

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université MOULOUD MAMMERRI – Tizi-Ouzou**  
**Faculté de Génie Electrique et d' Informatique**  
**Département d'Electronique**



## **MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES**

*Présenté En vue de l'obtention du diplôme  
D'ingénieur d'état en électronique*

*Option : Instrumentation*

**Thème**

### ***ETUDE ET OPTIMISATION D'UNE CELLULE SOLAIRE À BASE DE Si ET SiGe***

**Présenté par :**

**Mr. Benfodil AbdelGhani**  
**M<sup>elle</sup>. Bouhanik Massiva**  
**M<sup>elle</sup>. Bouchia Ouiza**

**Dirigé par:**

**Mr. MOHIA YACINE**

***Année universitaire : 2009 /2010***

---

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

---

# *Remerciement*



*On remercie dieu, le tout puissant,  
Pour nous avoir donné le courage,  
La patience, la volonté et la force nécessaire  
Pour affronter toutes les difficultés et les obstacles,  
Qui se sont hissés au travers de notre chemin,  
Durant toutes nos années d'études.*

*Nous tenons à remercier très vivement*

*Mr. TAALBI et son professeur Mr. HENIFI pour leur grand aide son  
oublier notre promoteur Mr. MOHIA.Y.*

*On remercie également les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font  
en jugeant ce travail*

## *SOMMAIRE*

---

***Introduction générale***.....

---

**CHAPITRE I : Généralités sur les semi-conducteurs**

---

I.1.Introduction.....	3
I.2.Définition d'un semi-conducteur.....	3
I.2.1.La conductivité.....	4
I.2.2.photoconduction.....	5
I.2.3.Redressement.....	5
I.3.Structure cristalline.....	5
I.3.1.La structure diamant.....	7
I.4.Bande d'énergie.....	9
I.5.Semi-conducteur intrinsèque.....	10
I.5.1.Concentration intrinsèque.....	11
I.5.2.Température intrinsèque.....	12
I.6.Différents types de dopage.....	13
I.6.1.Semi-conducteur dopé n.....	13
I.6.2. Semi-conducteur dopé p.....	14
I.6.3.densité de charge dans un semi-conducteur.....	15
I.7.la jonction PN.....	16
I.7.1.polarisation direct de la jonction PN.....	17
I.7.2. polarisation indirect de la jonction PN.....	18
I.8.courant dans le semi-conducteur.....	19
I.9.génération et recombinaison des porteurs.....	19
I.9.1.recombinaison en volume de types radiatifs.....	21
I.9.2.recombinaison en volume de types Auger.....	22
I.9.3.recombinaison par piège.....	23
a)-Recombinaison en volume de type RSH.....	23
b)- Recombinaison en surface.....	24
I.10.contact métal/semi-conducteur.....	24
I.10.1.contact ohmique.....	25
I.10.2.contact redresseur (Schottky).....	27
I.11.conclusion.....	27

---

**CHAPITRE II : propriétés physiques du silicium et du Germanium**

---

II.1.introduction.....	28
	28
	28
	29

---



IV.3.types de cellules solaires.....	54
IV3.1.1 <sup>ère</sup> génération .....	54
IV3.2.2 <sup>ème</sup> génération.....	55
IV3.3.3 <sup>ème</sup> génération.....	52
IV.4.structure et fonction d'une cellule photovoltaïque.....	53
IV.4.1.interaction photon/ semi-conducteur.....	55
IV.4.2.fabrication d'une cellule photovoltaïque.....	56
IV.4.3.structure d'une cellule photovoltaïque.....	57
IV.4.4.principe de fonction d'une cellule photovoltaïque.....	59
IV.5.schéma électrique de la cellule photovoltaïque.....	60
IV.6.les différents paramètres de la cellule photovoltaïque.....	62
IV.7.installation électrique photovoltaïque.....	64
IV.9.Conclusion.....	66

**CHAPITRE V :**

***Simulation des cellules solaires a base de Si***

V.1.Introduction.....	67
V.2.la conversion photovoltaïque.....	67
V.2.1.principe de la conversion photovoltaïque.....	67
V.2.2.paramètres essentiels caractérisant une cellule solaire.....	68
V.2.2.1.courant de court circuit.....	69
V.2.2.2.tension de circuit ouvert.....	69
V.2.2.3.facteur de forme.....	69
V.2.2.4.rendement de conversion d'énergie.....	69
V.3.logiciel de simulation PC1D.....	70
V.3.1.aperçu du logiciel.....	70
V.3.2.les paramètres du dispositif (device).....	72
V.3.3.les paramètres des régions.....	72
V.3.4.les paramètres d'excitation.....	73
V.3.5.les résultats.....	73
V.4.Simulation des cellules solaires a base de silicium.....	74
V.4.1.paramètre de simulation.....	74
V.4.2.Résultats de simulation.....	74
V.4.2.1.Caractéristique I-V.....	74
V.4.2.2.Réponse spectrale.....	75

V.4.2.3. Influence de l'épaisseur de l'émetteur n+ sur le rendement.....	76
V.4.2.4. Influence de l'épaisseur de la cellule solaire sur le rendement.....	..78
V.4.2.5. Influence de la longueur de diffusion sur le rendement, Icc et Vco.....	
V.4.2.6. Influence du dopage du substrat p+ sur le rendement, Icc et Vco.....	.82
V.4.2.7. Influence du dopage de l'émetteur n+ sur le rendement, Icc et Vco.....	.84
V.4.2.8. Influence de la recombinaison en surface sur le rendement, Icc et Vco.....	86
V.5. Conclusion.....	89

**Conclusion générale** .....

Liste des abréviations et symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

**Bibliographie**

## **INTRODUCTION**

La conversion photovoltaïque utilise le principe de la conversion directe de l'énergie lumineuse en une énergie électrique. Les cellules solaires sont capables d'effectuer cette transformation.

L'effet photovoltaïque fut découvert en **1839** par Le physicien français Edmond Becquerel, et en **1875** Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin, un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs, mais, le phénomène resta encore une curiosité de laboratoire.

---

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

En **1958** une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point .Ce rendement a été porté à une valeur supérieure à 10% pour les cellules solaires à base de silicium monocristallin en 1960. Les applications des cellules solaires étaient réservées au seul usage à cause de leurs prix de revient très élevés et leurs faibles rendements.

Cependant, il est à noter que l'augmentation du rendement a été considérée plus déterminante que la réduction du coût, car toute amélioration des performances, optimisation des paramètres, s'applique directement en pourcentage sur le prix de l'énergie produite.

Dans notre cas, l'objectif essentiel est l'accroissement du rendement. Ceci explique et justifie les recherches concernant l'étude des programmes numériques de conception, de modélisation et de simulation. Notre travail est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre, nous rappelons quelques notions fondamentales nécessaires des semi-conducteurs.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des différents types de silicium et les étapes à suivre pour obtenir du silicium de qualité électronique. Puis, nous présentons les propriétés physiques du silicium et du germanium que nous utilisons dans la simulation numérique.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les propriétés générales de l'alliage  $Si_{1-x}Ge_x$ .et quelques notions de base du  $Si_{1-x}Ge_x$  ainsi que sa structure de bande.

Dans le quatrième chapitre nous allons présenter quelques généralités sur les cellules photovoltaïques et leur fonctionnement.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous décrivons les différentes étapes du logiciel PC1D, utilisé en simulation numérique en donnant quelques exemples. Les résultats ainsi obtenus sont commentés et interprétés grâce aux notions de la caractéristique courant tension et de la réponse spectrale. La maîtrise du logiciel et des techniques de simulation, nous permettra d'avantage d'étudier n'importe quelle région de la cellule solaire et tous les paramètres physiques.

---



# ***CHAPITRE I :***

## ***GÉNÉRALITÉS SUR LES SEMI- CONDUCTEURS***

### **I.1. Introduction**

Les technologies des circuits intégrés utilisent les matériaux semi-conducteurs de base. La physique des semi-conducteurs commence en 1833 avec M. Faraday qui remarque que le pouvoir conducteur de certains matériaux augmente avec la température, contrairement à ce qui se passe habituellement pour les métaux. 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.

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,  $\text{SiO}_2$ ) 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) [1].

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 : on parle alors de S.C. intrinsèque [2].

Le germanium est découvert par le savant allemand Clemens Winkler le 6 février 1886. Il peut être trouvé dans 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 de tension (0,3 V environ, application en détection) [3].

## **I-2-Définition d'un semi-conducteur**

Un semi-conducteur est un matériau qui est parfaitement isolant à 0 K, mais devient progressivement conducteur lorsque la température augmente ou par apport d'énergie sous une forme quelconque (lumière ou tout rayonnement électromagnétique, chauffage, etc.). Il reste cependant proche de l'isolant à température ambiante. S'il est pur on dit que le semi-conducteur est **intrinsèque** qui est un élément chimique de valence 4. Si non on dit qu'il est extrinsèque (contient des impuretés).

**Exemples de semi-conducteurs purs** : silicium (Si, 14), germanium (Ge, 32).

Les semi-conducteurs sont spécifiés par rapport aux métaux par :

### **I-2-1-La conductivité :**

Dans un métal la conduction est assurée par un seul type de porteurs qui sont les électrons. Par contre, dans les S-C la conduction est assurée par deux types de porteurs les électrons et les trous. La conductivité croît rapidement avec la température dans les S-C. L'expression de la conductivité est la suivante :

---

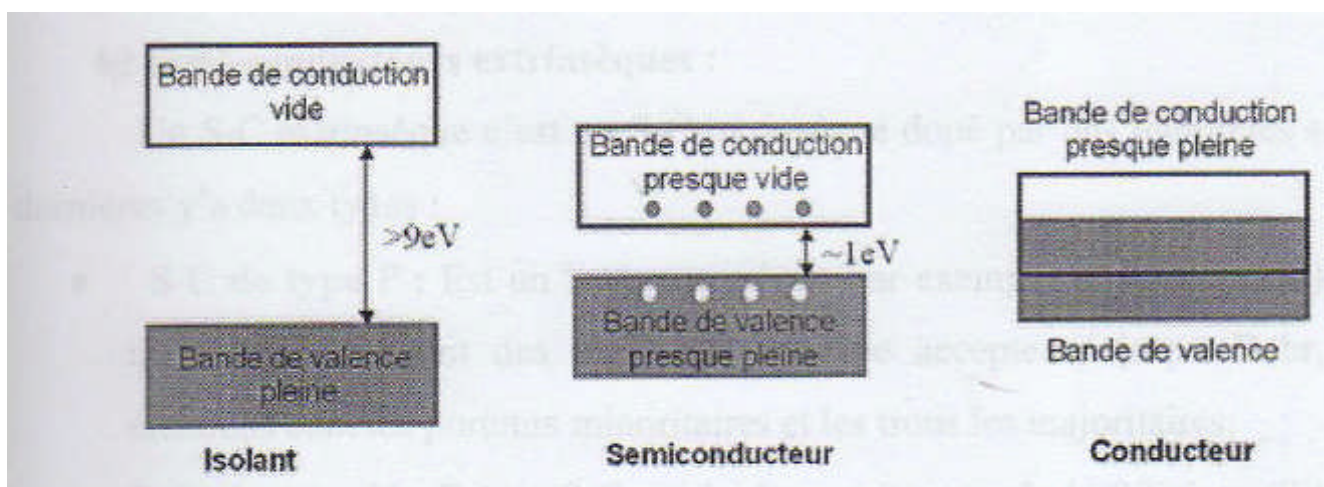
$$\sigma(T) = q(n\mu_n(T) + p\mu_p(T)) \quad (I.1)$$

Le tableau suivant donne les intervalles de conductivité des différents solides :

Solides	Conductivité (S/Cm)	Exemples
Isolants	$\sigma < 10^{-8}$	Diamant $10^{-14}$ S/Cm
Semi-conducteurs	$10^{-8} < \sigma < 10^3$	Silicium $10^{-5}$ à $10^3$ S/Cm
Conducteurs	$10^3 < \sigma$	Argent $10^6$ S/Cm

**Tableau : I.1 : Conductivités des isolants, conducteurs et semi-conducteurs [4].**

Leurs bandes d'énergies se présente dans la figure suivante :



**Figure I .1 structure électronique du Métal, Isolant et de Semi-conducteur.**

Cette figure représente schématiquement la structure électronique pour les trois grandes familles de solides à savoir : les métaux, les isolants et semi-conducteurs.

### I-2-2-photoconduction :

Un semi conducteurs éclairé voit sa résistivité diminuer. Cette propriété est absente chez les conducteurs et les isolants.

### **I-2-3–Redressement :**

Un semi-conducteur n'autorise le passage du courant que dans un seul sens, cette propriété est utilisée pour le redressement du courant.

Les semi conducteurs peuvent être classés en trois types :

- Les éléments simples tels que le (carbone, germanium, silicium,...).
- Des composés minéraux binaires (InSb, GaAs, CdTe, GaP,...).
- Des composés organiques très nombreux tels que les polymères organique (constituer d'atomes de carbone sur les quels sont fixés les éléments comme l'oxygène et l'hydrogène). .

### **I.3. Les structures cristallines**

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 I.2, 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 <sup>(1)</sup> des éléments intervenant dans les liaisons, ce qui confère aussi des propriétés mécaniques et électriques au solide cristallisé résultant.



**Figure I. 2 Microphotographie du réseau cristallin du silicium prise par TEM.**

(1) : les électronégatifs sont des éléments possédant 7 électrons périphériques (halogènes).

---

On distingue quatre familles de solides cristallins : Les cristaux ioniques, les cristaux covalents, les métaux et les cristaux moléculaires [5].

† **cristaux ioniques** : ce sont des cristaux qui résultent d'une association des éléments fortement électropositif et des éléments fortement électronégatif exemple : NaCl.

L'électron libéré par les alcalins est fortement fixé sur l'halogène de sorte qu'aucun électron n'est libéré dans le réseau du matériau. Ces cristaux sont électriquement des isolants, d'un point de vue mécanique sont très durs. Les liaisons entre atomes sont très fortes.

† **cristaux covalents** : ils sont construits à partir des éléments de la colonne 4 du tableau périodique ( C, Si ,Ge ,Sn), ces cristaux sont construit de manière que les atomes ( possédant 4 électrons de valence ) mettent en commun avec 4 voisins leurs électrons de valence pour établir des liaisons covalentes . Ces dernières sont importantes dans le cas du carbone diamant, faible dans le cas de l'étain et intermédiaire dans le cas du silicium.

† **les métaux** : ils sont construits avec des éléments électropositifs, ils libèrent leur électrons périphériques lors de la liaison entre atomes, les électrons périphériques sont libérés lors de la réalisation du cristal.

Le réseau est constitué des ions positifs, de point de vue électrique ce sont des conducteurs, les liaisons entre atomes sont faibles d'un point de vue mécanique ce sont moins dure fondant à basse température. Ce sont des cristaux formés par des éléments alcalins et des matériaux nobles (l'Or, l'argent et le cuivre).

† **cristaux moléculaires** : ce sont des cristaux bâtis sur une unité de base qui est la molécule ( non pas l'atome ). Les forces de liaisons dans ces cristaux sont fortes à l'intérieur de la molécule mais très faible entre molécule (force de type de Van Der Waals  $10^{-12}$  N). Ce sont des matériaux très peu résistants fondants à très basse température.

### **I-3-1 -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 Face Cubique Centré. déplacées l'une par rapport à l'autre le long de la diagonale principale.

La position de l'origine de la seconde structure Face Cubique Centré 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.

---

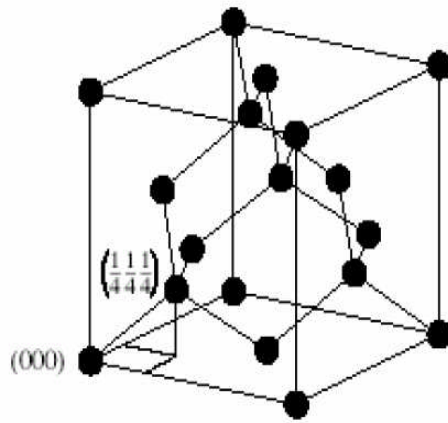


Figure I.3 : Structure diamant.

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 [6]. La structure de bande est la relation entre l’énergie de la particule et son vecteur  $k$  :  $E(k)$ .

On représente l’évolution de l’énergie de l’électron par la courbe  $E(k)$  en forçant le vecteur d’onde  $k$  à demeurer dans une direction remarquable de l’espace des  $k$ , c’est-à-dire une direction cristallographique du réseau réciproque.

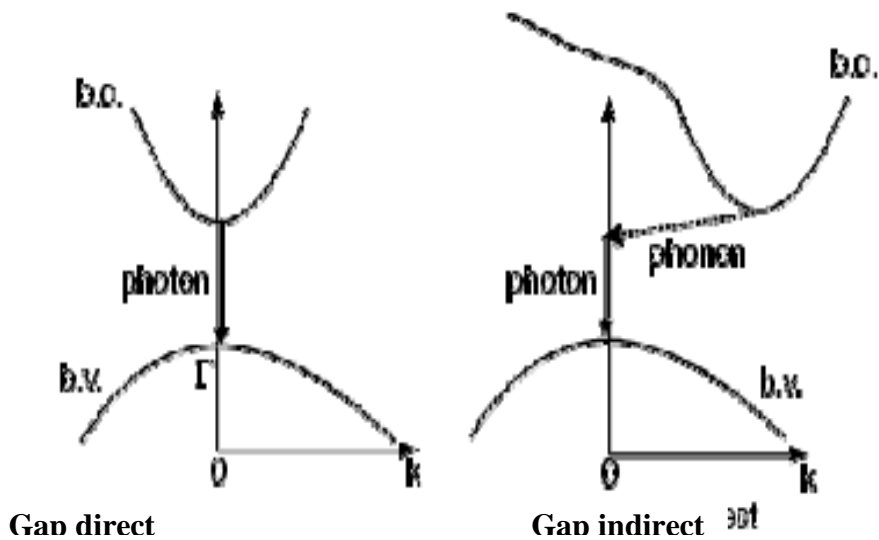


Figure I.4 : Structure de bande schématique d’un semi-conducteur direct et indirect [6].

La structure de bande du Silicium a été l’objet de plusieurs études qui ont permis à la connaître avec une grande précision. Le minimum de la bande de conduction du silicium est dans la direction [010] et donc, par symétrie, aussi dans les directions  $[010]$ ,  $[001]$ ,  $[00\bar{1}]$ ,  $[100]$ ,  $[\bar{1}00]$  soit au total six minima.

Au contraire, pour le germanium, le minimum de la bande de conduction a lieu dans les directions correspondant aux diagonales du cube, donc nous sommes en présence de 8 minima [7].

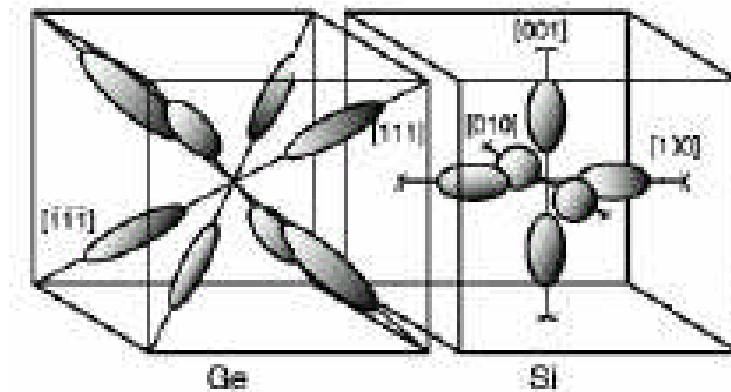


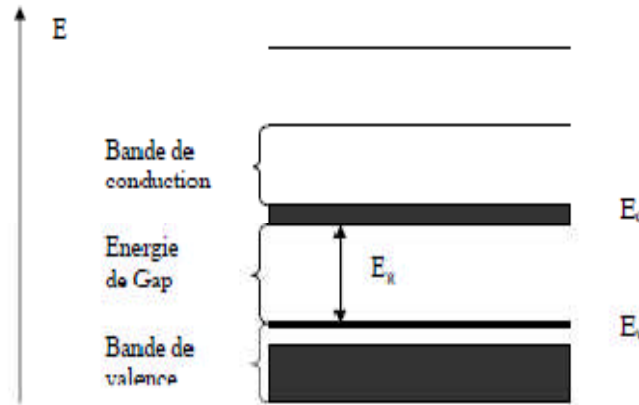
Figure I.5 : Représentation des minima de la bande de conduction Si et du Ge.

#### I.4. Bandes d'énergie

Bien que les électrons d'un atome isolé aient des niveaux d'énergie permis bien définis, le comportement de ces électrons dans un réseau cristallin périodique est différent.

Si la distance entre les atomes est suffisamment petite, comme dans le cas du réseau cristallin du silicium, la présence des atomes voisins génère une sorte d'interférence entre les niveaux permis de chaque atome, cela entraîne une multitude quasi continue d'états autour de chaque niveau permis de l'atome individuel. Cet ensemble d'états, très proches entre eux, est plutôt considéré alors comme une bande d'énergie permise, avec une densité d'états associée.

Les niveaux d'énergie des électrons de valence et le niveau d'énergie d'ionisation génèrent ainsi deux bandes d'énergies permises particulièrement intéressantes, la bande de valence et la bande de conduction, séparées par une bande dépourvue de niveaux permis, nommée bande interdite (Figure I.6). La particularité de ces bandes permises tient au fait que électrons peuvent circuler librement dans toute la maille cristalline et ainsi générer des courants de conduction électrique (s'agissant d'électrons partagés par les atomes du réseau cristallin).



**Figure I.6 : Diagramme des bandes d'énergies des semi-conducteurs.**

A des températures très basses, la bande de conduction se trouve vide d'électrons et la bande de valence est complètement occupée, car l'énergie thermique n'est pas suffisamment importante pour ioniser les atomes du réseau cristallin. A des températures normales un bon nombre des atomes ionisés ont déjà cédé leurs électrons à la bande de conduction, dans laquelle ils participent à la conduction électrique avec une charge négative.

La bande de valence, même quasiment pleine, présente un nombre de niveaux inoccupés (trous) égal au nombre d'électrons dans la bande de conduction (dans le cas d'un semi-conducteur intrinsèque); ces niveaux inoccupés peuvent être occupés par un électron de valence d'un atome voisin et ainsi se déplacer dans le réseau cristallin, et participer à la conduction électrique comme s'ils étaient des particules chargées positivement.

La valeur  $E_g$  de la bande interdite donne des caractéristiques électriques importantes à chaque semi-conducteur. Ces variations peuvent être décrites approximativement par la fonction universelle suivante [8] :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{(T + b)} \quad (\text{I.2})$$

Au voisinage de chacune des limites  $E_c$  et  $E_v$ , respectivement de la bande de conduction et de la bande de valence, la densité d'états permis  $N(E)$  peut être estimée avec l'approximation parabolique suivante [5] :

$$N_c(E) = K_c (E - E_c)^{1/2} \quad (\text{I.3})$$

$$N_v(E) = K_v (E_v - E)^{1/2} \quad (\text{I.4})$$

$K_c$  et  $K_v$  étant des constantes pratiquement indépendantes de la température.

## I.5.Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur intrinsèque est un matériau idéal ne possédant ni défaut physique ni défaut chimique. Un tel monocristal possède une structure de type tétraédrique c'est à dire que chaque atome est entouré symétriquement de 4 atomes.

### I.5.1. Concentration intrinsèque :

A l'équilibre thermique, les densités totales d'électrons dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence sont données par les expressions suivantes [8] :

$$n = \frac{2}{h^3} (2\pi m_e kT)^{3/2} \exp\left[\frac{E_F - E_c}{kT}\right] = N_c \exp\left[\frac{E_F - E_c}{kT}\right] \quad (\text{I.5})$$

$$p = \frac{2}{h^3} (2\pi m_h kT)^{3/2} \exp\left[\frac{E_v - E_F}{kT}\right] = N_v \exp\left[\frac{E_v - E_F}{kT}\right] \quad (\text{I.6})$$

Où :

$N_c$  et  $N_v$  sont respectivement la densité effective d'états des électrons dans la bande de conduction et la densité effective d'états des trous dans la bande de valence.

Un semi-conducteur intrinsèque est un matériau dépourvu de toute impureté susceptible de modifier la densité des porteurs. Les électrons de la bande de conduction ne pouvant résulter que de l'excitation thermique des électrons de la bande de valence, les trous et les électrons existent nécessairement par paires ( $n = p = n_i$ ) donc on obtient les expressions suivantes, pour la concentration intrinsèque des porteurs et le niveau de Fermi intrinsèque :

$$n_i = [N_c N_v]^{1/2} \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right] \quad (\text{I.7})$$

$$E_F = \frac{1}{2}[E_v + E_c] + \frac{3}{4}kT \log \frac{m_h}{m_e} \quad (\text{I.8})$$

Il en résulte que le niveau de Fermi intrinsèque  $E_F$  est toujours très proche du centre de la bande interdite.

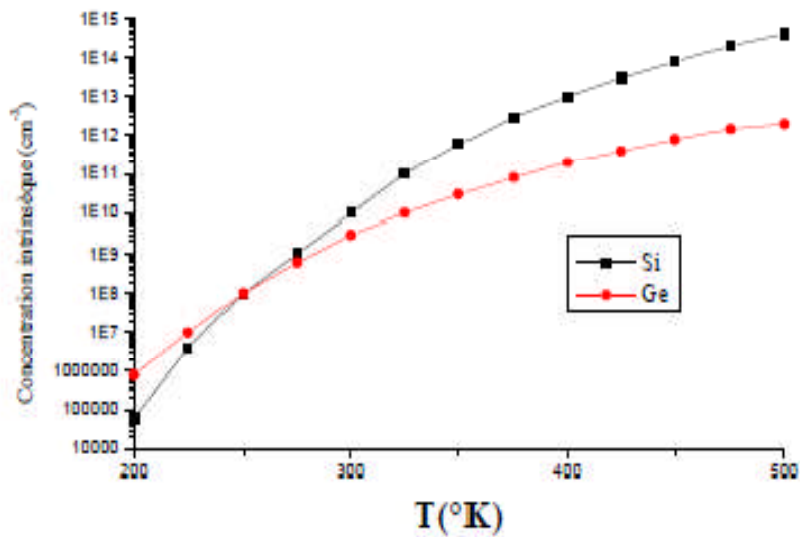


Figure I.7 : Concentration intrinsèque du silicium et du germanium en fonction de la température.

Dans le cas d'un semi-conducteur non dégénéré et à l'équilibre thermique :

$$(p = p_0, n = n_0, p_0 \cdot n_0 = n_i^2) :$$

$$n_0 = n_i \exp\left[\frac{E_i - E_F}{kT}\right] \quad (\text{I.9})$$

$$p_0 = n_i \exp\left[\frac{E_i - E_F}{kT}\right] \quad (\text{I.10})$$

### I.5.2. Température intrinsèque :

La transition entre le régime d'épuisement et le régime intrinsèque marque la température limite pour un dispositif semi-conducteur, dite température intrinsèque. D'où l'importance, dans les cas d'applications en haute température, de repousser au maximum cette transition.

Si on définit la température intrinsèque  $T_i$  comme la température où la concentration intrinsèque  $n_i(T)$  devient comparable ou égale à la concentration des impuretés dopantes nette :  $|N_d - N_a|$  donc [8] :

$$n_i(T_i) = |N_d - N_a| \quad (\text{I.11})$$

## I.6. Différents types de dopage

Les semi-conducteurs intrinsèques n'ont pas une grande utilité en tant que tels ; ils servent de base aux semi conducteurs dopés : on y rajoute des impuretés pour modifier leur comportement. Il existe deux types de semi conducteurs extrinsèques [9]:

### I.6.1. Semi- conducteur dopé n :

Un matériau dopé n est un semi-conducteur dont la concentration en électrons est largement supérieure à la concentration en trous. On y a introduit généralement du phosphore, de l'Arsenic ou encore de l'Antimoine. Prenons par exemple le cas du Phosphore dans lequel on introduit du phosphore (possède 5 électrons sur la couche extérieure).

Quatre de ces cinq électrons sont mis en commun avec les atomes de silicium voisins pour réaliser des liaisons de covalences (figure I.8a). Le 5<sup>ème</sup> électron, inutilisé, est très faiblement lié à l'atome pentavalent.

Une très faible énergie suffit pour le libérer et il se retrouve "libre" dans la bande de conduction. L'atome de phosphore qui a fourni un électron libre est appelé atome donneur. Il a perdu sa neutralité pour devenir un ion positif fixe.

A la température ordinaire, la quasi-totalité des atomes donneurs sont ionisés.

Si  $N_D$  est la concentration des atomes donneurs, ceux-ci vont libérer  $n = N_D$  électrons libres.

Les concentrations en électrons libres ( $n$ ) et en trous libres ( $p$ ) sont liées par la **loi d'action de masse** :

$$n \cdot p = n_i^2$$

**Les électrons sont les porteurs majoritaires et les trous les porteurs minoritaires.**

Dans la modélisation du schéma des bandes d'énergie (figure I.8b), la population des électrons libres de la B.C est beaucoup plus importante que celle des trous libres dans B.V. Le niveau indicateur de Fermi ( $E_{F_n}$ ) se déplace donc du milieu de la bande interdite ( $E_{F_i}$ ) vers la bande de conduction de telle manière que :

$$\Delta E_n = KT \cdot \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right)$$

(I.12)

Avec :  $\Delta E_n = E_{F_n} - E_{F_i}$

---

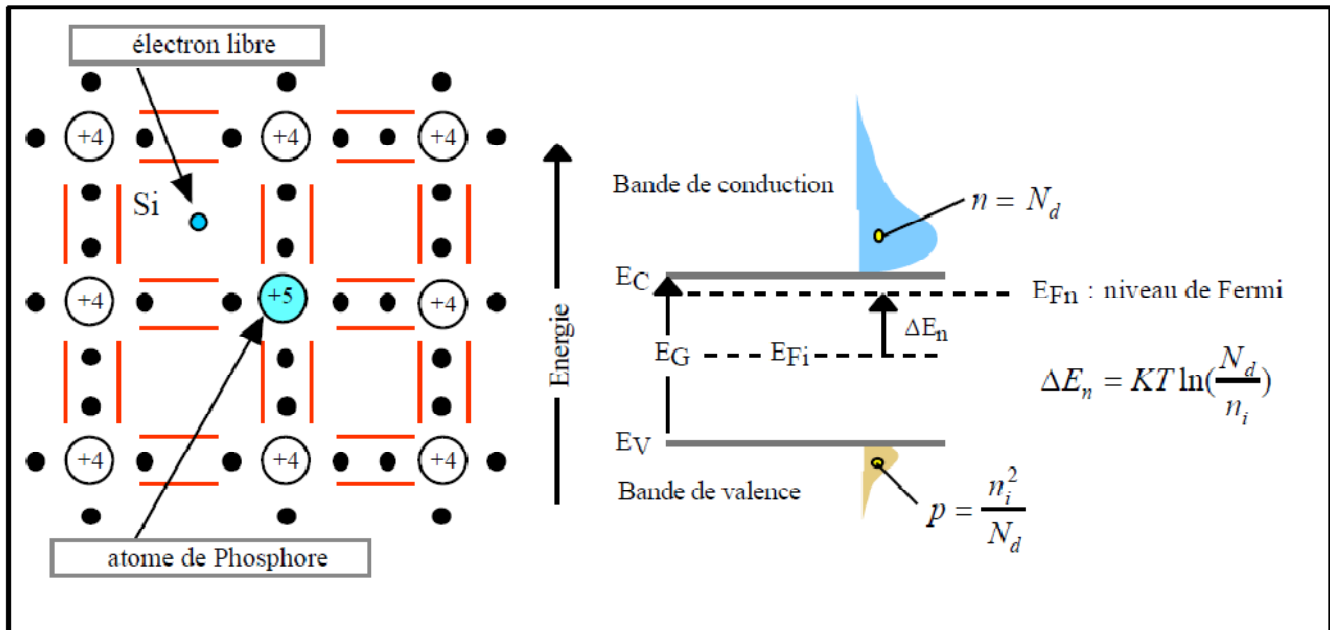


Figure I.8 : (a) libération d'un électron par l'atome de phosphore . (b) Diagramme des bandes.

### I.6.2. Semi-conducteur dopé p

On obtient un S.C. dopé P en injectant dans le silicium des atomes de la 3<sup>o</sup> colonne (bore, indium) qui possèdent trois électrons périphériques. Il s'agit d'un semi-conducteur dont la concentration en trous est largement supérieure à la concentration d'électron.

Il manque ainsi un électron à l'atome trivalent pour réaliser les liaisons covalentes avec les quatre atomes de silicium qui l'entourent (figure I.9a). En fait, les électrons participant aux liaisons sont indiscernables les uns des autres. Tout ce passe alors comme si un des atomes de silicium voisin avait cédé un électron à l'atome trivalent de bore, créant ainsi un trou dans le cristal de silicium.

L'atome de bore qui capte un électron est appelé atome accepteur, il a perdu sa neutralité pour devenir un ion négatif fixe.

A la température ordinaire, la quasi-totalité des atomes accepteurs sont ionisés. Si  $N_A$  est la concentration par  $\text{cm}^3$  des atomes accepteurs, ceux-ci vont libérer :  $p = N_A$  trous libres.

Les concentrations en électrons libres (n) et en trous libres (p) sont liées par la **loi d'action de masse** :

$$n \cdot p = n_i^2$$

**Les trous sont les porteurs majoritaires et les électrons les porteurs minoritaires.**

Dans la modélisation du schéma des bandes d'énergie (figure I.9b), la population des électrons libres de la B.C est beaucoup plus faible que celle des trous libres dans B.V. Le niveau indicateur de Fermi  $E_{Fp}$  se déplace du niveau intrinsèque  $E_{Fi}$  vers la bande de valence de telle manière que :

$$\Delta E_p = KT \cdot \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right)$$

(I.13)

Avec :  $\Delta E_p = E_{F_i} - E_{F_p}$

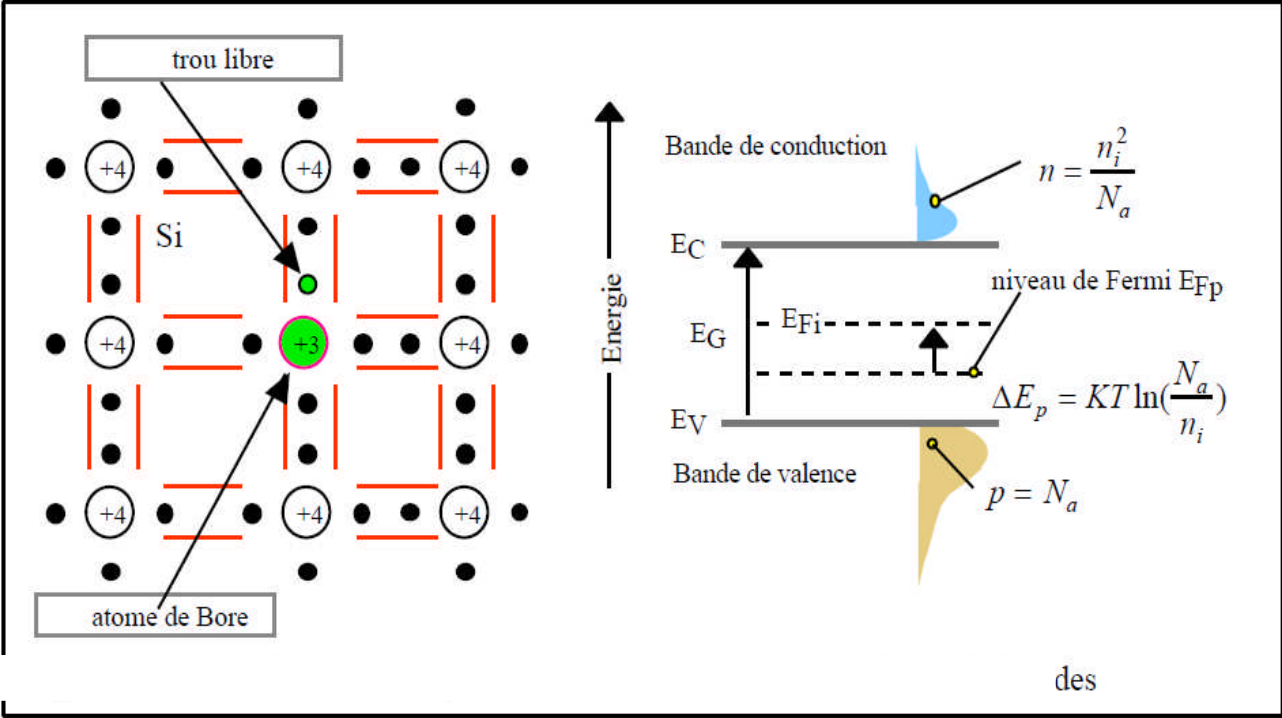


Figure I-9 : (a) libération d'un trou par le bore. (b) Diagramme des bandes.

**I.6.3. Densité de charges dans un semi-conducteur :**

Si l'on considère un Semi-conducteur possédant une densité  $N_d$  d'atomes donneurs et une densité  $N_a$  d'atomes accepteurs on peut estimer qu'à la température ordinaire toutes les impuretés sont ionisées. Il en résulte le bilan des charges suivant:

$$n + N_a = p + N_d$$

(I.14)

Dans le cas des semi-conducteurs dopés  $n$  ou  $p$  la relation (I .14) se simplifie lorsque l'on tient compte des ordres de grandeur des différentes concentrations.

• *Semi-conducteur dopé n:*

$N_a = 0$  et  $N_d \gg p \Rightarrow n \approx N_d$  : Les électrons sont les porteurs majoritaires.

La densité des donneurs ionisés  $N_d^+$  s'écrit :

$$N_d^+ = \frac{N_d}{1 + 2 \exp\left(\frac{E_F - E_d}{kT}\right)} \quad (\text{I.15})$$

$E_d$  étant le niveau d'énergie donneur.

• **Semi-conducteur dopé p:**

$N_d = 0$  et  $N_a \gg n \Rightarrow p \approx N_a$  : Les trous sont les porteurs majoritaires.

La densité d'accepteurs ionisés  $N_a^-$  s'écrit [5] :

$$N_a^- = \frac{N_a}{1 + \frac{1}{4} \exp\left(\frac{E_a - E_F}{kT}\right)} \quad (\text{I.16})$$

$E_a$  : étant le niveau d'énergie accepteur.

Le matériau semi-conducteur étant globalement neutre, l'équation de la neutralité électrique s'écrit :

$$n + N_a^- = p + N_d^+ \quad (\text{I.17})$$

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

• **Trous dans un semi-conducteur dopé n:**

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_d} \quad (\text{I.18})$$

• **Electrons dans un semi-conducteur dopé p :**

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_a} \quad (\text{I.19})$$

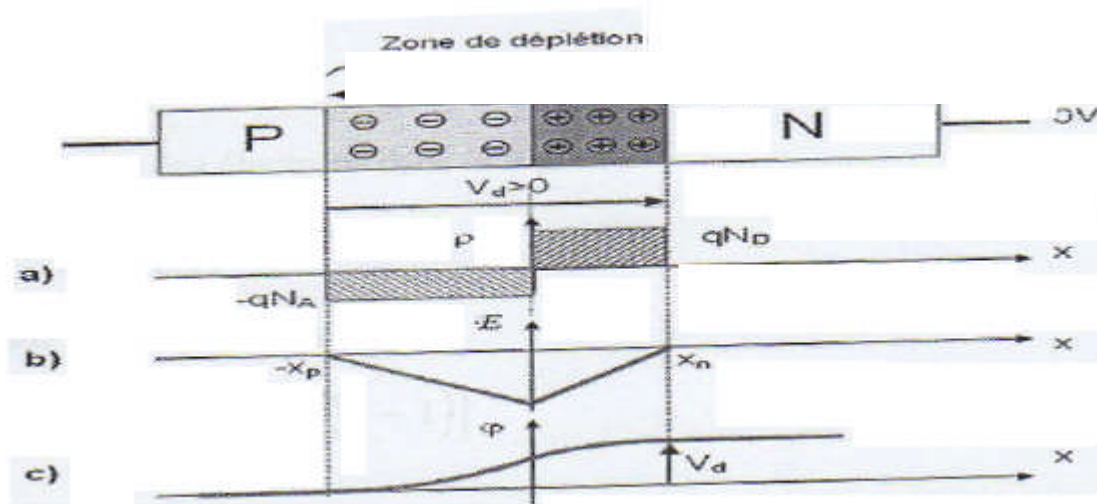
## I.7. La jonction PN :

Une jonction est constituée par la réunion de deux morceaux de semi conducteurs dopés P et N (jonction P-N). Les connexions avec le milieu extérieur sont réalisées par des contacts métalliques. Les jonctions entre métal et semi conducteur sont purement ohmique (non redresseuses).

La différence des densités de donneurs et d'accepteurs  $N_D - N_A$  passe **Brusquement** d'une valeur négative pour la région P à une valeur positive pour la région N. la loi de variation de cette différence est donnée par deux constantes pour une jonction dite **abrupte**.

Il existe d'autres types de jonctions comme les jonctions exponentielles, linéaires, etc. Cependant l'étude d'une jonction abrupte étant plus simple et de plus aisément généralisable à une jonction quelconque.

Après la mise en contact des deux semi-conducteurs de dopage différent une barrière de potentiel pour les trous et les électrons est constituée. En effet, la double couche de charge négative coté P et positive coté N, crée un champ électrique dirigé de N vers P qui empêche la diffusion et maintien la séparation des trous coté P et des électrons coté N. Par ailleurs à cause de cette double couche, le potentiel électrostatique varie brusquement dans la zone de la jonction et la d.d.p.  $V_d$  appelée tension de diffusion, atteint des valeurs non négligeables (0,8V pour le Si) [4].



**Figure I-10 : Jonction PN à l'équilibre thermodynamique. a) charge d'espace, b) champ électrique, c) potentiel électrostatique.**

#### Jonction PN à l'équilibre : quelques remarques

\_ A l'équilibre, le courant total est nul :  $i = I_D - I_S = 0$ .

Donc, pour  $v = 0$ , on a  $I_D = I_S$ .

\_  $I_S$  dépend de la concentration des porteurs minoritaires et dépend donc fortement de la température et des concentrations de dopage.

\_ La tension de diffusion  $V_0$  dépend de la température, de la concentration de dopage et du gap du matériau.

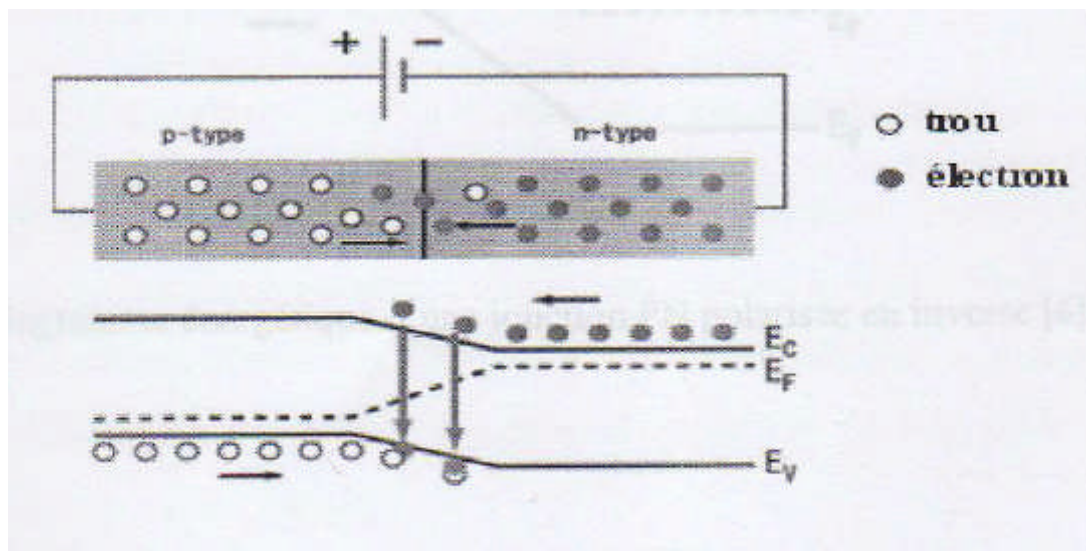
Pour le Si,  $V_0 \approx 0,6$  à  $0,8$  V à  $T = 300$  K.

\_ La différence de potentiel entre l'anode et la cathode vaut zéro, pas  $V_0$ .

\_ Valeurs typiques de la largeur de la région de déplétion : de  $0,1$  à  $10 \mu\text{m}$ .

#### **I.7.1 Polarisation en directe de la jonction PN :**

Une jonction PN est polarisée en direct quand la borne positive de la source de tension est relié au coté P et la borne négative au coté N de la jonction. Le champ électrique dû à la polarisation s'oppose à celui de la diffusion. Le champ résultant de leur différence est inférieur à celui existant avant la polarisation. En conséquence la ZCE diminue ainsi que la barrière de potentielle.



**Figure I- 11: Jonction PN polarisée en directe [4].**

### **I.7.2. Polarisation en inverse de la jonction PN :**

La polarisation inverse consiste à relier la borne positive de la source au côté N et la borne négative coté P. dans ce cas le champ électrique s'ajoute au champ électrique interne donc le champ résultant de leur somme et plus important, ce qui nécessite un grand nombre de charge ionisée pour son maintien. En conséquence la ZCE augmente ; en terme de bande d'énergie, la polarisation inverse fait élever le diagramme énergétique de coté P et la baisse de coté N.

Le potentiel de polarisation s'ajoute à celui de diffusion, la barrière de potentiel est plus haute.

Les porteurs majoritaires de chaque coté rencontrent une plus grande opposition pour diffuser de l'autre coté de la jonction, tandis que les porteurs minoritaires sont mieux aidés à traverser la jonction.

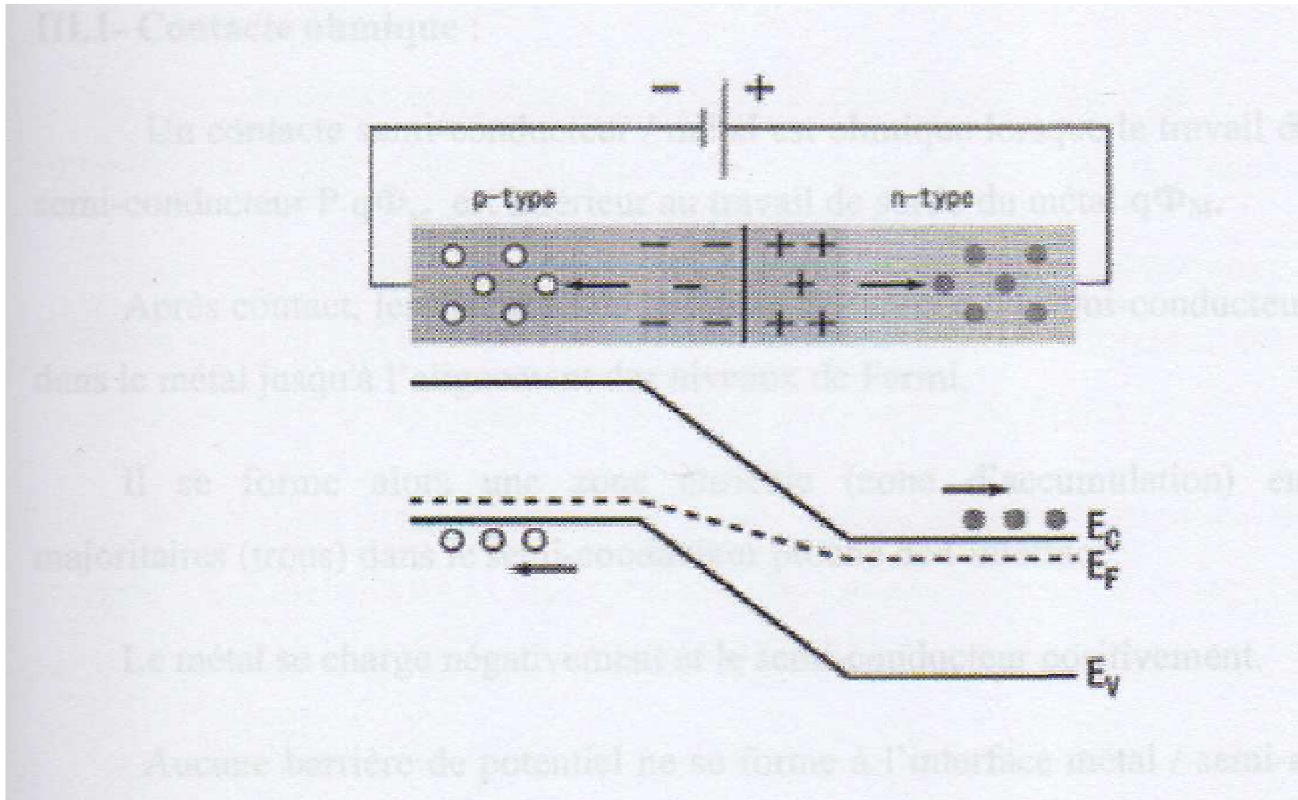


Figure I-12 : Diagramme énergétique d'une jonction PN polarisée en inverse [4].

### I.8. Courants dans le semi-conducteur

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) [8].

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

$$J_{c_n} = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot E \tag{I.20}$$

$$J_{c_p} = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot E \tag{I.21}$$

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]:

$$J_{tot} = q(n\mu_n + p\mu_p)E = \sigma E \tag{I.22}$$

$$\rho(T) = \frac{1}{q(n\mu_n(T) + p\mu_p(T))} \tag{I.23}$$

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:

$$J_{D_p} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx} \quad \text{Ou} \quad D_p = \mu_p \frac{kT}{q} \quad (\text{I.24})$$

$D_p$  est la constante de diffusion.

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:

$$J_{D_n} = qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad \text{Ou} \quad D_n = \mu_n \frac{kT}{q} \quad (\text{I.25})$$

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 :

$$J_n = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx} \quad (\text{I.26})$$

$$J_p = qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx} \quad (\text{I.27})$$

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 [4]

$$J_{tot} = J_n + J_p \quad (\text{I.28})$$

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

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q} = V_T \quad (\text{I.29})$$

## I.9. Génération 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 :

$$h\nu = E_g \quad (1.30)$$

Soit :

$$(\mu) = \frac{h\nu}{E_g} \quad (1.31)$$

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 :

$$\begin{cases} U_n = D_n \Delta n \\ U_p = D_p \Delta p \end{cases} \quad (1.32)$$

Avec :

$$\begin{cases} U_n = \frac{\bar{n} - n}{\tau_p} \\ \bar{n} = \frac{\partial n}{\partial t} \end{cases} \quad (1.33)$$

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 :

### 1.9.1. Recombinaison en volume de types radiatifs

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 :

$$R = B(pn - n_i^2) \quad (1.34)$$

Avec :

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

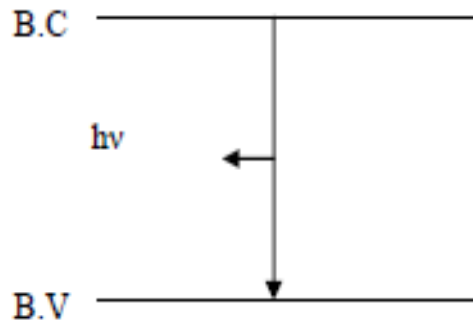


Figure I-13 : Schéma descriptif du processus de recombinaison de type radiatif.

### I.9.2. 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 :

$$R = (C_n n + C_p p) (pn - n_i^2) \quad (\text{I.35}) \quad \text{5)}$$

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

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

$$C_p = 9,9 \cdot 10^{-32} \text{ cm}^6 / \text{s}$$

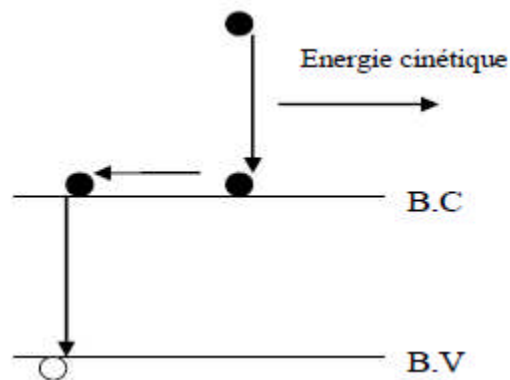


Figure I-14. Schéma descriptif du processus de recombinaison de type Auger.

### I.9.3. 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).

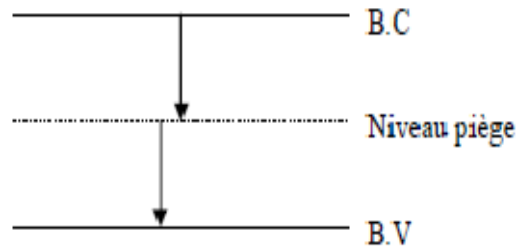


Figure I-15. Schéma descriptif du processus de recombinaison par piège.

**a. Recombinaison en volume de type RSH :**

Le modèle physique décrivant les recombinaisons en volume est basé sur le modèle de Read-Shokley-Hall à un seul niveau piège. Le taux de recombinaison par piège est donné

par la relation :

$$R_{RSH} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_n \left( p + n_{ie} e^{\frac{-E_T}{KT}} \right) + \tau_p \left( n + n_{ie} e^{\frac{E_T}{KT}} \right)} \quad (I.36)$$

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  $10^3 \mu m$ .

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

$$n_{ie}^2 = pn \exp\left(\frac{\Delta E_{gn} + \Delta E_{gp}}{KT}\right) \quad (I.37)$$

Elle est due au rétrécissement de la bande interdite pour un semi-conducteur fortement dopé et  $\Delta E_{gn}$  ,  $\Delta E_{gp}$  présentent le rétrécissement de la bande interdite.

**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°K). Les recombinaisons en surface avant et arrière inhérentes aux densités de dopages selon la relation suivante :

$$S = S_0 \left( \frac{N}{N_{set}} \right)^\alpha \quad (\text{I.38})$$

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

La passivation est l'ajout d'une couche de **SiO<sub>2</sub>** en surface pour limiter les recombinaisons en surface et combler les liaisons cassées (en surface) lors de la découpe du semi-conducteur [10].

## I.10.Contact métal/ semi-conducteur

On a trop besoin d'un contact (jonction) métal/ semi-conducteur comme par exemple le connecteur dans la cellule photovoltaïque. La compréhension des propriétés de la jonction entre un métal et un semi-conducteur est un problème qui se pose dès que l'on fait un dépôt du métal sur le semi-conducteur pour l'insérer dans un circuit. Pour comprendre les phénomènes qui se déroulent au niveau de la jonction métal/ semi-conducteur on définit d'abord :

- **Niveau du vide  $N_{vide}$**  : C'est le niveau d'énergie pour lequel un électron devient non lié au matériau.
- **Travail de sortie  $q\Phi$**  : Il représente la différence de l'énergie entre le niveau de Fermi et le niveau du vide.
- **L'affinité électronique du semi-conducteur  $q\chi_{sc}$**  : C'est une grandeur qui représente l'écart

d'énergie entre le niveau du vide et la bande de conduction de semi-conducteur.

### I.10.1.contact ohmique

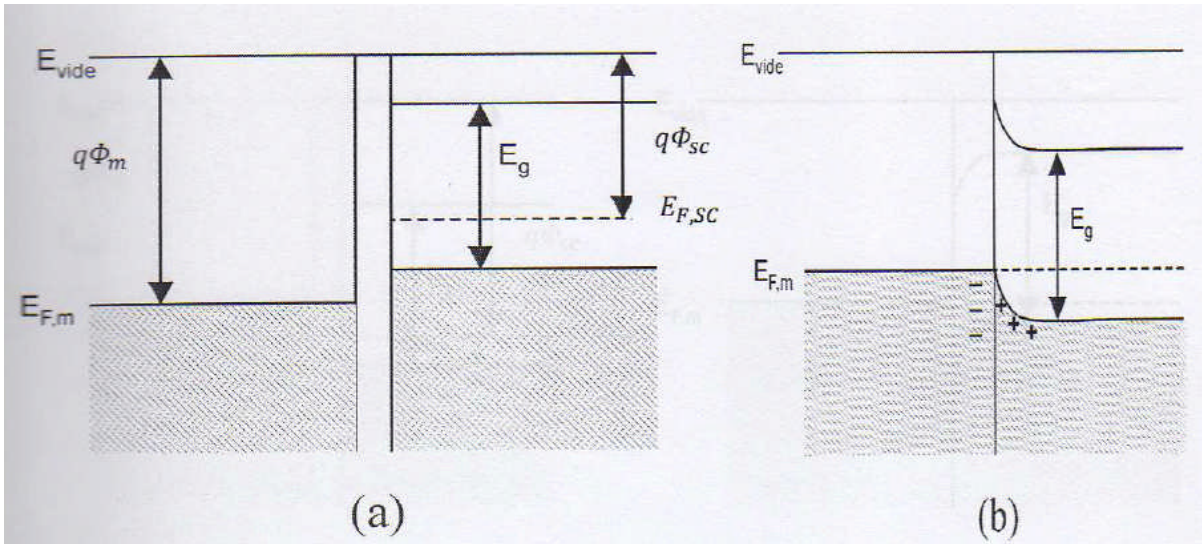
Un contacte semi-conducteur / métal est ohmique lorsque le travail de sortie du semi-conducteur  $P$

**$q\Phi_{sc}$  est inférieur** au travail de sortie du métal  **$q\Phi_M$** .

Après contact, les électrons de la bande de valence du semi-conducteur diffusent dans le métal jusqu'à l'alignement des niveaux de Fermi.

Il se forme alors une zone enrichie (zone d'accumulation) en porteurs majoritaires (trous) dans le semi-conducteur proche de l'interface.

Le métal se charge négativement et le semi-conducteur positivement. Aucune barrière de potentiel ne se forme à l'interface métal/ semi-conducteur et le courant peut passer dans un sens comme dans l'autre : le contacte est dit ohmique. Inversement, dans le cas d'un semi-conducteur de type **n**, il apparaît un contact ohmique lorsque le travail de sortie du semi-conducteur  **$q\Phi_{sc}$  est supérieure** au travail de sortie du métal  **$q\Phi_M$**  [4].



**Figure I.16. Schéma énergétique d'un contact ohmique entre un métal et un semi-conducteur de type P. (a) : avant contact, (b) : après contact [4]**

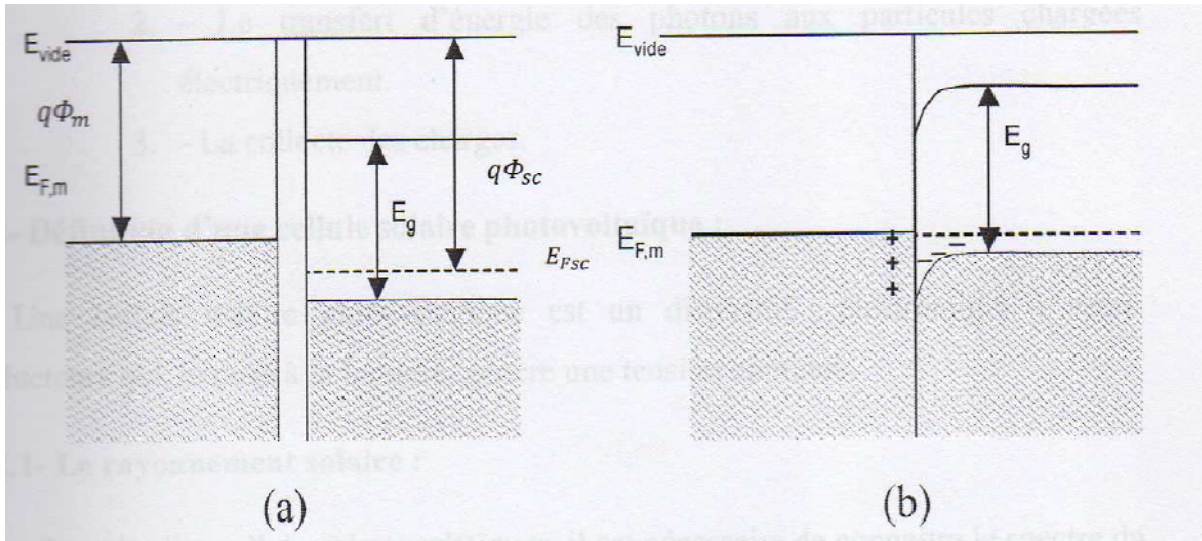
### I.10.2. contact redresseur (Schottky)

Pour un semi-conducteur de type P, le contact est redresseur si le travail de sortie du semi-conducteur P  $q\Phi_{SC}$  est supérieur au travail de sortie du métal  $q\Phi_M$ .

Lorsque les deux matériaux se trouvent en contact, les électrons du métal diffusent dans la bande de valence du semi-conducteur. La migration des porteurs à travers l'interface, se fait jusqu'à égalisation des niveaux de fermi.

Il y'a alors création d'une zone de charge d'espace due à ce transfert de charges. Ceci est décrit par une courbure des bandes de valence et de conduction à partir de l'interface, l'énergie du gap étant conservée.

Le mouvement de charges s'interrompt lorsque le champ électrique créé par la zone de charge d'espace est suffisant pour compenser le courant de diffusion. On est en présence d'un contact redresseur ou contact Schottky.



**Figure I.17. Schéma énergétique d'un contact rectifiant entre un métal et un semi-conducteur de type P. (a) : avant contact, (b) : après contact [4]**

Pour un semi-conducteur de type n, le contact est redresseur lorsque le travail de sortie du semi-conducteur **est inférieur** au travail de sortie du métal.

## I.11. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné les notions fondamentales des semi-conducteurs et la structure de bande des deux principaux semi-conducteurs. Puis, nous avons donné les différents types de recombinaison en surface et en volume dans la cellule solaire.

Dans le chapitre suivant nous présenterons les différents types du silicium de qualité électronique ainsi les propriétés physiques du silicium et du germanium.

***CHAPITRE II :***  
***PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DU SILICIUM ET***  
***DU GERMANIUM***

---

## **II.1. Introduction**

Actuellement, le matériau silicium occupe une place prédominante au sein de l'industrie photovoltaïque grâce à ses nombreux avantages : disponibilité, qualité photovoltaïque assurant au final un bon rendement de conversion [11].

En effet, il est possible de réaliser des plaques de Silicium monocristallin de très grande pureté et à faible coût.

## **II.2. Différents types du silicium**

Le silicium est le matériau le plus utilisé dans le domaine photovoltaïque et apparaît sous différentes formes selon son mode d'élaboration : monocristallin, polycristallin ou amorphe.

### **II.2.1. Le silicium monocristallin**

Le silicium monocristallin est le substrat de base le plus utilisé pour la production des composants électroniques (transistors, mémoires, etc.) La réalisation de ces différents dispositifs électronique rencontre deux principaux problèmes à résoudre pour la préparation du semi-conducteur, par exemple du silicium, du germanium ou de l'arséniure de gallium :

- taux de pureté très élevé
- Obtention du silicium monocristal c'est à dire se présentant sous la forme d'un cristal homogène à orientation moléculaire parfaitement définie [12].

Dans le cas du Silicium, la fusion de zone et le tirage en creuset (méthode de Czochralski) sont les deux méthodes utilisées couramment pour obtenir des lingots monocristallins de grande pureté.

### **II.2.2. Le silicium poly cristallin**

Il se présente sous forme de lingot de silicium, ce dernier étant constitué de grains d'une taille variant entre le millimètre et quelques centimètres. Du fait de la méthode d'élaboration, la concentration en impureté est supérieure à celle du silicium monocristallin et la structure granulaire induit des recombinaisons.

Les cellules polycristalline ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevée que les cellules monocristallines. Ces cellules grâce à leur potentiel de grain de productivité, ce sont actuellement imposés. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent de 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication [13].

### **II.2.3. Le silicium amorphe**

---

Le silicium amorphe a une structure atomique désordonnée, non cristallisée, vitreuse, mais il possède un coefficient d'absorption de la lumière environ 1000 fois supérieur au silicium cristallin. Une fine couche de 0,3 mm est donc suffisante pour absorber l'essentiel du spectre visible.

Dans cette technologie, le silicium est produit directement sur une plaque de verre à partir du gaz silane  $\text{SiH}_4$ . En fait, les plaques de verre sont placées dans une enceinte chauffée où l'on fait le vide, puis du silane est injecté et décomposé par une décharge radiofréquence; le silicium libéré se dépose alors sur les plaques. La présence d'hydrogène est également nécessaire pour la qualité du matériau (il limite le nombre de défauts en saturant les liaisons pendantes de silicium présentes à cause de la structure désordonnée).

L'adjonction des dopants est réalisée par ajout de gaz  $\text{PH}_3$  ou  $\text{B}_2\text{H}_6$  au silane.

Avec ce type de matériau peu coûteux par rapport aux autres formes de silicium, on a de faibles rendements: 5 à 6 % et des problèmes de stabilité apparaissent rapidement quand on l'expose au soleil et aux intempéries (quelques centaines d'heures) [14].

Types de silicium	Rendement théorique	Rendement en laboratoire	Rendement commercial	Domaine d'application
Silicium monocristallin	27,0%	24,7%	14,0-16,0%	Modules de grandes dimensions pour toits et façades ; pour appareils de faibles puissances ; pour l'espace (satellites)
Silicium polycristallin	27,0%	19,8%	12,0-14,0%	Modules de grandes dimensions pour toits et façades ; pour générateurs de toutes tailles
Silicium amorphe	25,0%	13,0%	6,0-8,0%	Modules de grandes dimensions pour intégration dans les bâtiments ; pour appareils de faibles puissances (calculatrices, montres)

**Tableau II.1. Rendement et domaine d'application de diverses cellules solaire [15].**

### II.3. Obtention d'un silicium de qualité électronique

Le silicium est l'élément le plus abondant sur terre après l'oxygène, il représente 25% de la croûte terrestre. Le prix élevé du silicium "qualité électronique" vient de la pureté exigée par l'industrie des semi-

conducteurs. Cette pureté est atteinte après plusieurs étapes industrielles que nous allons voir en détail ci-après.

### II.3.1. Réduction de la silice

Le silicium est obtenu à partir de sable blanc ou de quartz. Le sable est mélangé à du carbone en quantité appropriée, le tout est introduit dans un four à arc. Sous l'action de l'arc la température atteint 1600°C.

#### Réaction principale

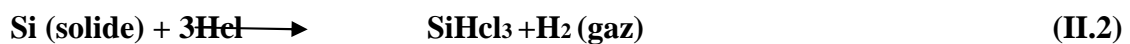


Le silicium ainsi obtenu s'appelle silicium métallurgique a une pureté de 98%, il faut encore le purifier pour obtenir un matériau de qualité électronique.

### II.3.2. Purification du silicium

Le silicium destiné à acquérir la qualité électronique, est réduit en poudre. On le fait réagir avec de l'acide chlorhydrique dans un lit fluidisé à 300°C. Les impuretés sont attaquées par l'acide et peuvent être facilement séparées ; le silicium donne plusieurs produits hydrochlorés dont le plus intéressant est le trichlorosilane  $\text{SiHCl}_3$ .

La réaction est la suivante :

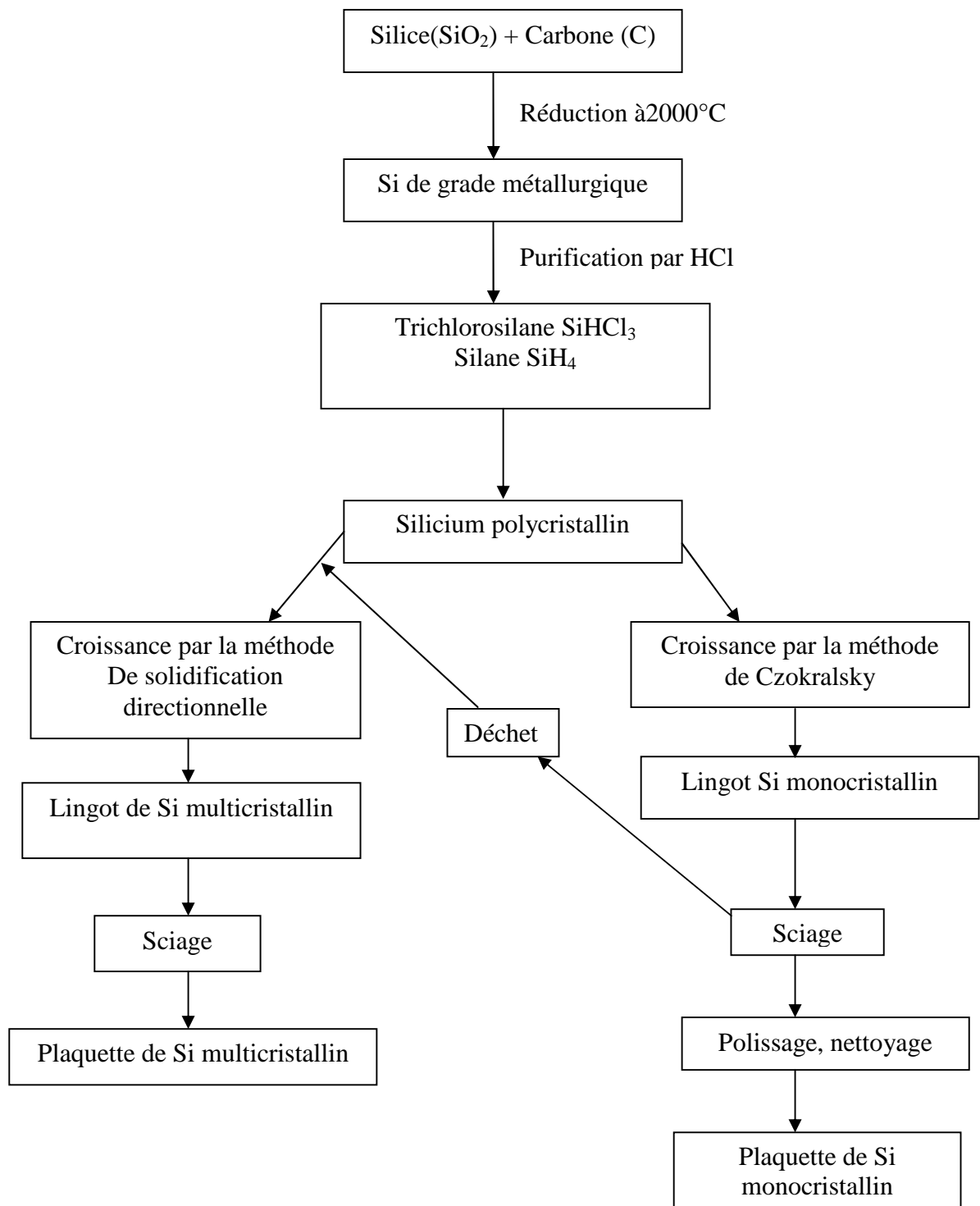


Le trichlorosilane  $\text{SiHCl}_3$  bout à 31, 8°C, on pratique une distillation fractionnée pour le séparer des autres produits. Ce trichlorosilane purifié est ensuite réduit pour redonner du silicium.



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 polycristallin, 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 Czochralsky.

---



**Figure II.1. Diagramme représentant les étapes de fabrication des Si monocristallin et multicristallin.**

### II.3.3. Procédure de Czochralsky

La plus grande partie du silicium monocristallin consommé par l'industrie électronique est produite par la méthode Czochralsky. On utilise creuset en quartz nettoyé, lavé à l'eau dès ionisée et séché sous vide. Dans le creuset, on met le silicium ultra pur en morceaux et on lui ajoute du dopant. Le tout est introduit dans un four qui est refroidit par un circuit de circulation d'eau. Le creuset est ensuite chauffé jusqu'à la fusion du silicium. On descend alors le germe de silicium monocristallin jusqu'à le mettre en contact avec le silicium en fusion.

Le germe tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, le creuset dans le sens contraire. Au départ, on imprime un mouvement rapide au germe pour obtenir un cylindre de silicium de la grosseur d'un doigt environ. On ralentit ensuite le mouvement ; plus la vitesse est faible, plus le diamètre du lingot est important [16] [17].

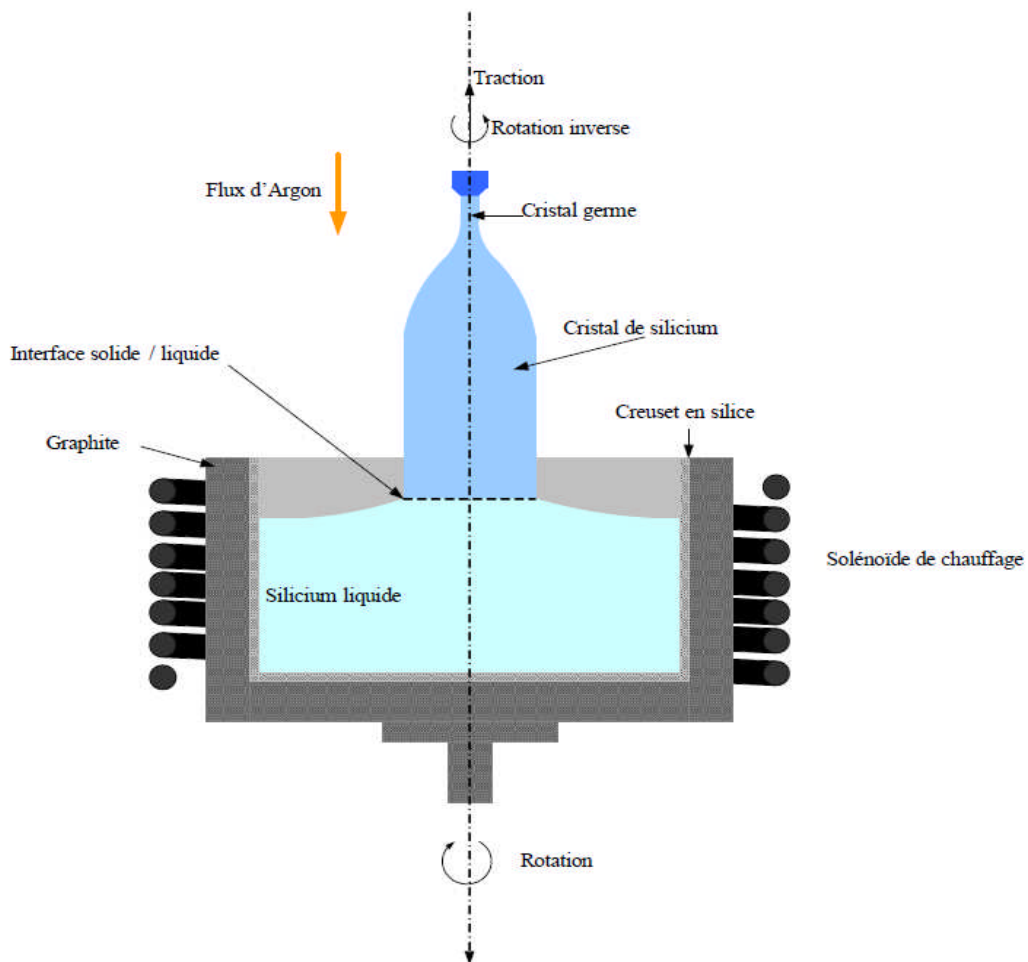
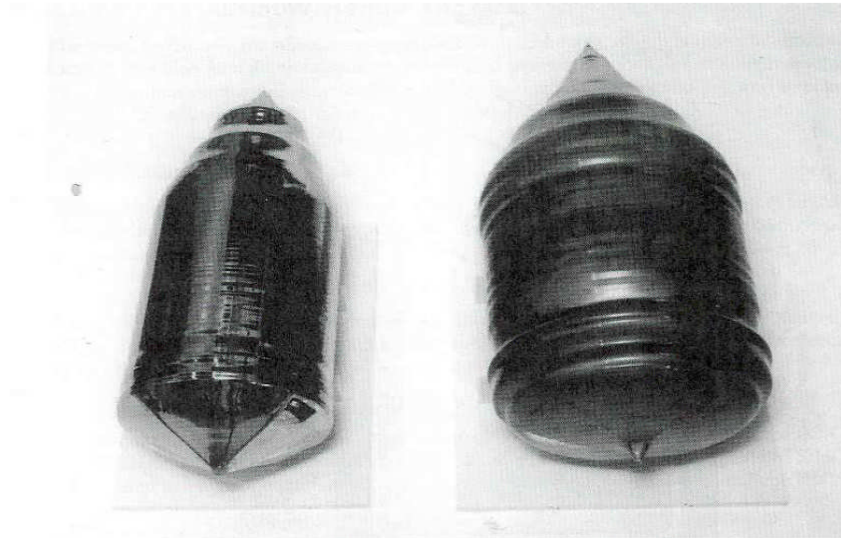


Figure II. 2. Méthode de Czochralsky [14].

La figure II.3 présente deux cristaux obtenus par la méthode czochralsky le premier à un diamètre de 300mm, le second à un diamètre de 400mm [14].



**Figure II.3. Lingots de silicium monocristallin [14 ].**

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

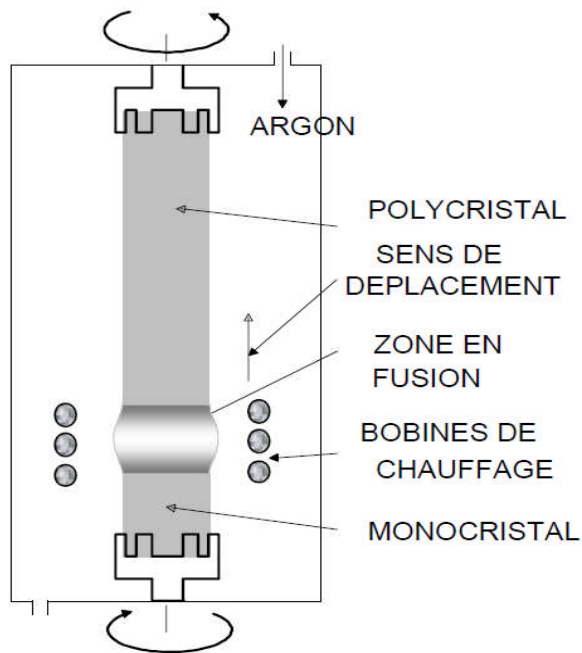
Pour certains dispositifs électroniques, en particulier ceux exigés pour des applications de puissance élevée, le silicium développé par la méthode de Czochralsky n'est pas assez pur.

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

#### **II.3.4.La fusion de zone**

Le raffinage par zone flottante (floating zone, FZ) est obtenu par fusion d'un lingot polycristallin et par le déplacement des éléments de chauffage le long du lingot. On part d'un lingot solide polycristallin. En faisant circuler dans les bobines le courant HF ; le silicium fond. Il se forme une goutte qui tient par la tension superficielle, elle se solidifie par le bas quand la bobine monte, la partie solidifiée prend l'orientation cristalline du bout de départ. On en profite pour obtenir un lingot monocristallin en mettant un germe monocristallin au début du lingot. Lors de la solidification, et suite à des phénomènes thermodynamiques, les impuretés ont tendance à rester dans la zone fondue plutôt qu'à se solidifier. Il en résulte une différence du taux de concentration de ces impuretés entre la zone liquide et la zone solide.

---



**Figure II.4. Raffinage et cristallisation par la méthode de la zone flottante**

### II.3.5. Préparation des plaquettes

#### II.3.5.1. Orientation et découpage

Une fois on a enlevé les deux bouts du lingot du four de croissance, le bout inférieur sert à constituer le germe monocristallin pour la croissance suivante. Le bout supérieur 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).

#### II.3.5.2. 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.

### II.3.6. Défauts cristallins dans le Silicium

Dans un lingot monocristallin plusieurs défauts peuvent être présents, la localisation de ces défauts sur l'emplacement du circuit intégré peut entraîner son rejet et baisser ainsi le rendement de fabrication. Les défauts les plus importants sont les dislocations, ce sont les imperfections dans la structure locale du cristal qui sont causées par des déformations plastiques lors d'un traitement thermique ou qui sont dues à la présence de certaines impuretés.

La densité de défauts est une donnée importante dans le rendement de fabrication. Même une faible densité de défaut peut avoir un effet néfaste [15].

## II.4. Propriétés physiques du silicium et du germanium

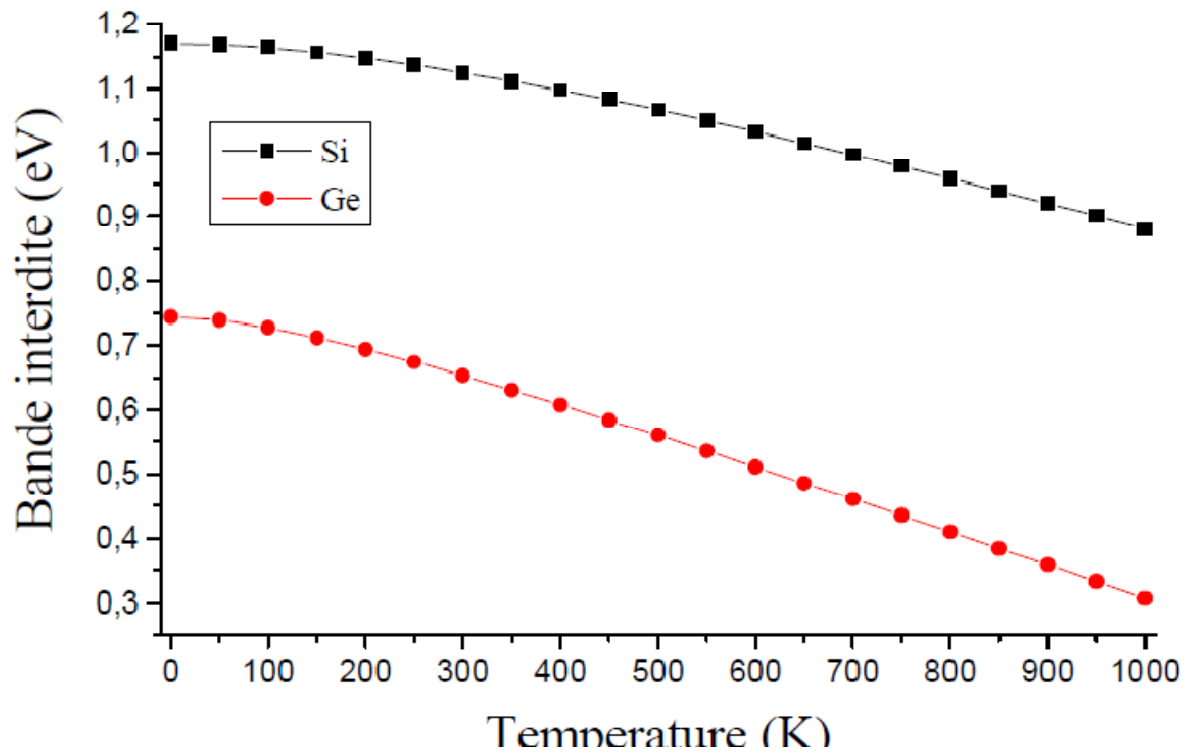
### II.4.1. Hauteur de la bande interdite

La valeur  $E_g$  de la bande interdite donne des caractéristiques électriques importantes à chaque semi-conducteur (Tableau II.2). Ces variations peuvent être décrites approximativement par la fonction universelle (I.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 II.2. Paramètres de variation de la bande interdite en fonction de la température [18].**

$E_g(0)$  est la hauteur de la **BI** à **0k**,  $T$  température en kelvin,  $a$  et  $b$  sont des constantes [8].



**Figure II.5. 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 II.5. 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.

Propriété à 300°K		Si	Ge
Largeur de bande interdite $E_g$ (ev)		1,12	0,67
Concentration d'atomes (/cm <sup>3</sup> )		$5 \cdot 10^{22}$	$4,42 \cdot 10^{22}$
Concentration intrinsèque (/cm <sup>3</sup> )		$1,45 \cdot 10^{10}$	$2,4 \cdot 10^{13}$
Mobilités intrinsèques (cm <sup>2</sup> /V.s)	$\mu_n$	1350	3900
	$\mu_p$	480	1900
Constantes diélectriques relatives $\epsilon_r$		11,7	16,3
Champ de claquage V/m		$-30 \cdot 10^6$	$-8 \cdot 10^6$

**Tableau II.3. Propriétés électrique des principaux semi-conducteurs [8].**

## II.4.2. 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 *SiC* 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 [19] [20].

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 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 :

$$\sigma(T) = q(n\mu_n(T) + p\mu_p(T)) \quad (\text{II.4})$$

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 (mobilité).

---

### II.4.3. Les masses effectives

Les surfaces de l'énergie sont des ellipsoïdes. Et on donne :

➤ Pour le silicium [21] [22]:

$$m_l = 0.98m_0$$

$$m_t = 0.19m_0$$

$$m^- = 0.32m_0$$

➤ Pour le germanium [23] :

$$m_l = 1.59m_0$$

$$m_t = 0.0815m_0$$

$$m^- = 0.22m_0$$

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  $m_0=9.1.10^{-31}$  kg

#### II.4.4. 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
$N_c$ (cm <sup>-3</sup> )	$2,8.10^{19}$	$1,04.10^{19}$
$N_v$ (cm <sup>-3</sup> )	$1,04.10^{19}$	$6,0.10^{18}$
Affinité d'électron eV	4,05	4,0
Energie de Gap à 300°K (eV)	1,12	0,66
Concentration intrinsèque des porteurs (cm <sup>-3</sup> )	$1,45.10^{10}$	$2,4.10^{13}$
Durée de vie minoritaire (s)	$2,5.10^{-3}$	$10^{-3}$
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 II.4. Propriétés physiques du silicium et de germanium**

#### II.5.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en premier lieu les différents types du silicium et les étapes à suivre pour obtenir un silicium de qualité électronique ainsi les techniques pour lesquelles on peut avoir des monocristaux de silicium. Ensuite, nous avons donné les propriétés physiques du silicium et du germanium.

Le silicium a de nombreuses applications dans diverses industries. Le silicium ultra pur est utilisé, par exemple, dans l'industrie semi-conductrice du fait de ses caractéristiques semi-conductrices.

***CHAPITRE III :***  
***PROPRIÉTÉS GÉNÉRAL DE L'ALLIAGE***  
***SiGe***

---

### III.1. Introduction

La technologie Silicium-Germanium (SiGe), dont les développements préliminaires datent du milieu des années 1980 et dont l'arrivée sur le marché est récente, répond à ce besoin conjoint de l'économie et des performances. Des transistors bipolaires à hétérojonction ou des transistors à effet de champ, aux dispositifs quantiques, un nombre important de fonctions sont alors permises. Seules certaines réussissent le pari de l'intégration à moindre coût, mais les fonctions fondamentales tendent déjà à bouleverser les habitudes du concepteur de circuits micro-ondes qui voit une technologie nouvelle se présenter à lui, face aux technologies III-V pour un moindre coût. De plus, de nombreuses études restent également à mener pour évaluer l'ensemble des possibilités offertes par l'alliage SiGe. L'une de ces possibilités a encore été peu étudiée : il s'agit de l'utilisation du transistor bipolaire SiGe comme phototransistor [25] [26].

De nos jours, l'industrie électronique mondiale a acquis un formidable savoir-faire dans le traitement du Silicium. Les avantages naturels: mécaniques, thermiques et chimiques, du Silicium ont tenu une grande part dans la réussite de sa maîtrise technologique, dans la diminution des coûts de fabrication, et ainsi dans sa généralisation.

Cependant, le Silicium ne profite pas du même enthousiasme quant à ses propriétés électriques, au point de pouvoir être considéré comme un semi-conducteur lent.

L'avantage, bien que le coût soit plus élevé, revient alors nettement aux différents composés III-V lorsqu'il s'agit de monter à des fréquences supérieures à quelques GHz.

L'adjonction de Germanium présente en partie une alternative à ce problème en permettant de retravailler les bandes d'énergies du Silicium en vue d'en améliorer les performances. C'est en ce sens que cette idée de réaliser des transistors bipolaires SiGe, qui remonte aux années 1960, est exploitée depuis le milieu des années 1980 [27].

Les propriétés optiques du SiGe ont été étudiées depuis les débuts de ce matériau, laissant entrevoir un potentiel important en détection proche infrarouge ( $0,8\mu\text{m}$  à  $1,55\mu\text{m}$ ), en supports guides d'ondes, mais également en émission au travers de modulateurs [28 ], [29 ].

Les dispositifs exploitant ces propriétés sont en phase active de recherche plus particulièrement depuis le début des années 1990, bien que leur intérêt ait été décelé depuis la réalisation des premières hétéro-structures SiGe.

---

## III.2. Propriétés générales de l'alliage $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

En 1948, Bardeen, Brattain et Schotcky inventèrent le transistor bipolaire. Bien que le matériau exploité fût le Germanium, le Silicium a prît le relais à peine quelques années plus tard dans les développements de l'électronique. La période de transition, qui en découla autour de 1960, favorisa les premières études sur le mélange de ces deux composés en alliage  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ .

Il est alors amusant de s'apercevoir que les premières études concernant ce matériau n'ont pas toujours été réalisées dans l'esprit de trouver un meilleur matériau, mais plutôt parfois dans la volonté de profiter des qualités de réalisabilité de l'alliage, de miscibilité des deux constituants l'un dans l'autre, ou de disponibilité des deux matériaux, pour atteindre un but différent qui était d'étudier des phénomènes généraux afin d'en tirer des lois et des modèles applicables à la classe entière des matériaux semi-conducteurs, comme les phénomènes d'absorption optique [30].

Dans ce cadre également, seul le substrat SiGe fut étudié. Le désaccord de maille qui existe entre le cristal de Silicium et le cristal de Germanium, ne permet pas, en effet, la croissance directe du SiGe sur substrat Si ou inversement, sans provoquer rapidement des dislocations du cristal irrémédiables pour le fonctionnement électrique de la jonction ainsi formée. Ce n'est donc qu'avec la possibilité de déposer et de contrôler avec précision des films d'une dizaine de nanomètres, que les premières études sur l'alliage SiGe contraint au paramètre de maille du Silicium et dépourvu de défauts, ont pu être entamées.

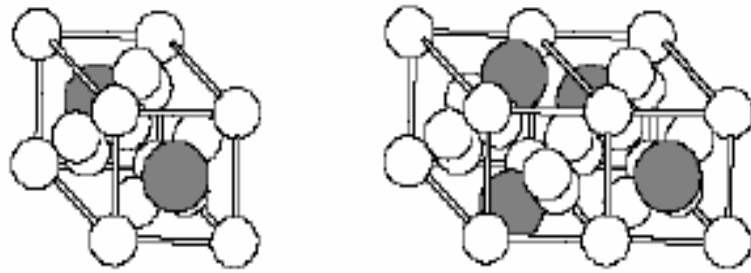
### III.2.1. Le SiGe massif

#### III.2.1.1. Structure cristalline

Les structures cristallines du Si, du Ge ou de l'alliage de SiGe sont les mêmes : elles consistent en deux cubes à faces centrées, décalés chacun selon la diagonale principale d'un quart de la longueur de celle-ci. Dans cette structure, pour le SiGe, les atomes de Silicium et de Germanium sont répartis de manière aléatoire et homogène. Cette répartition aléatoire définit l'absence de plans préférentiels au sein du cristal qui pourraient, pour l'un, contenir majoritairement des atomes de Si, pour l'autre, majoritairement des atomes de Ge[31]. Ceci définit l'absence de phases chimiques qui produiraient une certaine périodicité dans la répartition du Germanium.

Voilà la structure cristalline du SiGe. En d'autres mots, il s'agit de celle du Silicium dans laquelle certains atomes ont été échangés aléatoirement avec des atomes de Germanium. Cela peut également être dit à l'envers : la structure cristalline du SiGe est celle du Germanium dans laquelle certains atomes ont été échangés aléatoirement avec des atomes de Silicium. Une représentation symbolique est fournie par la Figure III.1 ci-après.

---



**Figure III.1.Exemples de maille dans un cristal SiGe.**

Les atomes sont représentés par des sphères de petite taille (14 électrons) pour le Silicium et de plus grande taille (32 électrons) pour les atomes de Germanium. Les traits matérialisent les limites des structures cubiques à faces centrées.

Bien que la représentation des atomes par des sphères de diamètre donné soit sommaire, elle permet de comprendre aisément la notion de paramètre de maille dans un cristal. En ce sens, si les atomes sont gros, le paramètre de maille devra s'élargir afin de préserver l'équilibre. A l'inverse, si les atomes sont petits, le paramètre de maille sera plus faible. Le matériau est dit relaxer lorsqu'aucune contrainte de pression ne s'exerce sur l'une ou l'autre des liaisons et que le paramètre de maille est laissé libre.

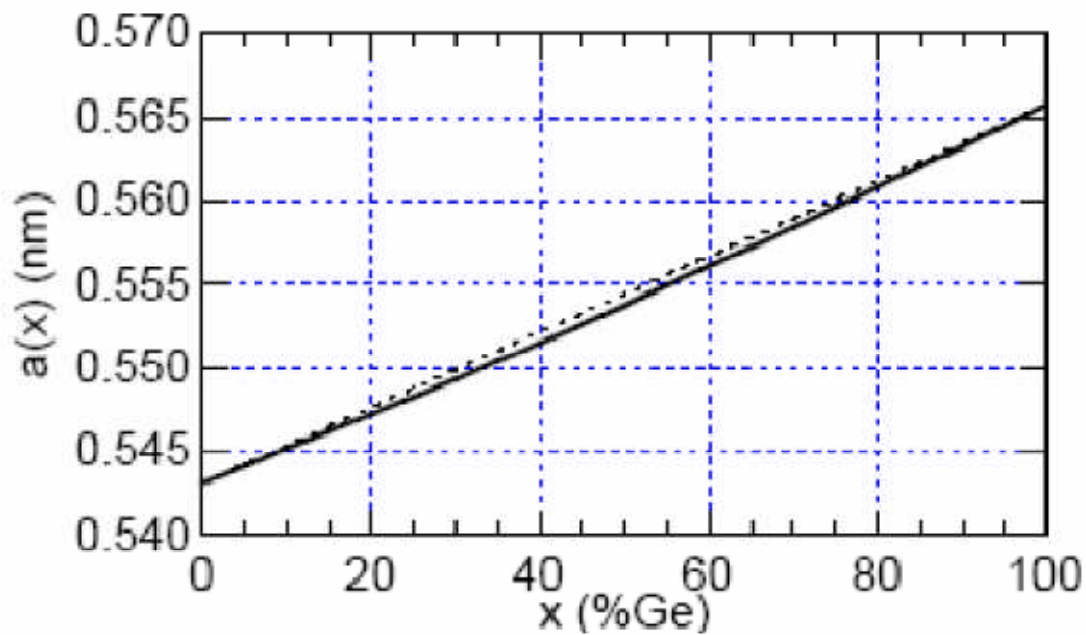
Les données pour le cristal de Silicium et le cristal de Germanium sont présentées dans le Tableau III.1. Le diamètre de l'atome de Germanium étant plus grand que celui de l'atome de Silicium, le cristal de Germanium massif présentera un paramètre de maille plus grand que celui du cristal de Silicium.

Dans le cas du matériau  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , ces atomes de diamètres différents sont mélangés. Le paramètre de maille du cristal va donc évoluer d'un extrême à l'autre, passant de la valeur du cristal de Silicium, pour la fraction molaire  $x=0$ , à celle du cristal de Germanium, pour  $x=1$ .

Il s'agit là du premier paramètre du SiGe variant avec la concentration de Germanium. La loi de Vegard appliquée à ce cas prédit une variation linéaire du paramètre. Ceci est une extrapolation extrêmement courante et utile. La mesure ne montre qu'une infime déviation autour de cette loi, Figure III.2, [32].

	Silicium	Germanium
Diamètre de l'atome (°A)	1,46	1,52
Paramètre de maille (°A)	5,43	5,66

**Tableau III.1.Paramètres des atomes des cristaux de Si et de germanium massifs.**



**Figure III.2. Variation du paramètre de maille de cristal  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  en fonction de la composition de germanium [45].**

La courbe en pointillés représente l'approximation par la loi de Vegard. La répartition des atomes de Germanium dans le cristal peut cependant être ordonnée dans le volume. Ce phénomène est principalement engendré par des considérations de dynamique de croissance de film plutôt que par des raisons de stabilité. Il dépend donc du mode de production du cristal. On trouve dans ces conditions les cas suivants :

- Pas d'ordonnement dans le SiGe massif produit à partir de SiGe liquéfié, ni dans celui produit par dépôt sur un substrat d'orientation  $\langle 111 \rangle$ .
- Ordonnement présent dans le volume et aux interfaces du SiGe massif produit par dépôt sur substrat d'orientation  $\langle 100 \rangle$  entre  $300^\circ\text{C}$  et  $800^\circ\text{C}$  (des techniques particulières utilisant des tensio-actifs permettent néanmoins de l'éviter) [45].

Cette existence de différentes phases, avec des plans de Silicium et des plans de SiGe au sein du cristal, peut affecter les performances optiques du matériau dans les dispositifs où les interfaces sont nombreuses, comme au sein des super-réseaux [31] [33] [34].

### III.2.1.2. Bandes d'énergies

L'alliage SiGe massif, ou relaxé, présente de manière générale un intermédiaire entre le cristal de Silicium et le cristal de Germanium. Ainsi, l'augmentation progressive de la fraction de Germanium dessine une modification continue des propriétés du cristal de Silicium vers celles du Germanium.

Les bandes d'énergies des deux extrêmes sont représentées en espace réciproque sur la Figure III.3 à  $300\text{K}$ . Le Germanium et le Silicium sont tous les deux des matériaux à gap indirect. Le sommet de la bande

de valence est situé en  $k=0$  (région  $\Gamma$  sur la figure III.3) alors que le bas de la bande de conduction du Germanium se situe en vallée L, tandis que celui du Silicium se situe en vallée X. Ces bandes d'énergies définissent des valeurs de bande interdite, indirectes ou directes, qui sont donc différentes. Leurs valeurs à température ambiante sont données par le Tableau III.2.

	Silicium	Germanium
Largeur de la bande interdite directe (eV)	>2,50	0,90
Largeur de la bande interdite indirecte (eV)	1,10	0,65

**Tableau III.2. Largeurs de bande interdite, direct et indirect, pour le cristal de silicium et de germanium à 300K [45].**

Les valeurs de ce tableau sont données volontairement à  $\pm 0,05\text{eV}$ . Cet écart est couramment rencontré dans la littérature et est suffisant pour une présentation générale. Il traduit, outre les imprécisions, les variations impliquées par les différences de méthodes de mesure[45].

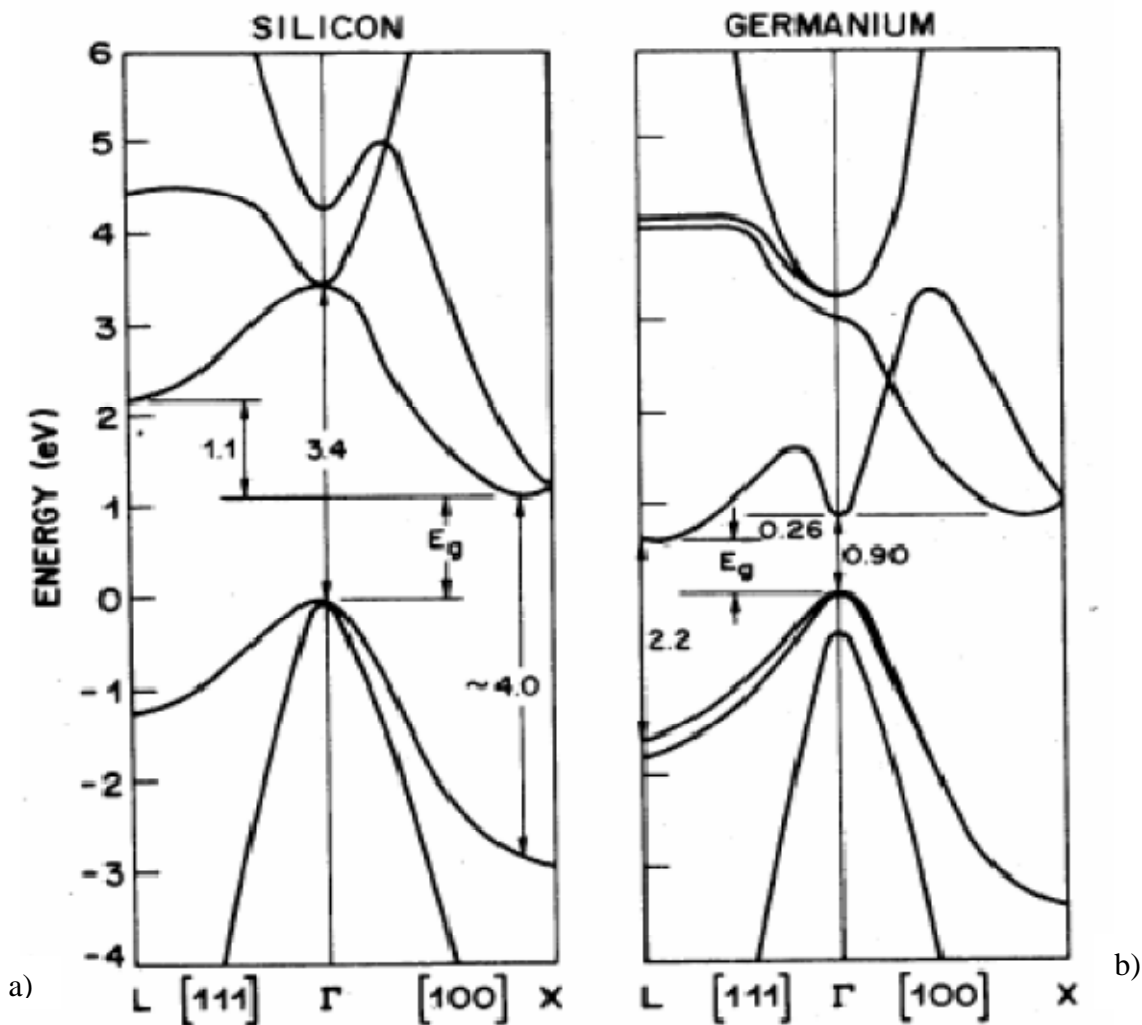
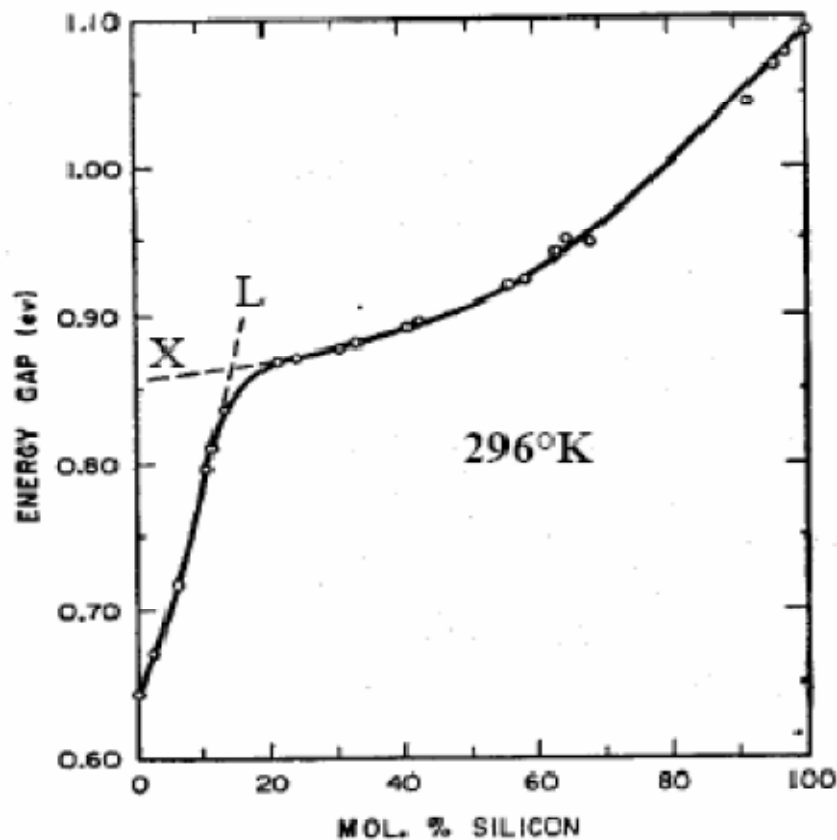


Figure III.3. Schéma des bandes d'énergies dans l'espace réciproque à 300k, pour a) le Silicium b) le Germanium [8].

Les mesures réalisées sur la valeur de la bande interdite indirecte  $E_g$ , ont exploité les spectres d'absorption optique du SiGe massif. La comparaison à des modèles, l'absorption indirecte a permis l'extraction précise de cette largeur de bande. Les mesures réalisées en 1958 par Braunstein [30], sont présentées sur la figure suivante :



**Figure III.4. Largeur de bande interdite indirecte en fonction de la composition du Si dans l'alliage SiGe à 296°k [30].**

La position de gauche sur l'axe horizontal repère le cas du Germanium pur tandis que celle de droite repère celui du Silicium.

Les variations en fonction de la composition de Germanium de la largeur de bande interdite suivent une évolution de la position des minima de la bande de conduction du Silicium vers celle des minima du Germanium. Deux seules vallées rentrent en jeu. Le minimum de la bande de conduction du  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  se trouve d'abord dans la vallée X qui est celle du minimum du Silicium pur, puis dans la vallée L qui est celle du Germanium pur, au-delà de 85% de Ge.

Avant que ce dernier ne se positionne dans la vallée L, il a fallu que l'énergie de la bande de conduction du Silicium baisse légèrement dans cette vallée et qu'elle augmente légèrement dans la vallée X. Ceci se produit depuis le silicium pur jusqu'à  $x=0,85$ . Au-delà, le minimum de la vallée L prévaut alors sur la largeur de bande interdite indirecte [35].

Braunstein [30] a mesuré les spectres d'absorption optique de l'alliage SiGe dès 1958 en fonction de la température et de la composition. La dépendance de l'énergie de bande interdite avec la concentration en Ge est directement liée à la structure de bande de conduction.

Ainsi, on observe une transition assez brutale du gap lorsque l'on passe du matériau de type Si au matériau de type Ge. Krishnamurly [36] a déduit une expression du gap optique à 300°K pour chaque régime de variation s'accordant bien avec l'étude expérimentale de Braunstein et [6]. Les expressions du SiGe sont :

$$\begin{cases} E_g^X = 1.1053 - 0.3803x + 0.1691x^2 \\ E_g^L = 2.1762 - 1.7442x + 0.3306x^2 \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

### III.2.1.3. Propriétés optiques

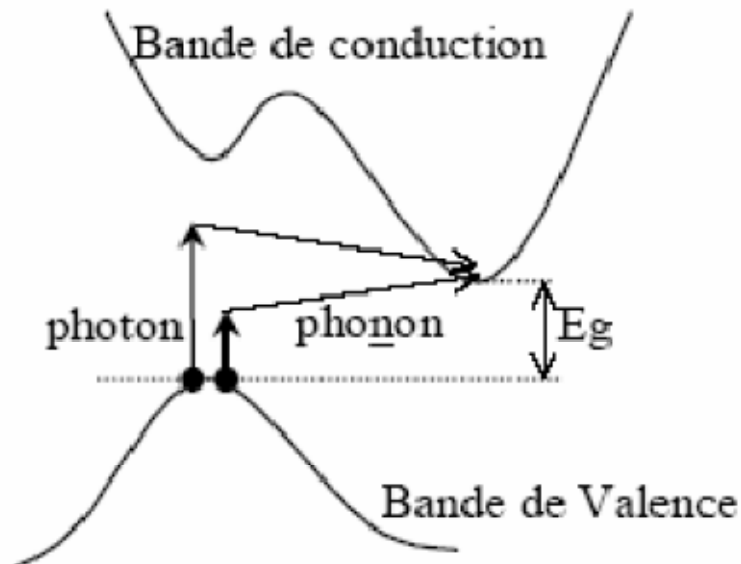
Les matériaux Silicium, Germanium et SiGe, sont tous les trois des matériaux à gap indirect. Les transitions des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction provoquées par l'incidence de photons sont verticales. En l'absence de tout autre mécanisme, elles ne peuvent donc se produire que pour des transitions de hauteur au moins égale à la valeur de la bande interdite directe. Sa valeur, indiquée précédemment, Tableau III.2, est supérieure à 2,5eV. Celle du Germanium est plus basse avec 0,90eV.

La limite correspondante d'absorption en longueur d'onde vaut alors l'inverse de cette limite en énergie, multiplié par un facteur 1,24 eV.μm, d'après les liens qui existent entre l'énergie et longueur d'onde. La limite d'absorption directe du Silicium est donc inférieure à 0,5μm, dans le visible vers le bleu. Celle du Germanium est en revanche de 1,38μm.

Cependant, il existe également une absorption indirecte qui se produit entre deux extrema des bandes de conduction et de valence, et qui prolonge l'absorption en longueur d'onde. Ceux-ci sont décalés dans l'espace des vecteurs d'onde, aussi, pour expliquer ce phénomène, il est nécessaire de faire intervenir un mécanisme permettant la conservation de la quantité de mouvement.

Cette conservation, que ne saurait faire respecter un photon lors d'une transition indirecte, fait essentiellement appel aux propriétés vibratoires du réseau, concentrées dans une particule appelée phonon : ainsi, durant l'absorption indirecte d'un photon, un phonon, dont la quantité de mouvement est égale à celle qui sépare l'extremum de la bande de valence avec le minimum de la bande de conduction, sera généré ou absorbé. Ce mécanisme est schématisé

par la Figure III.5.



**Figure III.5. Schéma du mécanisme d'absorption indirecte assisté par phonon.**

La limite d'absorption indirecte est donc déterminée par la somme de la largeur de la bande interdite indirecte et de l'énergie des phonons mis en jeu. L'étude détaillée menée par Braunstein [29], a permis d'isoler les termes de largeur de bande interdite et d'énergie de phonon. Ce sont ces travaux qui ont permis de mesurer avec exactitude la valeur de la largeur de bande interdite du SiGe massif présenté au paragraphe précédent.

Les spectres d'absorption mesurés, d'une part pour des alliages riches en Silicium, d'autre part pour des alliages riches en Germanium, sont respectivement présentés sur la Figure III.6 et la Figure III.7. L'absorption au sein de l'alliage SiGe est très similaire à celle du Silicium, jusqu'à des proportions de 30% de Germanium. Ceci est fondamentalement lié au fait que la largeur de bande interdite n'évolue que faiblement pour cette composition.

En première approximation, le matériau se comporte comme le Silicium. Au-delà, dans le cas des alliages SiGe riches en Germanium, le spectre d'absorption évolue rapidement avec la composition pour se rapprocher du spectre du Germanium pur.

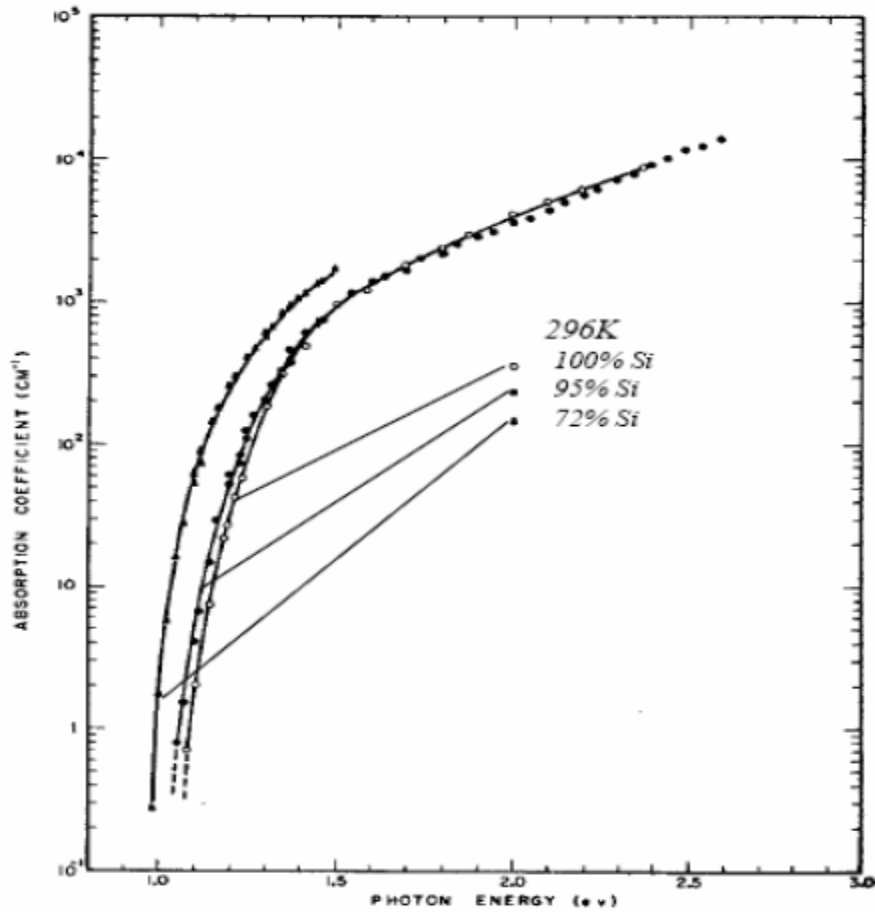


Figure III.6. Spectres d'absorption d'alliages SiGe riches en silicium [29] [30].

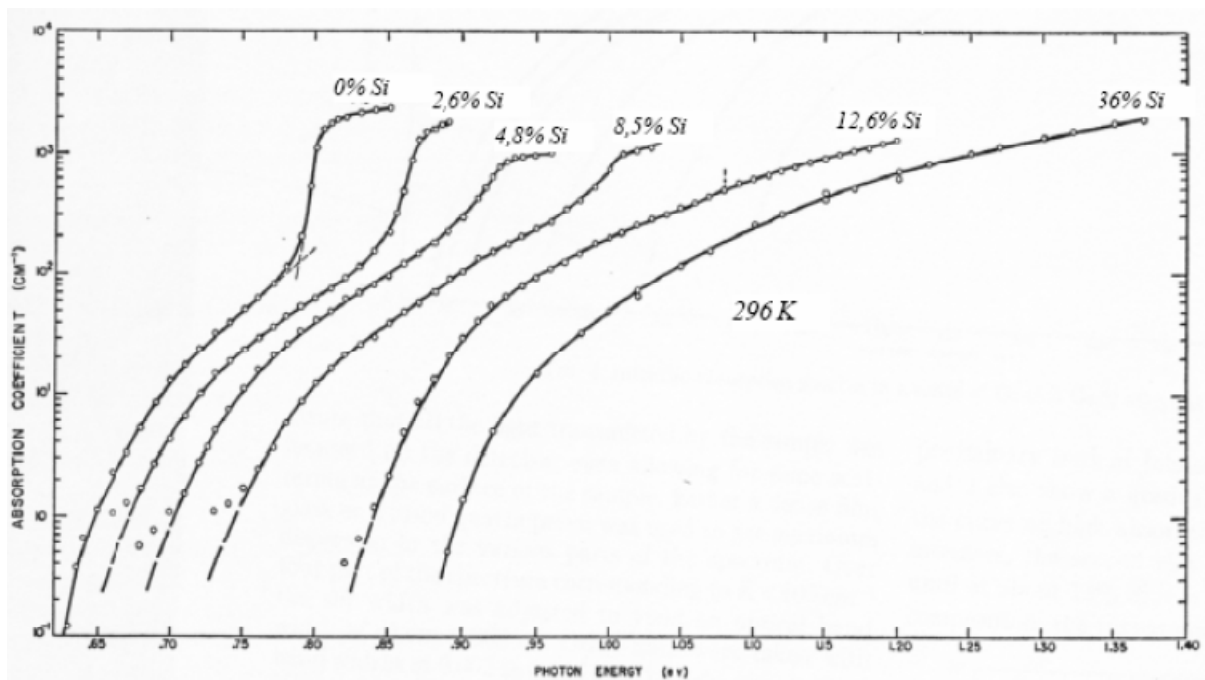


Figure III.7. Spectres d'absorption d'alliages SiGe riches en Germanium [30].

En définitive l'alliage SiGe massif ne présente d'améliorations vis-à-vis du

Silicium quant à l'absorption optique, que si la proportion de Germanium est significative, c'est-à-dire supérieure à 30%. Il sera vu qu'il peut en être différemment pour le SiGe contraint.

### III.2.2. Le SiGe contraint sur Silicium

#### III.2.2.1. Structure, contrainte et stabilité

Le matériau  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  présente l'intérêt fondamental, pour les composants étudiés, de posséder une largeur de bande interdite plus faible que celle du Silicium. La mise en application de cette propriété nécessite néanmoins la réalisation d'au moins deux couches superposées Silicium- Germanium / Silicium alternant deux largeurs de bande interdite différentes. Cet empilement constitue une hétérostructure pour laquelle il existe a priori un désaccord de maille entre les deux matériaux. Ceci est schématisé par la Figure III.8.

Le désaccord de maille, pour 20% de Germanium, entre le SiGe et le Silicium reste cependant de l'ordre de 1%. Cette particularité rend possible la croissance de fines couches SiGe en accord de maille avec le Silicium. Le matériau possède alors des propriétés différentes de celles du SiGe massif, dit relaxer. Ceci justifie que l'on distingue le SiGe contraint et le SiGe-massif. Puisque le paramètre cristallin des alliages SiGe est supérieur à celui du Silicium, les films contraints sur Silicium sont en compression biaxiale dans le plan de croissance, et en élévation normalement à l'interface. Les propriétés de transport sont, de ce fait, anisotropes [37] [38].

Dans le cas de films SiGe plus épais, les couches éloignées auront tendance à être relaxées. Il y a dès lors apparition de dislocations qui se propagent depuis l'hétérojonction jusque dans le volume de SiGe.

Les dislocations de matériaux constituent une dégradation profonde des qualités du matériau. Elles caractérisent donc un état critique qu'il n'est pas envisageable de tolérer dans un dispositif actif. Elles sont notamment la cause de mécanismes de recombinaison importants, ainsi que de fuites et court-circuit.

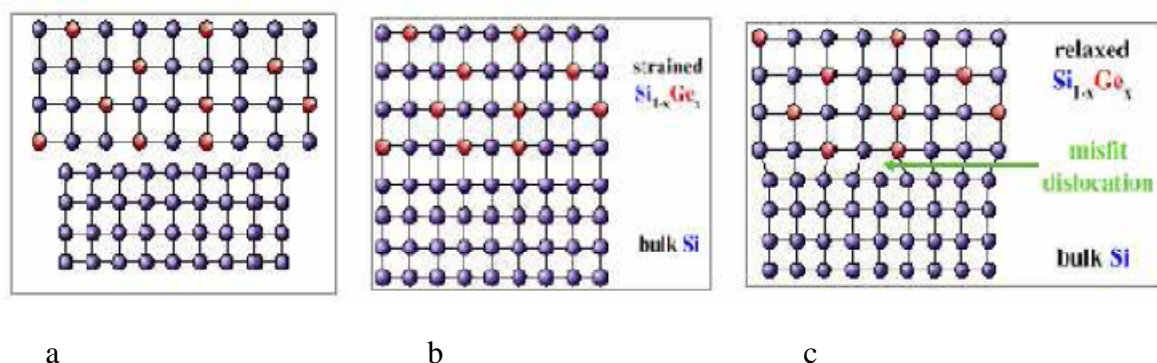


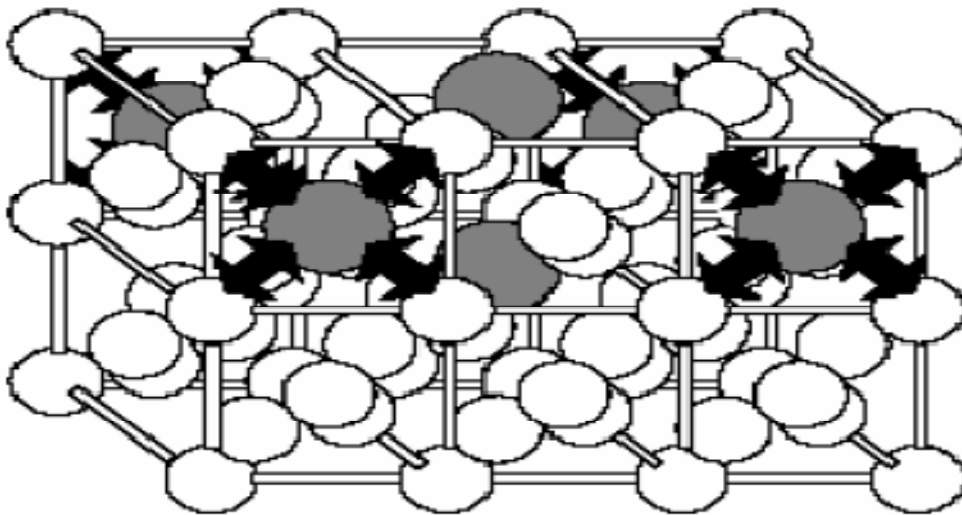
Figure III.8. Représentation plane de la structure cristalline d'hétérostructures SiGe/Si.

Trois cas possibles : a) pas de jonction, les deux matériaux sont relaxés et les paramètres de maille sont distincts ; b) la jonction des deux matériaux est réalisée, le film de SiGe est suffisamment fin pour que le film de SiGe-contraint soit stable ; c) la jonction est réalisée mais le film de SiGe est instable, des dislocations prennent naissance à l'interface et le matériau se relaxe.

### III.2.2.2. Réduction de la bande interdite

Les atomes de Germanium, qui sont une ligne en dessous du Silicium dans la classification périodique des éléments, possèdent un cortège électronique doté d'une couche supplémentaire vis-à-vis du Silicium. Son occupation spatiale est nécessairement plus volumineuse et la représentation des atomes en sphères permet ainsi de mieux comprendre la notion de contrainte qui s'en dégage.

La Figure III.9 donne la représentation en trois dimensions de l'hétérojonction SiGe/Si. La partie supérieure représente le Silicium-Germanium dont le paramètre de maille est contraint à celui du Silicium. Les atomes de Germanium, qui sont plus gros, apparaissent ainsi comprimés, leur cortège électronique modifie alors celui des atomes de Silicium voisins ce qui se traduit par une modification des bandes d'énergie du SiGe contraint par rapport au cas du SiGe relaxé.



**Figure III.9.Exemples de mailles présentes à l'interface  
SiGe(au-dessus) / Si( au-dessous) [45].**

Les flèches noires traduisent de manière symbolique la contrainte sur les liaisons Si - Ge, induite par l'accord de maille forcé du SiGe sur le Si.

La largeur de bande interdite et l'ensemble de la structure de bande du matériau se retrouvent affectés par cette mise sous contrainte, mais la quasi-totalité de l'influence de cette compression de l'alliage SiGe se répercute intégralement dans la bande de valence [39].

### III.3. Conclusion

L'alliage SiGe est devenu au profil des ans l'un des matériaux les plus intéressants pour l'industrie de la microélectronique. Les chercheurs utilisent maintenant une technique de dépôt de pointe d'épitaxie en phase

---

vapeur sous vide poussé (UHV-CVD) afin d'élaborer des couches minces de SiGe utilisées tant par l'industrie de la microélectronique, pour le développement de nouveaux produits, que par les universités, pour de nouvelles initiatives de recherche.

Le silicium et le SiGe sont également utilisés dans la fabrication des cellules photovoltaïques qui permettent de transformer la lumière en électricité. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter quelques notions sur les cellules photovoltaïques.



***CHAPITRE IV :***  
***LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES***

---

## **IV.1. Introduction**

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus prometteuse et la plus puissante parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque (PV) est obtenue par transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen de cellules PV.

Cependant la plupart de l'énergie électrique est produite par combustion de ressources non renouvelables (carbone, pétrole, gaz, nucléaire) dont le délai d'épuisement est estimé à quelques dizaines d'années. De plus, ce type de production d'énergie est très polluant. Le développement des sources d'énergies renouvelables et non polluantes est donc d'actualité.

Parmi les sources d'énergies renouvelables, on compte le vent océaniques, la géothermie, le solaire PV, etc... Ce dernier est une source d'énergie très puissante. En effet, la puissance du rayonnement solaire au niveau du sol est d'environ  $950 \text{ Watt/m}^2$ . La quantité totale d'énergie solaire reçue au niveau du sol pendant une semaine dépasse l'énergie produite par les réserves mondiales de pétrole, de carbone, de gaz et d'uranium.

La production d'électricité photovoltaïque connaît une croissance importante depuis les années 1990-95 pour dépasser les 700MWc en 2003 [40].

Les projections les plus courantes prévoient un marché annuel est de l'ordre de 3GWc pour l'année 2010 et entre 9 et 21GWc pour 2020. Pour faire face à cette croissance, la recherche dans le domaine s'oriente sur deux axes essentiels, qui peuvent sembler opposés : augmenter le rendement des cellules, tout en diminuant les coûts de production.

## **IV.2. Le rayonnement solaire :**

### **IV.2.1. notions préliminaires**

Le développement, l'optimisation et la caractérisation de cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée : le soleil. La surface de celui-ci se comporte comme un corps noir à la température d'environ 5800k. Ceci conduit à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de  $0,5\mu\text{m}$  pour une puissance d'environ  $60\text{MW/m}^2$ . Soit un total de  $9,5 \cdot 10^{25} \text{W}$ .

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  $1,36\text{kW/m}^2$  hors atmosphère.

Cette irradiance est pondérée par divers facteurs à la surface de la terre : absorption par les molécules des différentes couches de l'atmosphère, conditions climatiques, l'altitude du lieu d'observation et saison. Des

---

gaz comme l’ozone (O<sub>3</sub>), pour des longueurs d’ondes inférieures à 0,3μm, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et la vapeur d’eau ( H<sub>2</sub>O), pour les infrarouges au dessus de 2μm, absorbent les énergies proches de leur énergie de liaison, ce qui conduit à des « trous » dans le spectre solaire visible au sol. Par ailleurs, les poussières et aérosols présents dans l’atmosphère conduisent à une absorption répartie quasiment sur toute la gamme spectrale, ce qui conduit à une baisse globale de la puissance incidente. Afin de comparer et d’unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, il a été institué la notion d’air Mass ( AM ). Elle quantifie la quantité de puissance absorbée par l’atmosphère en fonction de l’angle θ du soleil par rapport au zénith :

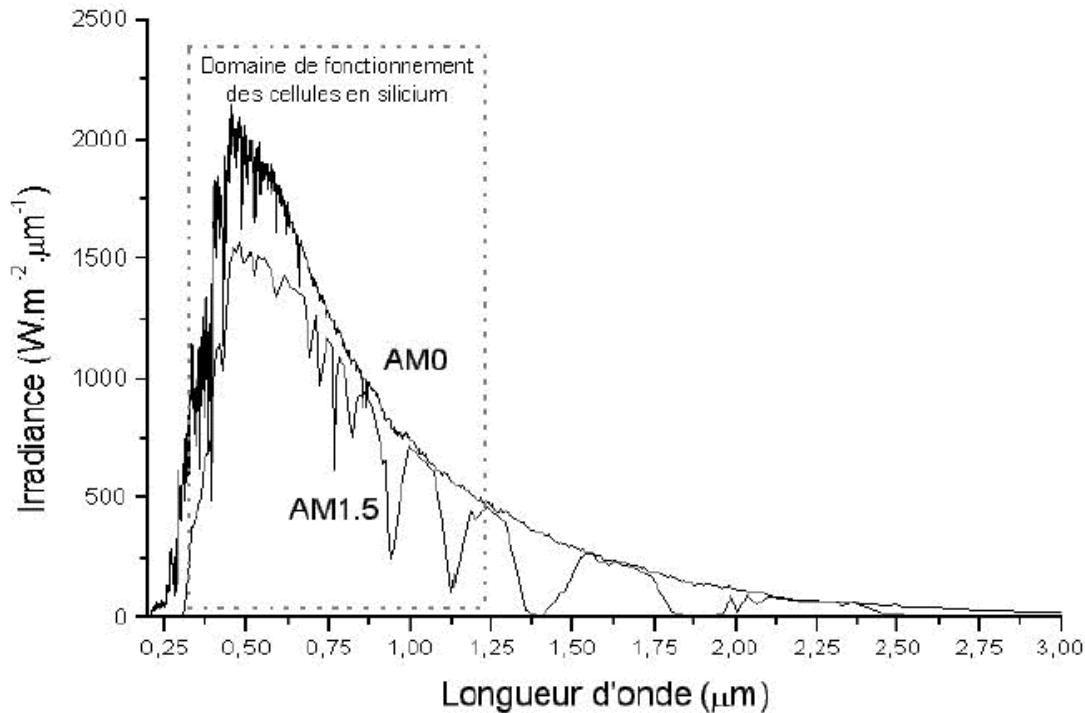
$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (IV.1)$$

#### IV.2.2.Spectre du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L’énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d’onde λ :

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l’émission d’un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en :

Ultraviolet UV	0.20 < λ < 0.38 μm	6.4%
Visible	0.38 < λ < 0.78 μm	48.0%
Infrarouge IR	0.78 < λ < 10 μm	45.6%



**Figure IV.1.Spectre solaire hors atmosphère [40]**

AM0 correspond à l'irradiance (puissance reçue par une surface en  $W/m^2$ ) hors atmosphère, AM1 correspond à une position du soleil au zénith du lieu d'observation.

Le spectre AM1.5, correspondant à un angle du soleil de  $48,19^\circ$  par rapport au zénith, est le plus couramment utilisé. L'irradiance correspondante est arrondie à  $1KW.m^{-2}$ . Le nombre 1,5 indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith.

### **IV.3.Types de cellules solaires**

On distingue trois générations de cellules photovoltaïques en fonction des développements des technologies [41].

#### **IV.3.1.1<sup>ère</sup> génération**

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction PN et utilise généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les wafers de silicium est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté. On différencie également les cellules à base de silicium monocristallin et polycristallin. Ces dernières ont un rendement inférieur par rapport aux premières, mais ont un coût de fabrication moins élevé.

#### **IV.3.2. 2<sup>ème</sup> génération**

Les couches minces ("thin films") constituent la seconde génération de technologie photovoltaïque. Dans cette génération, on distingue le silicium amorphe (a-Si), le di-sélénium de cuivre indium (CIS), le tellure de cadmium (CdTe), entre autres.

Dans le cas de couches minces, la couche de semi conducteur est directement déposée sur un substrat (par exemple du verre). La production de ce type de cellules est moins coûteuse que la première génération puisqu'elle consomme moins de matériau semi-conducteur et ne nécessite pas de passer par l'étape de transformation du silicium en "wafers". Le problème des cellules de seconde génération est le rendement moindre de ce type de cellules (6-7% et 14% en labo) et la toxicité de certains éléments (cadmium) pour leur fabrication. Cependant, cette seconde génération a beaucoup d'avantages pour des marchés de niche comme les applications en modules flexibles, avec de faibles illuminations ou avec des températures élevées.

Le di-sélénium de cuivre Indium (CIS) qui est au stade de la production industrielle et offre un rendement de 10 à 12 % pour ses modules commerciaux ne présente pas les problèmes de toxicité du cadmium.

Les réductions de coût attendues à moyen terme pour cette technologie sont donc très prometteuses.

### **IV.3.3. 3<sup>ème</sup> génération**

La troisième génération vise à passer la limite maximale de rendement des cellules actuelles, qui est d'environ 30%. Plusieurs concepts sont envisagés pour atteindre cet objectif :

- superposition de multiples cellules (utilisant des bandes d'énergie différentes) .
- cellules à concentration.
- utilisation des photons à basse énergie qui ne sont habituellement pas absorbés par la cellule.
- cellules à électrons chauds produisant plus de paires électron/trou pour des énergies supérieures à la bande d'énergie
- conversion des photons pour ajuster le spectre de la lumière solaire aux caractéristiques du semi-conducteur.

## **IV.4. Structure et fonctionnement d'une cellule photovoltaïque**

### **IV.4.1. Interaction photon / semi-conducteur**

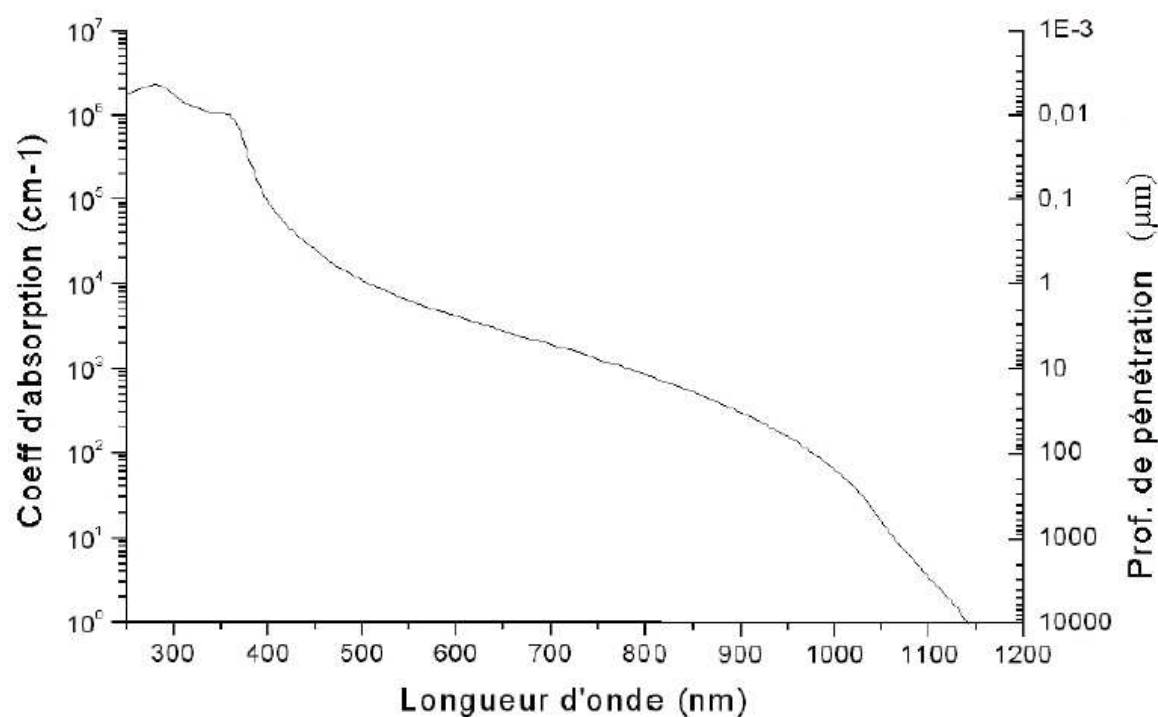
L'écart entre les bandes de valence et de conduction, ou gap, représente une caractéristique fondamentale des semi-conducteurs. Selon la nature du gap (direct ou indirect) il se présente deux types de transition : radiative (gap direct) : quand le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction coïncident dans l'espace des k, les transitions s'effectuent alors verticalement, et non radiative (gap indirect) : le cas du silicium, les transitions entre les extrema des bandes sont obliques puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirecte, il faut que le photon soit absorbé (ou

---

émis) par l'électron. Notons que la valeur du gap indirect du silicium est 1,12eV à 300°K (ce qui correspond a une longueur d'onde de 1107 nm).

L'interaction entre les photons et les semi conducteurs se traduit par la caractéristique essentielle de matériau dans le domaine photovoltaïque : le coefficient d'absorption. Il traduit le nombre de photons par unité d'épaisseur du matériau à la fonction de leurs longueur d'onde .la figure IV.2 nous donne celui du silicium. Nous constatons que pour des longueurs d'onde inferieur à 365nm, la majorité des photons incidents est absorbée dans les 100 premiers Å du matériau.

Comme nous l'avons vu précédemment, ces transitions directes ne sont plus possibles pour des longueurs d'ondes plus grandes .Il faut alors, qu'un phonon au mois vienne assister l'électron pour que se dernier passe dans la bande de conduction .Ceci réduit la probabilité de transition. L'augmentation de la longueur d'onde des photons entraine donc une diminution du coefficient d'absorption. Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau (à l'énergie d'un phonon près) la transition n'est plus possible et le photon n'est pas absorbé.



**Figure IV.2 coefficient d'absorption du silicium et profondeur pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde [40]**

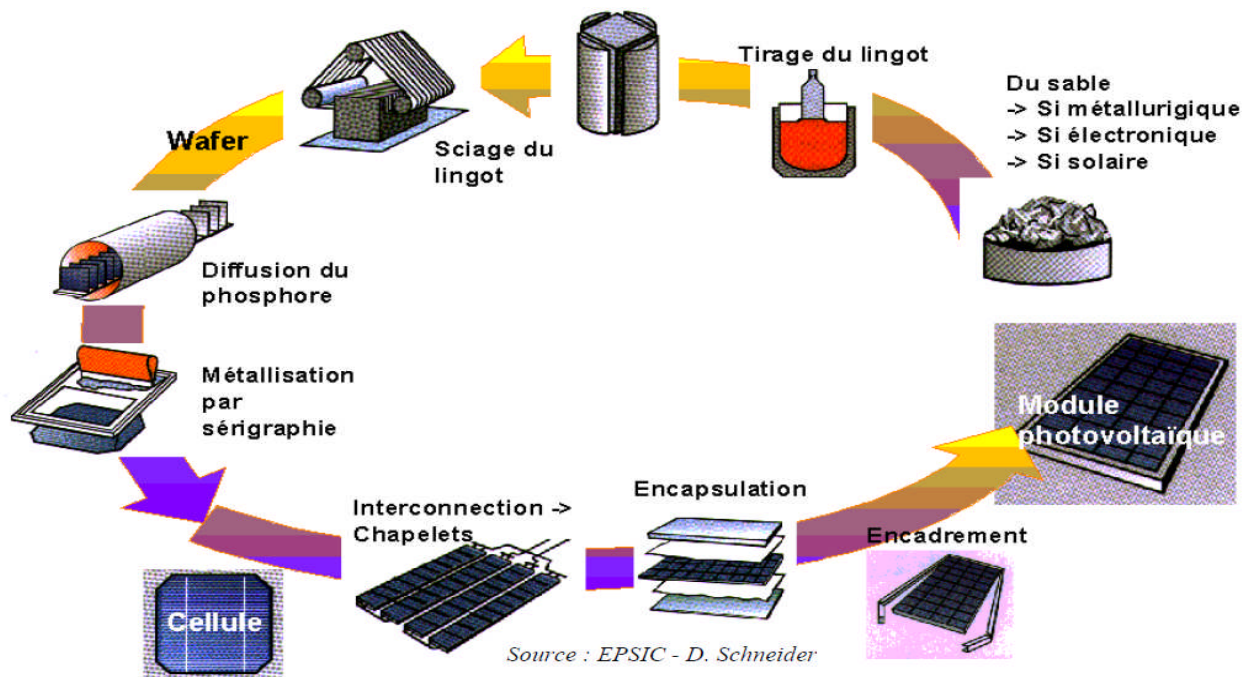
L'interaction photon/électron au sein du semi-conducteur se traduit finalement par la génération d'une paire électron-trou, qui modifie localement la conductivité du matériau.

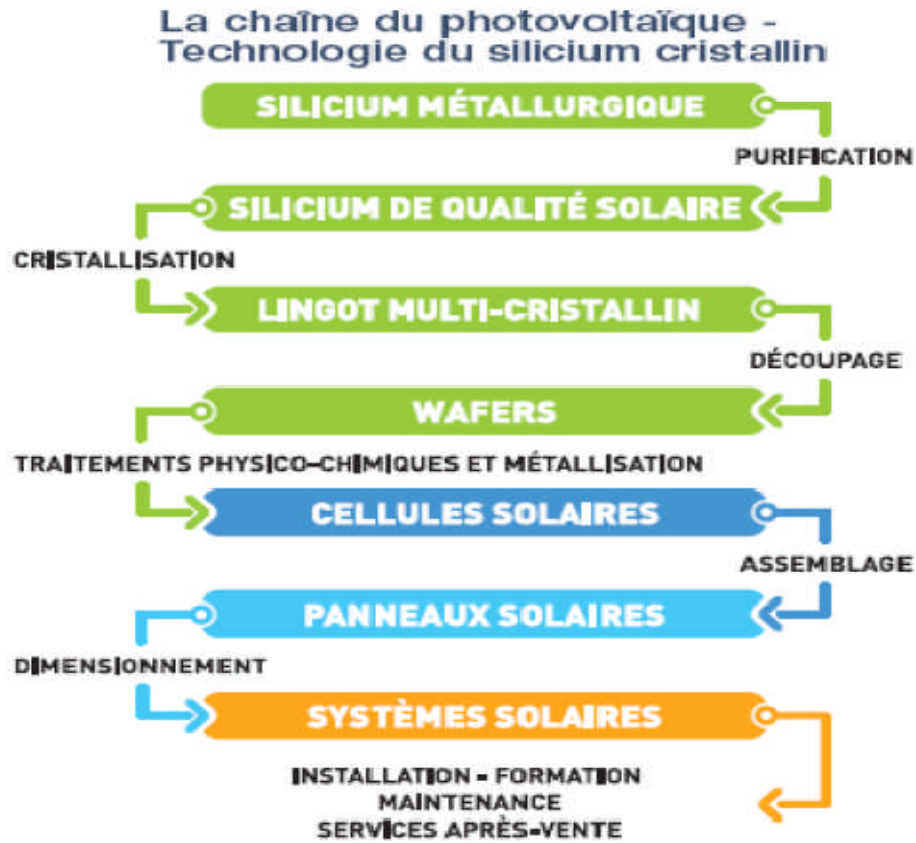
Notons que nous nous situons dans un régime du faible injection, c'est à dire que la densité de porteurs photogénérés ,est faible devant celle des porteurs majoritaires au sein du matériau .Ainsi cet excès de porteurs est plus sensible dans le cas de porteurs minoritaires (trous dans la région dopé n et électron dans celle dopé p).

La cellule photovoltaïque se comportant comme un générateur, il s'agit à présent de séparer ces deux types porteurs pour éviter qu'ils ne se recombinent entre eux ,et de les collecter dans un circuit électrique extérieur .

#### IV.4.2.Fabrication d'une cellule photovoltaïque :

On peut expliquer cette procédure par les schémas suivants :





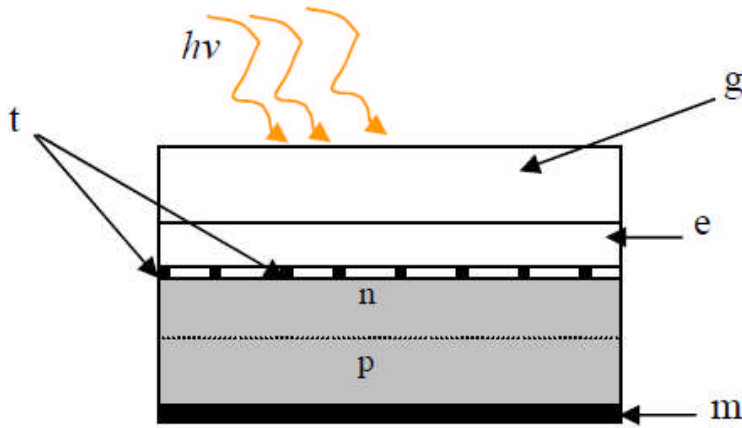
**Figure IV.3. Processus de fabrication [13]**

#### **IV.4.3. Structure d'une cellule photovoltaïque**

Une cellule photovoltaïque peut être définie comme un dispositif qui génère des charges positives et négatives par absorption d'énergie lumineuse. La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homo jonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne.

La figure (IV-4) représente un échantillon schématique d'une configuration de la cellule solaire. Elle se compose d'un abri du verre (g), un encapsulant (e), et un métal en arrière contact (m) afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident [42].

La jonction p-n de ces deux matériaux fonctionne comme une diode. Lorsque cette diode est exposée à des photons dont l'énergie ( $h\nu$ ) est supérieure à celle de l'énergie du matériau, appelée l'énergie de bande gap, le nombre d'électrons libres du semi-conducteur de type-p et celui de trous du semi-conducteur de type-n augmente considérablement. Si les photons incidents ont une énergie inférieure à  $E_g$ , ils ne seront pas absorbés c'est-à-dire leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque.

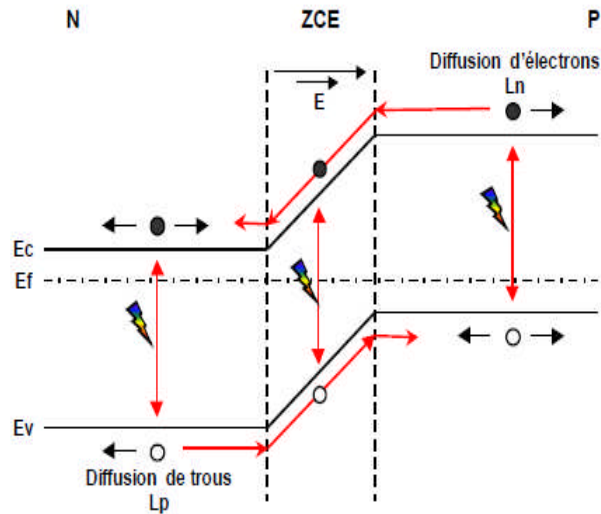
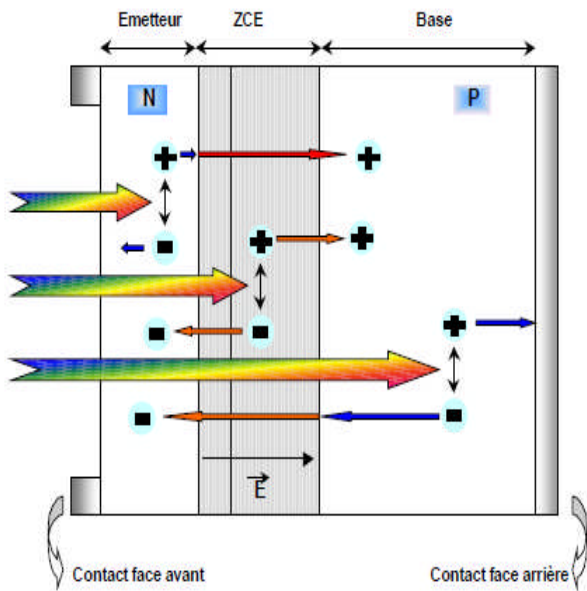


**Figure IV.4.présentation schématique d'une cellule photovoltaïque [42]**

#### **IV.4.4.principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque**

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. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type *n* et dopée de type *p*. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau *n* diffusent dans le matériau *p*. La zone initialement dopée *n* devient chargée positivement, et la zone initialement dopée *p* chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone *n* et les trous vers la zone *p*. Une jonction PN a été formée.

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont bombardés par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches de valence ont tendance à être arrachés : si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons décrochés créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.

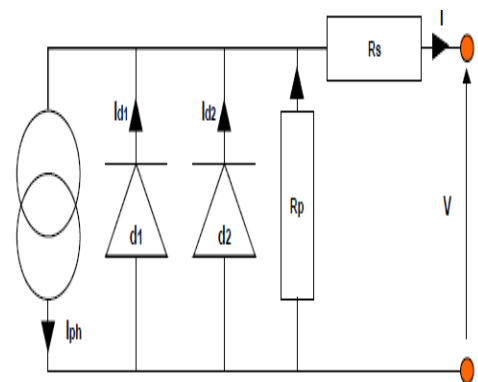


**Figure IV.5. Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque sous éclairage [11]**

#### IV.5. Schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque

L'analogie entre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque sous éclairage est celui d'un générateur de courant, produisant un courant  $I_{ph}$  auquel se soustrait le courant de la diode en polarisation directe, n'est qu'une représentation simplifiée du fonctionnement réel de la cellule.

Pour tenir compte de différentes limitations de la cellule photovoltaïque, en introduisant le modèle à deux diodes représenté sur la figure suivante (figure IV.6.) [11].



**Figure IV.6. Modélisation d'une cellule photovoltaïque**

Les différents paramètres de ce modèle sont :

**Générateur de courant** : il délivre le courant  $I_{ph}$  correspondant au courant photo généré.

**La résistance série  $R_s$**  : elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, à savoir l'émetteur, la base et les contacts métalliques.

**La résistance parallèle  $R_p$**  : également connue sous le nom de résistance de court circuit, elle traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur.

**La diode  $D1$**  : modélise la diffusion des porteurs dans la base et l'émetteur. Son influence sera d'autant plus grande que le matériau présentera une bonne longueur de diffusion.

**La diode  $D2$**  : modélise la génération/ recombinaison des porteurs dans la zone de charge d'espace.

Le courant au sein de la cellule photovoltaïque est donné par la relation :

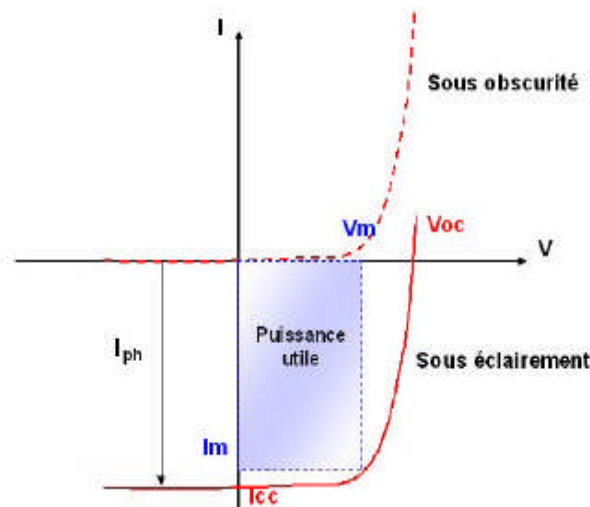
$$I = I_{s1} \left( \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{n_1 kT}\right) - 1 \right) + I_{s2} \left( \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{n_2 kT}\right) - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_p} \quad (\text{IV.2.})$$

$I_{s1}$  et  $I_{s2}$  : sont les courants de saturation des diodes  $D1$  et  $D2$ .

$n_1$  et  $n_2$  : sont les facteurs d'idéalité des diodes  $D1$  et  $D2$ .

#### IV.6. Les différents paramètres de la cellule photovoltaïque

Considérons la caractéristique courant /tension de la cellule photovoltaïque représentée sur la figure suivante (IV.7)



**Figure IV.7. caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque [11]**

Les différents paramètres caractéristiques de la cellule sont les suivants :

- **$V_{co}$**  : tension de circuit ouvert : elle représente la tension aux bornes de la cellule sous éclairage sans circuit de charge.

$V_{co}$  est donné par la relation :

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s} - 1\right) \quad (\text{IV.3})$$

- **I<sub>cc</sub>** : courant de court circuit : courant lorsque V=0.
- **V<sub>m</sub>** : tension correspondante à la puissance maximale fournie.
- **I<sub>m</sub>** : courant correspondant à la puissance maximale fournie.

Le point de fonctionnement est imposé par la résistance de charge et par la cellule elle-même. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra d'obtenir la puissance maximale, soit :

$$P_m = V_m \cdot I_m \quad (\text{IV.4})$$

On définit les deux autres paramètres suivants :

- **FF** : facteur de forme : on détermine la qualité électrique de la cellule.

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (\text{IV.5})$$

Dans le cas d'une cellule idéale, le facteur de forme FF ne peut pas être supérieur à 0,89 du fait de la relation exponentielle liant courant et tension.

- **η** : rendement : le rendement est le rapport entre la puissance électrique fournie par la cellule et la puissance incidente.

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_{incidente}} \quad (\text{IV.6})$$

#### IV.7. Installation électrique photovoltaïque

En site isolé, le champ photovoltaïque peut fournir directement l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipement domestique). Un système de régulation et une batterie d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique en l'absence de soleil. Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques: Le régulateur de charge a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie.

La majorité des populations à l'écart des réseaux électriques vit dans des zones rurales, où l'implantation de tels réseaux est difficile, pour des raisons d'accès ou de moyens. Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante, ils donnent aux populations un accès à l'électricité avec un coût, une maintenance et des difficultés de mise en œuvre réduits.

En site isolé on peut utiliser des récepteurs fonctionnant en courant alternatif. Dans ce cas, l'installation comprendra un onduleur [13].

Un onduleur est un dispositif électronique et statique qui convertit le courant électrique continu en courant alternatif avec la fréquence souhaitée

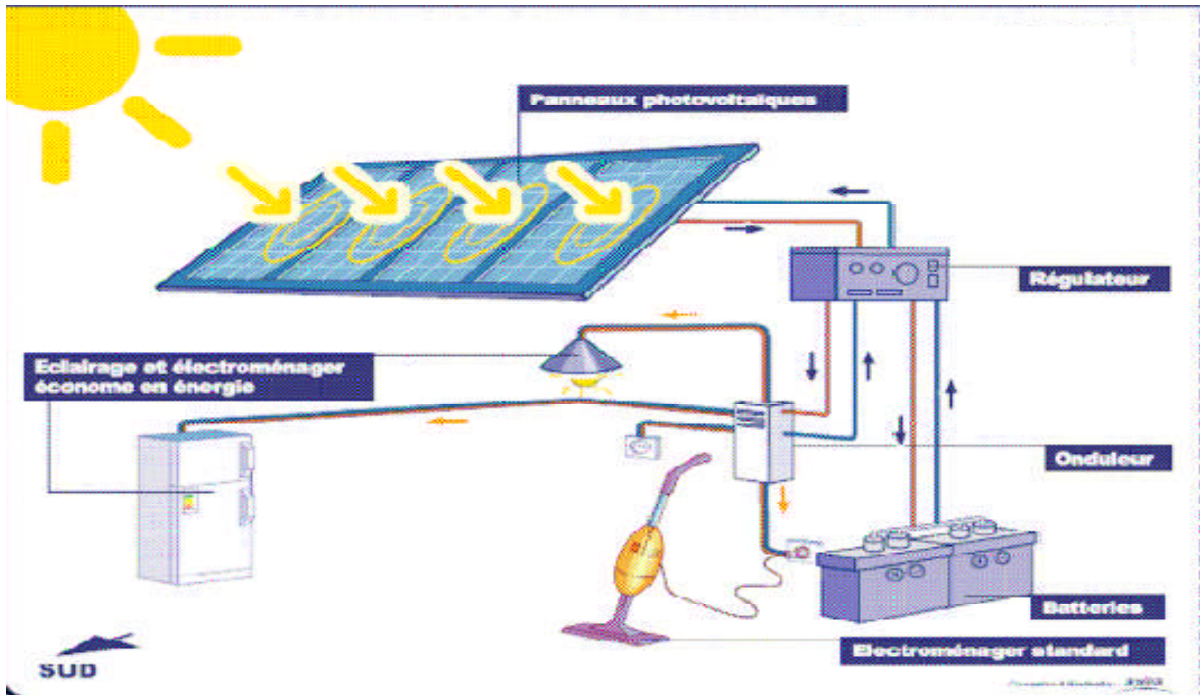


Figure IV.8.Installation électrique photovoltaïque [13]

#### IV.9.Conclusion

L'industrie des semi-conducteurs contribua largement au développement des cellules solaires. Une cellule solaire classique n'est rien d'autre qu'une grande diode au silicium ayant la surface de la plaquette sur laquelle elle est disposée.

## CHAPITRE V :

# ***SIMULATION DES CELLULES SOLAIRES À***

## ***BASE DE***

### ***Si***

#### **V.1 Introduction**

Une façon d'exploiter l'énergie solaire est d'utiliser des cellules photovoltaïques qui convertissent l'énergie véhiculée par le rayonnement incident en un courant électrique continu. Cette conversion est basée sur l'effet photovoltaïque engendré par l'absorption de photons. Une partie des photons absorbés génère des paires électron-trou dans lesquelles un champ électrique créé dans la zone de charge d'espace d'une jonction p-n.

Un tel dispositif est appelé diode p-n. Une autre façon d'amplifier ce courant est de réduire l'épaisseur de la première zone qui absorbe une partie de la lumière incidente. [43].

#### **V.2. La conversion photovoltaïque**

##### **V.2.1. Principe de la conversion photovoltaïque**

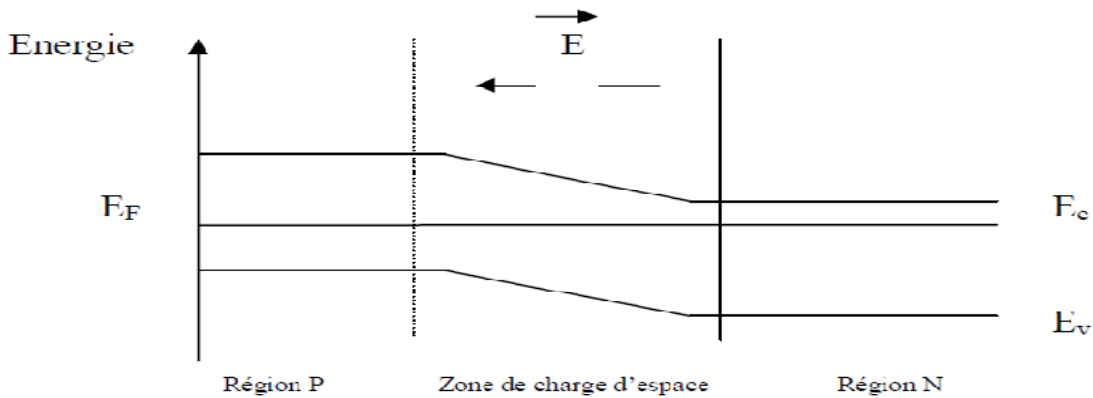
Considérons une jonction p-n recevant un rayonnement monochromatique de fréquence  $\nu$ , telle que  $h\nu > E_g$ . Si les photons incidents interagissent avec les électrons de la bande de valence en leur communiquant

---

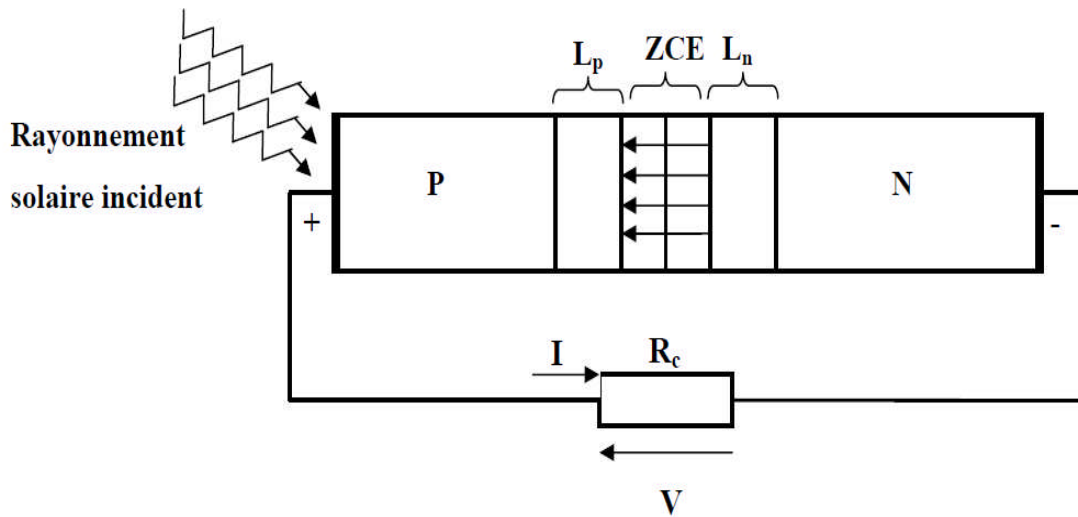
leur énergie, ceux-ci passent dans la bande de conduction laissant des trous dans la bande de valence. Le rayonnement incident excite des paires électron-trou. Les électrons créés dans la région P et les trous engendrés dans la région N diffusent et atteignent la zone de charge d'espace et les porteurs libérés de part et d'autres de la jonction à une distance inférieure à leur longueur de diffusion  $L_p$  et  $L_n$  pris et accélérés par le champ électrique  $E$ , traversent la zone de transition.

La région N reçoit des électrons et se charge négativement ; la région P accepte des trous et devient positive.

Le rayonnement incident a pour effet de polariser la jonction en direct.



**Figure V.1.a. Diagramme de bande d'une cellule**



**Figure**

**V.1.b. Jonction PN éclairée et chargée d'une résistance  $R_c$**

Lorsqu'on relie les deux cotés de la jonction à une charge  $R_c$  le courant  $I$  la parcourt et une d.d.p  $V$  apparaît à ses bornes :  $V = V_P - V_N = RI$ , le courant traverse la jonction de N vers P, il est donc négatif.

$$I = I_{cc} - I_d (V) \quad (\text{V.1})$$

Avec :

**I<sub>cc</sub>** : courant de court circuit.

**I<sub>d</sub> (V)** : courant d'obscurité de la diode.

Eclairer la jonction revient à la polariser en direct, ce qui se traduit par une injection de porteurs minoritaires, tandis que la concentration des porteurs majoritaires n'est pas modifiée. Le courant I est dû à la diffusion des porteurs minoritaires par rapport à l'équilibre. La jonction p-n éclairée est un convertisseur d'énergie électromagnétique en énergie électrique (Figure V.1 .b)

## V.2.2. Paramètres essentiels caractérisant une cellule solaire

### V.2.2.1. Courant de court-circuit

Si les deux électrodes sont en court-circuit à travers un ampèremètre, les électrons drainés par un champ interne de la jonction vont donner naissance à un courant de court-circuit **I<sub>cc</sub>** qui correspond au photocourant **I<sub>ph</sub>** généré par le rayonnement. Pour une distribution spectrale donnée, ce photocourant est proportionnel à l'irradiation du rayonnement incident et à la surface active de captation. Il définit la quantité de paire électron-trou générée G qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion **L<sub>n</sub>** et **L<sub>p</sub>**, donné par la relation suivante:

$$I_{ph} = q G (L_n + L_p) \quad (\text{V.2})$$

### V.2.2.2. Tension de circuit ouvert

Si la cellule est laissée en circuit ouvert, les porteurs générés par le rayonnement et séparés par le champ interne vont s'accumuler de part et d'autre de la jonction, induisant une autopolarisation de la jonction dans le sens passant. Cette autopolarisation induit un courant de diode dans le sens direct égal et opposé au photocourant. La tension alors mesurée aux bornes des électrodes est appelée tension de circuit ouvert **V<sub>co</sub>**. C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal au photocourant, elle est donnée par la relation suivante :

$$V_{co} = (kT/q) \ln[(I_{cc}/I_0)+1] \quad (\text{V.3})$$

### V.2.2.3. Facteur de forme

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule ou encore, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée  $V_m \cdot I_m$  et la puissance idéale  $V_{co} \cdot I_{cc}$ , on le note comme suit :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (V.4)$$

#### V.2.2.4. Rendement de conversion d'énergie

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident  $P_0$ . On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale et la puissance  $P_0$  :

$$\eta_m = \frac{V_m I_m}{P_0} = FF \frac{V_{co} I_{cc}}{P_0} \quad (V.5)$$

### V.3. Logiciel de simulation PC1D

#### V.3.1. Aperçu du logiciel

Le logiciel de simulation numérique des cellules solaire PC1D (Calculations, Primarily, One-Dimensional), a une réputation internationale dans la recherche photovoltaïque. Il a été développé à l'université « New South Wales de Sydney » en Australie ; qui est l'une des pionnières dans ce domaine.

Son utilisation est très pratique, il permet de simuler n'importe quelle structure photovoltaïque, selon les matériaux disponibles en fichiers data, 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 par la Figure IV.2, 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.

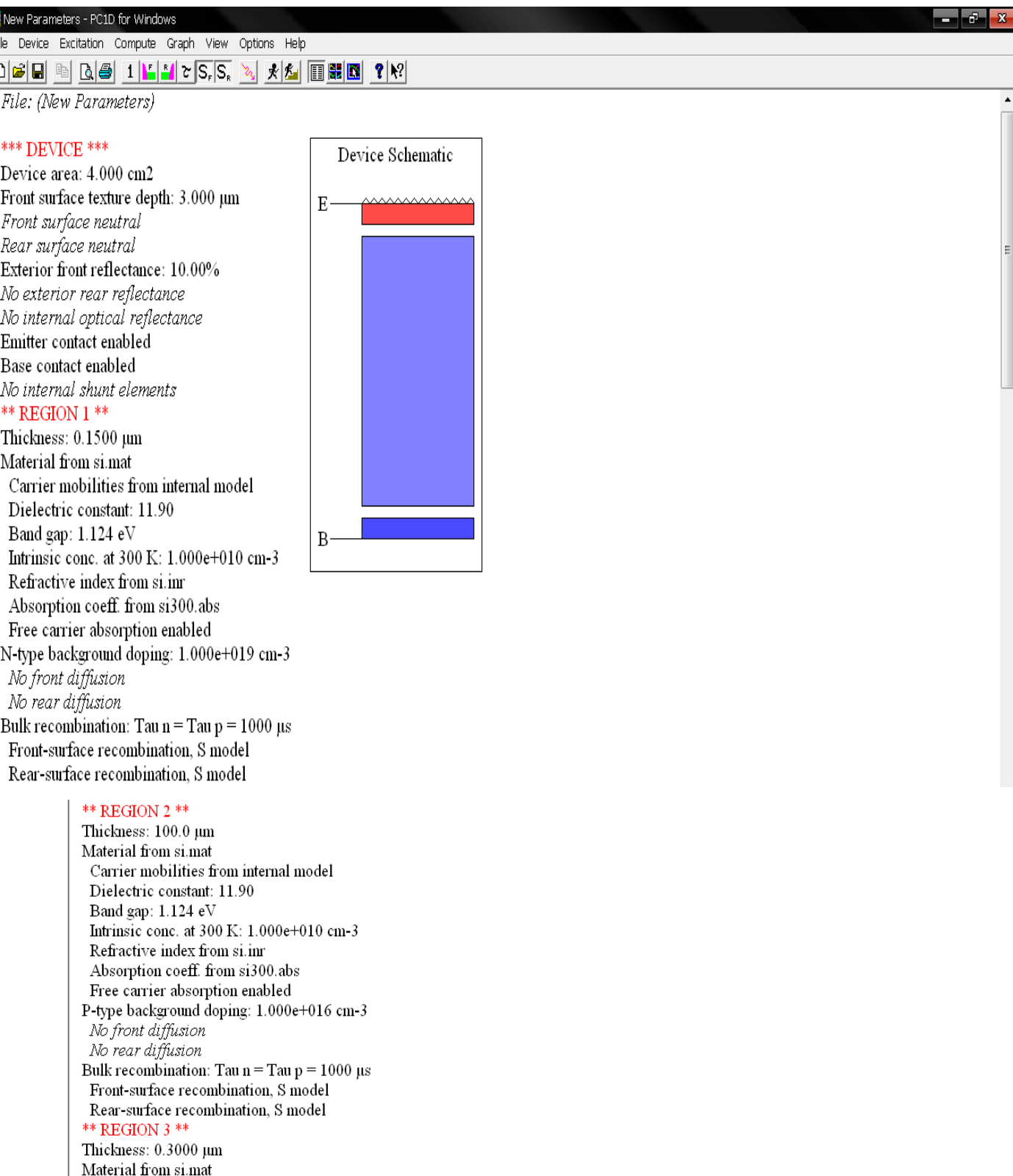


Figure V.2.fenêtre de logiciel PC1D utilisé en simulation numérique

### V.3. 2. Les paramètres du dispositif (Device)

- Aire du dispositif (Device) : la surface du dispositif est très importante car elle influe sur le photocourant d'une manière appréciable. Dans notre simulation, nous avons choisi une surface de 4cm<sup>2</sup>.

- 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 texturisation est très importante, car elle permet de diminuer les pertes par réflexion du rayonnement incident. Nous avons texturé seulement la face avant, car l'autre face est considérée à l'obscurité.

- Les deux faces sont considérées comme neutres, du fait qu'il n'y a pratiquement pas de charges aux interfaces, c.à.d. qu'il n'y a pas de barrière de potentiel aux surfaces.

- Nous n'avons pas introduit de couches antireflets, car elle est remplacée par la texturation. Cette couche est généralement de la silice ( $\text{SiO}_2$ ), elle peut être remplacée par d'autres matériaux qui sont transparents au spectre solaire et qui sont donnés dans le logiciel sous forme de fichiers.

- Réflectance optique interne : elle est négligée dans notre simulation, nous considérons que les surfaces sont spéculaires et non diffusées c.à.d. 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'elles peut être : conducteur, diode ou condensateur. Dans notre cas nous considérons qu'il n'y a pas d'élément qui peut shunter le circuit.

### V.3.3. Les paramètres des régions

- L'épaisseur de l'émetteur est relativement mince par rapport à la base. Dans le cas du silicium elle varie sur un intervalle compris entre  $0,1\mu\text{m}$  et  $2,5\mu\text{m}$ .

- Le matériau utilisé: les paramètres qui le décrivent, sont stockés dans des fichiers d'extension (\*.mat), ils sont fournis avec le logiciel dans une disquette. Les paramètres stockés dans ce fichier sont :

- La mobilité : le modèle utilisé est le modèle de Thuber et al 1981.

- La constante diélectrique.

- L'énergie de gap (eV).

- La concentration intrinsèque ( $\text{cm}^{-3}$ ).

- L'indice de réfraction.

- Coefficient d'absorption : le modèle utilisé est celui de Rajkanan et al 1979.

- Absorption des porteurs libres : l'équation décrivant l'absorption des porteurs libres est :

$$\alpha = (2,6 \cdot 10^{-27} \cdot n \cdot \lambda^3) + (2,7 \cdot 10^{-24} \cdot p \cdot \lambda^2) \quad .$$

- Type et concentration de dopage : de type n ou p, la concentration maximale est de  $10^{19} \text{cm}^{-3}$ . Ce logiciel présente quatre profils 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.

---

### **V.3.4. 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 « am15g.spc ».

La seconde source est désactivée, car la face arrière n'est pas éclairée dans notre cas [44].

### **V.3.5. 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 :

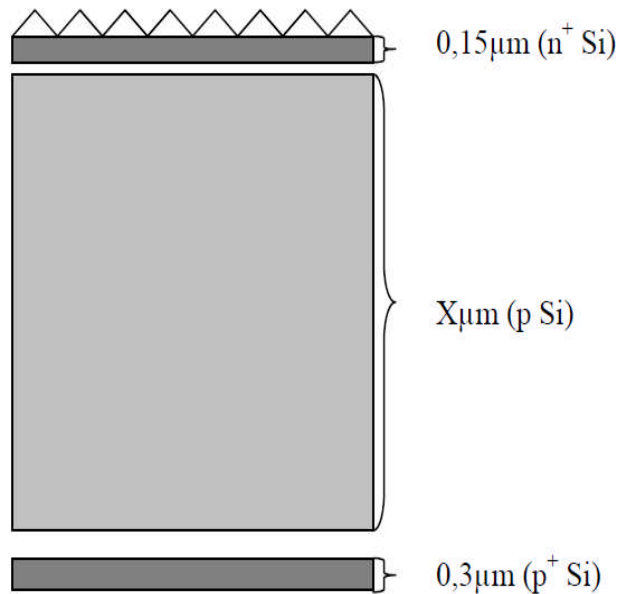
- La valeur de courant de court circuit.

- La valeur de la puissance maximale.

## **V.4. Simulation des cellules solaires a base de silicium**

### **V.4.1. Paramètres de simulation**

Nous avons simulé une cellule de type n+p-p de surface  $4 \text{ cm}^2$  avec une texturation à la surface avant pour optimiser le captage du rayonnement.



**Figure V.3. Schéma de la cellule solaire à base de silicium [45]**

Un émetteur classique dopé à  $10^{17}\text{cm}^{-3}$  pour la réalisation des cellules solaires, nécessite une épaisseur importante pour une bonne collecte de porteurs. Par contre, les nouveaux émetteurs utilisés actuellement sont dopés à  $10^{19}\text{cm}^{-3}$  et nécessite une faible épaisseur. Ce type d'émetteur est appelé Emetteur Transparent et dispose d'un phénomène de diffusion très important.

## V.4.2. Résultats de la simulation

### V.4.2.1. Caractéristique I-V

La cellule solaire simulée est à base de silicium 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. Le substrat est d'épaisseur  $0,3\mu\text{m}$  dopé à  $10^{19}\text{cm}^{-3}$ . Les résultats obtenus sont :

$$I_{cc} = 138.4 \text{ mA}$$

$$F.F = 84.21\%$$

$$V_{co} = 671.8 \text{ mV}$$

par conséquent on a :

$$\eta_{\max} = 19.95\%$$

$$P_{\max} = 78.3 \text{ mW}$$

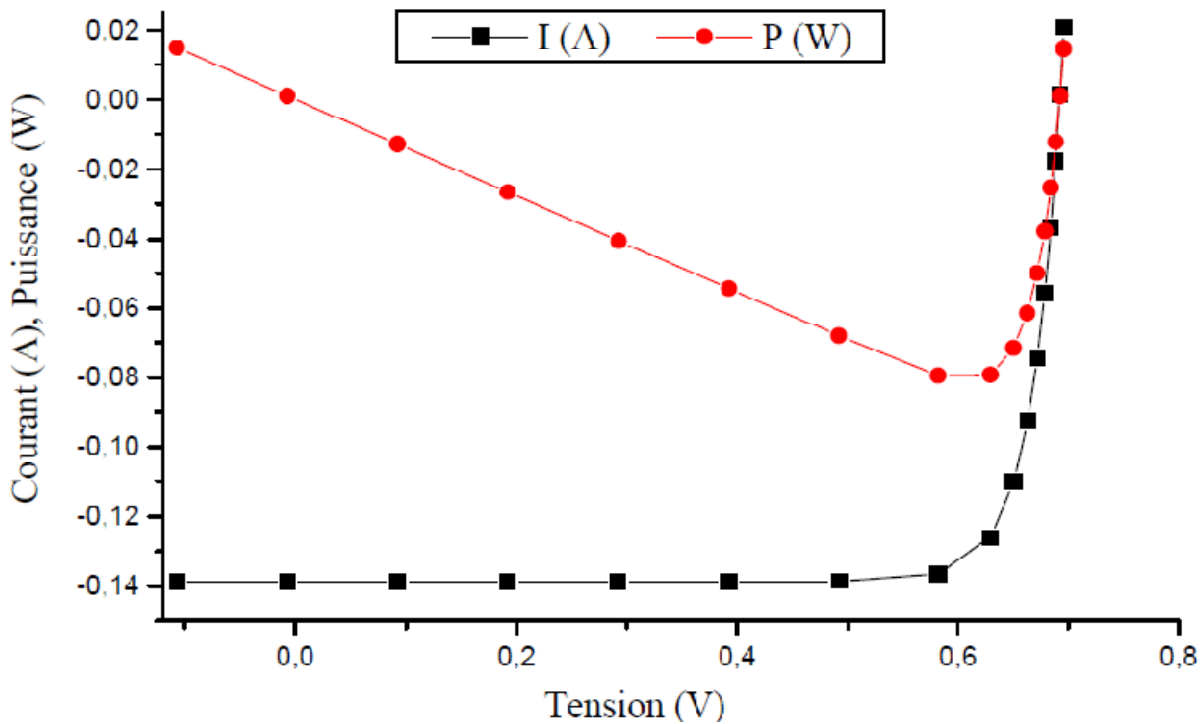


Figure V.4 La caractéristique I-V de la cellule solaire à base de silicium

#### V.4.2.2. Réponse spectrale

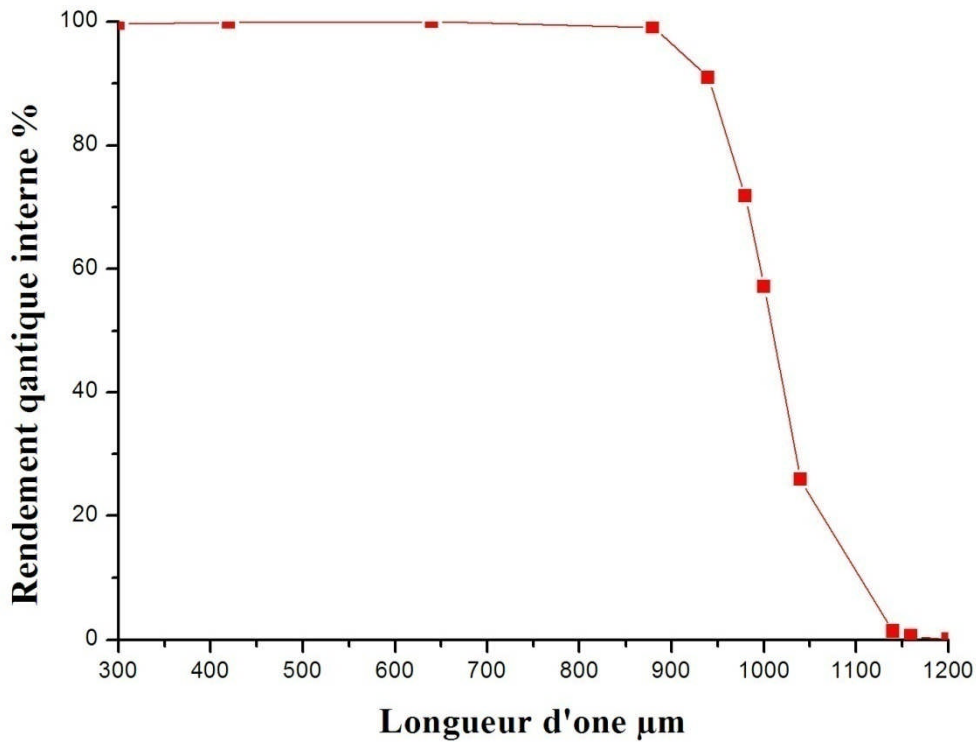
La zone **pp+** engendre un champ électrique interne et joue un rôle important dans le fonctionnement des cellules solaires. En effet, elle a quatre effets sur les performances des cellules solaires :

- Repousser les électrons vers la jonction np et améliorer le rendement de collecte des porteurs.
- Motiver le piégeage des porteurs minoritaires.
- Diminuer les recombinaisons en surfaces arrière des porteurs minoritaires.
- Augmenter l'absorption optique d'une partie du spectre solaire incident.

La figure V.5 représente le rendement quantique interne, la réponse spectrale est obtenue en utilisant l'expression suivante :

$$RS = \frac{q \cdot (1 - R)}{h \cdot \nu \cdot RQI} \quad (V.6)$$

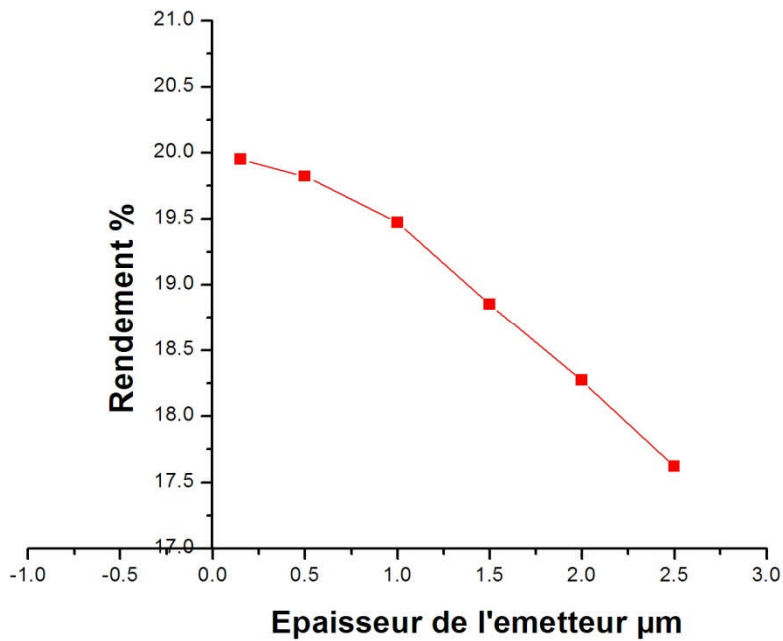
Avec **RQI** le rendement quantique interne et **R** le coefficient de réflexion.



**Figure V.5 variation du rendement quantique pour une cellule solaire à base de silicium**

#### **V.4.2.3. Influence de l'épaisseur de l'émetteur $n_+$ sur le rendement**

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de l'émetteur, nous avons pris une cellule d'épaisseur fixe ( $100\mu\text{m}$ ) et nous avons varié celle de l'émetteur. D'après le résultat obtenu (Figure. V.6), nous avons choisi un émetteur de  $0.15\mu\text{m}$  pour toutes les autres simulations qui suivent, cela est dû au rendement élevé obtenu par rapport aux autres épaisseurs plus grandes.

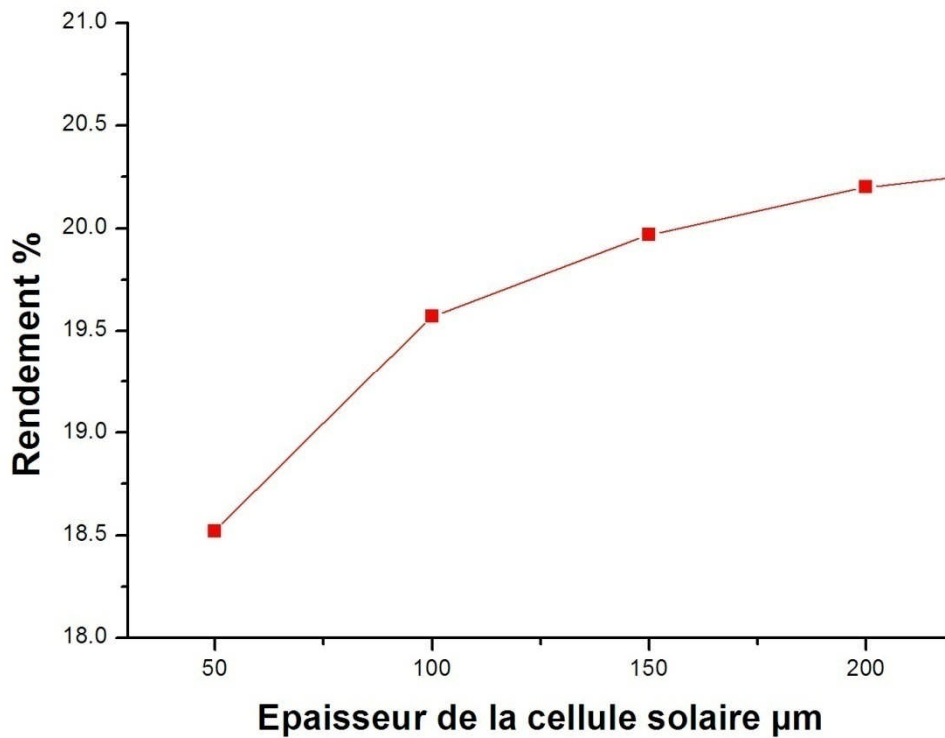


**Figure V.6. Variation du rendement de la cellule solaire en fonction l'épaisseur de l'émetteur.**

#### **V.4.2.4. Influence de l'épaisseur de la cellule solaire sur le rendement**

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de la cellule sur le rendement nous avons varié cette dernière est fixé les autres paramètres. D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure que l'épaisseur de la cellule est un facteur important pour l'absorption des photons. Il n'est pas nécessaire de fabriquer des cellules solaires monocristallines avec des épaisseurs trop grandes pour cela nous choisissons l'épaisseur 100μm avec lequel nous avons un rendement de 19,95 %.

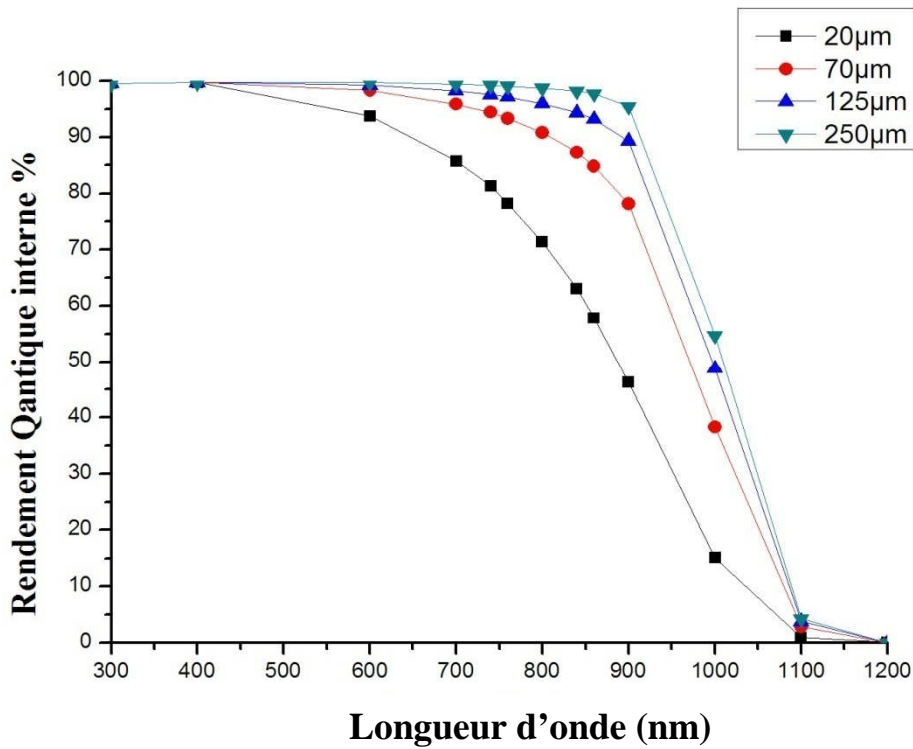
Pour une cellule solaire à base de silicium monocristallin, une épaisseur de 250μm peut donner un rendement de 21%. En comparant une cellule de 250μm et une cellule de 100μm, nous pouvons dire qu'une différence de 150μm peut augmenter le rendement que de 1,05%.



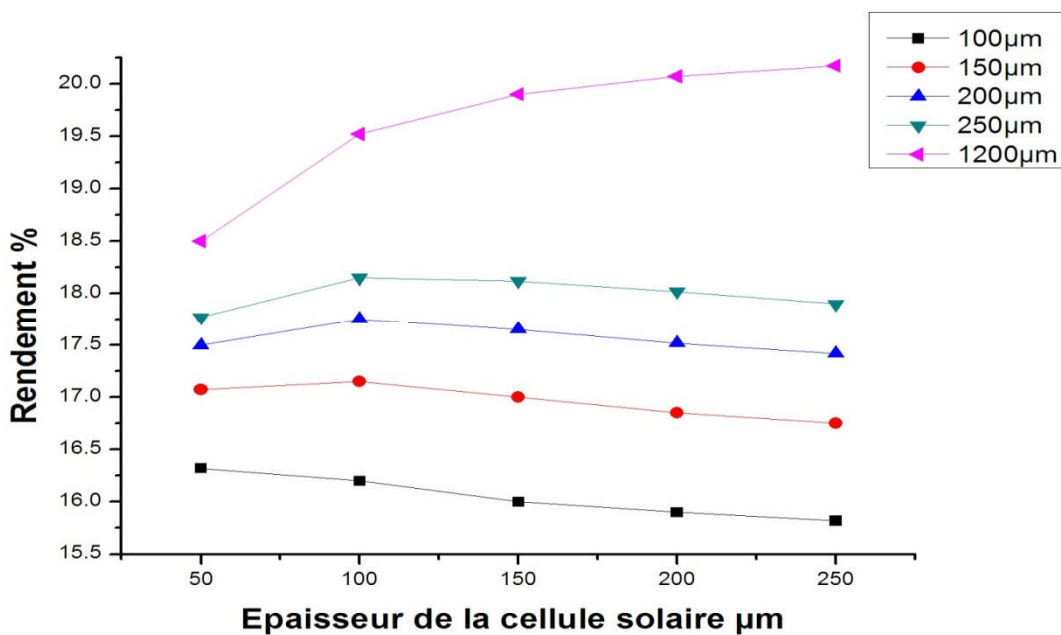
**Figure V.7. Variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la cellule solaire**

#### **V.4.2.5. Influence de la longueur de diffusion sur le rendement, $I_{cc}$ et $V_{co}$**

La longueur de diffusion est un paramètre extrêmement influent sur le rendement des cellules solaires, pour cela nous avons fixé l'épaisseur de la cellule solaire à 100μm et nous avons varié la longueur de diffusion. L'augmentation de la longueur de diffusion a un effet direct sur l'amélioration du photocourant et par conséquent sur le rendement de conversion de la cellule solaire.



**Figure V.8. Influence de la longueur de diffusion sur la variation de rendement quantique interne de la cellule solaire à base de silicium**



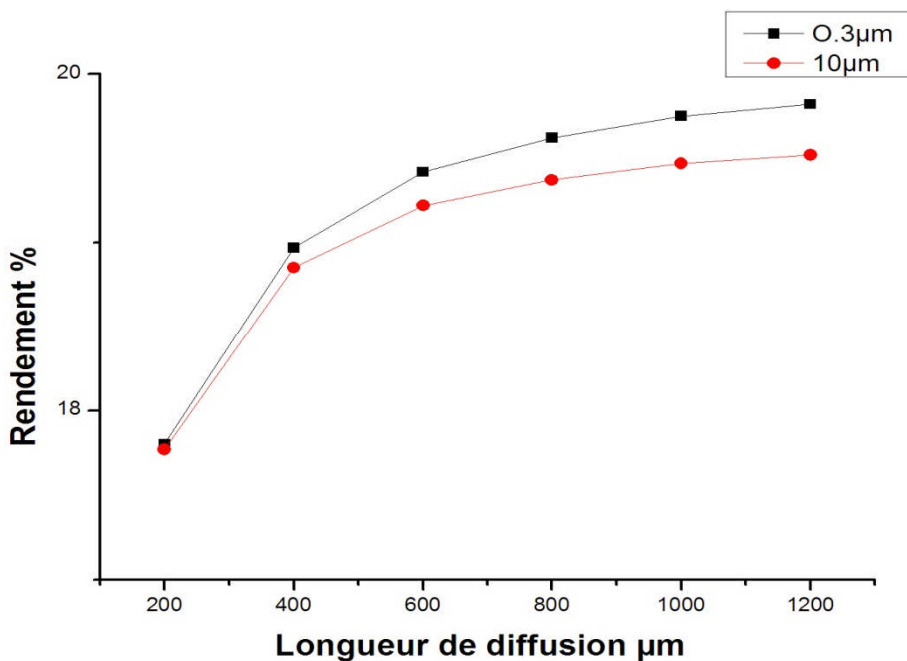
**Figure V.9. Influence de la longueur de diffusion sur la cellule solaire à base de silicium.**

D'après les résultats obtenus, on peut déduire que le rendement de la cellule dépend fortement de la longueur de diffusion ce qui est confirmé par la relation entre le photocourant  $I_{ph}$  et les longueurs de diffusion

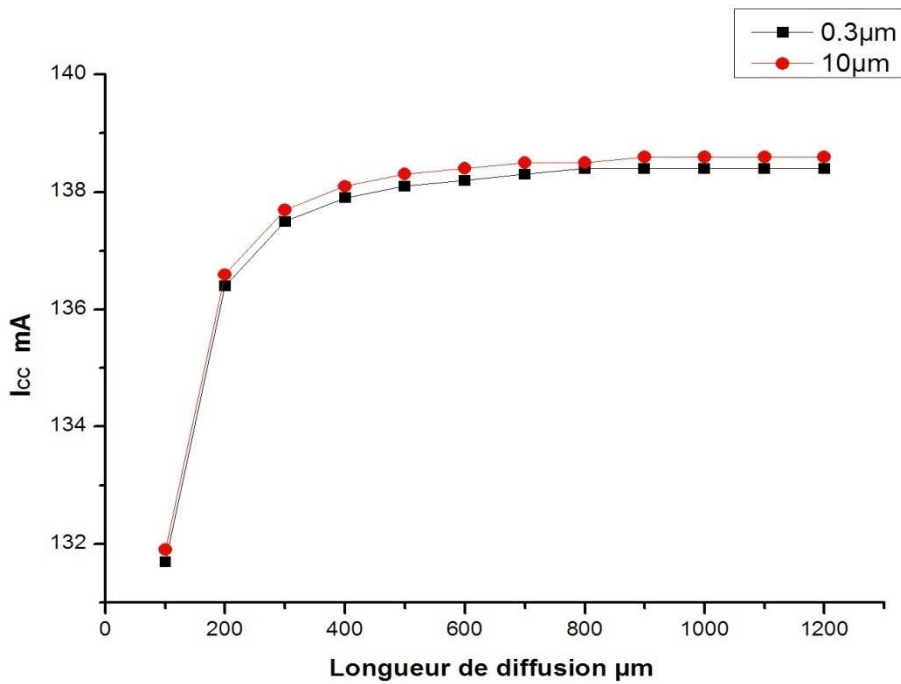
$L_n$  et  $L_p$ . les cellules solaires à base de silicium monocristallin ont des rendements maxima pour des épaisseurs de 100 à 150 $\mu\text{m}$  pour différentes longueurs de diffusion (Figure IV.9). Pour le silicium industriellement approprié de la qualité matérielle Czochralski, la longueur de diffusion est toujours le facteur limitateur. C'est un paramètre extrêmement influent sur le rendement des cellules solaires. Les trois paramètres de la cellule (le rendement, le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert) dépendent fortement de la longueur de diffusion.

Des simulations ont été faites avec deux épaisseurs du substrat en faisant varier la longueur de diffusion, les autres paramètres sont fixés. Nous pouvons remarquer qu'il n'est pas nécessaire de fabriquer des cellules solaires avec des grandes épaisseurs du substrat car le rendement commence à diminuer en augmentant cette épaisseur (Figure IV.10).

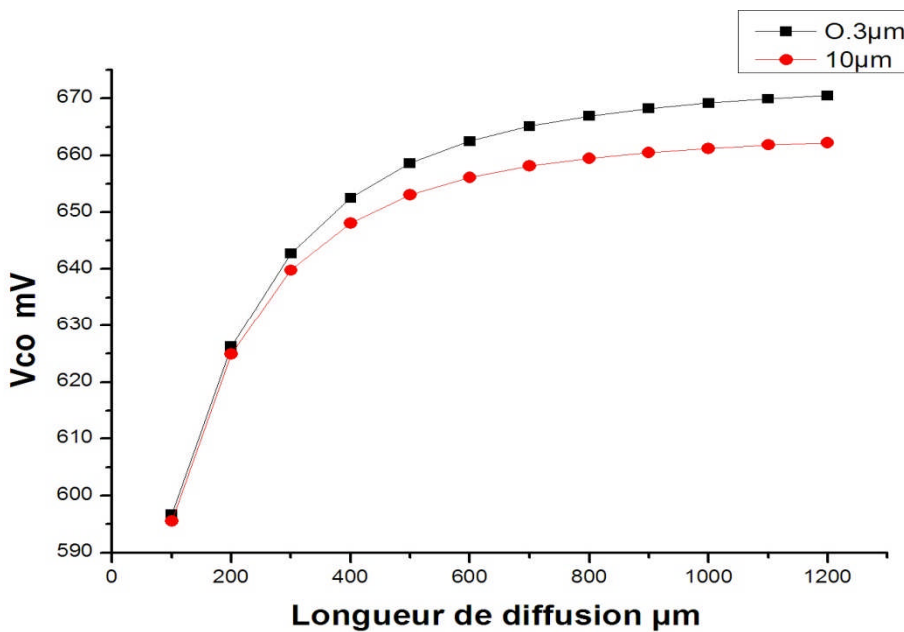
La réduction de l'épaisseur des cellules et l'augmentation des longueurs de diffusion des porteurs minoritaires rendent l'optimisation prépondérante.



**Figure V.10. Variation du rendement de la cellule solaire en fonction de la longueur de diffusion pour deux différentes épaisseurs du substrat.**



**Figure V.11. Variation du courant du court-circuit de la cellule solaire en fonction de la longueur de diffusion pour deux différentes épaisseurs du substrat.**



**Figure V.12. Variation de la tension du circuit ouvert de la cellule solaire en fonction de la longueur de diffusion pour deux différentes épaisseurs du substrat.**

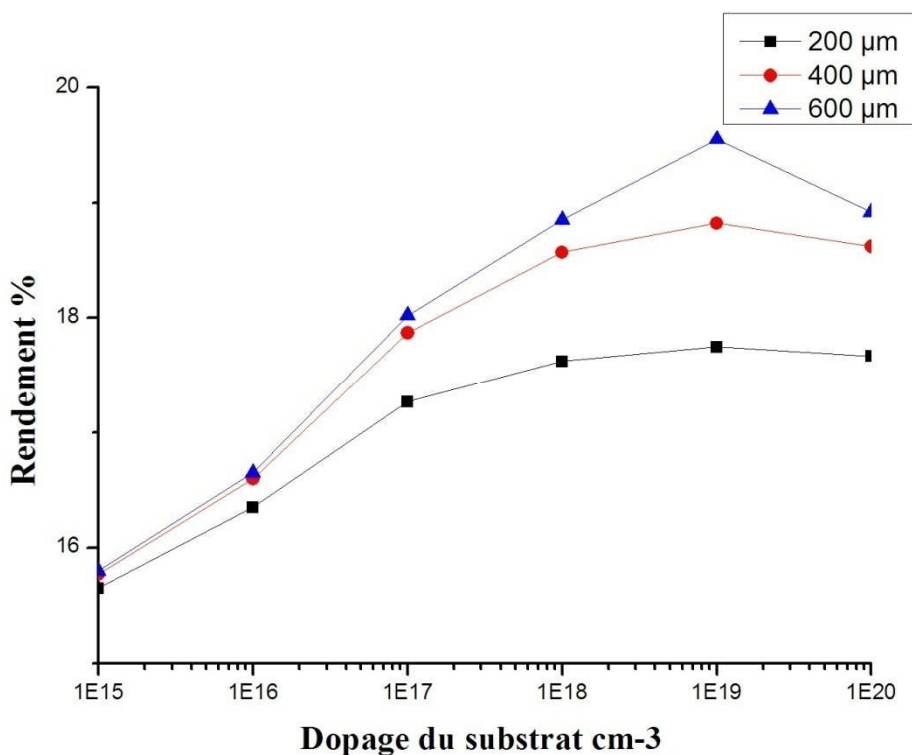
**V.4.2.6. Influence du dopage du substrat p+ sur le rendement,  $I_{cc}$  et  $V_{co}$**



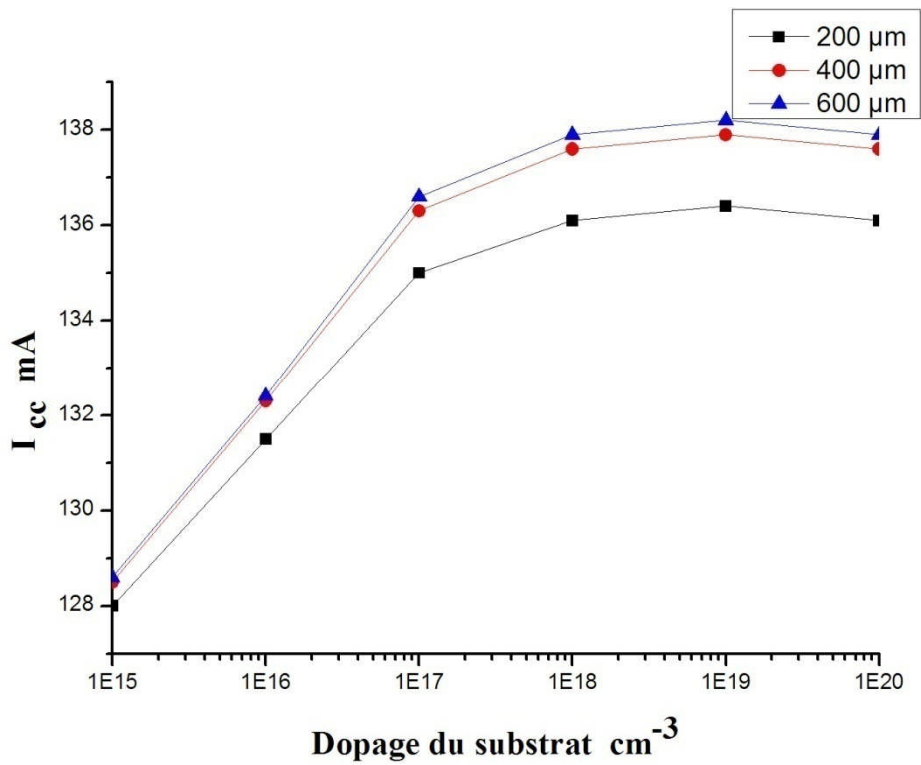
Nous pouvons constater qu'il y a une valeur optimale du dopage du substrat qui correspond au maximum de rendement de la cellule. Pour une cellule de référence sur un substrat de type p avec une longueur de diffusion de  $600\mu\text{m}$ , le dopage optimal est égal à  $10^{19}\text{ cm}^{-3}$ . Si le substrat est faiblement dopé, 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.

En créant un gradient d'accepteurs en face arrière de la cellule solaire, nous obtenons:

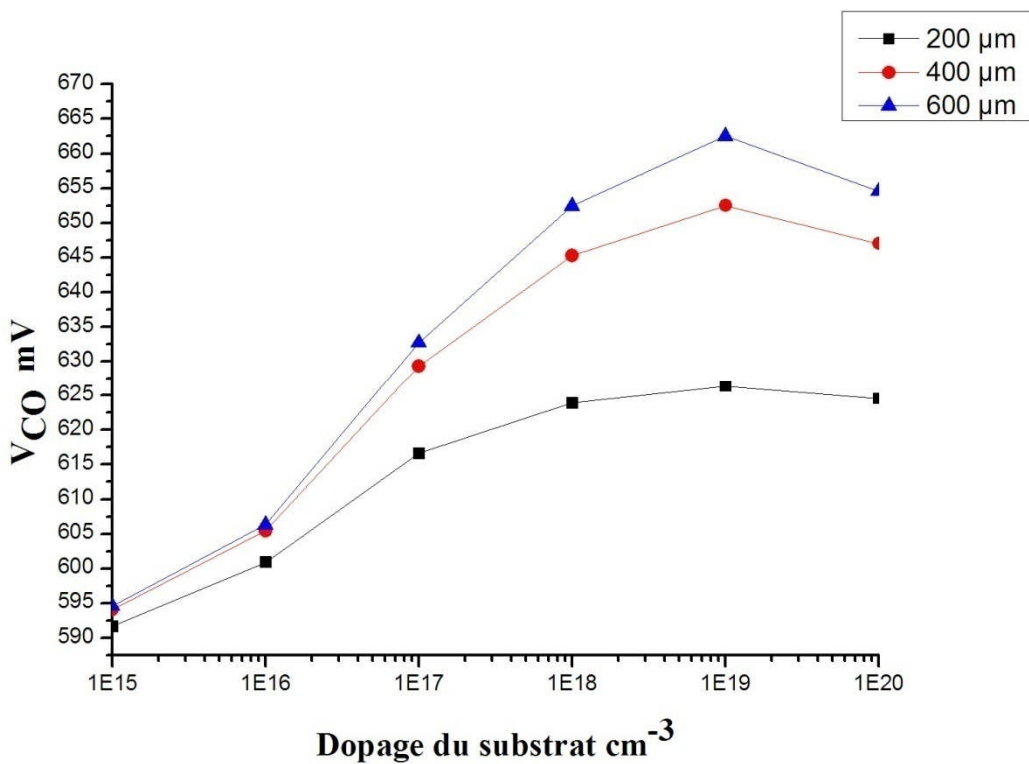
- une augmentation du courant de court circuit due aux porteurs générés.
- une augmentation de la tension du circuit ouvert due au gradient de dopage donc un champ créé empêche les porteurs de se recombiner.



**Figure V.13. Variation du rendement de la cellule solaire en fonction du dopage du substrat.**



**Figure V.14. Variation du courant du court-circuit de la cellule solaire en fonction du dopage du substrat.**

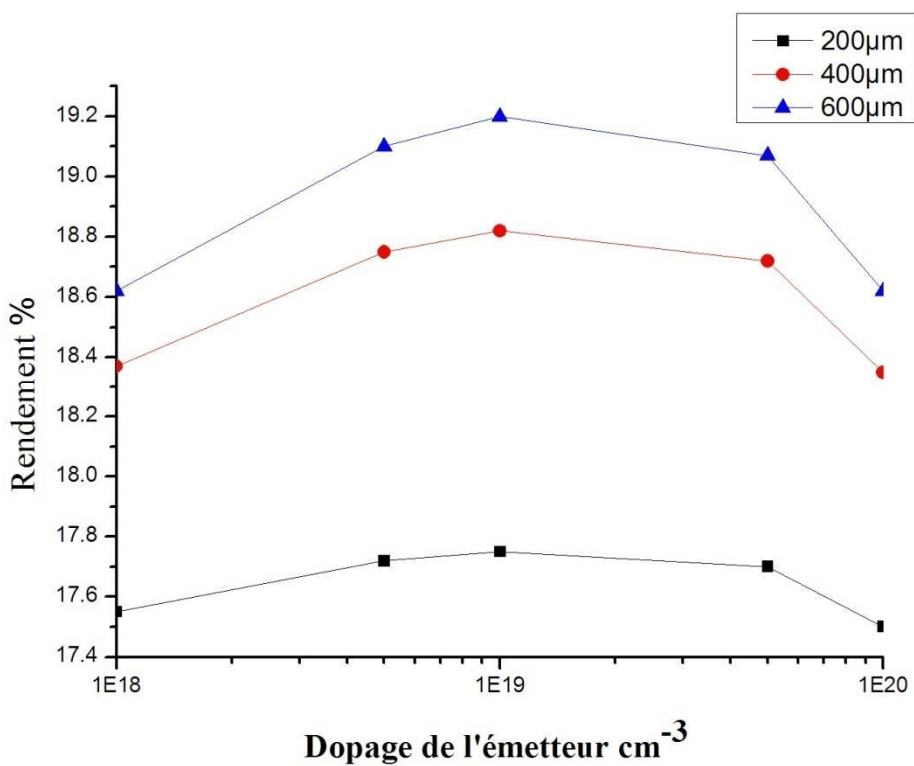


**Figure V.14. Variation de la tension du circuit ouvert de la cellule solaire en fonction du dopage du substrat.**

#### V.4.2.7. Influence du dopage de l'émetteur n+ sur le rendement, I<sub>cc</sub> et V<sub>co</sub>

Maintenant, nous fixons tous les paramètres de la cellule et nous faisons varier que le dopage de l'émetteur pour différentes valeurs de longueurs de diffusion. Nous remarquons que le courant de court circuit varie très peu en fonction du dopage de l'émetteur, par contre la variation du rendement et de la tension du circuit ouvert est remarquable.

Dans l'intervalle [10<sup>18</sup>, 10<sup>19</sup>] cm<sup>-3</sup>, le rendement a une valeur presque constante. Au delà de 10<sup>19</sup>cm<sup>-3</sup> l'élévation du niveau de dopage de l'émetteur diminue la hauteur de la barrière de potentiel. Une croissance du dopage de l'émetteur conduit à une dégradation des performances.



**Figure. V.16. Variation du rendement de la cellule en fonction du dopage de l'émetteur**

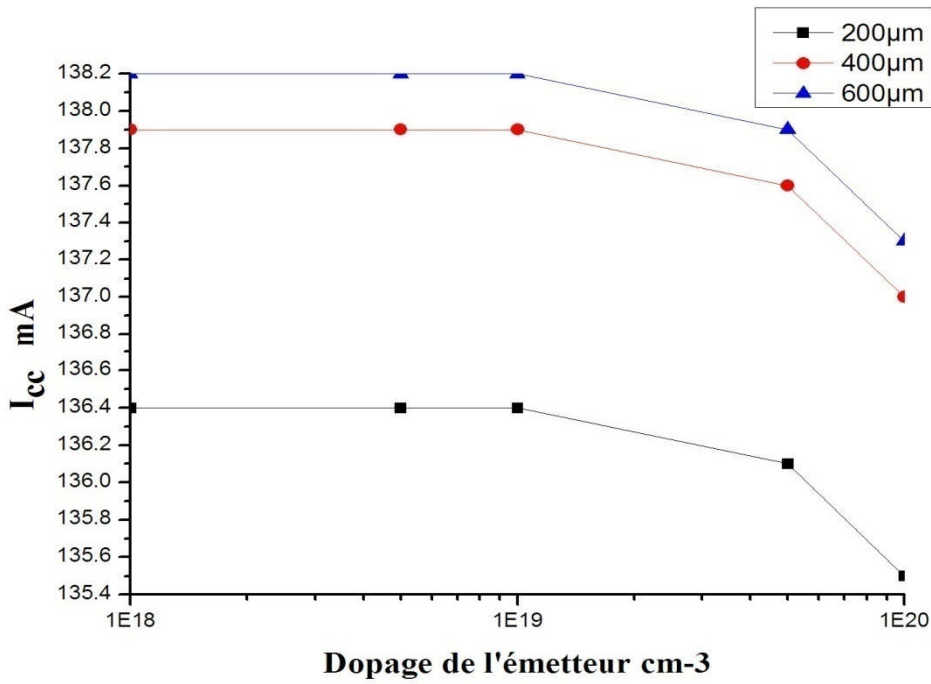


Figure. V.17. Variation du courant de court-circuit de la cellule en fonction du dopage de l'émetteur.

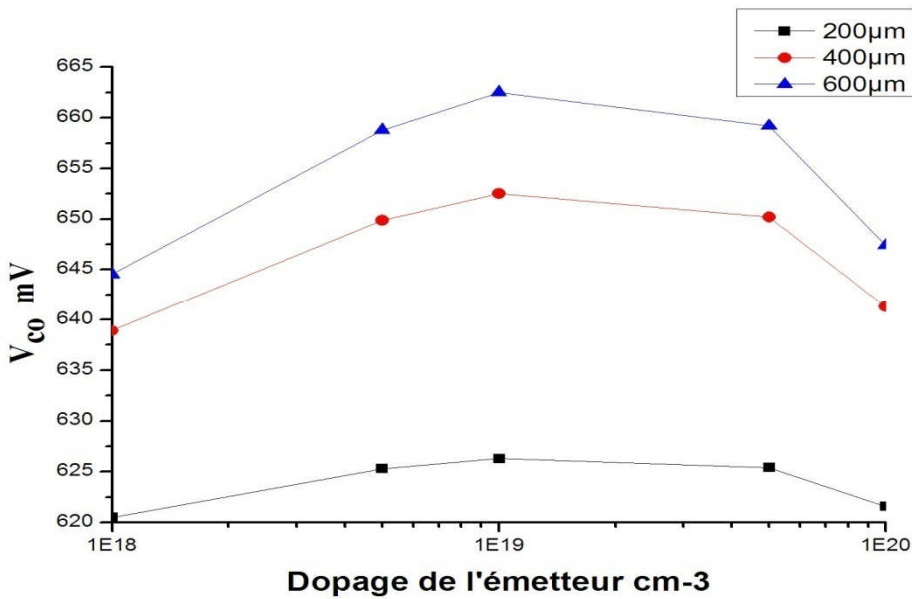


Figure. V.18. Variation de la tension du circuit ouvert de la cellule en fonction du dopage de l'émetteur.

#### V.4.2.8. Influence de la recombinaison en surface sur le rendement, $I_{cc}$ et $V_{co}$

Pour examiner l'influence de la recombinaison sur les faces avant et arrière de la base nous avons fait varier ces deux paramètres séparément. Les résultats de la simulation sont présentés sur les figures ci dessous.

On constate que la vitesse de recombinaison en surface est l'un des paramètres qui influence sur le rendement des cellules solaires. La grande vitesse de recombinaison peut dégrader le rendement, par contre si la vitesse de recombinaison en surface est inférieure à 100 cm/s elle n'a pas d'influence importante sur les caractéristiques de la cellule. On remarque aussi que le courant de court-circuit reste constant quelque soit la recombinaison en surface.

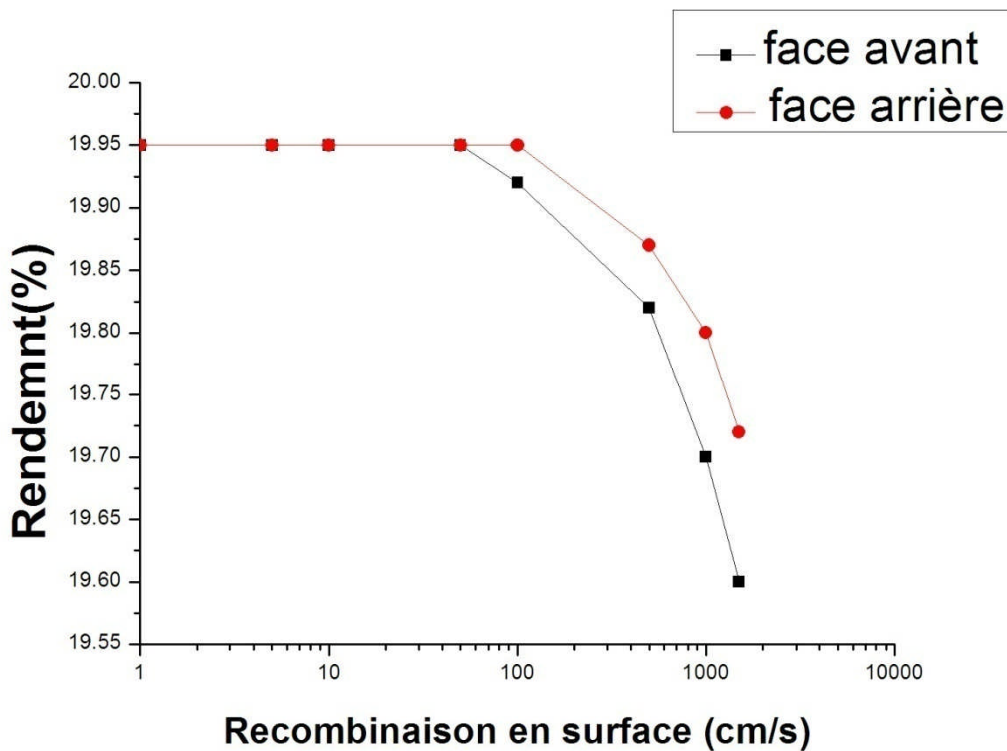
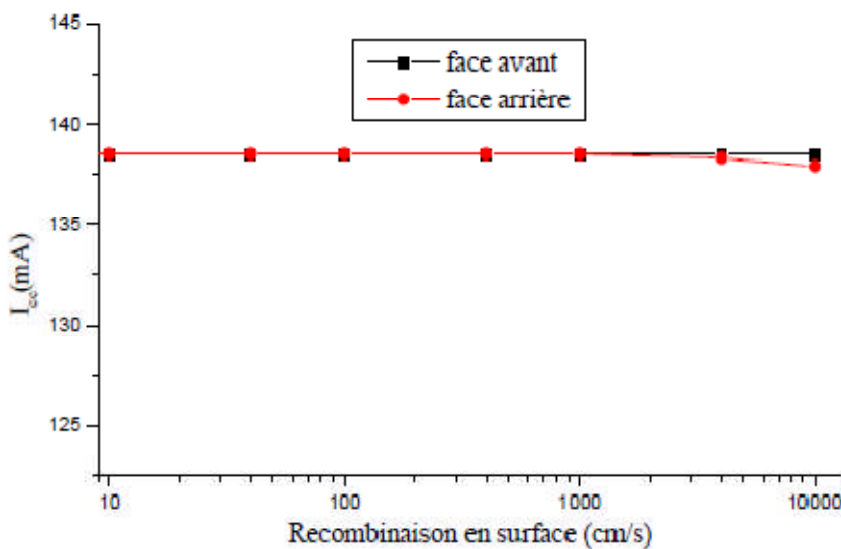
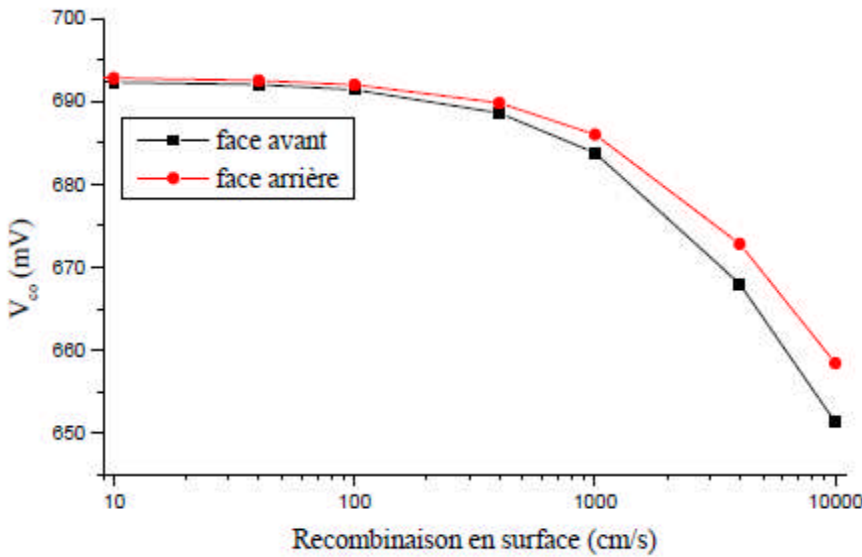


Figure. V.19. Variation du rendement en fonction de la recombinaison en surface.



**Figure. V.20. Variation du courant de court-circuit en fonction de la recombinaison en surface.**



**Figure. V.21. Variation de la tension du circuit ouvert en fonction de la recombinaison en Surface.**

Le tableau suivant résume les paramètres étudiés de la cellule qui peuvent donner un bon rendement :

Epaisseur de l'émetteur	0,15 μm
Epaisseur de la base	100 μm
Epaisseur du substrat	0,3 μm
Dopage de l'émetteur	$10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Dopage de la base	$10^{16} \text{ cm}^{-3}$
Dopage du substrat	$10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Vitesse de recombinaison	1000 cm/s

**Tableau V.1. Paramètres de la cellule solaire à base de silicium**

## V.5. Conclusion

Quelque 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 régions, les longueurs de diffusion et les profils de dopage. Les valeurs de ces paramètres dépendent de la qualité du matériau, de la vitesse de recombinaison en surface (face avant et arrière),...etc. L'optimisation de la cellule solaire comprend donc l'étude de ces paramètres sur le rendement afin d'obtenir une structure conduisant à un rendement maximal.

## *CONCLUSION*

De 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. Tout les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semiconducteur ne peuvent générer de paires électron-trou et sont donc perdues. Le rendement d'une cellule dépend aussi à la base du nombre de photons y pénétrant.

Dans notre exemple le semiconducteur silicium est le matériau de base. Il reste cependant le plus utilisé dans le photovoltaïque. Il bénéficie d'une implantation importante et durable dans l'industrie micro électronique. Celle-ci utilise du silicium monocristallin de très haute pureté. Ce type de matériau qui présente une excellente qualité électronique est très couteux et il a un rendement plus élevé que ceux en silicium multicristalin.

La simulation a été largement utilisée dans le cadre de ce travail afin d'étudier les paramètres les plus important pour le fonctionnement des cellules solaires à base de silicium dans le but de diminuer les pertes et d'optimiser les paramètres physique de la cellule pour obtenir un rendement maximal.

L'utilisation des alliages SiGe dans les cellules solaires prend une nouvelle dimension lorsqu'ils sont utilisés en couches minces, car le rapport performance/cout atteint avec des telles cellules est supérieur à celui d'une cellule au silicium pour la même épaisseur .Mais les rendements atteints sont encore faibles que l'on attend d'une cellule solaire à cause de la faible épaisseur de la couche.

---

## *Liste des abréviations et symboles*

Si : silicium

Ge : Germanium

S-C : Semi-conducteur

$E_g$  : Longueur de bande interdite

$E_c$  : Niveau de la bande de conduction

$E_v$  : Niveau de la bande de valence

$\sigma$ : Conductivité du matériau

f.c.c : Cubique à faces centrées

$k$  : Vecteur d'onde

$N_c$  : Densité d'états des électrons de la bande de conduction

$N_v$  : Densité d'états des électrons de la bande de valence

$n_i$  : Concentration intrinsèque des porteurs

$E_F$ : Niveau de Fermi

$T(^{\circ}K)$  : Température en kelvin

$N_d$  : Concentration des atomes donneurs

$N_a$  : Concentration des atomes accepteurs

$T_i$  : Température intrinsèque

$n$  : Concentration en électrons libres

$p$  : Concentration en trous libres

B-V : Bande de valence

B-C : Bande de conduction

BI : Bande interdite

Z.C.E : Zone de charge d'espace

$I_s$  : Courant de saturation

$J$  : Densité de courant

Ppm : partie par million

$\mu$ : Mobilité des porteurs

$E$  : Champ électrique

$\rho$  : Résistivité du matériau

$D_p$  : Courant de diffusion des trous

---

$D_n$  : Courant de diffusion des électrons

$V_T$  : Tension thermique ( $= KT/q = 0,026V$  à la température ambiante)

$\lambda$  : Longueur d'onde

$U_n$  : Taux de recombinaison des électrons

$U_p$  : Taux de recombinaison des trous

$R_{Rsh}$  : Taux de recombinaison en volume de type RSH (Read-Shokley-Hall)

FZ : Fusion de zone

PV : Photovoltaïque

AM : Aire mass

$R_s$  : Résistance série

$R_p$  : Résistance parallèle

$I_{s1}$  : Courant de saturation de la diode D1

$I_{s2}$  : Courant de saturation de la diode D2

$n_1$  : facteur d'identité de la diode D1

$n_2$  : Facteur d'identité de la diode D2

$n$  : Rendement de la cellule PV

FF : Facteur de forme

$I_{cc}$  : Courant de court circuit

$V_{co}$  : Tension de circuit ouvert

$P_m$  : Puissance maximale

$N_v$  : Niveau du vide

$q\Phi$  : Travail de sortie

$q\Phi_m$  : Travail de sortie du métal

$q\Phi_{s-c}$  : Travail de sortie du semi-conducteur

$qX_{sc}$  : Affinité électronique

$I_d(v)$  : Courant d'obscurité de la diode.

---

## *Liste des figures*

Figure I.1 : Structure électronique du métal, isolant et du semi-conducteur

Figure I.2 : Microphotographie du réseau cristallin du silicium prise par TEM

Figure I.3 : Structure diamant

Figure I.4 : Structure de bande schématique d'un semi-conducteur direct et indirect

Figure I.5 : Représentation des minima de la bande de conduction du Si et du Ge

Figure I.6 : Diagramme des bandes d'énergie des semi-conducteurs

Figure I.7 : Concentration intrinsèque du Silicium et du Germanium en fonction de la température

Figure I.8–a) : libération d'un électron par l'atome de phosphore

-b) : schéma des bandes

Figure I.9 –a) : libération d'un trou par le bore

-b) : schéma des bandes

Figure I.10 : jonction PN à l'équilibre thermodynamique

a) Charge d'espace

b) Champ électrique

c) Potentiel électrostatique

Figure I.11 : jonction PN polarisée en directe

Figure I.12 : Diagramme énergétique d'une jonction PN polarisée en inverse

Figure I.13 : schéma descriptif du processus de recombinaison de type radiatif

Figure I.14 : schéma descriptif du processus de recombinaison de type Auger

Figure I.15 : schéma descriptif du processus de recombinaison par piège

Figure I.16 : schéma énergétique d'un contact ohmique entre un métal et un semi-conducteur de type P.

**(a) : avant contact, (b) : après contact**

Figure I.17 : schéma énergétique d'un contact rectifiant entre un métal et un semi-conducteur de type P.

**(a) : avant contact, (b) : après contact**

Figure II.1 : diagramme représentant les étapes de fabrication des siliciums monocristallin et multicristallin

Figure II.2 : méthode de Czochralsky

Figure II.3 : lingots de silicium monocristallin

---

Figure II.4 : Raffinage et cristallisation par méthode de la zone flottante

Figure II.5 : variation de la bande interdite du Si et du Ge en fonction de la température

Figure III.1 : exemple de maille dans un cristal de SiGe

Figure III.2 : variation du paramètre de maille du cristal  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  en fonction de la composition de Germanium

Figure III.3 : Schéma des bandes d'énergies dans l'espace réciproque à 300°K pour a) le silicium b) le Germanium

Figure III.4 : largeur de bande interdite indirecte en fonction de la composition du Si dans l'alliage SiGe à 296°K

Figure III.5 : Schéma du mécanisme d'absorption indirecte assisté par phonon

Figure III.6 : Spectre d'absorption d'alliage SiGe riche en Silicium

Figure III.7 : Spectre d'absorption d'alliage SiGe riche en Germanium

Figure III.8 : Représentation plane de la structure cristalline d'hétérostructures SiGe/ Si

Figure III.9 : exemple de maille présentes à l'interface SiGe (au-dessus)/Si( au-dessous)

Figure IV.1 : Spectre solaire hors atmosphère

Figure IV.2 : Coefficient d'absorption du silicium et profondeur pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde

Figure IV.3 : Processus de fabrication

Figure IV.4 : installation, formation, maintenance et service après vente

Figure IV.5 : présentation schématique d'une cellule photovoltaïque

Figure IV.6 : Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque sous éclairement

Figure IV.7 : Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Figure IV.8 : caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque

Figure IV.9 : Installation électrique photovoltaïque

Figure V.1.a : diagramme de bande d'une cellule

Figure V.1.b : jonction PN éclairée et chargée d'une résistance  $R_c$

Figure V.2 : fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique

Figure V.3 : Schéma de la cellule solaire à base de silicium

Figure V.4 : La caractéristique I-V de la cellule solaire a base de silicium

Figure V.5 : Variation du rendement quantique pour une cellule solaire à base de silicium

Figure V.6 : Variation du rendement de la cellule solaire en fonction de l'épaisseur de l'émetteur

Figure V.7: Variation du rendement de la cellule solaire en fonction de l'épaisseur de la cellule solaire

Figure V.8: Influence de la longueur de diffusion sur la variation du rendement quantique interne de la cellule solaire à base de silicium

Figure V.9: Influence de la longueur de diffusion sur la cellule solaire à base de silicium

---

- Figure V.10: variation du rendement de la cellule solaire en fonction de la longueur de diffusion pour deux différentes épaisseurs du substrat.
- Figure V.11: variation du courant de court-circuit de la cellule solaire en fonction de la longueur de diffusion pour deux différentes épaisseurs du substrat.
- Figure V.12: variation de la tension du circuit-ouvert de la cellule solaire en fonction de la longueur de diffusion pour deux différentes épaisseurs du substrat.
- Figure V.13: variation du rendement de la cellule solaire en fonction du dopage du substrat.
- Figure V.14: variation du courant de court-circuit de la cellule solaire en fonction du dopage du substrat.
- Figure V.15: variation de la tension du circuit-ouvert de la cellule solaire en fonction du dopage du substrat.
- Figure V.16: variation du rendement de la cellule solaire en fonction du dopage l'émetteur.
- Figure V.17: variation du courant de court-circuit de la cellule solaire en fonction du dopage l'émetteur.
- Figure V.18: variation de la tension de circuit-ouvert de la cellule solaire en fonction du dopage l'émetteur.
- Figure V.19: variation du rendement de la cellule solaire en fonction de la recombinaison en surface.
- Figure V.20: variation du courant de court-circuit de la cellule solaire en fonction de la recombinaison en surface.
- Figure V.21: variation de la tension du circuit-ouvert de la cellule solaire en fonction de la recombinaison en surface
-

## *Liste des tableaux*

Tableau : I.1 : Conductivités des isolants, conducteurs et semi-conducteurs

Tableau II.1 : Rendement et domaines d'application de diverses cellules solaires

Tableau II.2 : Paramètres de la variation de la bande interdite en fonction de la température

Tableau II.3 : propriétés électriques des principaux semi-conducteurs

Tableau II.4 : Propriétés physiques du Si et Ge

Tableau III.1 : Paramètres des atomes des cristaux de silicium et de Germanium massifs

Tableau III.2 : Largeurs de bande interdite, directe et indirecte, pour le cristal de silicium et le cristal de Germanium à 300°K

Tableau V.1 : paramètres de la cellule solaire à base de silicium

---

## ***Bibliographie***

- [1] : <http://www.goodfellow.com/csp/active/static/F/Silicium.html>
- [2] : <http://membres.lycos.fr/procession/electronique/smcd06.pdf>
- [3] : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Germanium>
- [4] : thèse d'ingénieur « étude des facteurs influant le rendement des cellules photovoltaïques organiques à base de polymères conjugués » U.M.M.T
- [5] : H.Mathieu, Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Masson, Paris, 1996.ISBN : 2-225-85124-7
- [6] : [http://ipn2.epfl.ch/LNS/lectures/solid/cours/Appendice\\_A.pdf](http://ipn2.epfl.ch/LNS/lectures/solid/cours/Appendice_A.pdf)
- [7] : <http://www.unine.ch/phys/Enseignement/Cours2003-2004/PhysSemi/Cours/Sem/node2.html>
- [8] : S.M. SZE, Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, 1981.
- [9] : Beiser A. Physique Appliqué : Cours et Problèmes.McGrawHill, série Schaum
- [10] : ANDER LAUGIER « Théorie des nanostructures de silicium » Mémoire présenté à l'université des Sciences et Technologies de Lille pour obtenir l'Habilitation à diriger des recherches
- [11] : Sébastien QUOIZOLA « Epitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium mesoporeux pour report sur substrats économique et application photovoltaïque bas cout » thèse de doctorat préparée au Laboratoire de Physique de la matière de l'INSA de Lyon
- [12] : Document internet : [www.google.com/search?q=silicium+monocristallin](http://www.google.com/search?q=silicium+monocristallin)
- [13] : [http://iufmrese.cict.fr/.../Energie\\_solaire\\_photovoltaique.pdf](http://iufmrese.cict.fr/.../Energie_solaire_photovoltaique.pdf)
- [14] : <http://membre.lycos.fr/energiesoltpe/principe.htm>
- [15] : <http://WWW.espci.fr/recherche/labos/upr5/fr/themes-optique/theme1.htm>
-

- [16] : P.H. Haumesser, Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, 'Elaboration par croissance Czochralski, caractérisation spectroscopique et propriétés laser de monocristaux dopés par l'Ytterbium'', 2000
- [17]: G.C. Joyce, D.T.J. Hurle et Q.Q.A.E. Vaughan, 'Novel Development of the Weighing Method for Automatic Czochralski Crystal Growth of Semiconductors'', Journal of Crystal Growth 132, 1 (1993)
- [18] : <http://ipn2.epfl.ch/LNM/cours/solide/pres/9.pdf> 2004/PhysSemi/Cours/Sem/note2.html
- [19]: M. Willander, H.L. Hartnagel, High Temperature Electronics, Chapman & Hall, London, 1997. ISBN: 0-412-62510-5.
- [20] : F.P. McCluskey et al, High Temperature Electronics, CRC Press, New York, 1997. ISBN: 0-8493-9623-9
- [21] : Propriétés. <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/Si/Masses>
- [22] : S.F. LIOTTA and A. MAJORANA. ITALY. "High field mobility and Diffusivity of an Electron Gas in Silicon devices".
- [23] : "Effective Masses" [www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/Ge/Bandstr.htm#Masses](http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/Ge/Bandstr.htm#Masses)
- [24] : S. Wolf. R. Tauber. "Silicon Processing for the VLSI Era (Lattice Press. Sunset Beach, California, 1986)"
- [25] : N. Chennafi, "Contribution à l'étude physique et à l'optimisation des phototransistors bipolaires à hétérojonction à l'aide d'outils de Simulation numérique : Application au développement d'un schéma équivalent grand signal du phototransistor", Thèse de doctorat, CNAM-Paris, 5 juillet 1999.
- [26] : C. Rumelhard, "A Model of Heterojunction Phototransistor to Design Optomicrowave Amplifiers and Mixers", in European Microwave Week Conferences, Optical Technologies for Microwave System's Workshop, Munich, Germany, October 1999.
- [27] : J. D. Cressler, "SIGE HBT TECHNOLOGY: A NEW CONTENDER FOR SiBASED RF AND MICROWAVE CIRCUIT APPLICATIONS", in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 46, N°5, pp. 572-589, May 1998.
- [28] : D. Paul, "The Physics, Material and Devices of Silicon Germanium Technology", in Physics World, Vol.13, N°2, pp. 27-32, February 2000.
- [29] : Silicon Quantum Integrated Circuits Project, web page : [www.sp.phy.cam.ac.uk/](http://www.sp.phy.cam.ac.uk/)
- [30] : R. Braunstein, A. R. Moore and Frank Herman, "Intrinsic Optical Absorption in Germanium-Silicon Alloys", in Physical Review, Vol. 109, N°3, pp. 695-710, February 1958.
- [31] : "Properties of strained and relaxed Silicon-Germanium", Edited by E. Kasper, IEE Inspec, emis datareviews series N°12, 1995.
- [32] : J. P. Bismukes, L. Ekstrom and R. J. Paff, "Lattice Parameter and Density in
-

Germanium-Silicon Alloys”, in Journal of Physical Chemistry, Vol. 68, N°10, pp. 3021-3027, October 1964.

[33] : R. J. Turton and M. Jaros, “Effects of interfacial ordering on the optical properties of Si-Ge superlattices”, in Semiconductor Science and Technology, Vol.8, pp. 2003-2009, August 1993.

[34] : M. Jaros, A. W. Beavis, E. Corbin, J. P. Hagon, R. J. Turton and K. B. Wong, “Effect of ordering, interface imperfections and clusters, and external electric fields on optical spectra of Si-SiGe heterostructures”, in Journal of Vacuum Science and Technology B, Vol. 11, N°4, pp. 1689-1692, July/August 1993.

[35] : F. Schäffler, “High-mobility Si and Ge structures”, in Semiconductor Science and Technology, Vol.12, pp.1515-1549, 1997.

[36] : S. Krishnamurly, A. Sher, and A.-B. Chen (1985), Appl. Phys. Lett. 47, 160.

[37] : T. Manku and A. Nathan, “Lattice Mobility of Holes in Strained and Unstrained Si<sub>1-x</sub>Gex Alloys”, in IEEE Electron Devices Letters, Vol. 12, N°12, pp. 704-706, December 1991.

[38] : T. Manku, J. M. McGregor, A. Nathan, D. J. Roulston, J.-P. Noël and D. C. Houghton, “Drift Hole Mobility in Strained and Unstrained Doped Si<sub>1-x</sub>Gex Alloys”, in IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 40, N°11, pp. 1990-1996, November 1993.

[39] : R. People, “Physics and Applications of GexSi<sub>1-x</sub>/Si Strained-Layer Heterostructures”, in IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. QE-22, N°9, September 1986.

[40] : Nichiporuk Oleksiy « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités » these de doctorat.

[41] : Document internet :[www.google.com/search?hl=fr&q=cellules+photovoltaïques](http://www.google.com/search?hl=fr&q=cellules+photovoltaïques)

[42] :Belhadj Mohammed « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome » Mémoire de Magister.

[43] : [http://anodegroup.univ-lille1.fr/docs/theses/heloisecolder\\_these.pdf](http://anodegroup.univ-lille1.fr/docs/theses/heloisecolder_these.pdf)

[44] : A. Benyoucef. Contribution à l'étude des performances de matériaux photovoltaïques à base de couches d'alliages Si<sub>1-x</sub>Gex et Si<sub>1-x-y</sub>GexCy. Mémoire de magister en physique, Université de Tlemcen, 2004.

[45] : Mme Benahmed Benabdelah Nadia« Propriétés Physiques Des Semi-conducteurs » thèse de magister en physique énergétique et matériaux Université de Tlemcen, 2006,

---