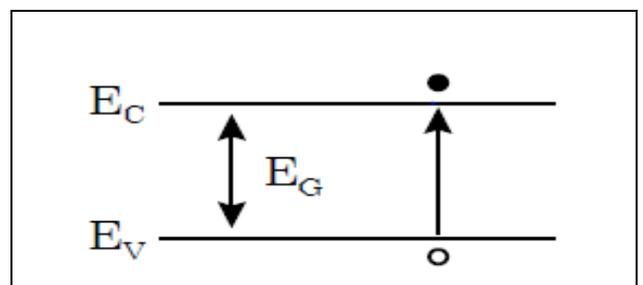
La structure du silicium et du germanium est la même que celle du diamant (cubique). Chaque atome est lié à 4 voisins placés aux sommets d'un tétraèdre par une liaison covalente : Ces éléments sont « tétravalents ». Figure II.2



**Figure II.2** représentation de l'atome de silicium faisant apparaître, **a)** les niveaux des énergies et électrons les occupants, **b)** le dernier niveau d'énergie, **c)** les quatre liaisons covalents possibles, **d)** structure de diamant

La figure II-3 correspond à une représentation sur un plan de la structure. Les traits figurent les électrons de valence. [18]

**Figure II-3** une représentation sur un plan de la structure ( $E_C$ ,  $E_V$ ,  $E_G$ )



La théorie des bandes appliquée aux semi-conducteurs amène à considérer une bande de valence entièrement pleine qui est séparée d'une bande de conduction par une bande interdite distante de l'énergie  $\Delta E$ .

Si on apporte une énergie thermique ou lumineuse suffisante à un électron, il peut passer de la bande de valence à la bande de conduction avec une probabilité P proportionnelle à :

$$p \propto \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad (1)$$

Avec :  $\Delta E$  : est l'écart en énergie séparant les deux bandes.

T : la température absolue.

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$  : est la constante de Boltzmann.

Dans un semi-conducteur,  $\Delta E$  est assez faible pour autoriser, à température ambiante, le passage d'un petit nombre d'électrons de la bande de valence vers la bande de conduction. Comme le Silicium  $\Delta E = 1,12 \text{ eV}$  et le Germanium  $\Delta E = 0,67 \text{ eV}$ . [19]

## II.3- Caractéristiques de la structure de bandes d'énergie

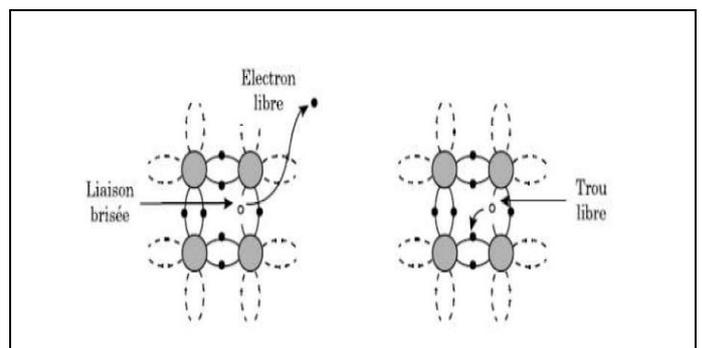
### II.3.1- Les trous

Rappelons qu'on peut briser des liaisons de valence si on apporte une énergie thermique (ou même lumineuse) : on excite ainsi un ou plusieurs électrons engagés dans ces liaisons en les faisant passer de la BV dans des états situés dans la BC (figure II.3). Ces électrons deviennent alors "libres" et peuvent participer à la conduction électrique.

En fait, compte tenu de la nature anti liante des fonctions d'onde dans la BC, ces électrons sont des particules quasi-libres dans le semi-conducteur. Nous verrons plus loin comment représenter ces particules quasi-libres par des quasi-particules libres, en leur affectant une masse effective  $m_e$  différente de la masse de l'électron libre ( $m_0 = 9,1 \times 10^{-31}$  kg).

Revenons sur les électrons de la BV. Ces électrons peuvent aussi se déplacer dans la BV dans la mesure où il existe des places vides. Lorsqu'un électron d'une orbitale liante occupée passe sur une orbitale liante voisine vide, la place vide se déplace dans l'autre sens; cette place vide est appelée trou (*hole*, en anglais). Ce phénomène est illustré à la figure II.4. Dans la mesure où la BV est toujours quasi pleine, l'étude du mouvement des électrons de cette bande est un problème compliqué (problème à N corps). On ramène alors le problème à une particule en affectant au trou une identité et en étudiant le mouvement des trous, qui en raison de leur faible nombre (ou faible densité) peuvent être traités comme des quasi-particules élémentaires. Comme le trou se déplace dans le sens opposé à l'électron, il est affecté d'une charge électrique  $+e$ . De façon similaire, on lui affecte une masse effective  $m_p$  différente de celle de l'électron.

**Figure II.4** : Apparition d'un électron "libre" et d'un trou "libre" lors de la rupture d'une liaison covalente [20]



### II.3.2- Masse effective des électrons

Dans la BC, un électron est caractérisé par une fonction d'onde qui est une somme de Bloch d'orbitale anti liante. Cette particule c'est une particule élémentaire plongée dans un potentiel cristallin. Cette particule quasi-libre de charge  $-e$  et de masse  $m_0$ , est représentée dans ce potentiel par une quasi-particule libre de charge  $-e$  et de masse effective  $m_e$  qu'on appelle masse effective de l'électron. [21]

Supposons notre cristal semi-conducteur soumis à un champ électrique extérieur. Un électron de conduction du cristal est soumis d'une part à une force interne  $\vec{F}_i$  résultant du champ cristallin et d'autre part à une force d'origine externe  $\vec{F}_e$  résultant du champ extérieur. On peut alors écrire :

$$\mathbf{m}_0 \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum \vec{F} = \vec{F}_i + \vec{F}_e \quad (\text{II.2})$$

On écrit que l'électron dans le cristal répond à la sollicitation de la force externe  $F_e$  comme une quasi-particule de masse  $m_e$  dans le vide :

$$\mathbf{m}_0 \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_e \quad (\text{II.3})$$

La masse effective contient l'effet global du potentiel cristallin sur l'électron. Tout se passe comme si l'électron, dans le cristal, se comporte comme une particule de masse  $m_e$  soumise uniquement à l'effet d'une force externe.

Le concept de masse effective est très utile pour décrire une bande d'énergie au voisinage d'un extrémum (minimum de la BC et maximum de la BV).

Dans l'état  $\vec{K}$ , un électron est représenté par un paquet d'ondes (qui sont des ondes de Bloch) dont la vitesse dite vitesse de groupe est donnée par :

$$\vec{V}_g = \frac{d\omega}{d\vec{k}} = \frac{d}{d\vec{k}} \left( \frac{E(\vec{K})}{\hbar} \right) = \frac{1}{\hbar} \frac{dE(\vec{K})}{d\vec{k}} \quad (\text{II.4})$$

Où  $\omega$  est la pulsation du paquet d'ondes et  $E = \hbar\omega$  est l'énergie associée à l'électron. L'accélération de l'électron est donnée par :

$$\gamma = \frac{d\vec{V}_g}{dt} = \frac{1}{\hbar} \frac{d}{dt} \left( \frac{dE(\vec{K})}{d\vec{k}} \right) = \frac{1}{\hbar} \frac{d}{d\vec{k}} \left( \frac{dE(\vec{K})}{dt} \right) \quad (\text{II.5})$$

En mécanique classique, l'énergie cinétique d'une particule de masse  $m$  animée d'une vitesse  $V$  est :

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{II. 6})$$

Dérivons cette expression, il vient :  $dE = m\vec{v} \cdot d\vec{v}$  Sachant que la force subie par cette particule est

$\vec{F} = m\vec{\gamma}$  Ou  $\vec{F} = d\vec{v}/dt$  est son accélération, on peut écrire :  $m \cdot d\vec{v} = \vec{F} \cdot dt$

Soit :  $dE = \vec{F} \cdot \vec{v} \cdot dt$

$$\text{Ou} \quad \frac{dE}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v} \quad (\text{II. 7})$$

En portant l'expression (II.7) dans l'expression (II.5), on obtient compte tenu de (II.4) :

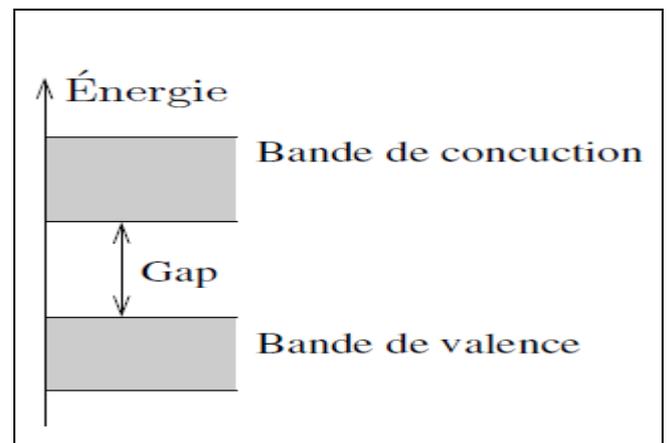
Ce qui s'écrit :  $\vec{F} = m_e \vec{\gamma}$

$$\text{Avec :} \quad m_e = \frac{\hbar^2}{d^2E(\vec{k})/dk^2} \quad (\text{II. 8})$$

Donc : la masse effective des électrons apparaît comme inversement proportionnelle à la dérivée seconde de la courbe de dispersion  $E(\vec{k})$  (par rapport à  $\vec{k}$ ) ou à la courbure des bandes d'énergie dans l'espace des  $\vec{k}$ .

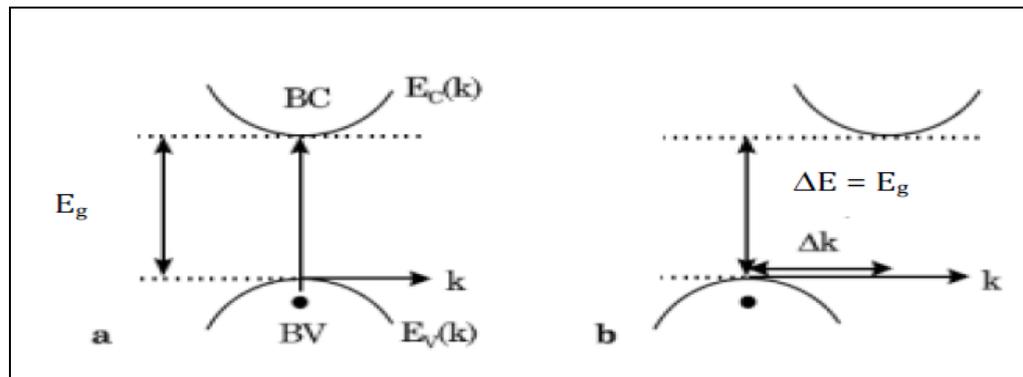
Le gap est par définition la largeur de la bande interdite, c'est-à-dire la différence d'énergie entre le minimum absolu de la BC et le maximum absolu de la BV. De ce point de vue, on distingue deux types fondamentaux de semi-conducteurs. [21]

**Figure II.5 :** Représentation des bandes de conduction et de valence et la définition du gap du matériau. [21]



### II.3.2 .a. Cas d'un semi-conducteur à gap direct

On distingue les semi-conducteurs dans lesquels le minimum de la BC et le maximum de la BV sont situés en des points différents de l'espace des  $\vec{k}$  : ce sont les semi-conducteurs à gap indirect, et les semi-conducteurs pour lesquels ces extrema sont situés au même point de l'espace des  $\vec{k}$  : ce sont les semi-conducteurs à gap direct (figure II. 6.a).



**Figure II.6 :** Schéma de bandes simplifié dans le cas d'un semi-conducteur à gap direct (a) et indirect (b)

La nature du gap joue un rôle fondamental dans l'interaction du semi-conducteur avec un rayonnement électromagnétique et par suite dans le fonctionnement des composants optoélectroniques.

Le tableau II.2 donne quelques valeurs de  $E_g$  pour différents semi-conducteurs à gap direct et indirect. [22]

**Tableau II.2 :** Energie (en eV) du gap de différents semi-conducteurs [23]

Semiconducteur		gap (eV)		Nature du gap
		4 K	300 K	
C	(c)	5,48	5,45	indirect
Si	(c)	1,169	1,12	"
SiC	(6H)	-	2,86	"
Ge	(c)	0,747	0,66	"
AlP	(c)	2,52	2,45	"
AlAs	(c)	2,24	2,16	"
AlSb	(c)	1,63	1,60	"
GaP	(c)	2,35	2,25	"
AlN	(H)	-	6,28	direct
GaN	(H)	-	3,39	"
GaAs	(c)	1,52	1,43	"
GaSb	(c)	0,81	0,68	"
InN	(H)	-	1,95	"
InP	(c)	1,42	1,27	"
InAs	(c)	0,42	0,36	"
InSb	(c)	0,237	0,17	"
ZnO	(H)	3,40	-	"
ZnS	(H)	3,80	3,68	"
ZnSe	(c)	2,82	2,67	"
ZnTe	(c)	2,39	2,26	"
CdS	(H)	2,56	2,42	"
CdSe	(H)	1,84	1,7	"
CdTe	(c)	1,60	1,44	"
SiO <sub>2</sub>		8,8	-	

*c : structure cubique      H : structure hexagonale*

### II.3.2 .b. Cas d'un semi-conducteur à gap indirect

Si le semi-conducteur est à gap indirect, la BC est dite multi-vallée et anisotrope. C'est-à-dire qu'elle comporte plusieurs minima équivalents situés en différents points de la zone de Brillouin Figure II.6.b.

### II.3.3- Masse effective des trous

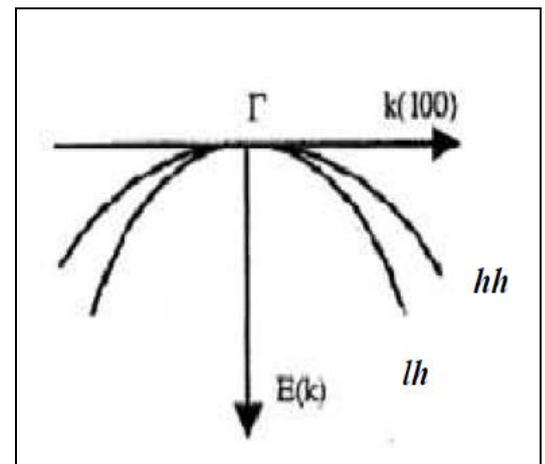
Lorsque la température devient supérieure à zéro ( $T > 0 K$ ), un certain nombre d'électrons de la BV sont excités dans la BC. Compte tenu de la nature anti liante des fonctions d'onde électroniques dans la BC, ces électrons sont des particules quasi-libres.

En affectant une masse effective aux trous considérés comme des particules quasi-libres dans la BV, on peut les représenter par des quasi-particules libres dans cette bande d'énergie, comme les électrons dans la BC.

La masse effective des trous est définie comme pour les électrons, par l'inverse de la dérivée seconde de la courbe de dispersion.

En général, la BV des semi-conducteurs classiques (cubiques en particulier) est composée de deux branches dégénérées en  $\vec{k} = 0$  (point  $\Gamma$ ). Comme le montre la figure II.7.

**Figure II.7 :** Structure de la BV au voisinage de  $\vec{k} = 0$ .

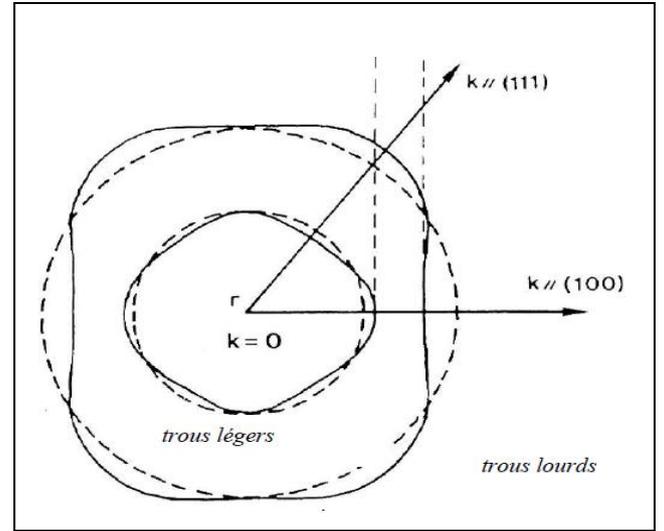


Sur cette figure, les énergies des trous sont comptées positivement vers le bas. La bande de plus grande courbure (bande inférieure) correspond à des trous de masse effective inférieure. On appelle ces trous, des trous légers notés  $lh$  (light holes, en anglais); la bande correspondante est appelée bande de trous légers. La bande de plus faible courbure (bande supérieure) est appelée bande de trous lourds  $hh$  (heavy holes). [21]

À cause de la dégénérescence qui se produit en  $k = 0$ , les bandes  $lh$  et  $hh$  ne sont pas isotropes. Pour chacune des deux bandes, les surfaces d'énergie se présentent sous forme de sphères déformées (à surface ondulée). La figure II.8 représente ces surfaces à deux dimensions; les surfaces d'énergie constante des trous légers ( $lh$ ) présentent des protubérances dans les directions de haute

symétrie [100] et équivalentes, et des creux dans les directions de haute symétrie [111] et équivalentes. La déformation des sphères représentant les énergies des trous lourds ( $hh$ ) est symétrique de la précédente.

**Figure II.8** : Représentation 2D des surfaces iso-énergétiques des trous légers et lourds [21]



On voit donc qu'il existe au sommet de la BV deux sortes de trous dits légers et lourds, dont les énergies en fonction du vecteur d'onde  $\vec{k}$  sont données par des expressions plus compliquées que dans le cas des électrons :

$$E(\vec{k}) = E_v + \frac{\hbar^2}{2m_0} [AK^2 \mp \sqrt{B^2K^2 + C^2(K_x^2k_y^2 + K_y^2k_z^2 + K_z^2k_x^2)}] \quad (\text{II. 9})$$

Où le signe (+) correspond aux trous légers et le signe (-) aux trous lourds. A, B et C sont des constantes sans dimension. Les masses effectives sont alors données par :

$$m_{hh} = \frac{m_0}{\gamma_1 - \bar{\gamma}} \quad (\text{II. 10})$$

$$m_{lh} = \frac{m_0}{\gamma_1 + \bar{\gamma}} \quad (\text{II. 11})$$

Avec :  $\gamma_1 = A$

$$\text{et } \bar{\gamma} = \sqrt{2\gamma_2^2 + 2\gamma_3^2} \quad \text{et } \gamma_2 = B/2 \quad \cdot \gamma_3 = \frac{1}{2\sqrt{3}} \sqrt{C^2 + 3B^2}$$

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  Sont appelés paramètres de la bande de valence. Leurs valeurs ont été calculées pour tous les semi-conducteurs cubiques et mesurées pour la plupart d'entre eux.

On peut alors développer les bandes de valence dans l'approximation des bandes paraboliques par des lois semblables à celles utilisées pour la bande conduction. En comptant l'énergie positivement vers le bas, ces lois s'écrivent :

$$E_{hh}(\vec{K}) = E_V + \frac{\hbar^2 \mathbf{k}^2}{2m_{hh}} \quad (\text{II. 12})$$

$$E_{lh}(\vec{K}) = E_V + \frac{\hbar^2 \mathbf{k}^2}{2m_{lh}} \quad (\text{II. 13})$$

Comme pour les électrons dans la bande de conduction, les trous dans les bandes de valence se comportent comme des quasi-particules libres de masses respectives  $m_{hh}$  et  $m_{lh}$ . [21]

Semi-conducteur	Masse effective des électrons $m_c / m_0$		Paramètre de la bande de valence			Masse effective des trous $m_t / m_0$	
	$m_l / m_0$	$m_t / m_0$	$\gamma_2$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$m_{hh} / m_0$	$m_{lh} / m_0$
Si	0.916	0.191	4.22	0.39	1.44	0.53	0.16
Ge	1.588	0.082	13.35	4.25	5.69	0.35	0.043

**Tableau II.3 :** Masses effectives des électrons et des trous aux extrema des bandes. Paramètres caractéristiques de la bande valence pour le Si et le Ge.

## II.4 Semi-conducteurs intrinsèques

Un semi-conducteur pur est appelé semi-conducteur intrinsèque. Les semi-conducteurs ont une valence de IV : cela veut dire que la couche périphérique de leurs atomes contient 4 électrons. Au total, cette couche peut contenir 8 électrons, alors, 4 états de la couche sont vacants. On peut représenter l'atome du semi-conducteur (par exemple, celui du silicium ou du germanium) par un diagramme de la figure II.9 (c). Ce diagramme représente le noyau de l'atome et la structure de couche périphérique ; les cercles blancs désignent les états vacants. Le nombre IV indique la valence de l'atome.

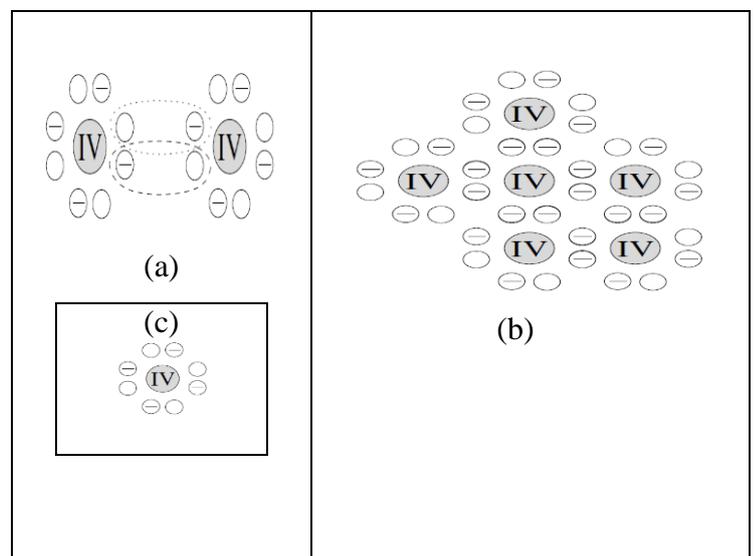
Pour s'allier dans un réseau cristallin, les atomes partagent chaque électron de la couche périphérique avec un des quatre atomes voisins ; de même, les quatre états vacants d'un atome sont occupés par les quatre électrons des quatre atomes voisins (figure II.9).

Cette configuration résulte en une liaison covalente très solide, qui emploie tous les électrons ne laissant libre aucun. La figure II.10 présente la géométrie tridimensionnelle du réseau cristallin d'un semi-conducteur intrinsèque.

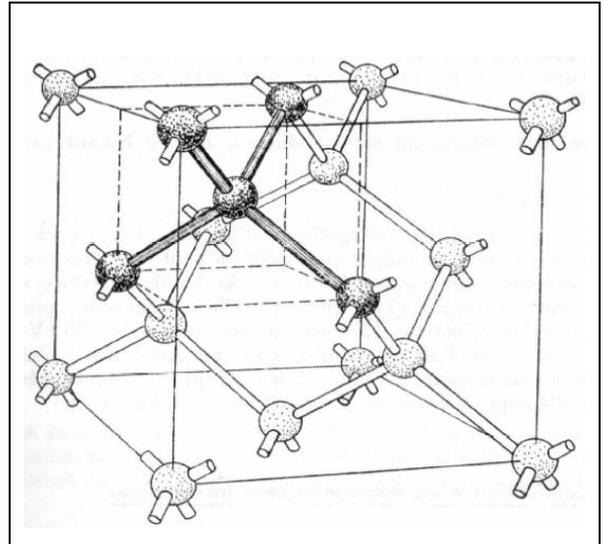
Que se passe-t-il lorsque dans un semi-conducteur un électron passe de la bande de valence vers la bande de conduction ? Rappelons qu'à l'équilibre tous les états de la bande de valence sont occupés par les électrons, cela veut dire que tous les électrons du cristal sont liés au sein de leurs atomes.

Lorsqu'un électron franchit le gap et se retrouve dans la bande de conduction, il quitte son atome et se déplace librement à travers le réseau. Soumis à un champ électrique extérieur, cet électron se comporte comme un électron libre dans un conducteur : il se déplace dans le sens d'accroissement du potentiel du champ extérieur. [21]

**Figure II.9** : Liaison au sein du réseau cristallin d'un semi-conducteur : **a)** liaison entre deux atomes voisins, **b)** structure du réseau. **c)** Structure d'un atome de semi-conducteur.

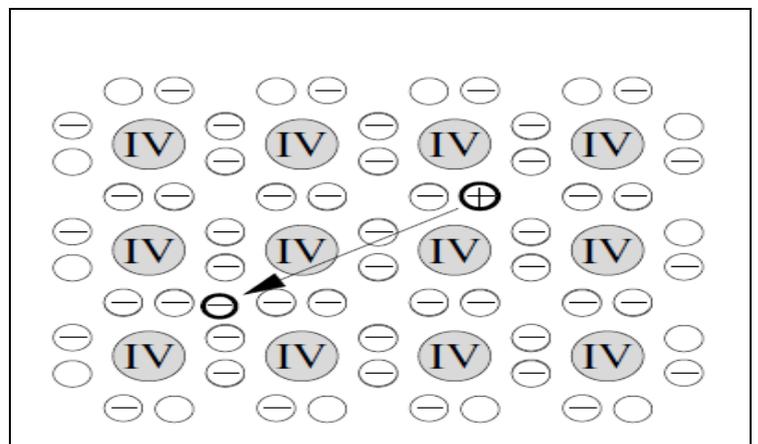


**Figure II.10 :** Structure tridimensionnelle du réseau cristallin du silicium, de type cubique à faces centrées. Une structure élémentaire du réseau, ou un seul atome est lié à ces quatre voisins, est représentée en couleur foncée. [23]



Or à l'ancien emplacement de l'électron dans le réseau cristallin, il se produit un phénomène particulièrement intéressant. Lorsqu'un électron se détache, l'état énergétique dans la bande de valence se trouve inoccupé, et dans le réseau apparaît une lacune, un emplacement où il manque un électron. Cet emplacement exerce une attraction sur des électrons voisins du réseau : ainsi, un électron de la bande de valence, ayant une énergie proche de celle qui correspond à l'état inoccupé, peut y être capturé. A son tour, cet électron laisse son état libre : celui-ci peut capturer un autre électron, et ainsi de suite. De cette manière, un état vacant peut se propager à travers le cristal (figure II.11).

**Figure.II.11** Apparition d'une paire < électron-trou > dans un semi-conducteur intrinsèque.



Lorsqu'un électron se détache de son emplacement, l'atome acquiert une charge positive (car il perd un électron chargé négativement). Ainsi, on peut considérer qu'un trou possède une charge positive. Sa propagation à travers le réseau cristallin fait propager cette charge, ainsi, le trou peut être apparenté à une charge positive élémentaire (chargée de  $+e$ ). Il s'agit d'une charge libre, car, comme on l'a vu, le trou n'est pas associé à un atome particulier. On peut également démontrer qu'un trou réagit à un champ électrique de la même manière qu'une charge positive : elle se déplace dans le sens de décroissement du potentiel.

Dans tous les cas, au sein d'un semi-conducteur pur, le nombre des trous est forcément égal au nombre d'électrons libres. La concentration volumique des trous et des électrons dépend de la température et de la largeur du gap  $E_g$  : [8]

$$p_i = n_i = AT^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-E_g}{2kT}} \quad (\text{II.14})$$

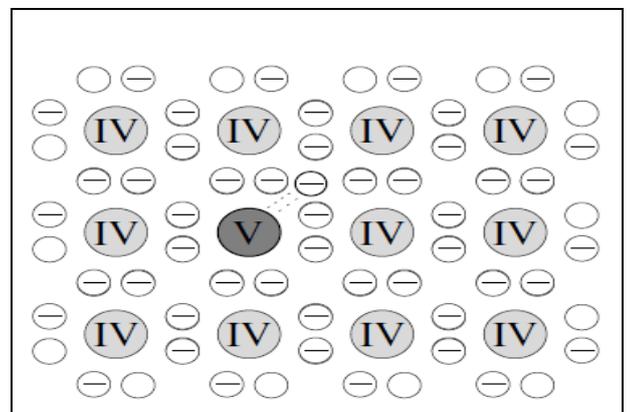
## II.5- Semi-conducteur extrinsèque

### II.5.1- Semi-conducteur de type n

Une introduction d'une très faible quantité d'impuretés dans un semi-conducteur peut modifier très sensiblement ses propriétés électriques.

Introduisons une quantité infime d'un élément de valence 5 dans le réseau cristallin du silicium (il possède cinq électrons sur la couche périphérique). [22]

Dans ce cas certains atomes de silicium sont remplacés par les atomes du dopant. Puisque le dopage est faible, il y a peu d'atomes de dopant : la structure du cristal ne change pas, chaque atome de dopant est entouré par quatre atomes du semi-conducteur d'origine. Or on sait qu'un seul électron de chaque atome est nécessaire pour effectuer une liaison covalente avec un autre atome. Donc, puisque le dopant a cinq électrons sur la couche périphérique, un électron est inoccupé : il peut se détacher très facilement (son détachement nécessite une énergie très faible, de l'ordre de 0.01 eV), il est alors un porteur de charge libre (figure 12). A la place de cet électron, une lacune se crée (chargée positivement). Néanmoins ce n'est pas un trou libre : l'énergie reçue par l'atome n'est pas suffisante pour capturer un électron appartenant un atome voisin. Cette lacune ne peut donc pas se propager.



**Figure II.12** Semi-conducteur dopé avec un élément de valence V. [22]

Vu que l'énergie d'ionisation des atomes du dopant est très faible, à température ambiante, tous les atomes du dopant sont polarisés. Par conséquent, la concentration des électrons apportés par le dopant est égale à la concentration des atomes du dopant dans le semi-conducteur. Il s'en suit qu'à température ambiante, les porteurs de charge d'un tel semi-conducteur sont les trous et les électrons générés normalement à partir des atomes de silicium, auxquels s'ajoutent les électrons libres apportés par le dopant. En règle générale on s'arrange pour que la concentration du dopant soit largement supérieure à la concentration des porteurs intrinsèques ( $n_i$ ,  $p_i$ ). Dans ce cas la conductivité du semi-conducteur est essentiellement assurée par les porteurs libres du dopant.

Pour cette raison les électrons s'appellent < porteurs de charge majoritaires >, alors que les trous < porteurs de charge minoritaires >.

Un dopant de valence V s'appelle < donneur >, car ses atomes rendent des électrons au réseau cristallin. Un semi-conducteur dopé par un donneur s'appelle < de type n >, l'appellation qui provient du mot négatif désignant le signe des charges majoritaires. [22]

### II.5.2- Semi-conducteur de type p

Utilisons maintenant un matériau de valence III (par exemple, indium ou gallium) pour doper un semi-conducteur intrinsèque. La situation est très similaire au cas précédent : puisqu'il y a peu d'atomes du dopant, la structure cristalline du semi-conducteur n'est pas modifiée, tout simplement, certains atomes du semi-conducteur sont remplacés par les atomes du dopant, qui sont tous entourés par quatre atomes du semi-conducteur. Or, le dopant ne possède que trois électrons de valence : un électron manque pour compléter la liaison. Ainsi, un emplacement dans le réseau est vacant : il attrape facilement un électron de l'atome voisin. Mais puisque tous les atomes sont neutres, à la place de cet électron capturé apparaît un trou mobile. A température normale tous les atomes du dopant allient un électron, en générant autant de trous mobiles que le nombre de ces atomes.

Si la concentration des atomes du dopant est largement supérieure à celle des porteurs libres intrinsèques, la concentration des charges libres est quasiment égale à la concentration des atomes des dopants, la conductivité est déterminée par la présence du dopant, (d'où l'appellation semi-conducteur extrinsèque).

Les trous s'appellent les charges majoritaires, alors que les électrons sont les charges minoritaires. Un dopant de valence III s'appelle < accepteur >, car ses atomes allient des électrons du réseau cristallin. Un semi-conducteur dopé par un accepteur s'appelle < de type p >, ce qui vient du signe des charges majoritaires (positif). [21]

### II.5.3 Loi d'action de masse

La loi d'action de masse relie, à une température T, la densité de porteurs (électrons et trous) à la densité intrinsèque du semi-conducteur. Elle s'exprime par:

$$\mathbf{n \cdot p = n_i^2} \quad \mathbf{(II.15)}$$

On en déduit la concentration de porteurs minoritaires de Semi-conducteurs dopés n et dopés p: [21]

- Trous dans un semi-conducteur dopé n:  $\mathbf{p_n = \frac{n_i^2}{N_d}} \quad \mathbf{(II.16)}$

- Electrons dans un semi-conducteur dopé p :  $\mathbf{N_p = \frac{n_i^2}{N_a}} \quad \mathbf{(II.17)}$

## II.6. COURANTS DANS LE SEMICONDUCTEUR

Les courants dans le semi-conducteur résultent du déplacement des porteurs de charge, électrons et trous, sous l'action de différentes forces, l'origine de ces forces étant un champ électrique (courant de conduction) ou un gradient de concentration (courant de diffusion).

Le courant de conduction est le courant que l'on rencontre dans les métaux et qui est proportionnel au champ électrique:

$$J_{C_n} = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot E \quad (\text{II. 17})$$

$$J_{C_p} = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot E \quad (\text{II. 18})$$

Ces relations sont valables pour des champs électriques suffisamment faibles pour que la vitesse des porteurs reste proportionnelle au champ. Le courant total s'écrit alors :

$$J_{\text{tot}} = q \cdot (n \cdot \mu_p + p \cdot \mu_n) E = \sigma E \quad (\text{II. 19})$$

Considérons un semi-conducteur dopé dont la concentration en trous varie suivant un axe x. La densité de courant de diffusion en un point d'abscisse x est:

$$J_{D_p} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx} \quad (\text{II. 20})$$

Avec  $D_p$  est la constante de diffusion  $D_p = \mu_p \frac{KT}{q}$

Les porteurs en excès tendent à se donner une concentration uniforme. Il en est de même dans le cas des électrons de concentration  $n(x)$  et on a:

$$J_{D_n} = qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad (\text{II. 20}) \quad \text{Avec } D_n = \mu_n \frac{KT}{q}$$

Lorsque les deux phénomènes existent simultanément la densité totale de courant pour les électrons et les trous est donnée, en explicitant la relation de dépendance avec la température, par :

$$J_n = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot E + qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad (\text{II. 21})$$

$$J_p = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot E - qD_p \frac{dp(x)}{dx} \quad (\text{II. 22})$$

Ces relations sont valables pour des champs électriques suffisamment faibles pour que la vitesse des porteurs reste proportionnelle au champ. Le courant total s'écrit alors : [8]

$$J_{\text{tot}} = J_n + J_p \quad (\text{II. 23})$$

Avec Les constantes  $D_n$  et  $D_p$  sont liées aux mobilités  $\mu_p$  et  $\mu_n$  par la relation d'Einstein.

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{KT}{q} \quad (\text{II. 23})$$

## II.7. GENERATION ET RECOMBINAISON DES PORTEURS

Si on considère un semi-conducteur à l'équilibre thermique, il se produit en permanence un processus de génération de paires électrons-trous par agitation thermique.

Cependant il existe aussi le processus inverse, un électron se recombine avec un trou, c'est la recombinaison. Dans un semi-conducteur à l'équilibre les deux processus s'équilibrent de façon à ce que la concentration en porteurs libres reste constante.

Lorsque l'électron descend de la bande de conduction vers la bande de valence, le semi-conducteur restitue l'énergie sous forme de chaleur ou émet de la lumière (photon).

Ce dernier effet est utilisé dans les diodes électroluminescentes (L.E.D) ou les lasers semi-conducteurs. Le photon émis a une énergie égale à  $E_g$  selon :  $\lambda E_g = hc$  (II. 23)

En sens inverse, un photon qui possède une énergie supérieure ou égale à  $E_g$  a le pouvoir de générer une paire électron-trou.

Quand le semi-conducteur absorbe une énergie suffisante ( $h\nu \geq E_g$ ), il engendre une paire électron-trou. En général, hors équilibre et en régime transitoire, les taux nets de recombinaison des électrons et des trous respectivement sont donné par :

$$U_n = D_n \Delta_n \quad (\text{II. 24. a})$$

$$U_p = D_p \Delta_p \quad (\text{II. 24. b})$$

$$\text{Avec : } U_n = \bar{n} - n/\tau_p \quad \text{et} \quad \bar{n} = \partial n / \partial t$$

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 : [24]

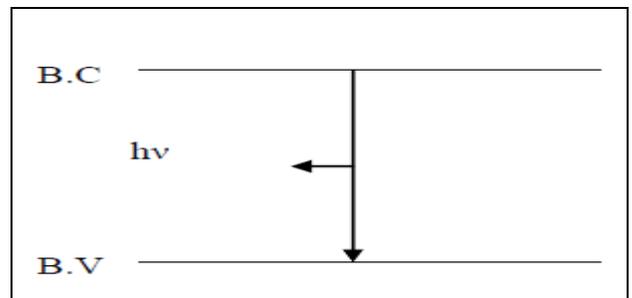
**II. 7.1.-Recombinaison en volume de type radiatif**

Le processus de recombinaison radiative ou inter bandes est défini comme l'inverse du processus d'absorption. L'excès d'énergie de l'électron recombiné est cédé sous forme d'un rayonnement optique. Ce processus est important pour les matériaux à bande interdite directe comme le GaAs et faible pour les matériaux à gaps indirects comme le Si. De ce fait, ce mécanisme n'influe pas considérablement sur la durée de vie des porteurs minoritaires. Le taux de recombinaison est proportionnel à la fois au nombre d'électron et au nombre de trous :

$$R = B(pn - n_i^2) \tag{II. 25} \quad [24]$$

Avec : B est le coefficient de recombinaison radiative, sa valeur est égale à  $9,5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{s}$ .

**Figure II.13.** Schéma descriptif du processus de recombinaison de type radiatif



**II.7.2- Recombinaison en volume de type Auger**

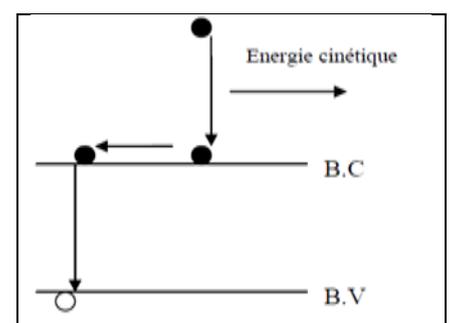
Nous avons une recombinaison de type Auger, lorsque l'énergie de l'électron qui se recombine dans la bande de valence est transférée sous forme d'énergie cinétique à un autre électron libre. L'énergie transférée est libérée ensuite sous forme de phonons. Ce mécanisme est prédominant pour les régions fortement dopées. Le taux de recombinaison est donné par la relation :

$$R = (C_n n + C_p p)(pn - n_i^2) \tag{II. 26}$$

Avec  $C_n$  et  $C_p$  sont des coefficients d'Auger. Leurs valeurs sont respectivement :

$$C_n = 2,2 \cdot 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s} \quad \text{et} \quad C_p = 9,9 \cdot 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s}$$

**Figure II.14 :** Schéma descriptif du processus de recombinaison de type Auger [24]

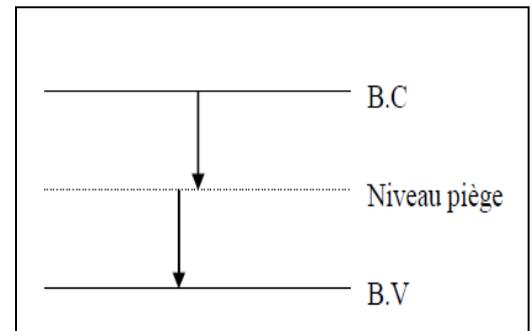


### II.7.3- Recombinaison par piège

Les deux mécanismes précédents ne dépendent que du dopage et pas des défauts et des centres de recombinaison associés. Ils sont souvent masqués par des processus de recombinaison plus efficaces faisant intervenir les niveaux profonds.

Pour le silicium, il y a des niveaux profonds proches du milieu de la bande interdite associés à quelques impuretés courantes. L'électron a tendance à revenir à son état initial dans la bande de valence, en passant par ces niveaux (s'ils existent).

**Figure II.15.** Schéma descriptif du processus de recombinaison par piège [24]



#### II.7.3. a. Recombinaison en volume de type RSH

Read-Shokley-Hall à un seul niveau piège. Le taux de recombinaison par piège est donné par la relation :

$$R_{RSH} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_n \left( p + n_{ie} e^{\frac{E_T}{kT}} \right) + \tau_p \left( n + n_{ie} e^{\frac{E_T}{kT}} \right)} \quad (\text{II. 27})$$

Où :

$E_T$  représente l'énergie du niveau piège proche du milieu de la bande interdite,  $\tau_n$  et  $\tau_p$  ont une valeur égale à  $10^3 \mu\text{s}$ .

Avec :  $n_{ie}$  Est la concentration intrinsèque effective donnée par la relation suivante :

$$n_{ie} = pn \exp\left(\frac{\Delta E_{g_n} + \Delta E_{g_p}}{KT}\right) \quad (\text{II. 28})$$

Elle est due au rétrécissement de la bande interdite pour un semi-conducteur fortement dopé et  $\Delta E_{g_n}$ ,  $\Delta E_{g_p}$  présentent le rétrécissement de la bande interdite [24]

### II.7.3.b. 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 constante ( $T=300^\circ\text{K}$ ). Les recombinaisons en surface avant et arrière inhérentes aux densités de dopages selon la relation suivante :

$$S = S_0 \left( \frac{N}{N_{set}} \right)^a \quad (\text{II.29})$$

$S_0$ ,  $N_{set}$  et  $a$  Dépendent du traitement de la surface et de la passivation. Pour une oxydation thermique d'une couche de silicium de type n,  $a$  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. [24]

## CHAPITRE III : LES PROPRIETES DE SILICIUM, GERMANIUM ET LOGICIEL DE SIMULATION PC1D

### III.1 INTRODUCTION

Actuellement les technologies de circuits intégrés utilisent encore le silicium comme matériau semi-conducteur de base. Le silicium étant un matériau semi-conducteur de largeur de bande interdite moyenne s'adapte bien aux contraintes imposées par les applications à des températures normales, soit de 0 à 100°C. A de plus hautes températures, la performance des technologies sur le silicium se dégrade progressivement.

Le silicium fut découvert en 1824 par J.J. Berzelius à Stockholm, en Suède. C'est, après le carbone, l'élément le plus abondant de la terre, la répartition étant de 277.000 ppm. On le trouve généralement sous forme de silicate dans de nombreuses roches, argiles et terres. Le silicium est obtenu en réduisant la silice (le sable, SiO<sub>2</sub>) par le carbone. Une fusion en zone subséquente donne un élément plus pur pour des applications nécessitant un silicium de haute pureté (par exemple les semi-conducteurs). Et Le silicium est le matériau de base de 90% de l'industrie micro-électronique.

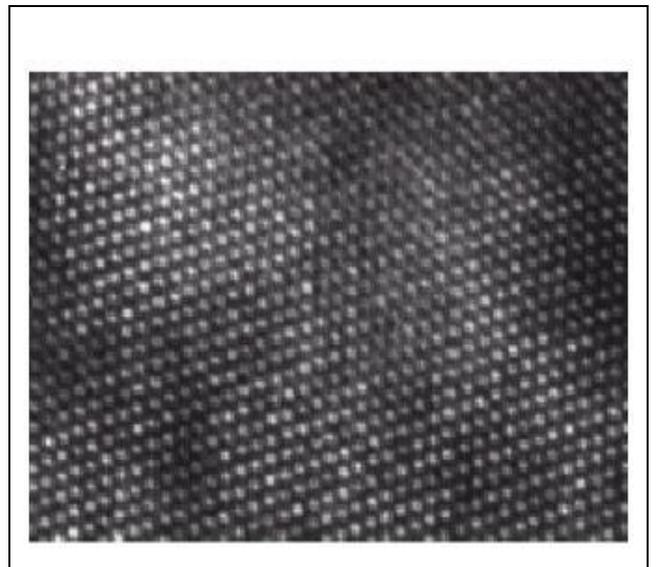
Le germanium a été découvert par le savant allemand Clemens Winkler le 6 février 1886, il peut être trouvé à beaucoup d'endroits, mais en concentrations faibles. Le germanium a servi de substrat semi-conducteur jusqu'à ce que le silicium prenne sa place, vers les années 1970. Aujourd'hui il n'est plus utilisé que dans le domaine des hautes fréquences, et pour la réalisation de diodes à faible chute (0,3 V environ, application en détection).

Les semi-conducteurs (germanium et silicium) possèdent 4 électrons sur leur couche périphérique car ils appartiennent à la 4<sup>ème</sup> colonne de la classification périodique des éléments. Il est possible de les produire avec un haut degré de pureté (moins de 1 atome étranger pour 10<sup>11</sup> atomes de semi-conducteur): on parle alors de S.C. intrinsèque [2].

### III.2- la structure cristalline

La matière condensée peut prendre deux états solides différents, suivant les conditions dans lesquelles elle s'est formée : un état dit amorphe, dans lequel la disposition des atomes est aléatoire, ou un état cristallisé, caractérisé par un arrangement périodique des atomes. Les solides amorphes sont généralement appelés des verres et considérés comme des liquides de haute viscosité. Les solides cristallisés peuvent former des monocristaux, si la périodicité est ininterrompue dans tout le volume, ou des poly-cristaux, s'il existe une périodicité locale et que le solide est composé d'un ensemble de grains cristallins de taille à peu près uniforme. Dans la microphotographie de la figure III.1, prise par TEM (Transmission Electron Microscopy), une vue de coupe du réseau cristallin du silicium permet d'observer sa périodicité.

Le résultat est un ensemble ordonné, ou localement ordonné, des noyaux d'atomes et d'électrons liés entre eux par des forces principalement coulombiennes. Ces forces sont plus ou moins importantes suivant l'électronégativité des éléments intervenant dans les liaisons, ce qui confère aussi des propriétés mécaniques et électriques au solide cristallisé résultant. On distingue quatre familles de solides cristallins : les cristaux ioniques, les cristaux covalents, les métaux et les cristaux moléculaires [19].



**Figure III.1** : Microphotographie du réseau cristallin du silicium prise par TEM

### La structure diamant

Dans la structure diamant chaque atome est entouré de 4 plus proches voisins, ce qui permet de former des liaisons covalentes. Elle peut être décrite comme étant formée de 2 structures c.f.c. déplacées l'une par rapport à l'autre le long de la diagonale principale. La position de l'origine de la seconde structure c.f.c. par rapport à l'origine de la première est  $(1/4, 1/4, 1/4)$ . Le diamant cristallise dans cette structure, mais aussi le Silicium et le Germanium.

#### la structure du diamant

- système : cubique
- réseau de Bravais : C. F.C
- paramètres de la maille :  $a = 0.3567 \text{ nm}$
- motif : 2 atomes C en  $(0, 0, 0)$  et  $(1/4, 1/4, 1/4)$

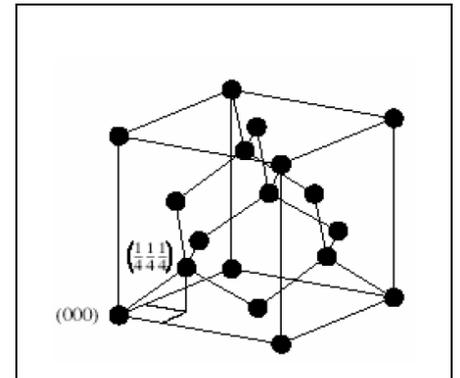


Figure III.2. La structure du diamant

Cette structure est typique des éléments de la colonne IV du tableau périodique, mais aussi des composés III – V dans lesquels les sites  $(0, 0, 0)$  et  $(1/4, 1/4, 1/4)$  sont occupés par différents types d'atomes. On parle dans ce cas de structure Zinc blende [23].

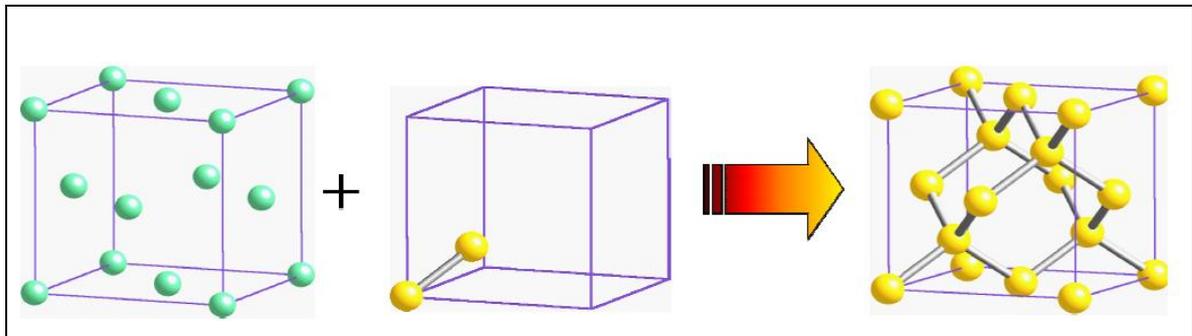


Figure III.3 : la structure du diamant

### III.3- propriétés physiques du silicium et germanium (Si et Ge)

#### III.3.1- Hauteur de la bande interdite

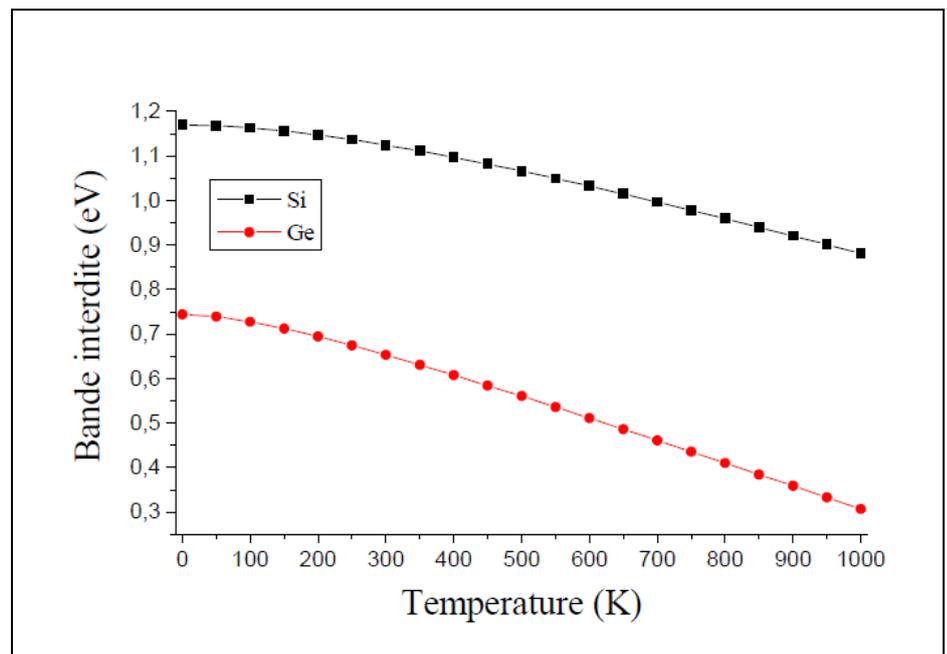
Largeur  $E_g$  de la bande interdite donne des caractéristiques électriques importantes à chaque semi-conducteur (Tableau III.1).

Semi- conducteur	$E_g(0)$ (eV)	a (eV/K)	b (K)
Si	1.170	$4.73 \cdot 10^{-4}$	636
Ge	0.7437	$5.405 \cdot 10^{-4}$	235

**Tableau III.1** Paramètres de la variation de la bande interdite en fonction de la température.

$E_g(0)$  est la hauteur de la BI à  $0^\circ\text{K}$ , T température en  $^\circ\text{K}$ , a et b sont des constantes.

**Figure III.4** Variation de la bande interdite du Si et Ge en fonction de la température



L'évolution de la variation de la largeur de la bande interdite du silicium et du germanium en fonction de la température est illustrée à la **figure III.4**. On peut remarquer que  $E_g$  dépend fortement de la température. En effet pour des températures plus élevées, on observe une décroissance sensible de la largeur de la bande interdite. [8]

Propriété à 300°K		Si	Ge
Largeur de bande interdite $E_g(\text{ev})$		1.12	0.67
Concentration d'atomes ( $/\text{cm}^3$ )		$5.10^{22}$	$4.42.10^{22}$
Concentration intrinsèque ( $/\text{cm}^3$ )		$1.45.10^{10}$	$2.4.10^{13}$
Mobilités intrinsèques ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )	$\mu_n$	1350	3900
	$\mu_p$	480	1900
Constantes diélectriques relatives $\epsilon_r$		11.7	10.3
Champ de claquage V/m		$-30.10^6$	$-8.10^6$

**Tableau III.2** Propriétés électriques de Si et Ge

### III.3.2 La conductivité

Une bonne conductivité thermique est nécessaire dans le substrat semi-conducteur, d'une part pour réduire la température du substrat par dissipation, et d'autre part pour assurer une température uniforme dans tout le substrat, afin d'améliorer la similitude du comportement des dispositifs de nature identique mais placés dans différentes positions dans le substrat semi-conducteur.

L'électronique d'état solide a pris le relais avec succès, grâce à sa plus haute densité d'intégration et à sa plus faible consommation d'énergie, ce qui ne rendait plus nécessaire aucune considération d'ordre thermique. Mais les technologies des circuits intégrés sur le silicium ont fortement évolué en densité d'intégration, et densité de puissance dissipée, tout en conservant le même type de substrat semi-conducteur.

De même, des nouveaux matériaux semi-conducteurs de plus large bande interdite et de plus importante conductivité thermique, tels que le *Si*, *C* et le *Diamant*, sont étudiés pour des applications à plus de 300°C. En ce qui concerne la gestion de la chaleur dans les circuits intégrés analogiques et mixtes, quelques techniques d'implémentation peuvent être appliquées afin de minimiser les gradients et les transitoires thermiques autour des structures les plus sensibles. [8]

Les semi-conducteurs y occupent un grand intervalle car leur conductivité dépend sensiblement de la température, mais elle varie surtout très fortement en fonction de la présence de petites quantités

d'impuretés bien choisies. Dans un monocristal de silicium intrinsèque, à la température ambiante quelques électrons ( $1,5 \cdot 10^{10}$  électrons pour  $5 \cdot 10^{22}$  atomes dans un  $\text{cm}^3$ ) sont excités thermiquement depuis la bande de valence vers la bande de conduction, et les électrons libres et les trous positifs ainsi créés contribuent ensemble à la conductivité du matériau, mais celle-ci reste assez faible.

Le courant dans un semi-conducteur (Si et Ge) étant en général la somme de celui dû au déplacement des électrons libres, et de celui dû au déplacement des trous, la conductivité  $\sigma$  est reliée à la densité des porteurs  $n$  et  $p$ , et à leur mobilité  $\mu$  par la relation :

$$\sigma(\mathbf{T}) = q(n\mu_n(\mathbf{T}) + P\mu_p(\mathbf{T})) \quad (\text{III. 1})$$

Où :

$q$  est la charge de l'électron.

$n$  et  $p$  sont les densités des électrons et des trous, et  $\mu$  est le coefficient qui, à une température donnée, relie la vitesse de dérive moyenne du porteur au champ électrique appliqué. [3]

### III.3. 3-notion de masse effective

Les surfaces de l'énergie sont des ellipsoïdes. Et on donne : le tableau ci-dessus

Matériau	$m_l$	$m_t$	$m^-$
Silicium(Si)	$0.98m_0$	$0.19 m_0$	$0.32 m_0$
Germanium(Ge)	$1.59 m_0$	$0.0815 m_0$	$0.22 m_0$

Avec  $m^- = (9m_l m_t^2)^{1/3}$

Où :

$m_l$  : est la masse effective longitudinale.

$m_t$  : est la masse effective transversale.

$m^-$  : est la masse effective de la densité d'état (masse réduite).

$m_0$  : est la masse de l'électron. Avec  $m_0=9.1 \cdot 10^{-31}$  kg

**III.3.4- Tableau des propriétés physiques du Si et Ge**

Propriétés	Silicium	Germanium
Structure	Diamant	Diamant
Densité (g /cm <sup>3</sup> )	2,328	5,3267
Constante diélectrique	11,9	16,0
Nc (cm <sup>-3</sup> )	2,8.10 <sup>19</sup>	1,04.10 <sup>19</sup>
Nv (cm <sup>-3</sup> )	1,04.10 <sup>19</sup>	6,0.10 <sup>18</sup>
Affinité d'électron	4,05	4,0
Energie de Gap à 300°K (eV)	1,12	0,66
Concentration intrinsèque des porteurs (cm <sup>-3</sup> )	1,45.10 <sup>10</sup>	2,4.10 <sup>13</sup>
Durée de vie minoritaire (s)	2,5.10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>
Mobilité des électrons (cm <sup>2</sup> .V <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	1500	3900
Mobilité des trous (cm <sup>2</sup> .V <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	450	1900
Indice de réfraction	3,44	3,97

**Tableau III.3.** Propriétés physiques du Si et Ge [8]**III.4- Les étapes pour obtenir un silicium de qualité électronique**

Le silicium existe essentiellement sous forme oxydée (silice, sable) et nécessite d'une part d'être réduit et d'autre part, d'être purifié afin d'obtenir un matériau de qualité électronique.

**III.4.1. Réduction de la silice**

On réalise une électrolyse dans un four à arc pour atteindre une température assez élevée pour faire fondre la silice. La silice est mélangée à du carbone.

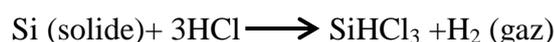
Réaction principale :



Le silicium obtenu a une pureté de 98%, il faut encore le purifier pour obtenir un matériau de qualité électronique. [25]

**III.4.2- Purification du silicium**

On va effectuer une purification chimique, une des méthodes consiste à faire une distillation à partir de SiHCl<sub>3</sub> (trichlorosilane) liquide à température ambiante.



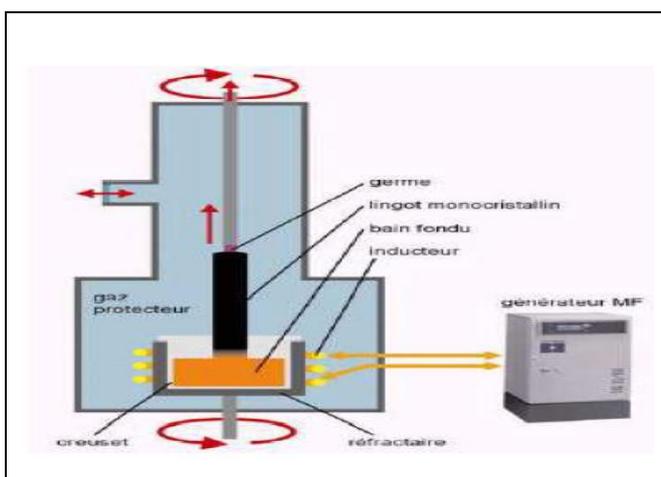
Le rendement de la réaction est égal à 90%, on a effectué une première purification car des précipités chlorés ne se mélangent pas au trichlorosilane. Puis  $\text{SiHCl}_3$  (qui a une température d'ébullition faible:  $31.8^\circ\text{C}$ ) est purifié par distillation fractionnée, il est plus volatil que les chlorures des principales impuretés. Ce trichlorosilane purifié est ensuite réduit pour redonner du silicium.



Après la distillation, la teneur en impuretés actives est inférieure à 1ppm, le silicium est alors de qualité électronique. Le silicium pur obtenu (donc intrinsèque) doit maintenant subir un double traitement à la fois d'enrichissement en matériau dopant afin d'en faire du silicium extrinsèque de type p ou n comportant une proportion d'une impureté connue et d'obtenir de plus un monocristal convenablement orienté. En effet, le silicium précédemment obtenu était poly-cristallin, il y a nécessité de le transformer en monocristallin pour améliorer sa conductivité. Cette opération est réalisée dans un four à tirage selon la procédure de **Czochralski**.

### III.4.3- Procédure de Czochralski

Dans le cas des oxydes utilisés notamment dans le cadre des applications laser, la méthode Czochralski est l'une des seules permettant d'obtenir de gros monocristaux de qualité optique suffisante. Le matériau à élaborer est d'abord porté à la fusion dans un creuset. Un germe monocristallin est approché du centre de la surface du bain, avec laquelle il est mis en contact. Le liquide remonte par capillarité le long du germe, créant une interface triple liquide-solide-gaz. Le germe est ensuite lentement tiré vers le haut, à des vitesses de l'ordre du millimètre par heure, pour former un monocristal. L'ensemble de la croissance est effectuée en maintenant le cristal en rotation, de manière à homogénéiser le bain et à contrôler la forme de l'interface solide/liquide. [25]



**Figure III.4.** Méthode de Czochralski



**Figure III.5.** Lingots de silicium monocristallin

La figure III.5. Présente 2 cristaux obtenus par la méthode Czochralski le premier à un diamètre de 150mm, le second à un diamètre de 200mm. [25]

Cependant, les simples cristaux de silicium développés par la méthode de Czochralski contiennent des impuretés puisque le creuset qui contient la fonte se dissout.

Pour certains dispositifs électroniques, en particulier ceux exigés pour des applications de puissance élevée, le silicium développé par la méthode de Czochralski n'est pas assez pur.

Pour ces applications, le silicium de flotter-zone (FZ-Si) peut être employé à la place.

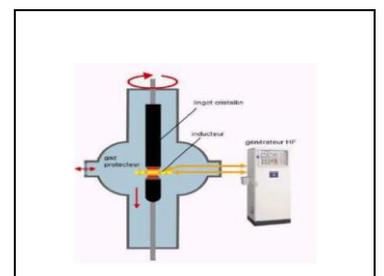
#### III.4.4-La fusion de zone

La fusion de zone permet de fabriquer des monocristaux de très haute pureté en comparaison avec les autres méthodes. Elle s'est donc imposée dans le domaine des semi-conducteurs (Si, Ge, ...). Elle est en cours de développement pour d'autres matériaux comme le SiC. La méthode consiste à faire fondre localement un lingot poly-cristallin en le faisant passer au travers d'une bobine (l'inducteur). Le passage du lingot au travers de l'inducteur se fait verticalement de haut en bas à une vitesse très lente. L'inducteur fait partie d'un circuit électrique oscillant, alimenté par un générateur HF. Le système inducteur-générateur à haute fréquence fonctionne à une fréquence comprise entre 1 et 3 MHz. Le courant alternatif dans le lingot cristallin, échauffant la zone du lingot située à l'intérieur de l'inducteur au-delà de sa température de fusion, ce qui le fait fondre. Selon le lingot la puissance du générateur HF est de l'ordre de 10 à 100 kW. La recristallisation en un lingot monocristallin de même diamètre a lieu sous la zone de fusion.

Le lingot effectue un mouvement de rotation afin que la matière fondue ne converge pas au milieu mais qu'elle se répartisse uniformément vers l'extérieur. Lors de la fusion, les matières étrangères diffusent vers le haut, ce qui donne sa grande pureté au monocristal. La vitesse de déplacement du lingot cristallin est de l'ordre du millimètre par minute, la fabrication du lingot monocristallin dure plusieurs heures.

Du point de vue des réglages, la fusion de zone est un mécanisme extrêmement complexe: la vitesse d'avancée, la vitesse de fusion, le volume de fusion, les forces centrifuges et la puissance du générateur HF sont des paramètres dépendants les uns des autres et qui doivent être accordés avec une extrême précision pendant toute la durée du processus. [25]

**Figure III.6 :** Fusion de zone



### ***III.4.5- Préparation des plaquettes***

#### ***III.4.5.1- Orientation et découpage***

Une fois on a enlevé les deux bouts du lingot du four de croissance, le bout supérieur sert à constituer le germe monocristallin pour la croissance suivante. Le bout inférieur contient une concentration d'impureté plus importante que dans le corps du lingot. Le lingot est ensuite rectifié au bon diamètre sur un tour pour donner un lingot parfaitement rond.

L'orientation cristalline du lingot est déterminée grâce à un appareil aux rayons X. Connaître cette orientation est nécessaire pour les étapes ultérieures de fabrication. En particulier, la séparation des circuits d'une plaquette les uns des autres, doit se faire d'un plan atomique. Un monocristal se coupe ou se clive le long d'un de ses plans réticulaires. L'orientation utilise les indices de Miller, un monocristal cubique contient trois plans atomiques: (100), (110) et (111).

#### ***III.4.5.2. Découpage et polissage***

Pour scier des plaquettes à partir d'un lingot, on utilise une scie diamantée à diamètre intérieur, elle a la particularité de provoquer le minimum de casse. Le lingot à scier est collé par son méplat primaire sur une barre afin de maintenir les plaquettes lors du sciage. On utilise aussi d'autres types de scies à fil diamanté. Quelques plaquettes sont enlevées du lot pour subir des tests et des mesures, à savoir, le diamètre, la planéité et l'épaisseur; on vérifie aussi l'homogénéité de la résistance.

Après le sciage, les plaquettes sont nettoyées à l'eau dés ionisée. On leur meule les arêtes vives pour les adoucir. Elles subissent ensuite un rodage mécanique à la poudre d'alumine. On les charge dans une machine à action orbitale où elles tournent entre deux surfaces lubrifiées avec de la poudre d'alumine. Après ce rodage, les irrégularités à la surface sont inférieures à 3 microns. [25]

## **III.6- LOGICIEL DE SIMULATION : PC1D**

### **III.6 .1- Introduction**

Durant ces dernières années, et à cause des coûts élevés de l'expérimentation (méthodes d'élaboration et techniques de fabrication), les chercheurs se sont orientés vers la simulation. Il existe principalement quatre types de simulateurs, nous citons à titre d'exemple, les simulateurs fonctionnels ou logiques, les simulateurs électriques ou analogiques, les simulateurs technologiques et ceux de composants ou de dispositifs, citons PC1D, ORIEL, PVSYST, UQAQ, AMPS1D, RAUPV2, SCAPS.

La simulation des cellules solaires à l'aide de ces différents simulateurs consiste à comprendre le comportement de ces dispositifs en fonction des paramètres tels que le dopage et les épaisseurs des régions sur les caractéristiques de la cellule solaire ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $\eta$ , FF).

Dans notre cas, nous avons utilisé le simulateur PC1D.

### III.6.2- Le simulateur PC1D

Le PC1D (personnel computer one-dimensionnel) est l'un des programmes qui a été élaboré pour modéliser et exploiter les composants semi-conducteurs, notamment les composants photovoltaïques. Il est capable de résoudre les équations couplées non linéaires qui gouvernent les phénomènes physiques du dispositif étudié. A l'aide du PC1D, la compréhension des cellules solaires et leurs phénomènes physiques internes tels que le mouvement des porteurs minoritaires la recombinaison et la photo-génération, devient aisée.

PC1D fonctionne sous Windows 3011 ou bien Windows 95, il exige au moins le microprocesseur 80387 et 80386 CPU, seul le fichier PC1D.EXE est nécessaire aux calculs demandés. Il est doté aussi d'un fichier d'aide PC1D.HLP et comprend d'autres fichiers additionnels contenant les paramètres de plusieurs semi-conducteurs, tels que le **GaAs**, **a-Si**, **AlGaAs**, **Si**, **InP**, et **Ge**. Il contient aussi trois spectres solaires standards (**AM0**, **AM1.5 G**, **AM1.5 D**) plusieurs exemples sont aussi fournis afin de mieux exploiter le PC1D, aucun programme n'est exigé pour leur installation. [26]

Le programme PC1D a été élaboré par Paul A.Basaure durant ses travaux de recherche à la faculté d'ingénierie électrique à l'université d'Iowa, et fut rendu public, pour la première fois, après l'avoir annoncé à la 18<sup>ème</sup> conférence sur le photovoltaïque IEEE PVSC (décembre 1985). La version 1 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).

La version 2 du PC1D a été améliorée par le même programmeur (Paul A.Basaure) au sein du département photovoltaïque aux laboratoires nationaux de Sandia, Cette version a eu sa démonstration en septembre 1988, et rendu public juste après son annonce à la conférence IEEE PVSC (Mars 1989). Le programme incluait une nouvelle interface ou boîte de dialogue qui sert à entrer les données, et une autre pour la souris. A l'aide de cette version on peut modéliser les hétéro-structures. Plusieurs additifs ont été ajoutés à cette version, telle que la texturation des surfaces de cellules solaires.

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

La version 4 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 est 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. On trouve aussi dans cette version des corrections et des ajustements physiques, telles que le modèle de mobilité des porteurs majoritaires, la correction de coefficient de

recombinaison bande-a-bande ( $9.5E-14$  à  $9.5E-15\text{cm}^3/\text{s}$ ), du rapport  $N_c / N_v$  (2.8 à 1.06), et l'absorption par les porteurs libres, pour les niveaux de dopage élevés. Parmi les avantages, 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 numériques, cette version est capable d'offrir des résultats précis sous forme graphique et forme tableau en mode Batch. [17]

### III.6.3 L'environnement de PC1D

L'utilisation de PC1D est très pratique. En jouant sur les paramètres variables (largeur, surface, dopage, etc...). Les résultats de la simulation, sont très proches des résultats expérimentaux, donc c'est un gain de temps et d'argent.

La fenêtre du logiciel PC1D est présentée sur la Figure III.8, ce logiciel se divise en quatre parties, les trois premières 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.

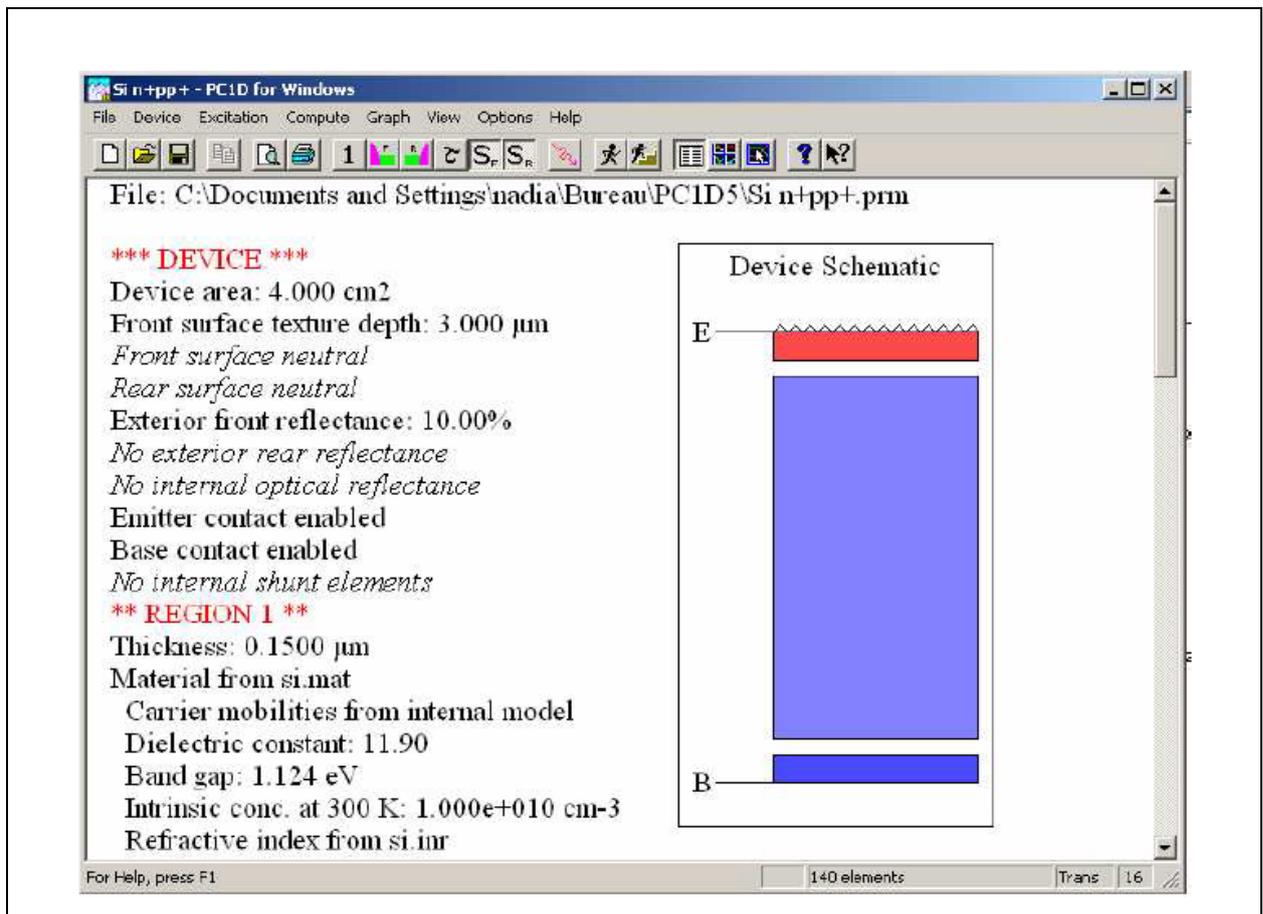


Figure III.8. Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique [26]

### III.6.4 -Les paramètres du dispositif (Device)

- **Aire du dispositif (Device)** : la surface du dispositif est très importante car elle influe sur le photo courant d'une manière appréciable.
- **Surface texturée** : les surfaces texturées utilisées dans toutes les structures étudiées sont composées de micro pyramides inversées de profondeur (depth)  $3\mu\text{m}$  et d'angle facial  $54,74^\circ$ . La texturation est très importante, car elle permet de diminuer les pertes par réflexion du rayonnement incident.
- Les deux faces sont considérées comme neutres, du fait qu'il n'y a pratiquement pas de charges aux interfaces, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de barrière de potentielle aux surfaces.
- Nous n'avons pas introduit de couches antireflets, car elle est remplacée par la texturation.
- **Réflectance optique interne** : elle est négligée dans notre simulation, nous considérons que les surfaces sont spéculaires et non diffuses c'est-à-dire non rugueuses.
- **Par défaut, l'émetteur et la base** sont connectés au circuit, tandis que le collecteur est déconnecté.
- **Quatre résistances shunt peuvent être introduites**, chacune d'elle peut être conducteur, diode ou condensateur. Dans notre cas nous considérons qu'il n'y a pas d'élément qui peut shunter le circuit. [26]

### III.6.5- Les paramètre des régions

- **L'épaisseur de l'émetteur** est relativement mince par rapport à la base.
- Le matériau utilisé: les paramètres qui le décrivent, sont stockés dans des fichiers d'extension (\*.mat), ils sont fourni avec le logiciel dans une diskette. Les paramètres stockés dans ce fichier sont :
  - La mobilité.
  - La constante diélectrique.
  - L'énergie de gap (eV).
  - La concentration intrinsèque ( $\text{cm}^{-3}$ ).
  - L'indice de réfraction.
    - Coefficient d'absorption.
    - Absorption des porteurs libres.
- **Type et concentration de dopage** : de type n ou p, la concentration maximale est de  $10^{19}\text{cm}^{-3}$ . Ce logiciel présente quatre profil de dopages : le profil uniforme, le profil exponentiel, le profil gaussien et le profil erfc.

- **Les recombinaisons en volume** : le modèle utilisé est basé sur la statistique de Read Shockley-Hall décrivant les recombinaisons par pièges, situées dans la bande de valence.
- **Les recombinaisons face avant et arrière.** [26]

### III.6.6- Les paramètres d'excitation

- Deux fichiers intégrés dans le logiciel permettent de simuler la caractéristique courant -tension et autres caractéristiques en utilisant le fichier « One-Sun.exc », ou la réponse spectrale en utilisant le fichier « Scan-qe.exc ».
- Le mode d'excitation : il y a trois modes d'excitation (en équilibre, stationnaire et transitoire). Pour une bonne simulation numérique, le mode transitoire est vivement recommandé.
- Dans la plus part des cas on choisit la température ambiante,  $T=25^{\circ}\text{C}$ .
- Il y a deux sources de Thevenin identiques, l'une pour la base et l'autre pour le collecteur.
- Seulement la face avant est éclairée (coté n), par un flux lumineux d'une intensité de  $0,1 \text{ W/cm}^2$ . Pour avoir la réponse spectrale, le logiciel fait un balayage sur l'intervalle de longueurs d'onde compris entre [300, 1200] nm. Pour avoir la caractéristique, il utilise directement le fichier d'aire masse « am 15g.spc ».

La seconde source est désactivée, car la face arrière n'est pas éclairée dans notre cas.

### III.6.7- Les résultats

Les résultats que nous pouvons visualiser en utilisant le fichier d'excitation « One- Sun.exc » sont :

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

Et ceux obtenus avec le fichier « Scan-qe.exc » sont :

- La valeur de courant de court- circuit.
- La valeur de la puissance maximale. [18]

## **CHAPITRE IV: SIMULATION DE LA CELLULE SOLAIRE A BASE DE SILICIUM(Si) ET DE SILICIUM GERMANIUM. (Si/Ge)**

### **IV.1.Introduction**

Dans le premier chapitre nous avons présentés les différentes structures de la cellule solaire ainsi que leurs avantages et inconvénients Dans le présent chapitre on a étudié deux types de cellule solaire monocristalline et hétéro-structure. La premier étude a été fait sur la cellule monocouche à base de silicium monocristallin, nous avons optimisé les paramètres géométriques et de dopage de la cellule a fin d'eu améliore ces performances.

Dans la seconde étude, on a étudié une cellule à base de silicium monocristallin dopée germanium, l'effet du dopage a été pris en considération. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux obtenus dans la première étude.

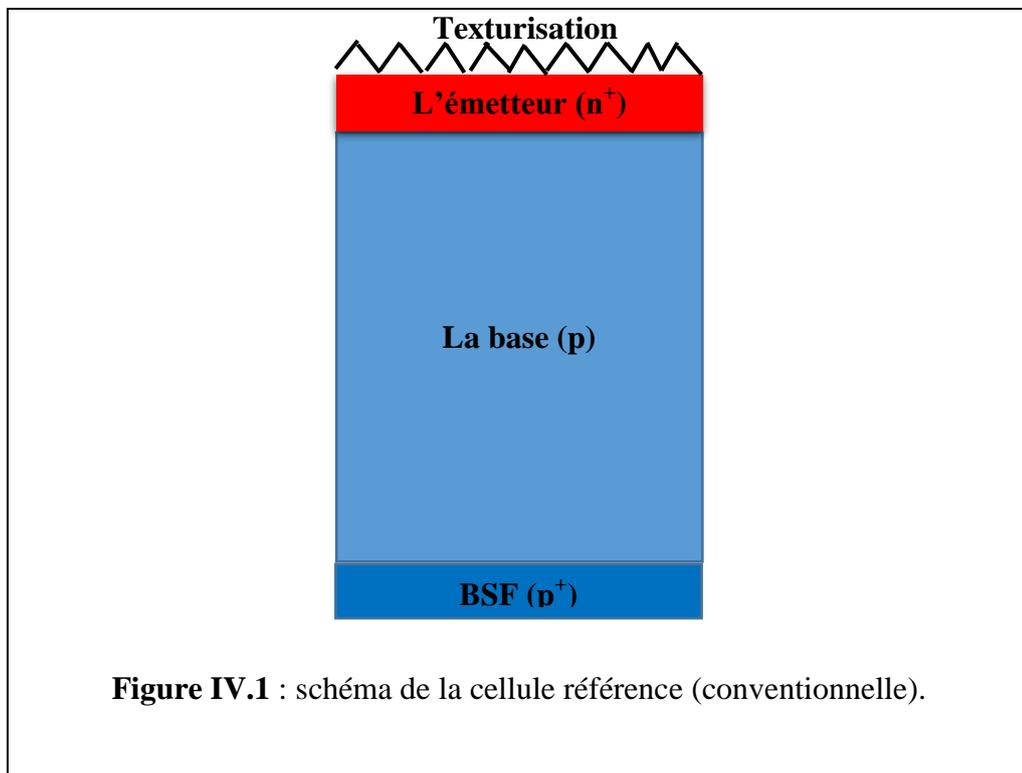
## IV.2. Simulation de la cellule photovoltaïque à base de silicium (Si)

### IV.2.1. Structure simulée et paramètres

#### IV.2.1.1. Structure simulée

La structure de la cellule utilisée pour la simulation est de type n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup> de surface 1 cm<sup>2</sup> avec une texturisation à la surface avant.

Pour simuler l'influence des différents paramètres, nous avons tout d'abord défini une cellule solaire de référence (conventionnelle) avec un ensemble de paramètres fixes, puis nous avons fait varier les paramètres un par un (les autres restant fixes) afin d'analyser leur influence sur les caractéristiques de la cellule solaire. La figure IV-1 représente la structure de la cellule de référence utilisée pendant la simulation.



**IV.2.1.2. Paramètres de la structure simulée**

Les paramètres de la cellule de référence sont donnés dans le tableau IV.1

Couche antireflet	$n_{\text{car}}$	2.03
	$d_{\text{car}}$ (nm)	75
Texturisation	Angle ( $^{\circ}$ )	54.74
	Depth ( $\mu\text{m}$ )	3
Emetteur	L'épaisseur ( $\mu\text{m}$ )	0.5
	Dopage ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2.10^{20}$
	Profile de diffusion	Erfc
Base	Concentration ( $\text{cm}^{-1}$ )	$3.10^{16}$
	Tau de recombinaison ( $\mu\text{s}$ )	30
	L'épaisseur ( $\mu\text{m}$ )	150
BSF	L'épaisseur ( $\mu\text{m}$ )	2
	Dopage ( $\text{cm}^{-3}$ )	$5.10^{18}$
Passivation	Surface avant ( $\text{cm/s}$ )	$10^5$
	Surface arrière ( $\text{cm/s}$ )	Non influente (présence du BSF)

**Tableau IV.1 :** Paramètre de la cellule de référence.

L'épaisseur de La cellule conventionnelle est de  $150\mu\text{m}$  et l'épaisseur de l'émetteur est  $0.5\mu\text{m}$  qui est fortement dopé ( $10^{19} \text{cm}^{-3}$ ). Le dopage à la base était à  $3.10^{16}\text{cm}^{-3}$  avec un taux de recombinaison de  $30\mu\text{s}$ , l'épaisseur de la BSF est égale à  $2 \mu\text{m}$  dopé à  $5.10^{18}\text{cm}^{-3}$ . la vitesse de recombinaison sur la surface avant est égale  $10^5 \text{cm/s}$  avec la négligence de la vitesse sur la surface arrière à cause de la présence de la BSF.

**IV.2.2. Exploitation des résultats de la simulation**

A partir de la cellule de référence décrite précédemment, Nous avons simulé une cellule de même type n+ p p+ de surface  $1 \text{ cm}^2$  avec une texturation à la surface avant, de profondeur (depth)  $3 \mu\text{m}$  et d'angle facial  $54,74^\circ$ . Pour optimiser le captage du rayonnement nous avons tout d'abord varié l'épaisseur de la cellule, ainsi la variation pour la profondeur et le dopage de l'émetteur et de BSF, aussi le dopage de la base et la durée de vie des porteurs minoritaires. Puis nous avons analysé l'influence de la vitesse de recombinaison sur la face avant pour déterminer les meilleurs paramètres géométrique de la cellule.

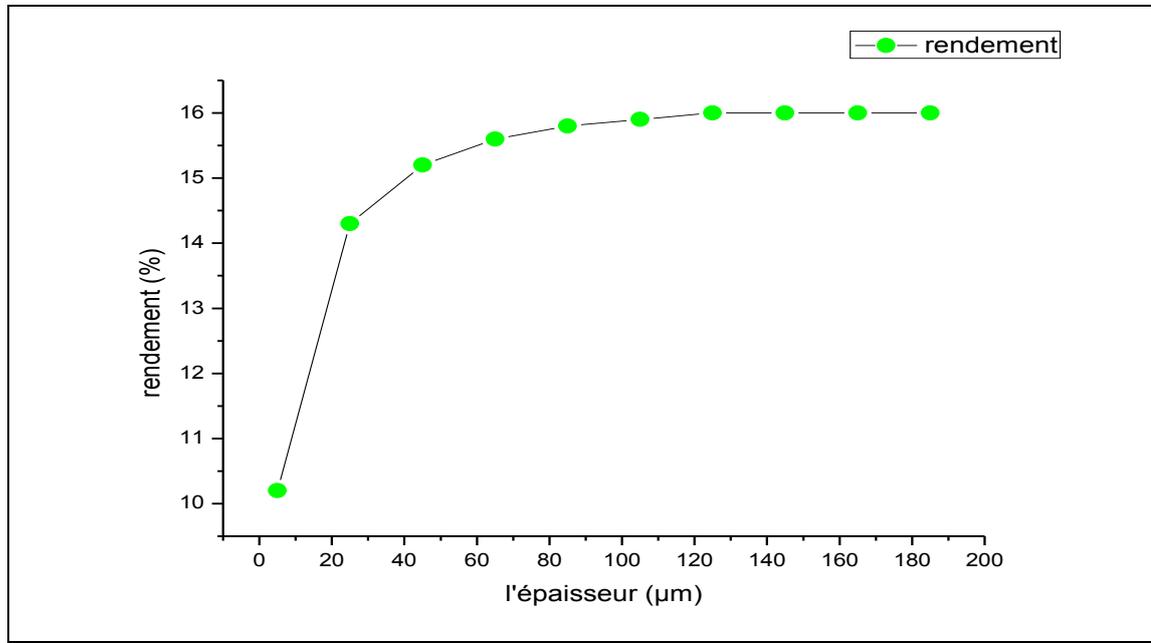
L'ensemble des variations est résumé dans le tableau IV.2.

Paramètre	Valeur minimale	Valeur maximale
épaisseur de la cellule	5 $\mu\text{m}$	200 $\mu\text{m}$
épaisseur de l'émetteur	0.1 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$
dopage de l'émetteur	$10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$2.10^{21} \text{ cm}^{-3}$
dopage de la base	$10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$10^{17} \text{ cm}^{-3}$
durée de vie des porteurs minoritaires	0.1 $\mu\text{s}$	1000 $\mu\text{s}$
dopage du BSF	$10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$5.10^{19} \text{ cm}^{-3}$
épaisseur du BSF	1 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$
vitesse de recombinaison face avant	10 $\text{cm} / \text{s}$	$10^7 \text{ cm} / \text{s}$

**Tableau IV.2 :** Paramètres variables pendant la simulation

#### IV.2.2.1. Influence de l'épaisseur de la cellule sur le rendement

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de la cellule sur le rendement nous avons varié ce dernier et fixé les autres paramètres et la figure IV.2 représenté la variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la cellule solaire.

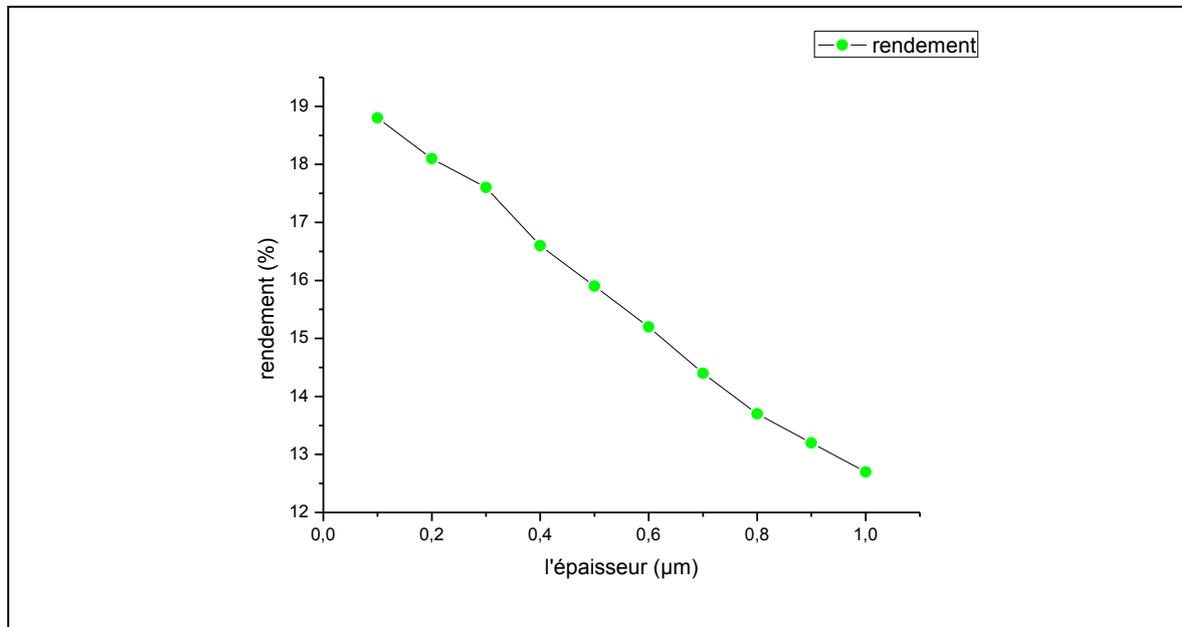


**Figure IV.2 :** Variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la cellule solaire

D'après le résultat obtenu (Figure.IV.2), nous pouvons conclure que l'épaisseur de la cellule est un facteur important pour l'absorption des photons, pour cette raison nous avons choisi une épaisseur de 100μm pour un bon rendement et pour toutes les autres simulations qui suivent.

#### IV.2.2.2. Influence de l'épaisseur de l'émetteur n+ sur le rendement

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de l'émetteur de la cellule sur le rendement nous avons varié ce dernier et fixé les autres paramètres et la Figure IV.3 représente la variation de rendement en fonction de l'épaisseur de l'émetteur n+



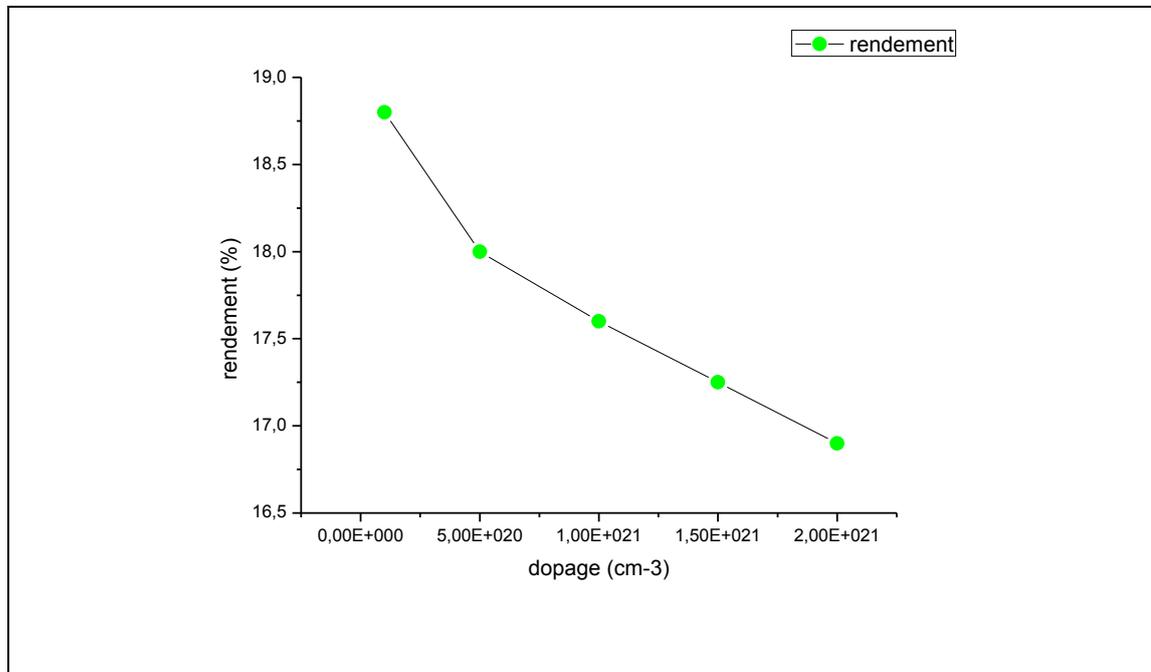
**Figure IV.3 :** variation de rendement en fonction de l'épaisseur l'émetteur n+

D'après les résultats obtenus (Figure IV.3), nous avons choisi un émetteur de 0,1 μm pour un bon rendement et pour toutes les autres simulations qui suivent, cela est dû au rendement élevé obtenu par rapport aux autres épaisseurs plus grandes ( $e > 0,1 \mu\text{m}$ ).

Les nouveaux émetteurs utilisés actuellement sont dopés à  $10^{19} \text{cm}^{-3}$  et nécessitent une faible épaisseur de l'ordre de 0,1 μm. Ce type d'émetteur est appelé émetteur transparent et dispose d'un phénomène de diffusion très important.

### IV.2.2.3. Influence du dopage de l'émetteur n+ sur le rendement

Pour étudier l'influence de dopage de l'émetteur de la cellule sur le rendement nous avons varié ces derniers et fixé les autres paramètres. La FigureIV.4 représenté la variation de rendement en fonction de dopage du l'émetteur.



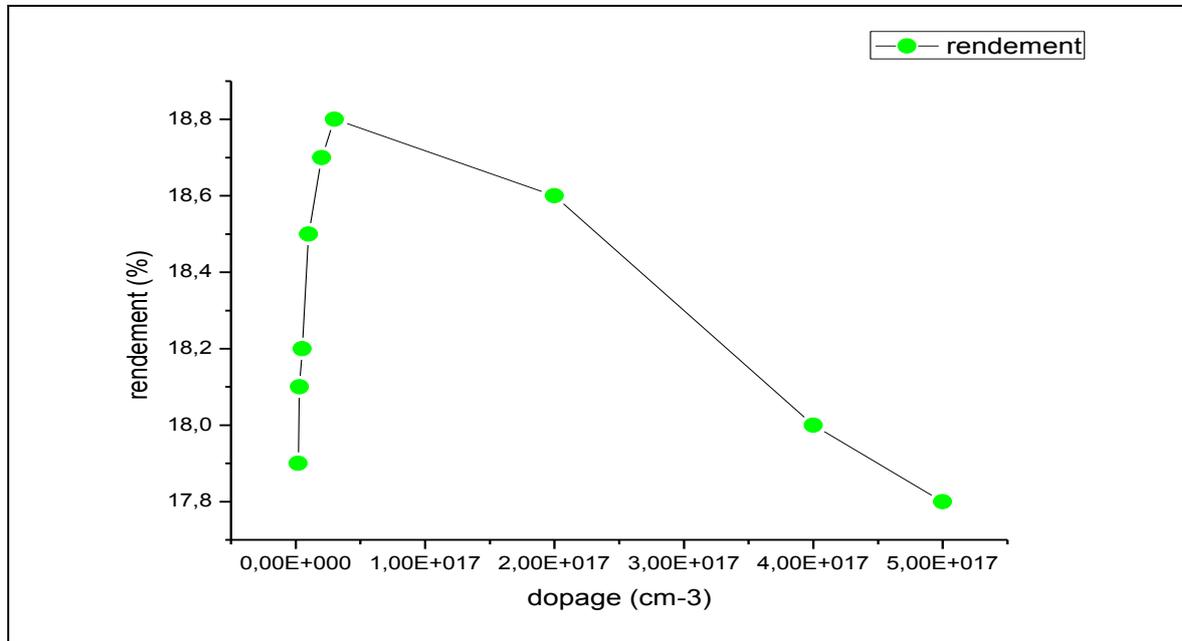
**FigureIV.4:** variation de rendement en fonction de dopage de l'émetteur.

D'après les résultats obtenus (Figure.IV.4), La variation du rendement est remarquable d'après cette figure nous constatons que le rendement prend sa valeur optimale pour un dopage de  $10^{20} \text{cm}^{-3}$  nous avons choisi cette valeur pour un bon rendement et pour toutes les autres simulations qui suivent.

Pendant la simulation nous remarquons que l'élévation du niveau de dopage de l'émetteur diminue de rendement de la cellule. On fait le dopage fait diminuer la hauteur de la barrière de potentiel. Une croissance du dopage de l'émetteur conduit à une dégradation des performances.

#### IV.2.2.4. Influence du dopage de la base p sur le rendement

Pour étudier l'influence de dopage de la base de la cellule sur le rendement nous avons varié ces derniers et fixé les autres paramètres et la figure IV.5 représenté la variation de rendement en fonction de dopage de la base.



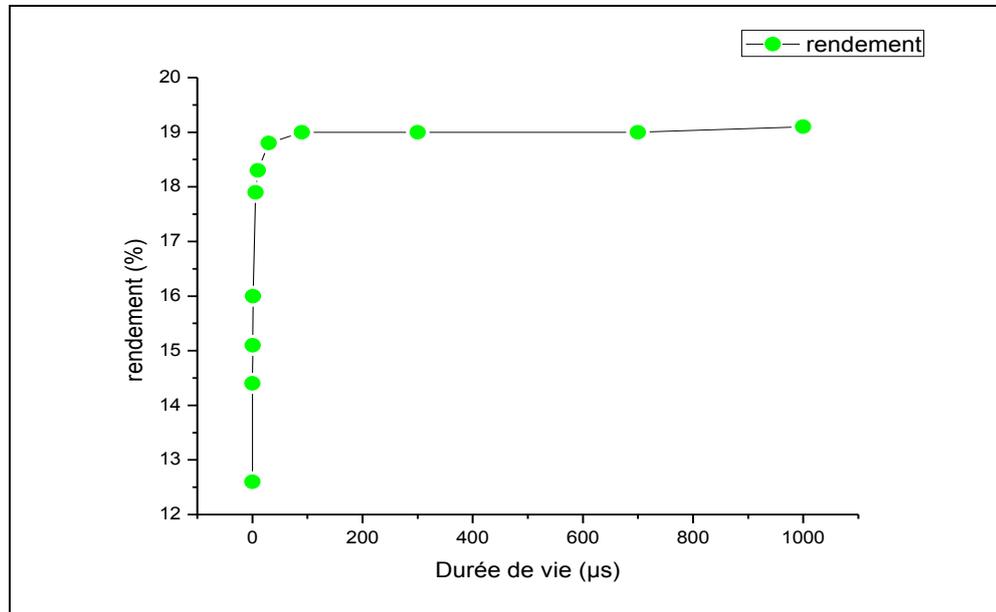
**Figure IV.5:** Evolution du rendement en fonction de dopage de la base.

D'après les résultats obtenus (Figure.IV.5) On remarque que le rendement en fonction du dopage de la base prend une valeur maximale à  $3.10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , ce qui est due l'effet considérable du dopage élevé (excès des recombinaisons). Après, il commence à diminuer.

Donc nous avons choisi la concentration de  $3.10^{16} \text{ cm}^{-3}$  pour un bon rendement qui présente un bon rendement pour la suite de notre simulation.

#### IV.2.2.5. Influence du taux de recombinaison (la durée de vie) sur le rendement

Pour étudier l'influence du taux de recombinaison sur le rendement nous avons varié ce dernier et fixé les autres paramètres et la figure IV.6 représente la variation de rendement en fonction du taux de recombinaison.



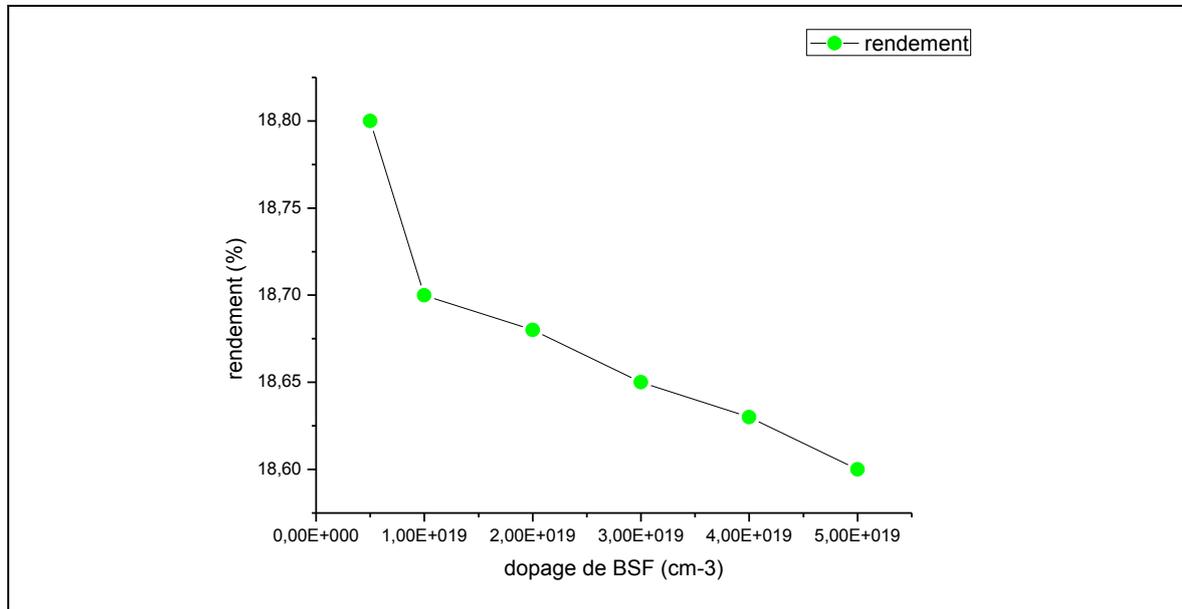
**Figure IV.6 :** Evolution du rendement en fonction de la durée de vie.

D'après les résultats obtenus, on peut déduire que le rendement dépend fortement de la durée de vie. Dans Figure IV.6, on remarque une augmentation du rendement avec l'augmentation de la durée de vie qui est due à l'élimination des recombinaisons en volume.

Donc nous avons choisi un taux de  $30\mu\text{m}$  pour le meilleur rendement et pour les autres simulations.

#### IV.2.2.6. Influence de dopage de la BSF sur le rendement

Pour étudier l'influence de dopage de la couche de BSF sur le rendement de la cellule nous avons varié ce dernier et fixé les autres paramètres et la figure IV.7 représente la variation de rendement en fonction de dopage de la BSF.



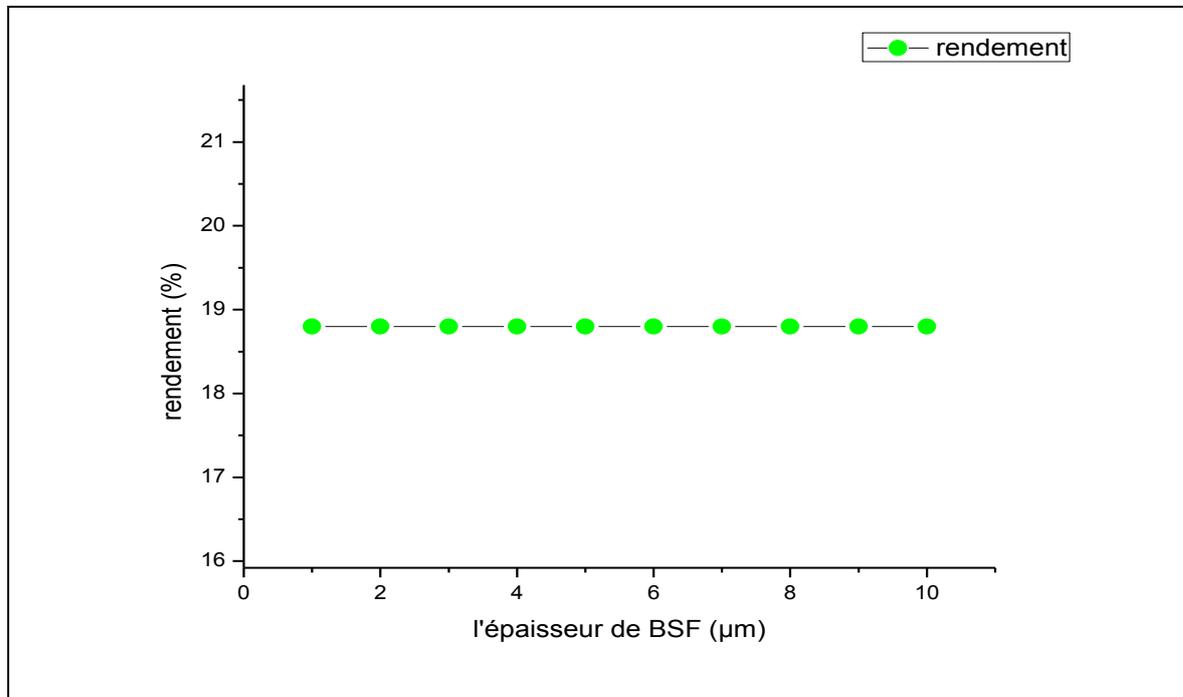
**Figure.IV.7 :** Evolution du rendement, en fonction de dopage de la BSF.

Nous pouvons constater qu'il y a une valeur optimale du dopage de la couche de BSF qui correspond au maximum de rendement de la cellule. Pour cette cellule de type n+ p p+ le dopage optimal est égal à  $5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , pour le bon rendement.

Si la BSF est faiblement dopée, la hauteur de barrière de potentiel de la jonction p-n est réduite. Dans ce cas, le champ électrique de la jonction p-n est moins fort et les conditions de collecte des porteurs sont mauvaises.

#### IV.2.2.7. Influence de l'épaisseur de la BSF sur le rendement

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de la couche de BSF sur le rendement nous avons varié ce dernier et fixé les autres paramètres et la figure IV.8 représente la variation de rendement en fonction de l'épaisseur de la BSF.

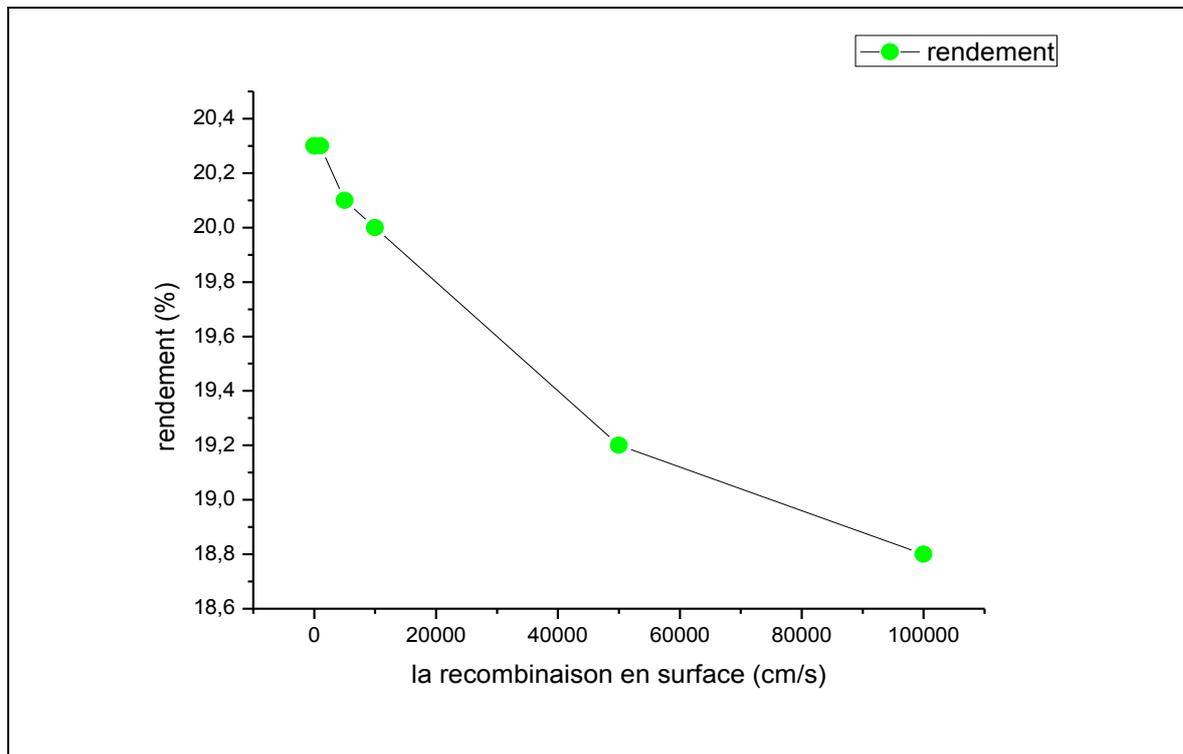


**Figure IV.8** représente la variation de rendement en fonction de l'épaisseur de la BSF.

L'épaisseur de BSF doit être importante pour assurer une réduction de la recombinaison sur les contacts au métal, D'après les résultats obtenus (Figure IV.8) on remarque que le rendement en fonction de l'épaisseur de BSF prend une valeur constante proche de  $2\mu\text{m}$ . Nous avons choisi cette  $2\mu\text{m}$  pour un bon rendement et pour toutes les autres simulations qui suivent.

#### IV.2.3.8 Influence de la recombinaison en surface avant sur le rendement

Pour étudier l'influence de la recombinaison en surface avant sur le rendement nous avons varié ce dernier et fixé les autres paramètres et la figure IV.9 représente la variation de rendement en fonction de la recombinaison en surface.



**Figure IV.9** Evolution du rendement, en fonction de la recombinaison en surface avant.

D'après les résultats obtenus (Figure IV.9), nous avons constaté que la vitesse de recombinaison en surface est l'un des paramètres qui influence sur le rendement des cellules solaires. Mais la grande vitesse de recombinaison peut dégrader le rendement, par contre si la vitesse de recombinaison en surface est inférieure à 1000 cm/s, donc elle n'a pas d'influence importante sur les caractéristiques de la cellule.

#### IV.2.2.9. Caractérisation I-V

La cellule solaire simulée est à base de silicium monocristallin d'épaisseur  $100\mu\text{m}$  dopée à  $10^{16}\text{cm}^{-3}$ , de face avant (face éclairée) texturée en pyramides inversées, cette texturation permet une réduction importante du coefficient de réflexion et ainsi des pertes optiques dans la cellule. La couche de BSF est d'épaisseur  $2\mu\text{m}$  dopée à  $10^{18}\text{cm}^{-3}$ . Les résultats obtenus sont :

$$P_{\text{max}} = 20.3\text{mW} \quad I_{\text{CC}} = 36.2 \text{ mA} \quad V_{\text{CO}} = 660.7 \text{ mV} \quad \eta = 20.3\%.$$

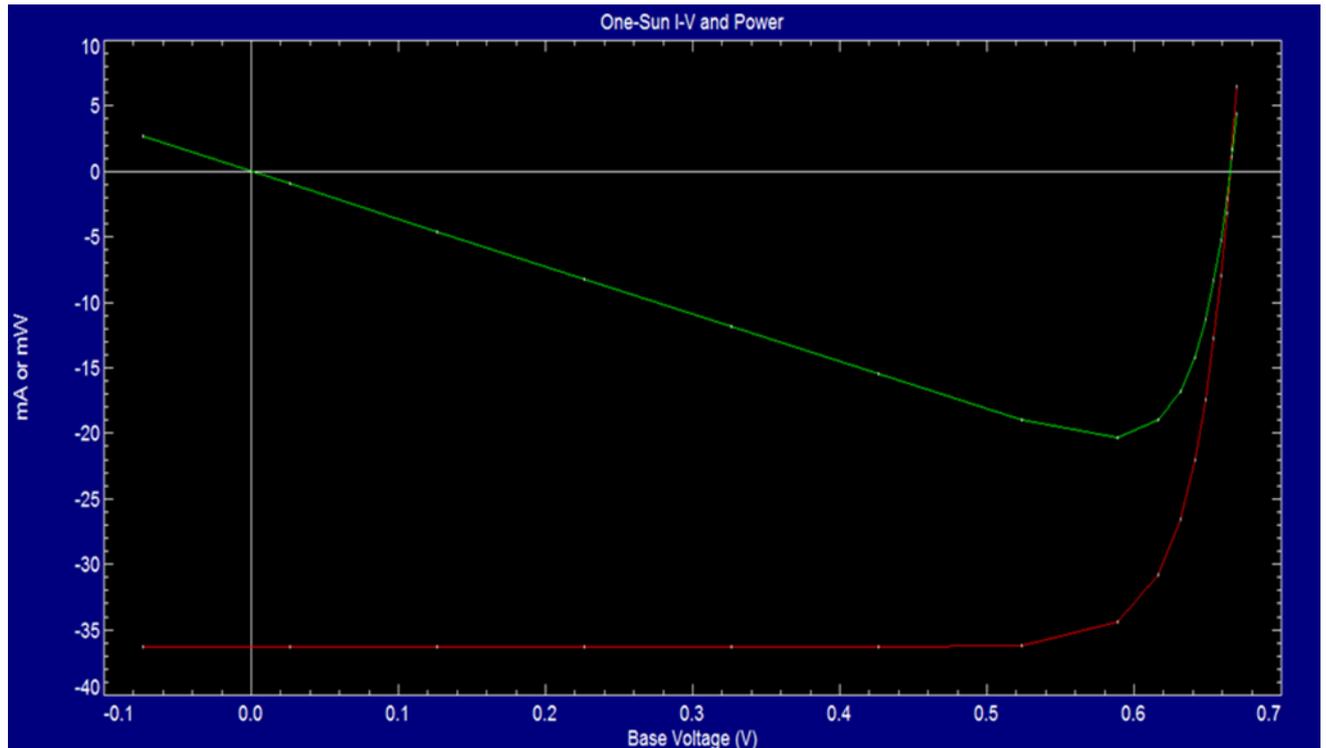


Figure IV.10 La caractéristique I(V) de la cellule solaire à base silicium monocristallin.

Le tableau suivant résume les valeurs optimales de la cellule qui peuvent donner un bon rendement :

Couche antireflet	$n_{car}$	2.03
	$d_{car}$ (nm)	75
Texturisation	Angle ( $^{\circ}$ )	54.74
	Depth ( $\mu\text{m}$ )	3
Emetteur	L'épaisseur ( $\mu\text{m}$ )	0.1
	Dopage ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1.10^{20}$
	Profile de diffusion	Erfc
Base	Concentration ( $\text{cm}^{-3}$ )	$3.10^{16}$
	Tau de recombinaison ( $\mu\text{s}$ )	30
	L'épaisseur ( $\mu\text{m}$ )	100
BSF	L'épaisseur ( $\mu\text{m}$ )	2
	Dopage ( $\text{cm}^{-3}$ )	$5.10^{18}$
Passivation	Surface avant ( $\text{cm/s}$ )	1000
<b>Le rendement (%)</b>		<b>20.3</b>

**Tableau IV.3 :** les conditions optimales pour une bonne cellule solaire.

### IV.3. Simulation d'une cellule solaire à base de silicium germanium

Pour pouvoir récupérer les photons d'énergie plus basse que le gap du silicium, il faut trouver un autre matériau semi-conducteur, qui a une énergie de gap plus basse et par conséquent un plus grand coefficient d'absorption dans la partie infrarouge. Le matériau qui répond le mieux à ces exigences est le germanium.

#### IV.3.1 structure simulée et paramètres

Dans cette partie on utilise la même structure étudiée dans la première partie, seulement en ajoute le germanium sous le silicium et en varie seulement l'épaisseur et la concentration de germanium ajouté.

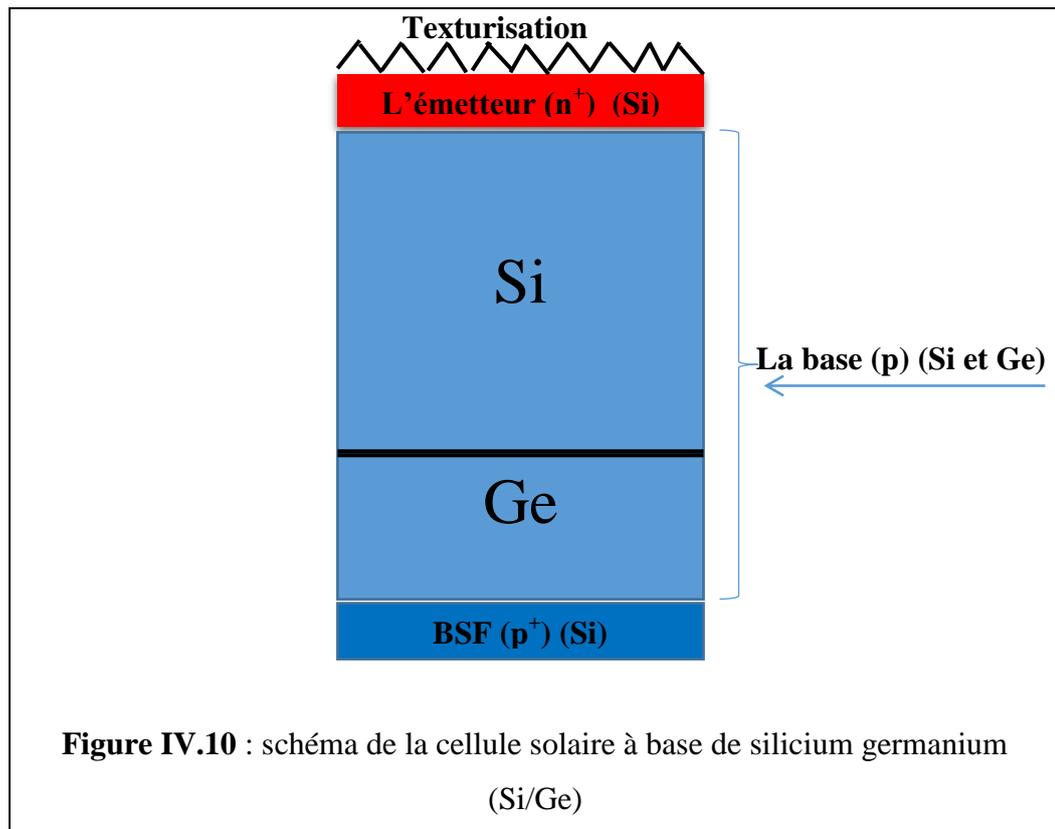
##### IV.3.1.1 paramètres de la cellule simulée

Couche antireflet		$n_{car}$	2.03
		$d_{car}$ (nm)	75
Texturisation		Angle ( $^{\circ}$ )	54.74
		Depth ( $\mu\text{m}$ )	3
Emetteur		L'épaisseur ( $\mu\text{m}$ )	0.1
		Dopage ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1.10^{20}$
		Profile de diffusion	Erfc
Base	Si	Tau de recombinaison ( $\mu\text{s}$ )	30
		Concentration ( $\text{cm}^{-3}$ )	$3.10^{16}$
		L'épaisseur ( $\mu\text{m}$ )	100
	Ge	Tau de recombinaison ( $\mu\text{s}$ )	30
		L'épaisseur ( $\mu\text{m}$ )	<b>Varie de 5 à 150</b>
		Concentration ( $\text{cm}^{-3}$ )	<b>Varie de <math>10^{16}</math> à <math>10^{20}</math></b>
BSF		L'épaisseur ( $\mu\text{m}$ )	2
		Dopage ( $\text{cm}^{-3}$ )	$5.10^{18}$
Passivation		Surface avant ( $\text{cm/s}$ )	1000
		Surface arrière ( $\text{cm/s}$ )	Non influente (présence du BSF)

**Tableau IV-4** : paramètres théorie de la cellule solaire à base de Si/Ge

#### IV.3.1.2. structure simulée

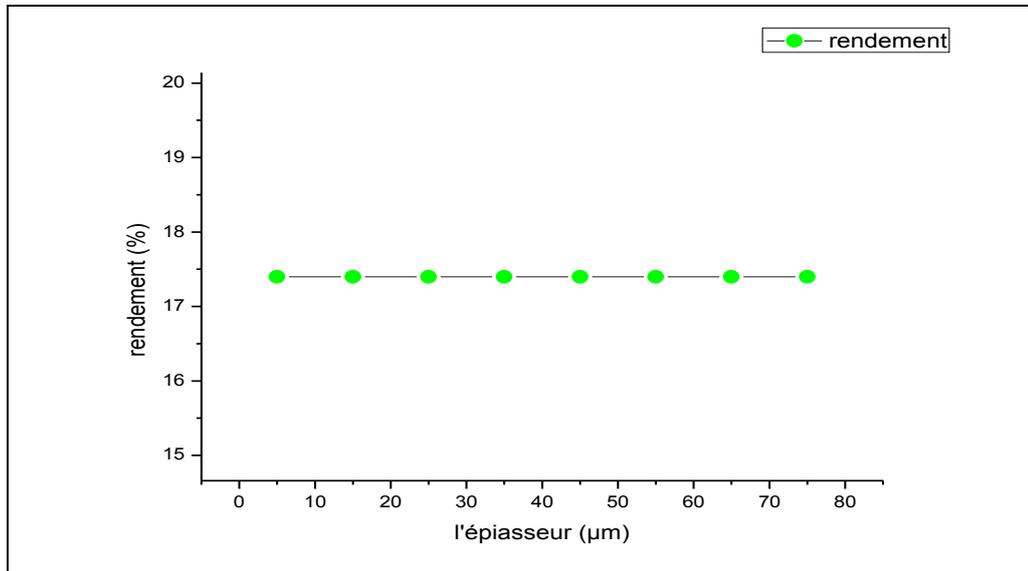
A partir de la cellule de référence décrite dans la simulation d'une cellule solaire à base de silicium, Nous avons simulé une nouvelle cellule de type n+ pp p+ de surface  $1 \text{ cm}^2$  avec une texturation à la surface avant de profondeur (depth)  $3 \mu\text{m}$  et d'angle facial  $54,74^\circ$ . pour optimiser le captage du rayonnement nous avons tous d'abord fait varier seulement l'épaisseur et le dopage de germanium. Puis nous avons analysé l'influence de ces dernières sur le rendement de la cellule pour avoir l'impact de l'influence de germanium sur le rendement d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin. Le schéma au-dessous représenté la nouvelle structure simulé.



### IV.3.2. Exploitation des résultats de la simulation

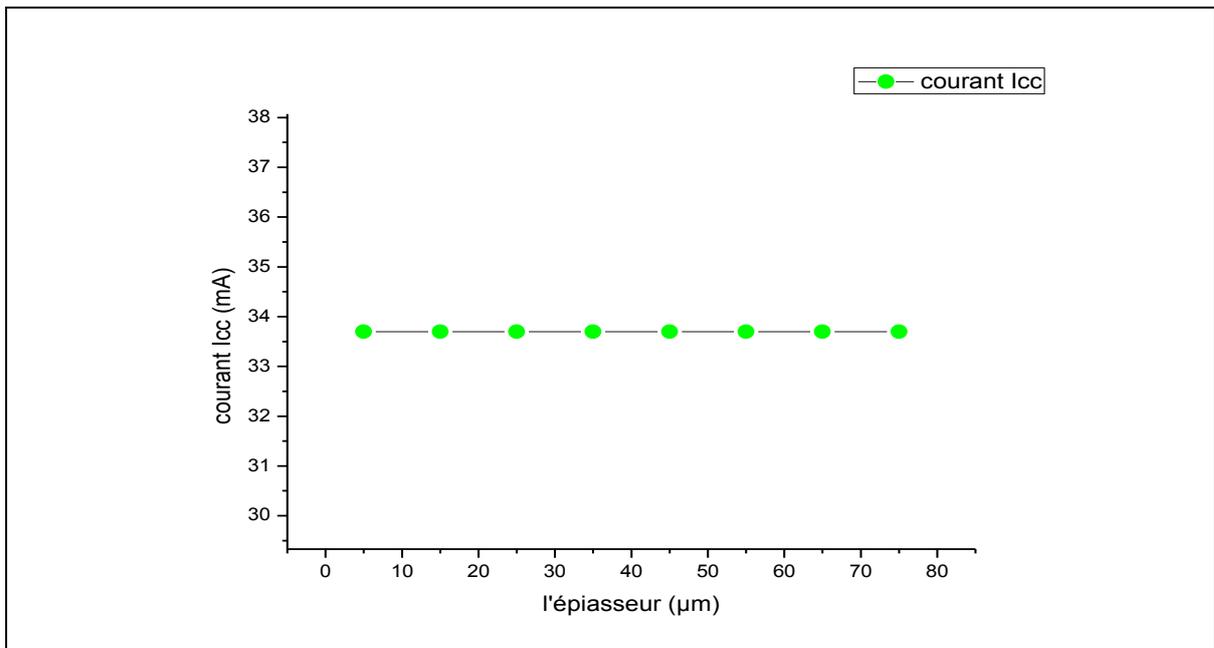
#### IV.3.2.1. Influence de l'épaisseur de germanium sur le rendement, $I_{CC}$ , $V_{CO}$

Pour examiner l'influence de l'épaisseur de la couche de germanium sur le rendement nous avons varié ce dernier et on fixe la concentration de germanium. La figure IV.11 représenté la variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche de germanium.

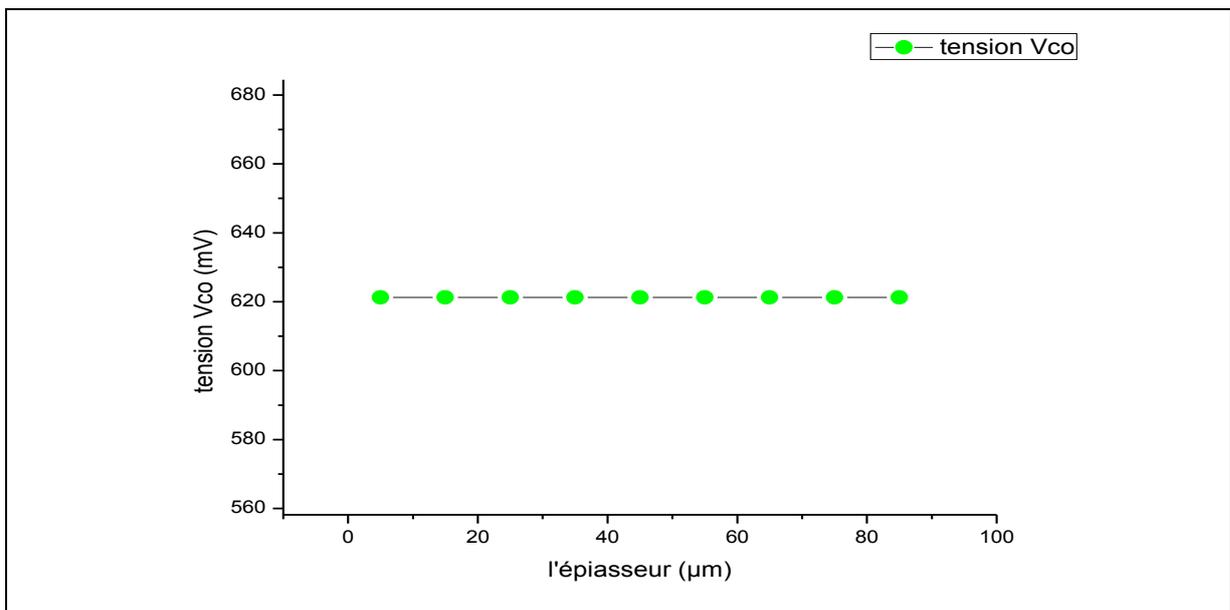


**Figure IV11.** la variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche de germanium.

L'épaisseur de la couche de germanium doit être importante pour assurer l'absorption des rayonnements. D'après les résultats obtenus (Figure.IV.11) on remarque que le rendement en fonction de l'épaisseur de la couche de germanium est constant. Et nous avons choisi l'épaisseur de  $5\mu\text{m}$  qui présente un bon rendement pour la suite de la simulation.



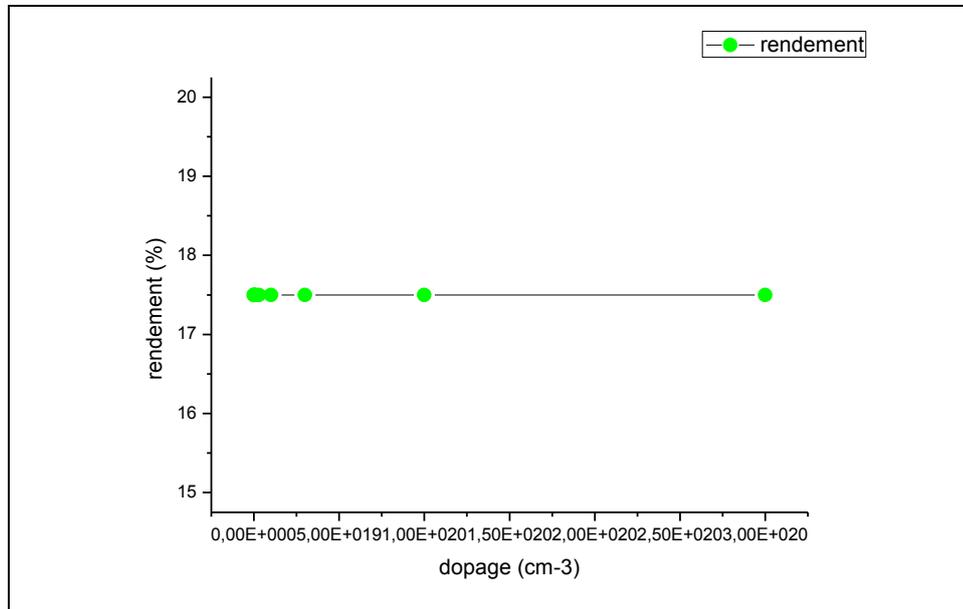
**Figure IV12.** La variation de courant en fonction de l'épaisseur de la couche de germanium.



**Figure IV13.** la variation de la tension en fonction de l'épaisseur de la couche de germanium.

### IV.3.2.2. Influence de dopage de germanium sur le rendement, $I_{CC}$ , $V_{CO}$

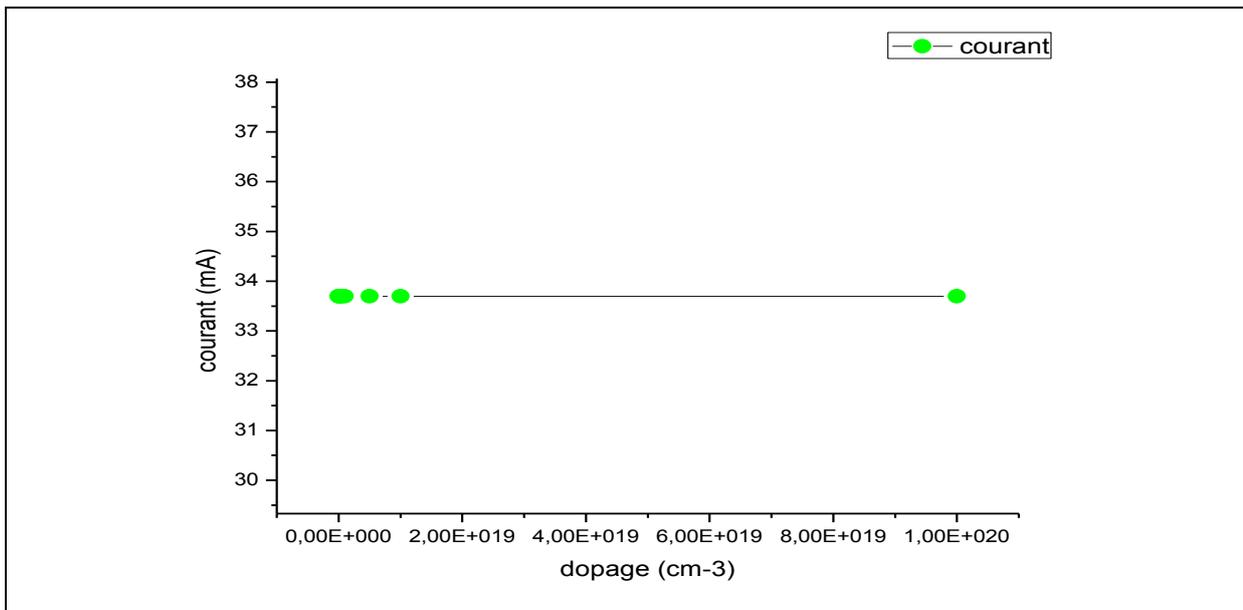
Pour examiner l'influence le dopage de la couche de germanium sur le rendement nous avons varié ce dernier et on fixe l'épaisseur de germanium. La figure IV.14 représente la variation du rendement en fonction de la concentration de la couche de germanium.



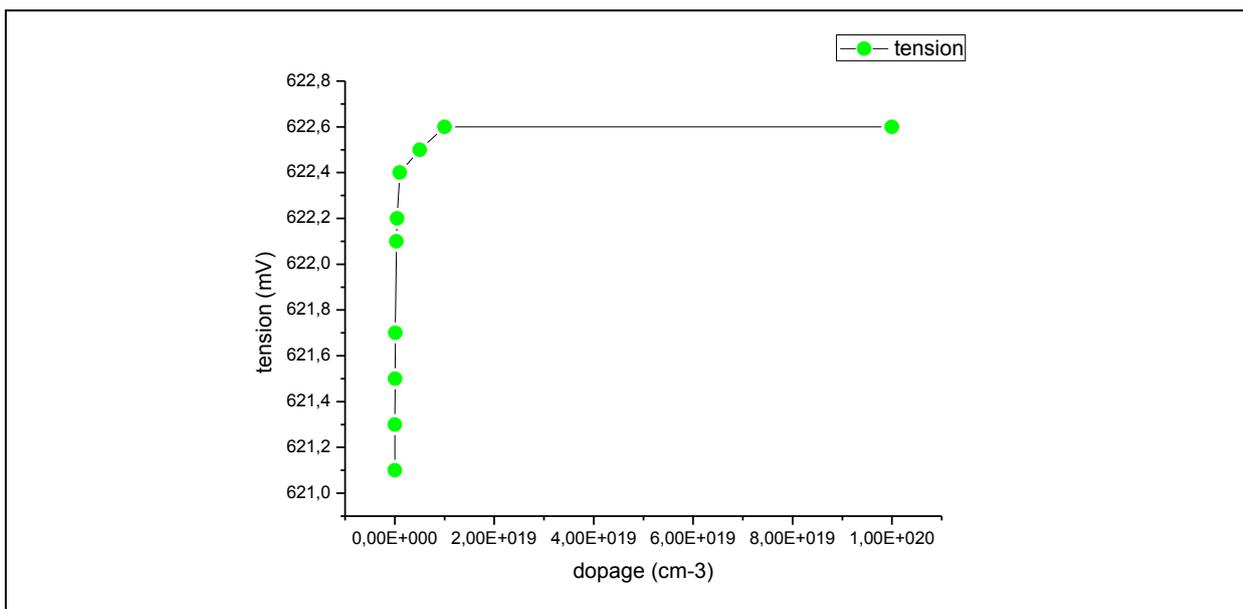
**Figure IV14.** La variation du rendement en fonction de la concentration de la couche de germanium.

D'après le résultat obtenu (Figure.IV.14) On remarque que le rendement en fonction de la concentration de la couche de germanium prend sa valeur maximale à  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , après, il prend une valeur constante.

Donc nous avons choisi une concentration de  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  pour un bon rendement.



**Figure IV15.** La variation de courant en fonction de la concentration de la couche de germanium.



**Figure IV16.** La variation de la tension en fonction de la concentration de la couche de germanium.

Le tableau suivant résume les valeurs optimisées de la cellule à base de silicium germanium qui peuvent donner un bon rendement :

Couche antireflet	$n_{car}$	2.03	
	$d_{car}$ (nm)	75	
Texturisation	Angle ( $^{\circ}$ )	54.74	
	Depth ( $\mu m$ )	3	
Emetteur	L'épaisseur ( $\mu m$ )	0.1	
	Dopage ( $cm^{-3}$ )	$1.10^{20}$	
	Profil de diffusion	Erfc	
Base	Si	Tau de recombinaison ( $\mu s$ )	30
		Concentration ( $cm^{-3}$ )	$3.10^{16}$
		L'épaisseur ( $\mu m$ )	100
	Ge	Tau de recombinaison ( $\mu s$ )	30
		Concentration ( $cm^{-3}$ )	$1.10^{17}$
		L'épaisseur ( $\mu m$ )	5
BSF	L'épaisseur ( $\mu m$ )	2	
	Dopage ( $cm^{-3}$ )	$5.10^{18}$	
Passivation	Surface avant ( $cm/s$ )	1000	
<b>Le rendement <math>\eta</math> (%)</b>		<b>17.5</b>	

Tableau IV.5 : les conditions optimales pour un bon rendement d'une cellule à base de Si/Ge.

#### IV.4 - Comparaison avec les autres recherches

	Logiciel utilisée	Structure (Si)	L'épaisseur ( $\mu m$ )	$\eta$ (%)	Structure (Si Ge)	épaisseur ( $\mu m$ )	$\eta$ (%)
Notre mémoire	PC1D	$n^+pp^+$	100 $\mu m$	20.30	$n^+pp^+$	105 $\mu m$	17.5
Autre mémoire [8] (Si <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub> )	PC1D	$n^+pp^+$	100 $\mu m$	20.20	$n^+ppp^+$	125 $\mu m$	18
Autre mémoire [24]	SILVACO	np	150 $\mu m$	14,34	$n^+p$	140 $\mu m$	14

Tableau IV-6 : comparaison entre les simulations de deux cellules solaires.

#### IV.5 - Conclusion

D'après les résultats obtenus :

Quel que soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire pour avoir un bon rendement. Habituellement, les paramètres à optimiser sont : l'épaisseur de la cellule, les niveaux et les profils de dopage, la configuration des contacts et le confinement optique. Les valeurs des paramètres optimaux dépendent de la structure de la cellule solaire, de la qualité du matériau, de la vitesse de recombinaison en surface (faces avant et arrière), etc... L'optimisation de la cellule solaire enseigne donc sur l'étude de l'influence de ces paramètres sur le rendement afin d'en obtenir le meilleur.

L'épaisseur de germanium a un effet appréciable sur le rendement de la cellule solaire à base de silicium germanium (Si/Ge), qui est dû à la grande valeur du coefficient d'absorption du germanium par rapport au silicium, donc plus la couche du germanium grand, plus l'absorption de la rayonnement est grand, alors le rendement est augmenté par rapport à cellule à base de silicium , mais le rendement de la cellule solaire à base de Si/Ge est inférieur à celui d'une cellule solaire à base de silicium grâce à la densité de défaut de germanium élevée et par conséquent la collecte de charge influe par la recombinaison. et aussi il y a un désaccord de maille aux interfaces de la base qui consistent en silicium et en germanium.

## CONCLUSION GENERALE

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale. Différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plus part des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée. Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ne peuvent générer de pair électron-trou, et sont donc perdus. Le rendement d'une cellule dépend aussi à la base du nombre de photons y pénétrant.

L'industrie photovoltaïque est constituée à plus de 90% sur l'utilisation du silicium comme matériau de base. Le silicium reste cependant le matériau le plus utilisé dans le photovoltaïque, il bénéficie d'une implantation importante et durable dans l'industrie de la microélectronique. Celle-ci utilise du silicium monocristallin de très haute pureté, obtenu par des méthodes telles que le tirage CZ (Czockralski). Ce type de matériau, qui présente d'excellentes qualités électroniques, est très coûteux. La part de silicium monocristallin y est plus importante, puisque les modules produits selon cette technologie ont un rendement plus élevé que ceux en silicium multi cristallin ou amorphe.

La simulation a été largement utilisée dans le cadre de ce travail afin d'étudier les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des cellules solaires à base de silicium et à base de silicium germanium, dans le but de diminuer les pertes des charges et d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule en vue d'obtenir un bon rendement.

Les résultats obtenus à partir de la simulation par PC1D sont comme suit :

En ce qui concerne l'influence de la concentration de la cellule solaire sur le rendement, ce dernier a augmenté lorsqu'on augmente le dopage. En ce qui concerne l'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement, ce dernier est augmenté plus mince lorsqu'on augmente le dopage et la réponse spectrale augmente légèrement lorsqu'on croît l'épaisseur de l'émetteur. La couche Si/Ge doit être épaisse pour une meilleure absorption du spectre solaire et par conséquent l'augmentation de densité des porteurs photo générés, ce qui permet d'augmenter le rendement de conversion photovoltaïque.

Par ce travail, nous pensons avoir apporté une contribution à l'étude des caractéristiques photovoltaïques des cellules solaires à base de silicium et des cellules solaires à base de Silicium Germanium. Pour réduit la consommation de la matière première, aussi pour réduit le cout de l'énergie solaire. à un but de l'énergie propre pour tous.

## REFERENCES

- [1] Nichiporuk Oleksiy « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdites » L'institut national des sciences appliquées de Lyon Pour obtenir Le grade de docteur (2005).
- [2] European Photovoltaic Industry Association. Renewable Energy House .Rue d'Arlon 63-65 .1040 Brussels - Belgium .Tel.: +32 2 465 38 84 - Fax: +32 2 400 10 10 .com@epia.org .www.epia.org.
- [3] LE PHOTOVOLTAÏQUE – MODULE 3 – FONCTIONNEMENT ET TECHNOLOGIES NOVEMBRE 2010
- [4] Professeur accompagnateur : M. Dietschy Groupe n°33. Les cellules photovoltaïques.
- [5] Benaïcha Mouna. Etude des matériaux semi-conducteurs III-V Application à la conversion photovoltaïque. Soutenu le : 31 /10/2007.
- [6].KHADIRE Nawal. MASTER Etude d'une cellule photovoltaïque a base de silicium soutenu le 24/06/2012.
- [7] Melle DJERIOUAT Khadidja Optimisation du rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonctions : GaInP/GaAs.
- [8] BENAHMED BENABDALLAH Nadia. Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe. Soutenu en Juillet 2006(magister).
- [9] Prof. Jean-Marie Tarascon. Le photovoltaïque: principes et filières inorganiques, organiques, hybrides.
- [10] M. PETIBON Stéphane. DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE. Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques.
- [11] Anne Kaminski , Mathieu Monville. FilièrePhysiquesdesComposants Nanostructurés PHELMA– Septembre2010.
- [12] Béchir DRIDI REZGUI. Etude des propriétés optiques, électriques et structurales des nanoparticules de silicium insérées dans une matrice diélectrique et étude de leur intégration pour des cellules photovoltaïques à haut rendement. soutenue le 26 Octobre 2010(doctorat).
- [13] Afaf Djeghbala. Mémoire de fin d'étude en Master Etude par simulation numérique de l'effet du Dopage et des épaisseurs sur les Caractéristiques électriques d'une Cellule solaire (p/n) en Silicium (magister).
- [14] Mohammed MANSOUR. Étude des propriétés optiques de nanoparticules de semiconducteurs : Application de l'ellipsométrie aux silicium et germanium nanostructurés. Soutenu le 27 octobre 2006 (these de doctorat).
- [15] OUDDAH MOURAD. ÉTUDE DU SILICIUM POREUX DESTINE AUX CELLULES SOLAIRES. PRESENTE POUR OBTENTION LE DIPLOME DE MAGISTER EN PHYSIQUE ECOLE DOCTORALE « ENERGIES RENOUVELABLES ».
- [16] Hocine Ghembaza : «OPTIMISATION DU PROFIL DE DISTRIBUTION DU PHOSPHORE DANS LES CELLULES SOLAIRES A BASE DE», Thèse de Magister, 2011, Université Abou Bekr Belkid de Tlemcen.

[17] "Introduction to the Electronic Properties of Materials" par David Jiles, 1998, Chapman & Hall, London.

**ECOLE POLYTECHNIQUE UNIVERSITAIRE DE MARSEILLE**

[18] *Département Micro-électronique et Télécommunications*

[19] Dimitri galayko UPMC, Master ACSI UE \_ Elec-info, M1.

[21] Henry Mathieu Hervé Fanet . Physique des semiconducteurs et des composants électroniques 6<sup>ème</sup> édition.

[22] physique des semi-conducteurs. École poly techniques. Département micro-électronique et tétécominacatin.

[23] charles kittel physique de l'elat solide.

[24] MALLEM Izzeddine Simulation des cellules solaires hétérojonction Si-SiGe par SILVACO .THÈSE DE MAGISTER.

[25] Systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental (HESPUL).

**HESPUL • ENERGIES RENOUVELABLES ET EFFICACITE ENERGETIQUE**

[26] YESREF Djamel. Optimisation d'une cellule solaire à base du silicium poly cristallin en couche mince déposé sur un substrat en céramique Soutenue le 04 juillet 2013, (magister).