

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

BOUTAOUS Khelifa

&

CHEMAMI Moussa

pour l'obtention du diplôme de Master en Électronique option microélectronique  
microsystème et conception des circuits

---

Thème

---

# Modélisation et simulation d'une structure à boîtes quantiques pour une cellule photovoltaïque

---

Proposé par : AISSAT Abdelkader & BENYETTOU Fethi

Année Universitaire 2014-2015

## Remerciements

---

Nous honoré et il est agréable d'adresser nos remerciements et nos reconnaissances à Monsieur Abdelkader AISSAT, Professeur à l'Université de Blida, d'avoir dirigé ma thèse, pour son soutien, sa confiance et ses précieux conseils.

Nous exprimons nos vifs remerciements à mon monsieur Fethi BEYETTOU, pour son entière disposition, et nous avoir consacré un temps précieux.

Nos sentiments de profonde gratitude vont à nos professeurs qui tout au long des années d'études nous ont transmis leur savoir sans réserve.

Nous tenons aussi à exprimer nos remerciements les plus sincères à Mme BOUGHRIRA Hamida , Professeur à l'Université de Blida, pour son aide et ses conseils.

Nous exprimons notre profonde et respectueuse gratitude à Mme BOUGHRIRA Nadia Professeur à l'Université de Blida.

Enfin mes remerciements s'adressent à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## *Dédicace*

*Je tiens à dédier ce modeste travail à :*

*A ma chère et tendre mère fatma Taalbi.*

*A mon cher père Abdelkader*

*A mes chères frères Mouloud et Ismail, et ma sœur  
halima.*

*A mes défunts grands parents Hocine khaira et  
Halima .*

*A mon grand père Abdelkader Taalbi.*

*A mes oncles et tantes ainsi qu'à leurs familles.*

*A tous mes enseignants*

*A mon binôme, camarade et amie moussa ainsi  
qu'à sa famille.*

*A tous mes amies, tous ceux que j'aime, tous ceux  
qui m'aime.*

*Khelifa*

## *Dédicace*

*Je tiens à dédier ce modeste travail à :*

*A ma chère et tendre mère .*

*A mon cher père .*

*A mes chères frères, et mes sœurs.*

*A mes défunts grands parents Hocine.*

*A mes oncles et tantes ainsi qu'à leurs familles.*

*A tous mes enseignants*

*A mon binôme, camarade et amie khelifa ainsi*

*qu'à sa famille.*

*A tous mes amies, tous ceux que j'aime, tous ceux*

*qui m'aime.*

*Moussa.*

---

**ملخص:** في هذه الأطروحة سوف نقوم بمحاكاة هيكليين أحدهما فيه نقاط كمية و آخر دون النقاط الكمية نستخدم من اجل هذا البرامج (سيلفاكو تيكاد) للنمذجة والمحاكاة لاثنتين من الخلايا الضوئية. عند مقارنة هيكل فيه نقاط كمية مع هيكل الخلية شمسية من دون نقاط كمية فقد وجدنا أن فعالية تحويل نتائج المحاكاة قد ازداد. جميع النتائج في الرسالة تبين أن النقاط الكمية لها تأثيرات إيجابية على الخلايا الضوئية.

**كلمات المفاتيح:** خض : خلايا ضوئية.

---

**Résumé :** Dans cette thèse, nous allons simuler deux structures, l'une à boîtes quantiques InAsN /GaAs et une autre sans boîtes quantiques GaAs. nous utilisons le logiciel TCAD Silvaco pour la modélisation et la simulation des deux cellules photovoltaïques. Lorsqu'on compare la structure InAsN /GaAs avec la cellule solaire sans boîtes quantiques GaAs, on trouve que l'efficacité de la conversion des résultats de simulation a augmenté.

Tous les résultats présentés dans cette thèse prouvent qu'il soit vrai que les boîtes quantiques embarqués ont des effets positifs sur les cellules photovoltaïques.

**Mots clés :** PV : Photovoltaïque

---

**Abstract:** In this thesis, we will simulate two structures, a quantum dot InAsN / GaAs and another without GaAs quantum dots. We use Silvaco TCAD software for modeling and simulation of two photovoltaic cells. When comparing the InAsN / GaAs structure with the solar cell without GaAs quantum dots, we find that the conversion efficiency of simulation results has increased.

All results presented in this thesis show that it is true that the embedded quantum dots have positive effects on photovoltaic cells.

**Keywords :** PV : photovoltaic

---

## TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 Notion sur l'alliage InAsN</b>	
1.1Introduction .....	4
1.2Structure cristalline .....	5
1.3Couche de contrainte .....	7
1.4Epaisseur critique $h_c$ .....	8
<b>Chapitre 2 Généralités sur la cellule photovoltaïque</b>	
2.1 Introduction .....	10
2.2 Historique .....	10
2.3 L'effet photovoltaïque et le Rayonnement solaire.....	13
2.3.1 L'effet photovoltaïque.....	13
2.3.2 Le rayonnement solaire.....	13
2.4 Les différentes filières des cellules photovoltaïques .....	14
2.4.1Cellules photovoltaïques à base de semi-conducteurs .....	15
2.4.2 Cellules photovoltaïques organiques .....	21
2.5 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	23
2.5.1 L'interaction photon/semi-conducteur .....	23
2.5.2 Caractéristique courant tension et schéma équivalent .....	25
a) Cellule photovoltaïque idéal.....	26
b) Cellule photovoltaïque réelle .....	28
2.5.3. Paramètres photovoltaïques .....	30
a) Courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	30
b) Tension a circuit ouvert $V_{oc}$ .....	31
c) Facteur de forme $ff$ .....	31
d) Le rendement $\eta$ .....	31
e)Le rendement quantique EQE.....	32
2.6. Conclusion .....	33

### **Chapitre 3 Modélisation de cellule photovoltaïque InAsN/GaAs à boîtes quantique**

3.1	Introduction .....	35
3.2	Présentation sur SILVACO.....	35
3.3	Les recherches des cellules solaires à boîtes quantiques.....	36
3.4	Description de la cellule photovoltaïque standard .....	37
3.4.1	Théorie de la cellule photovoltaïque standard.....	37
3.4.2	Champ électrique Intégré.....	37
3.4.3	Structure de la cellule photovoltaïque standard .....	38
3.5	Structure de la cellule photovoltaïque p-i-n .....	41
3.6	Modélisation de cellule photovoltaïque standard GaAs dans Silvaco TCAD.....	42
3.6.1	Les résultats de simulation.....	42
3.7	Modélisation de cellule photovoltaïque InAsN/GaAs TCAD à boîtes quantique dans Silvaco TCAD.....	43
3.7.1	Les résultats de simulation pour X=3, 16 et 20.....	44
3.7.2	Les résultats de simulation pour 10, 20, 30 et 40 boîtes.....	46
a)	Effet de l'insertion des boîtes sur I(V).....	46
b)	effet de l'insertion des boîtes sur EQE.....	47
3.8	Conclusion .....	48
	Conclusion générale et perspectives.....	50
	Références et bibliographiques.....	53

## Liste des figures

Figure 1.1.....	6
Figure 1.2.....	7
Figure 1.3.....	8
Figure 2.1.....	12
Figure 2.2.....	14
Figure 2.3.....	16
Figure 2.4.....	17
Figure 2.5.....	19
Figure 2.6.....	23
Figure 2.7.....	24
Figure 2.8.....	25
Figure 2.9.....	26
Figure 2.10.....	27
Figure 2.11.....	29
Figure 2.12.....	30
Figure 3.1.....	36
Figure 3.2.....	38
Figure 3.3.....	39
Figure 3.4.....	40
Figure 3.5.....	41
Figure 3.6.....	43
Figure 3.7.....	44
Figure 3.8.....	45
Figure 3.9.....	46
Figure 3.10.....	47



**Liste des tableaux**

Tableau 1.1 .....4

Tableau 2.1.....21

Tableau 3.1.....37

Tableau 3.2.....42

Tableau 3.3.....45

Tableau 3.4.....46

# **Introduction générale**

### Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années avenir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour la génération future. [1]

Par opposition, une énergie dite renouvelable doit se régénérer naturellement et indéfiniment à l'échelle temporelle de notre civilisation. Parmi ces énergies issues du soleil actuellement à ces critères à la fois d'abondance à la surface terrestre et de régénération infinie à notre échelle. Elle peut ainsi être utilisée directement sous forme thermique, et depuis la découverte de l'effet photovoltaïque, convertie en énergie électrique.

Cette dernière, bien qu'elle soit connue depuis de nombreuses années, comme source pouvant produire de l'énergie allant de quelques milliwatts au mégawatt, reste à cause du coût trop élevé des capteurs mis en œuvre.

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839. Cette conversion d'énergie peut s'effectuer par le biais d'un capteur constitué de matériaux sensibles à contenue dans les photons. Ce capteur se présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule nommé photovoltaïque (PV). Des paramètres géométriques du capteur et de sa capacité à collecter les électrons avant qu'ils ne se recombinent dans le matériau. L'association possible de plusieurs cellules PV en série parallèle permet d'adapter théoriquement la production d'énergie photovoltaïque à la demande. Ces associations constituent un générateur photovoltaïque (GPV) avec des caractéristique courant-tension  $I(V)$  spécifiques, non linéaires et présentant des points de puissance maximale (PPM) dépendant du niveau d'éclairement, de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. [2,3]

En effet, le développement des systèmes de conversion et économiquement viables, passe nécessairement par la compréhension des différents composants du système vieillissement à leur tête le panneau solaire. Ce dernier est composé de plusieurs cellules solaires qui nécessitent l'étude et la compréhension. Plusieurs modèles ont été présentés dans la littérature pour étudier le comportement d'une cellule solaire et déterminer ses caractéristiques en particulier la caractéristique courant-tension.

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur la modélisation et la simulation d'une cellule photovoltaïque à boîtes quantique. Pour se faire nous avons présenté ce manuscrit de façon suivante

Dans le premier chapitre, nous décrivons donner des notions les caractéristiques sur le matériau utilisé pour la modélisation de notre structure.

Dans le second chapitre, nous avons présenté les enjeux et le développement des cellules photovoltaïque, le fonctionnement d'une cellule en expliquant le phénomène photovoltaïque.

Nous avons présenté les différentes technologies des cellules actuellement sur le marché en en cours développement.

Dans le troisième chapitre, nous abordons une présentation des modèles physiques utilisés dans la simulation numérique et on discute les résultats de simulations obtenue par le logiciel SILVACO

# **CHAPITRE 1**

## **Notion sur l'alliage InAsN**

## 1.1 Introduction

Les semi-conducteurs III-V sont des matériaux composés d'éléments de la colonne III et de la colonne V du tableau périodique de Mendeleïev. Parmi tous les éléments possibles, les éléments les plus légers (comme le bore, l'aluminium ou l'azote) présentent d'avoir un semi-conducteur à large bande interdite.

I	II	III	IV	V	VI
		B	C	N	O
		Al	Si	P	S
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se
Ag	Cd	In	Sn	Sb	

**Tableau 1.1.** Table périodique abrégée des éléments [4].

L'addition de petites quantités (1%<) de l'azote dans les semi-conducteurs composés de III-V (InAs) a été trouvé pour réduire la largeur de la bande de gap et entraîner également un grand écart de la bande interdite inclinant, donnant lieu à une nouvelle physique fondamentale intéressante et tenant un grand potentiel pour le développement de nouveaux dispositifs. L'incorporation de N peut augmenter la masse effective des électrons et égaliser la densité d'états pour aider à soulager la recombinaison et des procédés d'absorption entre la bande de valence qui limitent actuellement l'efficacité quantique de l'infrarouge moyenne de source de lumière. Auparavant des nombreuses enquêtes ont été dirigés vers le (In) GaAsN / GaAs avec faible teneur en azote pour sa capacité à fonctionner entre 1.1 à 1.5  $\mu\text{m}$ .

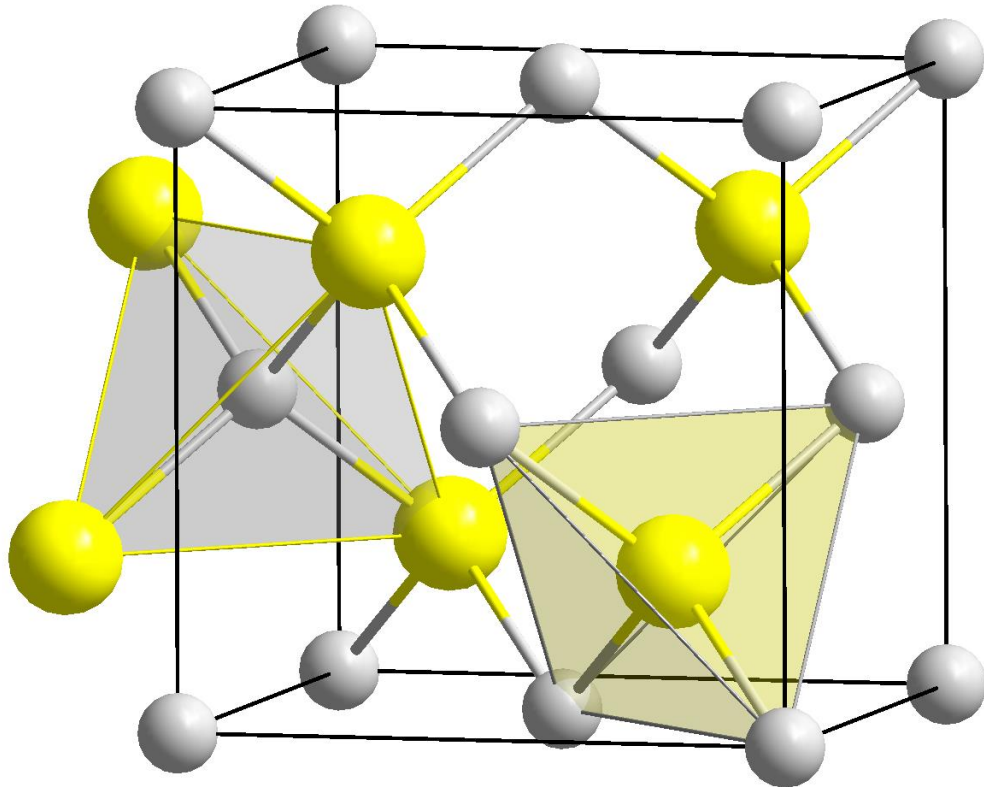
Selon les besoins de communications de fibre optique [5, 6]. Le comportement unique de bande de ce système ouvre de nombreuses possibilités pour les applications de périphériques en particulier de 1.3 $\mu\text{m}$  VCSEL [7-8] qui est une source de lumière de faible coût requis pour les réseaux optiques. les Structures de semi-conducteurs pour les dispositifs optoélectroniques dans le domaine optique sont maintenant produites en utilisant le InGaAsP/InP. Une lacune de lasers en utilisant cette structure est la faible stabilité thermique à la température ambiante à la suite du confinement des électrons insuffisante. À De plus, la qualité des substrats en InP est sensiblement

inférieure et coûte beaucoup plus que ceux de GaAs [5]. Jusqu'ici la meilleure performance de bord sur la base InGaAsN lasers à émission a été effectuée en utilisant l'épitanie par faisceau moléculaire avec une radio cellule de plasma de fréquence en tant que source d'azote. Ces matériaux ont montré des performances nettement améliorées avec une efficacité comparable à celle de diodes laser InGaAsP avec une température caractéristique élevé d'environ 215 K. [9,10]

Le InAsN à également une alternative intéressante à d'autres matériaux de milieu infrarouge, tels que HgCdTe, PbSnTe et InAsSb. Les précédentes tentatives ont été faites pour développer sur des substrats InAsN le InAs pour les applications infrarouges tels que l'imagerie médicale et la surveillance de la pollution atmosphérique. La réussite d'épitanie a été signalée pour la quantité d'azote allant jusqu'à 2,5% avec la température ambiante qui correspondante a la température d'émission jusqu'à 4.5 $\mu$ m [11]. Bien qu'à ce jour aucun dispositif n'a été signalé sur les substrats InAs, dernièrement il y a eu un certain nombre de publications de dispositifs de InAsN cultivés sur InP [12,13] et les substrats GaAs[14] utilisant les puits quantique et de la technologie à boites quantiques.

### **1.2 Structure cristalline :**

Les semi-conducteurs III - V cristallisent en un réseau constitué de deux sous réseaux cubiques à faces centrées imbriqués, l'un étant formé par les éléments de la colonne III et l'autre par les éléments de la colonne V.



**Figure 1.1.** Réseau cristallin InAs.

L'arséniure d'indium InAs est un semi-conducteur composite binaire de type III-V, composé d'arsenic et d'indium. Il a l'apparence d'un cristal cubique, gris, avec un point de fusion de 942 °C. L'arséniure d'indium est assez similaire à l'arséniure de gallium, ses propriétés sont assez proches, et comme lui il possède un gap direct. Il possède l'une des plus importantes mobilités d'électron parmi les semi-conducteurs, et son gap est l'un des plus petits. Il est toxique et dangereux pour l'environnement.

L'arséniure d'indium est parfois utilisé en combinaison avec le phosphore d'indium (InP). Les alliages avec l'arséniure de gallium (GaAs) forment un semi-conducteur ternaire, l'arséniure d'indium-gallium (InGaAs), dont le gap dépend du In/Ga.

La différence de paramètre de maille entre l'arséniure d'indium et le phosphore d'indium ou l'arséniure de gallium est cependant suffisante pour former des boîtes quantiques, lors du dépôt d'une monocouche d'InAs sur un substrat d'InP ou de GaAs, à cause des tensions qui se forment à cause de cette différence de paramètre de maille, l'arséniure d'indium se réorganise en « nano-îles » formant à la surface d'InP ou de GaAs des boîtes quantiques[17]. Il est également possible de former des boîtes

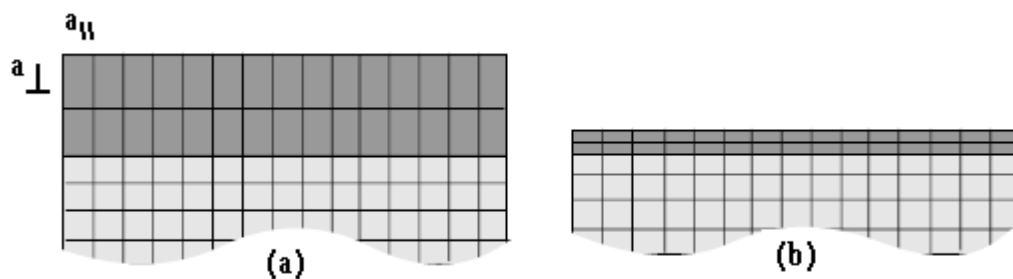


quantiques dans l'arséniure d'indium-gallium ou dans l'arséniure de gallium-aluminium.

### 1.3 Couche de contrainte :

Lors de l'épitaxie d'un matériau sur un substrat de paramètre de maille différent, un désaccord paramétrique est généré. Ce désaccord peut être rattrapé de deux façons différentes. [15]

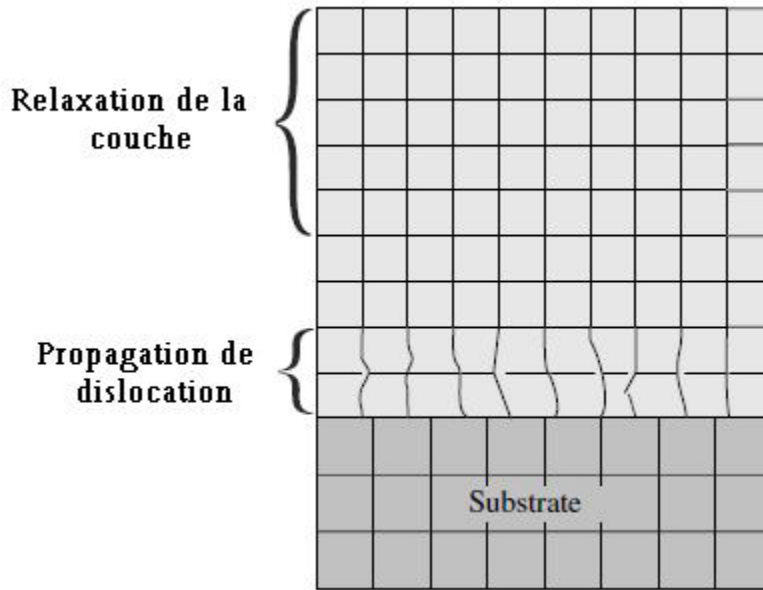
Dans le cas où les couches d'épitaxies sont suffisamment fines, la maille du matériau d'épitaxie se déforme de manière élastique de telle sorte que le paramètre de maille s'accorde au paramètre du substrat dans la direction parallèle à l'interface. Dans la direction perpendiculaire à l'interface de croissance le réseau se déforme en s'allongeant ou se comprimant selon que le paramètre de maille de la couche est plus petit ou plus grand que celui du substrat. Dans ce cas la couche est considérée comme étant totalement contrainte (figure 1.2).



**Figure 1.2.** Couche totalement contrainte, a) cas ( $a_{epitax} > a_{sub}$ )

Compression, b) cas ( $a_{epitax} < a_{sub}$ ) allongement.

Dans le cas d'une couche d'épitaxies plus épaisse, la déformation de la maille du matériau ne suffit plus à équilibrer l'énergie mécanique engendrée par la croissance. Le désaccord est alors rattrapé par la génération de dislocations à l'interface de croissance. Ces dislocations se propagent du substrat vers l'interface de croissance et la couche commence à relaxer.



**Figure 1.3.** Propagation de dislocation dans la couche d'épitaxie épaisse.

### 1.4 Epaisseur critique $h_c$ :

L'épaisseur au-delà de laquelle la couche d'épitaxie commence à relaxer est appelé épaisseur critique. Cette épaisseur critique dépend des propriétés mécaniques des matériaux (coefficients élastiques  $C_{ij}$ ), ainsi que du degré de désaccord paramétrique  $\Delta_a$  (équation 1.1) entre le substrat et la couche d'épitaxie.

Si l'épaisseur de la couche d'épitaxie dépasse la valeur de l'épaisseur critique, les mailles ne subissent plus les contraintes mécaniques imposées par le substrat et le paramètre de maille atteint celui du matériau massif. Le réseau est totalement relaxé [16]. (Figure 1.3).

$$\Delta_a = \frac{a_{epit} - a_{sub}}{a_{epit}} \quad (1.1)$$

## **Chapitre 2**

# **Généralités sur la cellule photovoltaïque**

### 2.1 Introduction :

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous allons parler et donner au début de ce chapitre un bref historique qui établit la position des cellules solaires par rapport aux autres systèmes de production d'énergie électrique. Elle est suivie d'une deuxième partie qui donne le principe de l'effet photovoltaïque et la présentation d'une source d'énergie durable (le soleil). La troisième partie présente les filières de Silicium et d'autres semi-conducteurs. Ensuite, nous décrivons le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales. Nous présentons les paramètres essentiels qui permettent de calculer le rendement d'une cellule solaire à partir de la caractéristique courant-tension. Puis, nous expliquons les différents constituants de base d'une cellule photovoltaïque conventionnelle.

### 2.2 Historique :

Naturellement à une vitesse comparable avec celle de son utilisation. Le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux sont ainsi des sources d'énergie renouvelables. Les énergies pétrolière et nucléaire n'appartiennent pas à cette classe puisque la réserve mondiale en pétrole et en uranium est limitée. En 1975, K.W. Ford avait reporté que l'énergie du rayonnement solaire à la surface de la terre était 104 fois plus grande que la demande d'énergie mondiale [17]. La conversion de cette énergie en électricité peut être effectuée de manière directe ou indirecte (figure 2.1). L'utilisation des cellules photovoltaïques pour obtenir cette conversion est une voie prometteuse pour exploiter cette source d'énergie durable. Le développement des cellules photovoltaïques a commencé en 1839 lorsque Henri Becquerel a mis en évidence l'apparition d'une tension aux bornes de deux électrodes immergées dans une solution électrolytique, lorsque celle-ci était exposée à la lumière naturelle. Par la suite, Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

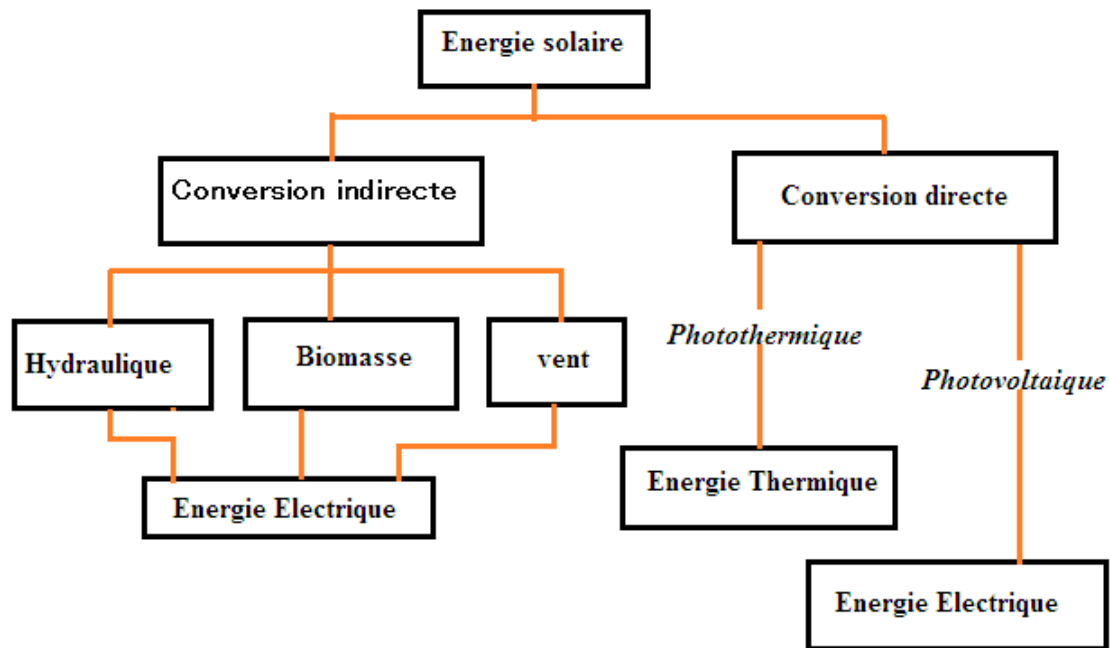
## Chapitre 2 : Généralités sur la cellule photovoltaïque

---

Où  $h$  est la constante de Planck,  $c$  est la vitesse de la lumière et  $\lambda$  est sa longueur d'onde. Aussi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte value a Albert Einstein le prix Nobel en 1905.

En 1954 Chapin et al. [18] des laboratoires Bell Téléphone aux Etats-Unis ont développé la première cellule solaire au silicium, avec un rendement énergétique de 6 %. Depuis, les cellules photovoltaïques ont commencé à faire l'objet de recherches plus intenses et se sont développées à l'échelle industrielle. Deux principales raisons en sont à l'origine :

- Le faible cout de fabrication du silicium qui pouvait en plus être issu en abondance des déchets de la microélectronique. En effet, le recyclage possible permettait alors d'éviter les premières étapes technologiques relativement, chères, notamment la purification.
- Le début du lancement d'importants programmes spatiaux et la nécessité d'avoir des sources d'énergie embarquées performantes.



**Figure 2.1.** Conversion de l'énergie solaire en énergie électrique

Pour les applications spatiales, répondante aux normes de poids et de durées de vie importantes, les cellules photovoltaïques sont rapidement devenues des cellules multicouches basées sur divers matériaux inorganiques, dont une des couches est souvent en GaAs. Elles présentent des rendements très élevés, une bonne fiabilité et une faible détérioration de leur caractéristique au cours du temps (sur au moins 20 ans). Les plus récentes sont formées de quatre couches de matériaux différents. Certaines recherches tendent même vers cinq couches. Bien que leurs performances soient meilleures que celles en Si, ces dernières ne se développent pas pour des applications terrestres en raison de leur prix, 50 à 100 fois plus chères. Pour les applications terrestres, le silicium est devenu le matériau le plus utilisé pour fabriquer des cellules PV en raison de son faible coût.

### 2.3 L'effet photovoltaïque et le Rayonnement solaire :

#### 2.3.1 L'effet photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque transforme directement le rayonnement solaire reçu en électricité. L'éclairement de la structure génère un courant ainsi qu'une tension, Fournissant ainsi une puissance électrique au circuit extérieur. Le matériau utilisé doit donc à la fois permettre le transfert d'énergie du photon absorbé à un électron et la collecte de plus haute énergie par un circuit externe. De nombreux matériaux et procédés peuvent potentiellement remplir ces conditions pour donner une conversion photovoltaïque. En pratique, les matériaux semi-conducteurs, sont les plus utilisés, sont le plus souvent sous la forme d'une jonction p-n. [36]

#### 2.3.2 Le rayonnement solaire :

Le développement, l'optimisation et la caractérisation de cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergies utilisée : le soleil. Celui-ci est une petite étoile, une boule de gaz, dont le diamètre est de 139100 Km, et qui est placée à 150000000 Km de nous. Ceci conduit à un éclairement moyen dans l'année de 1,36 KW/m<sup>2</sup> hors atmosphère.

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0,2Jm) à l'infrarouge lointain (2,5Jm). Lorsque ce rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption par les molécules des différentes couches atmosphériques, conditions climatiques, la diffusion moléculaire de Rayleigh et les poussières. Aussi le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), pour les infrarouges au-dessus de 2Jm, absorbent les énergies proches de leurs énergies de liaison, ce qui conduit à des trous dans le spectre solaire visible au sol.

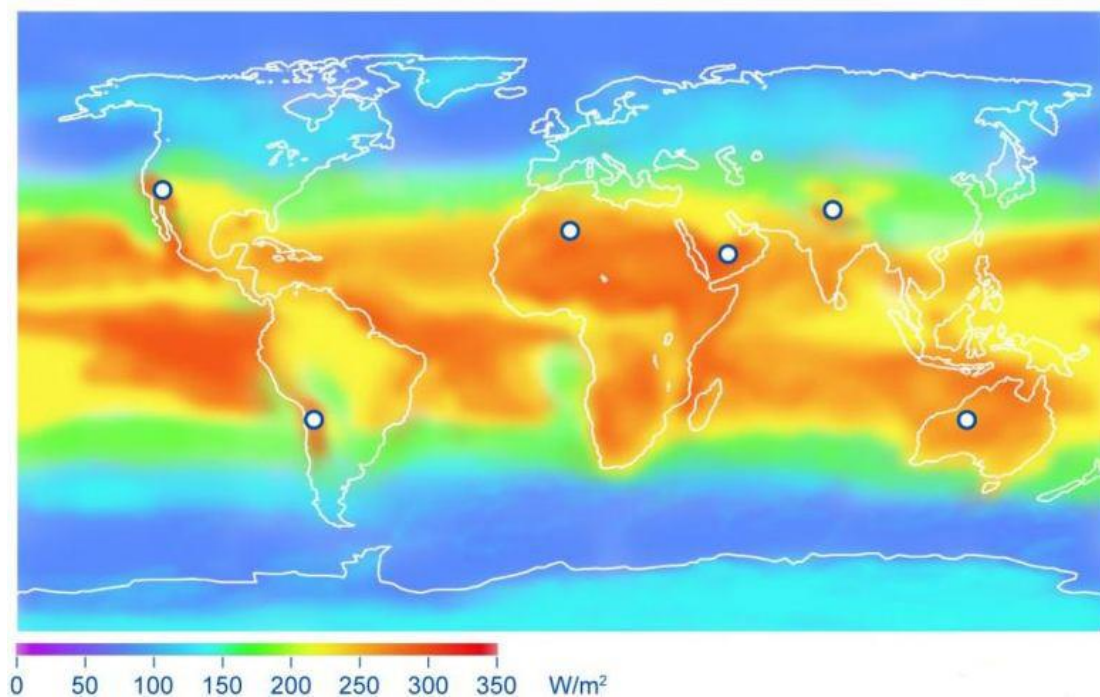
Par ailleurs, les aérosols et les poussières présents dans l'atmosphère conduisent à une absorption répartie quasiment sur toute la gamme spectrale, ce qui conduit à une baisse globale de la puissance incidente.

## Chapitre 2 : Généralités sur la cellule photovoltaïque

L'intensité lumineuse issue du soleil normalement incidente sur la surface de la terre est appelée la constante solaire. Cette constante à une valeur approximativement de 1,4KW/m<sup>2</sup> au-dessus de la couche atmosphérique est réduite sur terre à 1KW/m<sup>2</sup> par réflexion et absorption des particules présentes dans la couche atmosphérique. Cette perte est appelée la masse d'air (AMy), elle est utilisée afin de caractériser le spectre solaire en terme d'énergies émises [18], étant défini par :

$$Y = \frac{1}{\sin(A)} \quad (2.2)$$

A représente l'angle entre la position du soleil et l'horizon (Figure 2.2). On définit ainsi les conditions :



**Figure 2.2.** Rayonnement solaire suivant le site géographique [31]

### 2.4 Les différentes filières photovoltaïques :

Les panneaux solaires ne sont pas constitués de la même manière. En effet, il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et de développement. Parmi les technologies de cellules photovoltaïques existantes, deux grandes filières sont à distinguer en fonction du procédé de fabrication utilisé



### 2.4.1 Cellules photovoltaïques à base de semi-conducteurs :

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium et plus rarement d'autres semi-conducteurs.

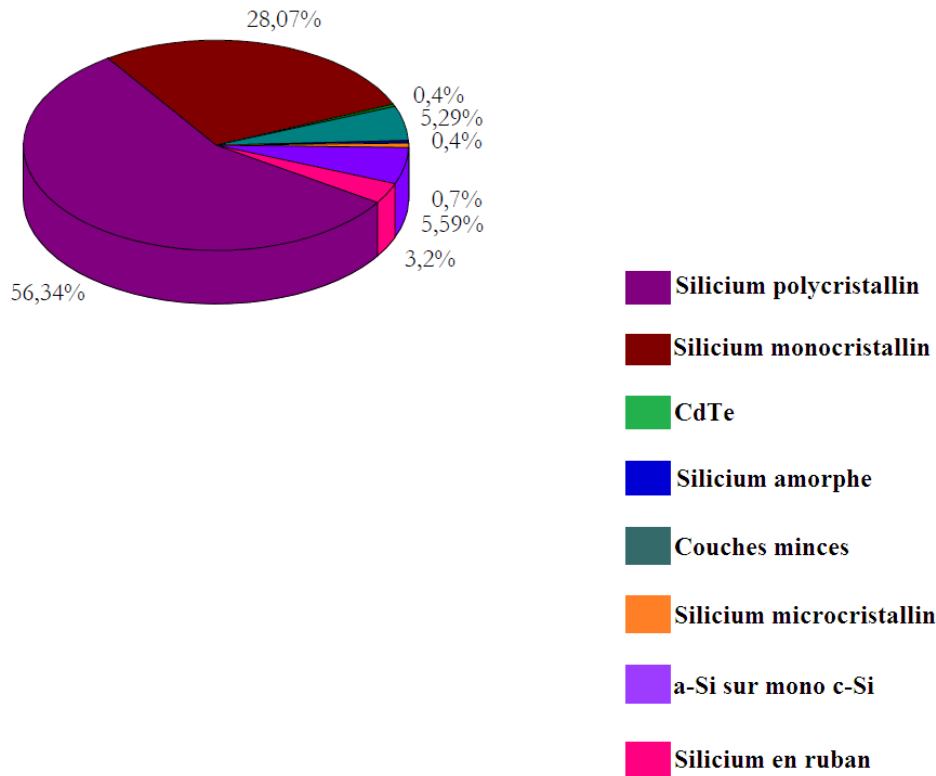
#### a) Propriétés Photovoltaïque de silicium :

Le silicium est l'élément le plus abondant sur terre après l'oxygène, il apparaît sous forme de dioxyde ( $\text{SiO}_2$ ), appelé plus communément silice. Le silicium est extrait à l'échelle industrielle par un mécanisme d'oxydoréduction, de la silice à faible teneur en oxyde de fer est mise en contact de composés carbonés, le tout étant porté à très haute température ( $3000^\circ\text{C}$ ) dans des fours électriques à arc. On obtient du silicium de qualité métallurgique, pur à 98%, qui deviennent de qualité dite (électroniques) après des opérations supplémentaires de purification [36].

Le silicium occupe une place prédominante au sein de l'industrie photovoltaïque grâce à ces nombreux avantages : disponibilité, qualités photovoltaïques assurant au final un bon rendement de conversion, non toxique. Enfin, il est aisé de modifier les propriétés électriques du silicium en introduisant dans la matrice cristalline des atomes dopants tels que le Bore (induisant un dopage de type P) ou le Phosphore (induisant un dopage de type N).

D'un point de vue photovoltaïque, le seul inconvénient du silicium réside dans sa structure électronique qui présente un gap indirect, gap à  $1,12\text{eV}$  ne correspondant donc pas exactement au maximum d'intensité du spectre solaire. Par conséquent, l'absorption du rayonnement solaire par le silicium sera plus faible que celle d'un semi-conducteur à gap direct comme l'arséniure de gallium GaAs.

Le silicium se présente sous différentes formes (figure 2.3) dont les plus répandues sont le silicium polycristallin, le silicium monocristallin et le silicium amorphe [36].



**Figure 2.3.** Répartition des différents matériaux sur le marché photovoltaïque [19]  
Nous allons maintenant d'écrire les différentes formes sous lesquelles est employé le silicium dans l'industrie photovoltaïque.

### •Le silicium monocristallin :

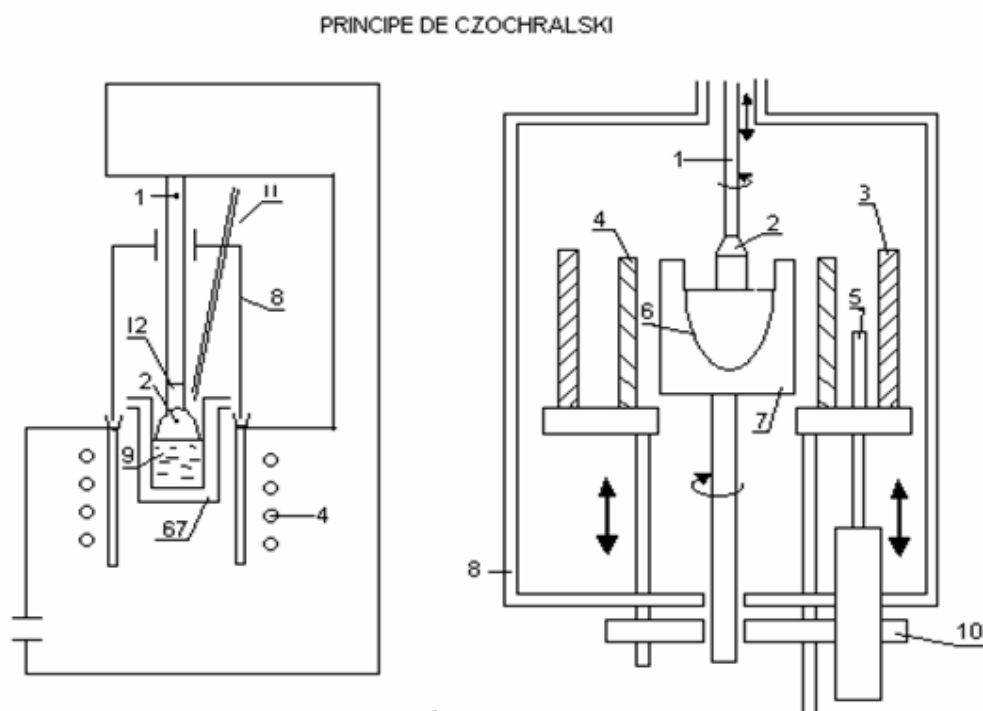
La technologie monocristalline, plus chère, utilise des barres pures de silicium également employées dans la fabrication des puces électroniques. Le silicium monocristallin est une matière première d'une très grande pureté. Il est généralement obtenu par tirage selon le procédé de « CZOCHRALSKI » ou par fusion de zone. Une plaquette de silicium monocristallin est composée d'un seul grain.

On obtient des lingots cylindriques monocristallins par tirage en creuset.

Un contrôle rigoureux de la température de refroidissement du silicium fondu permet d'obtenir un monocristal. Le silicium obtenu est appelé Cz (méthode Czochralski) ou FZ (Floated Zone). Conditionné en barreaux ou lingots, il est découpé

## Chapitre 2 : Généralités sur la cellule photovoltaïque

en tranches d'épaisseur souhaitée (wafers), d'où une source de perte importante de matière première car les déchets ne peuvent pas être réutilisés. Son procédé de fabrication est long et énergivore, plus coûteux, il est cependant plus efficace que le silicium polycristallin. Le rendement moyen des cellules est relativement élevé : entre 12% et 18% (version commerciale) et environ 24,7% pour le meilleur rendement obtenu en laboratoire (UNSW Australie). Les inconvénients de cette technologie sont les faibles rendements obtenus sous un faible éclairage et surtout le coût prohibitif de production des matériaux.



**Figure 2.4.** La méthode de Czochralski

- |                              |   |
|------------------------------|---|
| 1 : tige d'extraction        | 7 : creuset en graphite                       |
| 2 : mono cristal de silicium | 8 : paroi de la machine                       |
| 3 : écran thermique          | 9 : silicium + impuretés de dopage            |
| 4 : résistances chauffantes  | 10 : mécanisme de maintien                    |
| 5 : thermocouples            | 11 : tube d'introduction des produits dopants |
| 6 : creuset en quartz        | 12 : germe de silicium                        |

## Chapitre 2 : Généralités sur la cellule photovoltaïque

---

### •Silicium polycristallin :

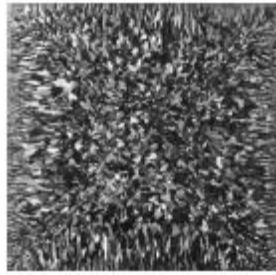
Ce type de cellules est produit à partir d'un bloc de silicium monocristallin, refroidi axialement, découpe en plaquettes minces par des scies à fil. Elles ont un rendement de 11% à 15% (version commerciale) et d'environ 18% en laboratoire, mais leur cout de production est moins élève que les cellules monocristallines. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication.

Le silicium poly-cristallin quant à lui, est obtenu par refonte des chutes de silicium monocristallin issues des opérations d'équarrissages. Son rendement est légèrement inférieur mais il est beaucoup moins cher à l'achat.

Les chutes sont placées dans un creuset porté à + 1430°C. Après la phase de fusion, le fond du creuset est refroidi. On oriente de bas en haut la solidification, pour lui donner une structure colonnaire multicristalline à gros grains. Le lingot obtenu est ensuite découpé, en briques de 101,5 x 101,5 mm ou 120 x 120 mm actuellement. Ces briques sont ensuite assemblées pour être transformées.

### • Cellules à base de silicium multicristallin :

Le silicium monocristallin comporte peu de défauts recombinauts et permet d'obtenir les meilleurs rendements. Cependant, son élaboration est très couteuse, ce qui constitue un frein à son développement industriel pour les applications photovoltaïques. Le silicium multicristallin, moins onéreux que le silicium monocristallin, a été introduit dans l'industrie photovoltaïque à partir des années 1970 [36]. Il se présente sous forme de lingots de silicium constitués de grains d'une taille variant entre le millimètre et quelques centimètres. Les techniques de production du silicium multicristallin sont beaucoup plus simples à mettre en œuvre. Néanmoins, du fait de la méthode d'élaborations, la concentration en impuretés est supérieure à celle du silicium monocristallin et la structure granulaire induit des recombinaisons. En conséquence le rendement de conversion photovoltaïque est limité [36].



**Figure 2.5.** Photographie d'une plaque de silicium multicristallin

- **Cellules à base de silicium amorphe :**

Le silicium amorphe est un matériau obtenu de façon simple par dépôt en phase vapeur sur des substrats économiques tels que le verre, le quartz ou l'aluminium. La décomposition en phase vapeur de silane  $\text{SiH}_4$  à basse température (200 à 400°C) permet de déposer du silicium amorphe hydrogéné avec une vitesse avoisinant la dizaine de nanomètres par minute.

Ce type de cellules, de structure moléculaire non cristalline, nécessite moins d'énergies pour leur production que les cellules cristallines, car il est composé de couches minces. Leur rendement actuel atteint 9% en industrie et environ 11% en laboratoire. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à faible coût en utilisant peu de matière première [36]. La technologie du silicium amorphe permet de fabriquer des cellules semi transparentes qui laissent passer 10% à 20% du rayonnement solaire incident. En effet, la grande densité de défauts du silicium amorphe (liaisons pendantes, états d'interface, structure multicristalline) limite son rendement de conversion.

- **Cellules tandem :**

L'amélioration du rendement des cellules peut passer par une meilleure utilisation du spectre lumineux, en combinant une couche mince de silicium amorphe à une couche de silicium microcristallin (cellules tandem) [21,22]. Il s'agit comme pour les multi-jonctions d'empiler deux cellules photovoltaïques qui absorbent des photons de longueurs d'onde différentes. Les avantages de cette technologie sont multiples : un fort potentiel d'augmentation de rendement, une fabrication à faible budget thermique ( $T < 250^\circ\text{C}$ ), une meilleure tenue en température et une application adaptée au substrat mince. Par ce mécanisme l'ensemble tandem composé de l'association de deux cellules, permet d'absorber un plus large spectre lumineux et ainsi produire plus d'énergie qu'une cellule simple jonction. La première couche en silicium amorphe

## Chapitre 2 : Généralités sur la cellule photovoltaïque

---

absorbe une partie du spectre alors que l'autre partie, qui la traverse, est absorbée par la seconde couche en silicium microcristallin. Les différentes couches qui composent la cellule sont déposées par plasma (PECVD Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) sur un substrat de verre.

- **Cellules à base de silicium en ruban :**

Une troisième technologie utilise directement le tirage de rubans à partir de bains fondus [23]. Un ruban servant de substrat passe à travers un bain de silicium en fusion, une fine couche de silicium se dépose alors sur le substrat. Cette technique permet de réaliser des wafers plus minces (120µm) et évite essentiellement les pertes liées au sciage. Malgré la lenteur de déposition (quelques cm/min), la technologie ruban est un candidat prometteur à la réduction du prix du watt crête photovoltaïque.

- **Cellules à base de silicium en couches minces :**

La technologie en couches minces de silicium cristallin déposé sur un support, dont le développement sera largement déterminé par le coût du silicium chargé, consiste à déposer une couche mince de silicium polycristallin de 10-40 nm d'épaisseur sur divers substrats de silicium métallurgique peu purifié, quartz, céramique ou métal. Ces couches minces devraient permettre d'obtenir des rendements de conversion du même ordre qu'une cellule sur matériau massif, moyennant un confinement optique et un champ arrière répulsif pour les porteurs minoritaires et du fait que la distance qu'ils ont à parcourir est plus faible, on peut se contenter d'une pureté moindre pour le matériau de base.

Depuis quelques années, les films minces de silicium cristallin suscitent un intérêt majeur en Europe et aux USA où Astropower aurait abouti (en 1998, après 10 ans d'annonce) à une fabrication pilote de cellules en couches minces sur une céramique de composition confidentielle avec une procédure de dépôt utilisant un alliage de silicium en phase liquide. Ce succès, a entraîné de nombreux laboratoires sur des projets de fabrication de films de Si en phase vapeur sur supports de silicium, de céramique ou même de verre.

Après avoir des rendements de conversion faible environ 10% lors de l'utilisation de silicium microcristallin avec la taille de grain, les études sont dirigées vers l'utilisation de silicium polycristallin (poly-Si) à larges grains déposé sur substrats résistants à haute

## Chapitre 2 : Généralités sur la cellule photovoltaïque

température, les rendements sont alors de l'ordre de 15 % (16,6% par exemple pour le procédé Silicone Film développé par la société Astropower).

Cependant, la structure granulaire limite le rendement comme l'ensemble de la filière du silicium (monocristallin, polycristallin et amorphe) représente à l'heure actuelle plus de 90% des parts du marché photovoltaïque. Le Tableau 2.1 représente un récapitulatif des différentes filières silicium présentant actuellement sur le marché

Technologie	Rendement Typique	Influence Température	Taux de dégradation	Prix d'un module (2008)
Monocristallin	12 à 16%	-0.442% par °C	-0.38% par an	3.13 €/Wc
Polycristallin	11 à 14%	-0.416% par °C	-0.35% par an	2.95 €/Wc
Amorphe	6 à 7%	+0.175% par °C	-1.15% par an	2.35 €/Wc

**Tableau 2.1.** Performance de la filière Silicium simple jonction [20]

- **Cellules GaAs (arséniure de Gallium) :**

Ce composé III-V est fait pour des cellules photovoltaïques à très haut rendement 25% à 28%. Elles présentent l'inconvénient de recourir à des procédés et des matériaux fort coûteux se révélant de surcroît très toxiques pour l'environnement. Ces restrictions interdisent actuellement toute production de masse. Ce type de cellule est souvent réservé au domaine spatial ou pour les systèmes à concentrateurs. Le procédé de multi jonction III-V du GaAs permet de dépasser une efficacité de 30%.

### **2.4.2 Cellules photovoltaïques organiques :**

Si le marché des cellules photovoltaïques est aujourd'hui dominé à plus de 90% par le silicium cristallin, les composites organiques, encore au stade de l'étude de la faisabilité d'introduction sur le marché en termes de rendement et de fiabilité. Bien que cette filière soit vraiment récente, les progrès annuels sont spectaculaires. Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre. Comme les semi-conducteurs, ces cellules possèdent des niveaux d'énergies susceptibles d'absorber les photons en créant des paires électron-trou utilisables grâce à des transitions entre les niveaux dits HOMO (Highest occupied)

## Chapitre 2 : Généralités sur la cellule photovoltaïque

---

molecular orbital) et des niveaux dits LUMO (Lowest unoccupied molecular orbital). En l'absence de séparation, les paires électron-trou peuvent se recombiner en émettant des photons de la longueur d'onde correspondante plutôt que se convertir en chaleur comme vu précédemment pour les filières inorganiques. La séparation des charges reste encore aujourd'hui un des points bloquants pour être effectuée efficacement. Cependant, les cellules photovoltaïques organiques restent des cellules souples et économiques en grandes quantités (films). Parmi ces cellules, on distingue deux types

- **Cellules de Gratzel :**

Depuis les années 2000, plusieurs laboratoires dans le monde étudient ce type de cellules. Nous utilisons, entre autre, le colorant naturel des plantes pour convertir l'énergie solaire en électricité tout comme le feraient les plantes lors de la photosynthèse. Les cellules Gratzel ont un rendement de l'ordre de 10%, cellules encore fragiles par rapport au silicium.

- **Cellules polymères :**

Les matériaux organiques polymères, faciles à mettre en œuvre, sont en passe de s'imposer à côté du silicium pour la fabrication des cellules solaires, même si des verrous technologiques restent à lever. Les organiques, autrement dit les plastiques, moins onéreux, apparaissent en effet de plus en plus comme une voie d'avenir complémentaire, séduisante et crédible. Ces cellules ont un rendement de l'ordre de 5%, mais leurs durées de vie restent encore limitées.

Les cellules solaires organiques avec leurs faibles coûts de matière première, leurs faibles besoins énergétiques de production et leurs capacités à être fabriquées à grande échelle sont des sérieux candidats et à fort potentiel pour un développement photovoltaïque à long terme.

Ce bilan rappelle les avantages et les inconvénients de chacune des technologies qui doivent être pris en compte dans la réalisation d'un projet photovoltaïque.

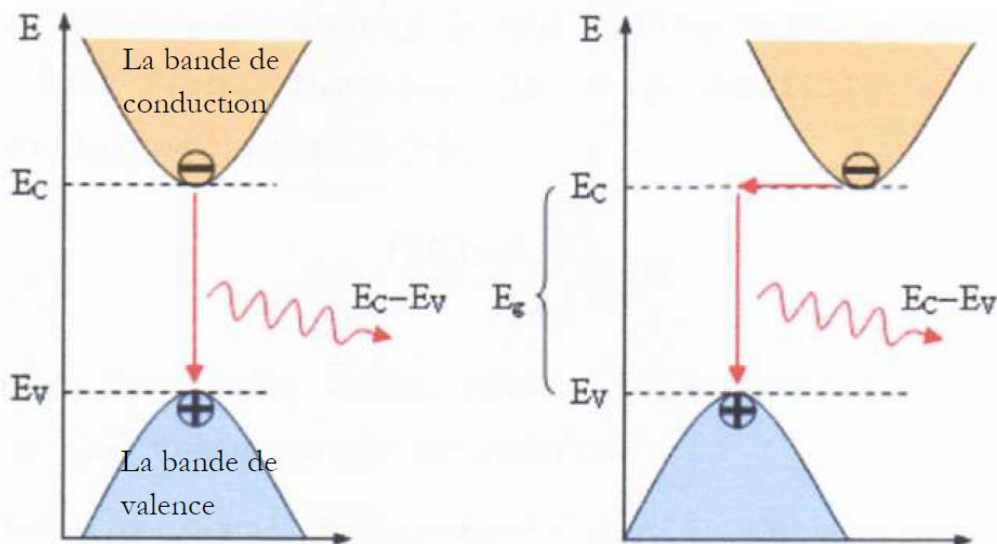
### 2.5 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :



### 2.5.1 L'interaction photon/semi-conducteur :

La cellule photovoltaïque ou photopile est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lie à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction), c'est l'énergie du gap.

Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des  $k$ , il s'agit d'un gap direct (figure 2.6.a). Le cas contraire correspond à un semi-conducteur à gap indirect (figure 2.6.b). Cette valeur « seuil » est propre à chaque matériau semi-conducteur et varie de 1.0eV à 1.8eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1.12eV pour le silicium cristallin, 1.7eV pour le silicium amorphe et de 1.43eV pour l'arséniure de gallium. [24] [25].



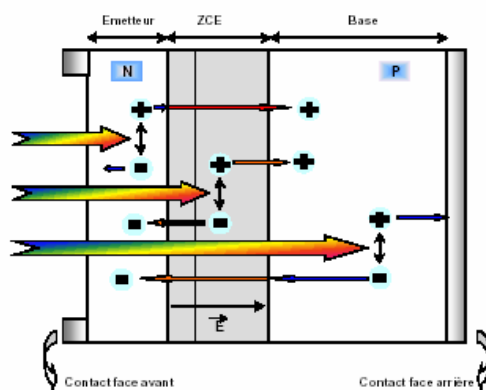
**Figure 2.6.** a) semi-conducteur a gap direct b) semi-conducteur a gap indirect. [26]

Les cellules solaires sont généralement décrites comme des jonctions p-n obtenues en variant le type de dopage dans un semi-conducteur (figure 2.7). La conversion de

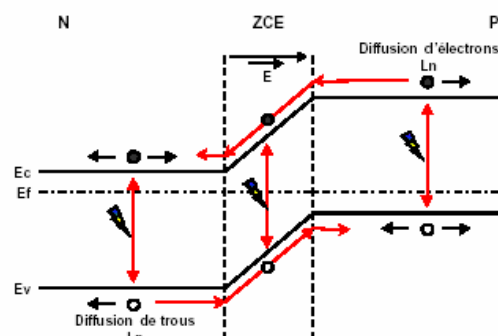
## Chapitre 2 : Généralités sur la cellule photovoltaïque

l'énergie est le résultat de l'absorption de photons donnant lieu à la création des paires électrons trous. Pour séparer cette paire de charges électriques de signe opposé et recueillir un courant électrique, il faut introduire un champ électrique permanent au sein du matériau. Ce dernier, assure une séparation rapide de ces porteurs pour éviter des phénomènes de recombinaison [27]. La méthode utilisée pour créer ce champ est celle du dopage par des impuretés. Deux natures de dopage sont possibles :

Le dopage de type n (négatif), qui consiste à introduire dans la structure cristalline semi-conductrice des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire, libre de se mouvoir dans le cristal (ex : le phosphore dans le cas du silicium). Le dopage de type p (positif), qui utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire. (Ex : le bore dans le cas du silicium).



Zone de charge d'espace



Zone de charge d'espace

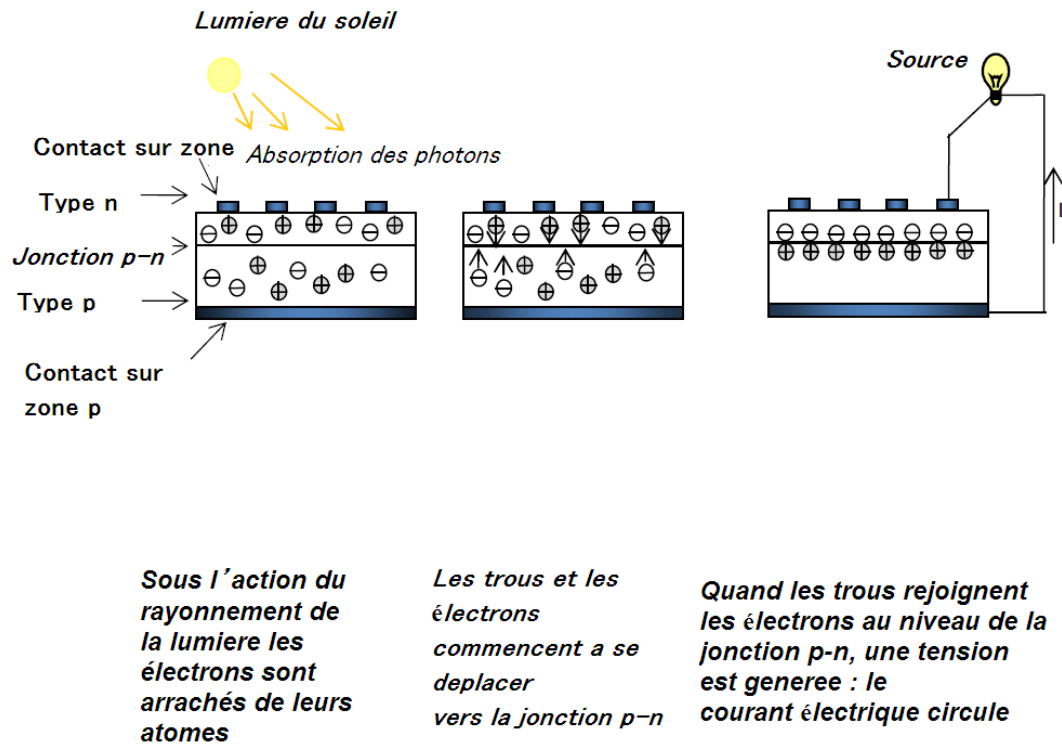
**Figure 2.7.** Structure et diagramme de bandes pour une jonction p-n

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 dans la zone p.

Une jonction p-n a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes. Chacun fait passer un électron de la bande de valence vers la bande de

## Chapitre 2 : Généralités sur la cellule photovoltaïque

conduction en laissant aussi un trou capable de se mouvoir et en engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule (figure 2.8).



**Figure 2.8.** Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques

### 2.5.2. Caractéristique courant tension et schéma équivalent :

La figure 2.9 représente une caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sous obscurité et sous éclairement. Cette jonction polarisée par une tension V et non éclairée est le siège d'un courant de densité :

$$J = J_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{NKT}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

Avec :  $J_s$  est le courant des porteurs minoritaires, il reste inchangé

Dans l'obscurité et dans le cas idéal, la courbe obéit à l'équation de Schrockley suivante :

$$I = JA = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{NKT}\right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

## Chapitre 2 : Généralités sur la cellule photovoltaïque

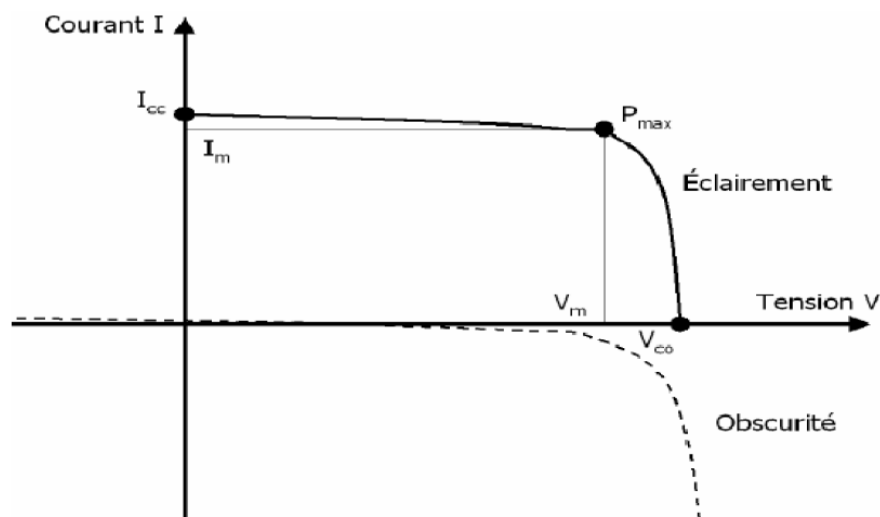
Où  $A$  est la surface de la diode,  $I_s$  est le courant de saturation,  $q$  est la charge de l'électron,  $k$  est la constante de Boltzmann,  $T$  est la température et  $n$  est le facteur d'idéalité de la diode. Ce dernier tient compte des recombinaisons.

Cette même jonction polarisée sous une tension  $V$  et soumise à un rayonnement, elle est alors le siège d'un courant supplémentaire inverse  $I_{ph}$

On obtient alors l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

La lumière  $I_{ph}$  : un courant inverse proportionnel à incidente

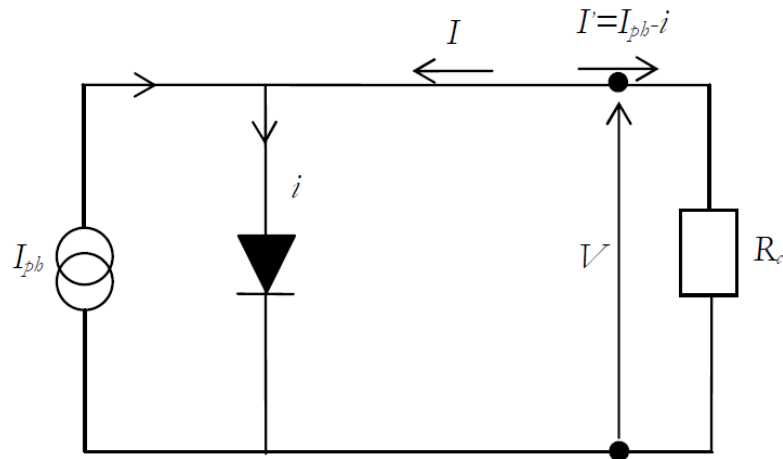


**Figure 2.9.** Caractéristique I-V d'une cellule solaire sous obscurité et sous éclairement

### a) cas d'une cellule idéale :

La jonction p-n sous éclairement peut être schématisée par un générateur de courant  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode délivrant un courant  $i$  dans l'obscurité.

Le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale est présent dans la figure (2.10)



**Figure 2.10.** Circuit électrique d'une jonction p-n idéale sous illumination

Connecte à une résistance de charge

Lorsque la jonction p-n est reliée à une résistance de charge  $R_c$ , la tension  $V$  apparaît par la chute ohmique du courant à travers  $R_c$  (en circuit ouvert,  $R_c$  tend vers l'infini et  $V$  tend vers  $V_{co}$ ).

L'orientation de  $I_{ph}$  vers  $R_c$  produit une tension induisant une polarisation directe à travers la jonction si bien que le courant  $i$  est de sens opposé à  $I_{ph}$ . D'un autre point de vue, nous pouvons considérer que la direction du photocourant dans la résistance de charge induit une tension à travers la jonction qui génère le courant direct  $i$  dans la direction opposée à  $I_{ph}$ . Si bien que globalement nous n'observons pas le photocourant entier  $I_{ph}$ , mais seulement :

$$I = I_{ph} - i \quad (2.6)$$

## Chapitre 2 : Généralités sur la cellule photovoltaïque

---

### b) Cas d'une cellule photovoltaïque réelle :

Lorsque les résistances de contacts (résistivité des électrodes et des interfaces métal-semi-conducteur) et les pertes ohmiques (dus à la résistivité des différentes couches de la cellule et de la surface latérale de la jonction) génèrent une résistance non négligeable par rapport à la résistance de charge, nous devons associer au schéma équivalent une résistance série, voir figure 2.11. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant le contact métal-semi-conducteur et en diminuant la résistivité du matériau utilisé. Cependant, un dopage trop élevé entraîne une augmentation de la recombinaison des porteurs.

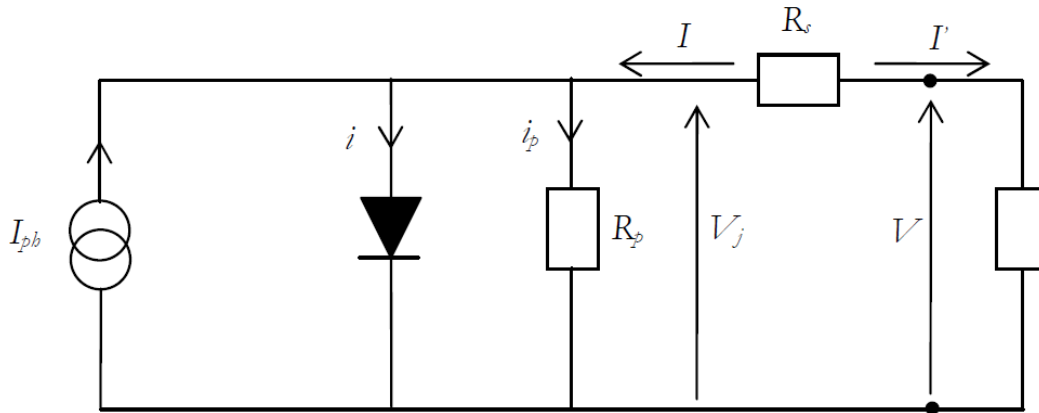
Si on note  $V_j$  la tension à travers la jonction, la tension  $V$  à travers la cellule est réduite à :

$$V = V_j - R_s I \quad (2.7)$$

Dans le premier quadrant nous avons :

$$I = I_{ph} - I_0 [\exp(qV_j/nkT) - 1] = I_{ph} - I_0 [\exp(q(V + RI)/nkT) - 1] \quad (2.8)$$

La pente de la courbe courant-tension au point  $V_{oc}$  représente l'inverse de la résistance série ( $1/R_s$ )



**Figure 2.11.** Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque avec résistance série et Shunt

De plus, lorsque les courants de fuite (courants de court-circuit) apparaissent à travers la cellule, nous pouvons prendre en compte cette nouvelle composante en insérant une résistance parallèle  $R_p$  (résistance Shunt).  $R_p$  tend vers l'infini lorsque  $i_p \approx 0$  (courants de fuite).

Cette valeur devra être la plus élevée possible. Nous obtenons :

$$I' = I_{ph} - i - i_p = I_{ph} - I_s [\exp(qV_j/nkT) - 1] - V_j/R_p \quad (2.9)$$

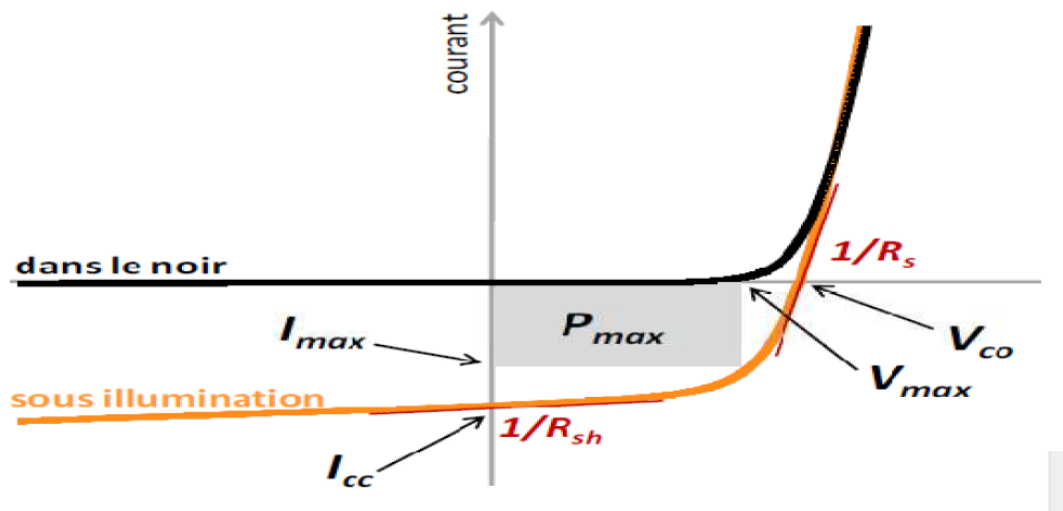
En remplaçant  $V_j$  par  $V + R_s$  nous avons :

$$I' = I_{ph} - I_s [\exp(q(V + R_s)/nkT) - 1] - V/R_p \quad (2.10)$$

La pente de la courbe courant-tension au point  $I_{cc}$  représente l'inverse de la résistance Shunt ( $1/R_p$ ). En général, la valeur de  $R_p$  est plus grande que  $R_s$  d'au moins un ordre de grandeur. Pour minimiser les pertes, il faut diminuer  $R_s$  et augmenter  $R_p$ . Le cas idéal est représenté par  $R_p$  égal à l'infini et  $R_s$  égale à zéro.

### 2.5.3 Paramètre des cellules photovoltaïques :

Une cellule photovoltaïque est caractérisée par un rendement de conversion  $\eta$ , une tension à circuit ouvert  $V_{oc}$ , un courant de court-circuit  $I_{cc}$  et un facteur de forme  $ff$ . Les caractéristiques courant-tension sont utilisées pour déterminer ces paramètres. La figure suivante représente les différents paramétrés de la cellule photovoltaïque



**Figure 2.12.** Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque

#### a) Courant de court-circuit $I_{cc}$

Le courant de court-circuit exprime en mA, est le courant qui circule dans la cellule sous éclairage et sans application de tension (en prenant  $V=0$  dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges et de la température.



## Chapitre 2 : Généralités sur la cellule photovoltaïque

### b) Tension a circuit ouvert Voc

La tension de circuit ouvert exprimée en millivolts, est mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans la cellule. Elle dépend de la différence des travaux de sortie des électrodes et de la résistance Shunt. Elle décroît avec la température et varie avec l'intensité lumineuse.

### c) Facteur de forme ff

Les valeurs  $V_{max}$  et  $I_{max}$  sont définies de telle sorte que le produit  $V_{max} \cdot I_{max}$  soit maximal. Ce produit correspond à la puissance maximale  $P_{max}$  pouvant être délivrée par la cellule photovoltaïque. Ce point  $P_{max}$  est obtenu en modifiant la valeur de la résistance externe, quand l'aire du rectangle défini par les axes  $Ox$ ,  $Oy$  et les droites  $x=I_m$  et  $y=V_m$  passe par un maximum.

Le nom facteur de forme (fill factor) dérive de la représentation graphique. Il est égal au rapport de la surface du rectangle  $P_{max}$  sur celle du rectangle dont les cotes mesurent  $V_{oc}$  et  $I_{cc}$ . Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (2.13)$$

Plus ce paramètre n'est élevé, l'efficacité de conversion est meilleure. En dehors de ce point de fonctionnement  $P_m$  particulier, la diminution du courant par recombinaison intervient à des points de fonctionnement ayant  $V_x$  supérieur à  $V_m$  et des pertes par chauffage (effet joule) des résistances séries apparaissent dans le cas de  $I > I_m$ .

### d) Le rendement $\eta$

Le rendement de conversion (efficiency) exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{inc}$

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{cc}}{P_{inc}} \quad (2.14)$$

## Chapitre 2 : Généralités sur la cellule photovoltaïque

Si on veut augmenter le rendement en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension a circuit ouvert.

### e) Le rendement quantique, EQE

Le rendement quantique, note EQE (external quantum efficiency), appelé aussi IPCE (Incident photon to current conversion efficiency), est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Ce rendement ne prend pas en considération les photons réfléchis et transmis. Il est donné par la relation suivante :

$$EQE = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi(\lambda)} * \frac{E_{ph}(\lambda)}{e} = \frac{hc}{e} * \frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi(\lambda)\lambda} = 1,24 \frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi(\lambda)\lambda} \quad (2.15)$$

Ou  $J_{cc}$  est la densité de courant de Court-circuit ( $A.cm^{-2}$ ),  $\phi$  est l'éclairement reçu par l'échantillon ( $w.cm^{-2}$ ),  $\lambda$  est la longueur d'onde monochromatique (nm),  $h$  est la constante de Planck (J.s),  $c$  est la vitesse de la lumière ( $J.ms^{-1}$ ),  $e$  la charge électronique et  $E_{ph}$  l'énergie du photon.

Le rapport  $\frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi(\lambda)}$  est appelé réponse spectrale, noté  $SR(\lambda)$ . Cette dernière représente la sensibilité de la cellule pour chaque longueur d'onde. Elle est souvent utilisée dans le marché de l'électronique comme caractéristique des photodiodes. EQE peut s'écrire selon l'expression :

$$EQE = SR(\lambda) \frac{hc}{e\lambda} \quad (2.16)$$

Le rendement quantique dépend du coefficient d'absorption des matériaux utilisés, de l'énergie d'ionisation, la largeur de la zone de déplétion et de l'efficacité de collecte. Il est mesuré en fonction de la longueur d'onde émise par une source monochromatique. Le rendement de 100% dans le cas idéal (sans pertes) correspond à la récolte par les électrodes d'une paire électron-trou par photon incident. Des valeurs de 50% et 80% ont été reportées pour les matériaux organiques et inorganiques respectivement [28] [29].

### 2.6 CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons présenté les enjeux et les développements actuels du photovoltaïque. Nous avons ensuite présenté le fonctionnement d'une cellule en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque. Nous avons vu que la cellule  $V$  présente une caractéristique  $I(v)$  non linéaire, Nous avons présenté des différents paramètres extérieurs sur cette caractéristique. Le courant de court-circuit évolue principalement avec l'éclairement et la tension à vide. Nous avons présenté les différentes technologies de cellules actuellement sur le marché. Nous avons aussi donné des notions sur les différentes filières de silicium.

# **Chapitre 3**

**Modélisation de cellule photovoltaïque**

**InAsN/GaAs à boîtes quantique**

### **3.1 Introduction :**

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude de la structure InAsN/GaAs. Dans une première partie, nous définissons la structure à simuler ainsi que les paramètres utilisés. Ces paramètres sont choisis selon les moyens technologiques utilisés dans la réalisation des cellules photovoltaïques. Nous présentons ensuite, un descriptif du logiciel de simulation de la société SILVACO et sa mise en œuvre dans le cadre de notre travail.

Dans une deuxième partie, Nous décrivons une étude de simulation à deux dimensions effectuées sous SILVACO/ATLAS et nous exposons les résultats obtenus de la simulation numérique de la structure à contacts arrière inter digités. Par ailleurs, les résultats de la simulation ont permis d'étudier différents paramètres influant sur les performances des cellules.

### **3.2 Présentation sur SILVACO :**

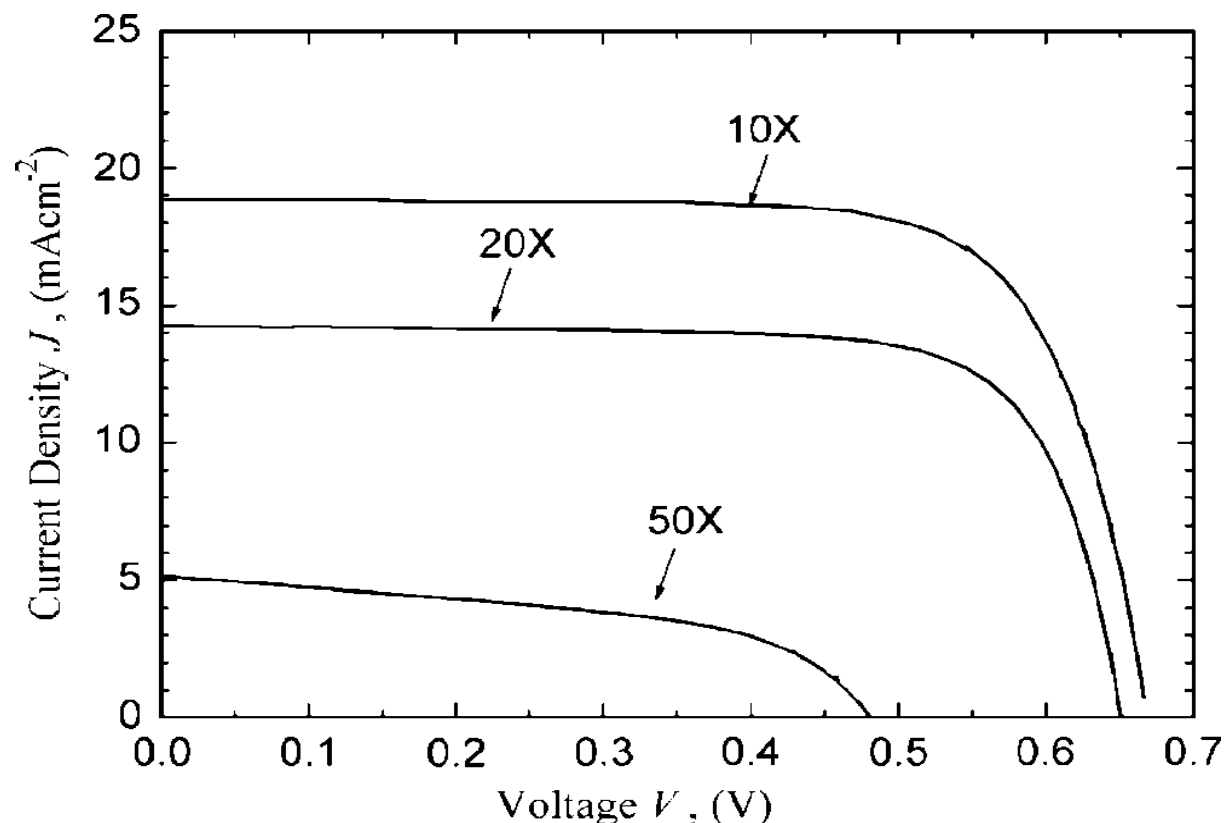
SILVACO est une société internationale Américaine, ayant son siège à Santa Clara en Californie. Elle est un des principaux fournisseurs de chaînes professionnelles de logiciels de simulation par éléments finis et de conception assistée par ordinateur pour les technologies de l'électronique TCAD (Technology Computer Aided Design). Ces outils sont employés par les compagnies de microélectronique dans le domaine de la recherche, du développement et de la conception de dispositifs.

SILVACO présente un ensemble des outils de simulation interactifs permettant la conception et l'analyse de la plus part des dispositifs à semiconducteurs VWF (Virtual Wafer Fab). [30]

Silvaco TCAD est un logiciel de conception de l'appareil et de simulation puissant, y compris les semi-conducteurs à la fois la simulation de processus et la simulation de l'appareil. Ce logiciel est développé par SILVACO.

### 3.3 Les recherches des cellules solaires à boîtes quantiques :

Au cours de l'année 2007, après avoir comparé 10 couches, 20-couche et 40-couche de boîtes quantiques cellules, Marti et al ont trouvé le nombre de boîtes quantiques les couches qui joue un rôle important dans la cellule photovoltaïque.[31]



**Figure 3.1.** Courbe de  $I(V)$  pour différentes couches de InAs. [31]

Comme la montre la Figure 3.1, pour InAs 10 couche à boîtes quantiques (arséniure d'indium), le courant de court-circuit est plus élevé. Toutefois, lorsque le nombre de couches augmente, le courant de court-circuit diminue. Ce résultat indique que le courant de court-circuit n'augmente pas toujours avec plus de couches de boîtes quantiques. Dans la même année, RB Laghumavarapu et al GaP ont inséré (Phosphate de gallium) 3 couches de boîtes quantiques en InAs / GaAs. [32]. Les résultats sont présentés ci-dessous dans le Tableau 3.1.

### Chapitre 3 : Modélisation de cellule photovoltaïque InAsN/GaAs à boîtes quantique

Echantillon	Voc(V)	Jsc(mA/cm <sup>3</sup> )	FF(%)
Contrôle de cellule	0.96	13.6	81.6
2 ML SC	0.73	9.9	73.1
4ML SC	0.72	9.8	73.5
2 ML SC	0.69	11.2	73.2
Pas de SC	0.42	8.3	62.5

**Tableau 3.1.** Cellule photovoltaïque à boîtes quantiques avec différentes couches de compensation de contrainte. [32]

## 3.4 Description de la cellule photovoltaïque p-i-n :

### 3.4.1 Théorie de la cellule photovoltaïque p-i-n :

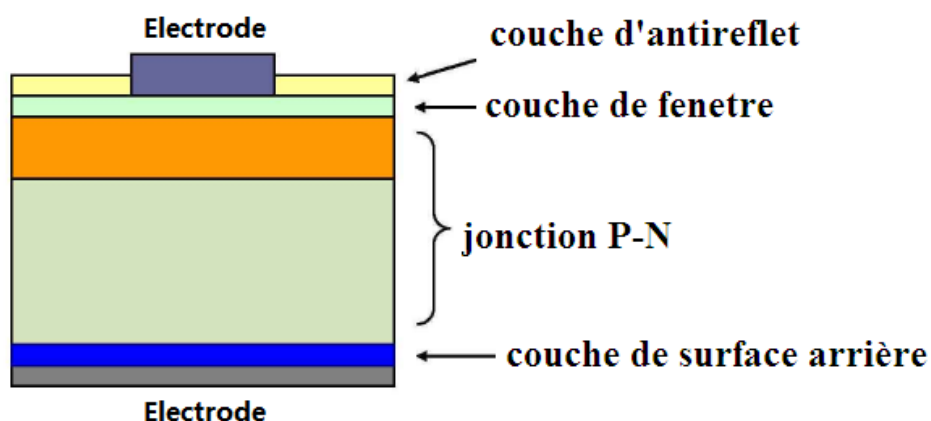
La théorie la plus essentielle de la cellule solaire est l'effet photovoltaïque de jonction PN, ce qui signifie que la tension est produite par l'éclairage. Dans l'année de 1839, Becquerel a commencé à trouver cet effet à partir de la jonction entre l'électrode et de l'électrolyte [46]. En 1954, la première cellule photovoltaïque de silicium a été construite, qui stipule la période à venir de cellules solaires à jonction PN. [33]

### 3.4.2 Champ électrique Intégré :

Lors de l'utilisation de semi-conducteur type p et de semi-conducteur type n en même temps, une jonction PN existera à l'interface. Dans la région de la jonction pn, la concentration en électrons de type n est supérieure à celle de type p. Par conséquent, les électrons de la région de type n se diffusent à la région de type p. Même raison que celle des électrons, les trous de région type p diffuseront à la région de type n. Après la diffusion des électrons et des trous, il y a des charges positives d'ionisation laissées à la région de type n et d'ionisation charges négatives laissées à la région de type p. Ces frais autour de la jonction PN sont appelés charge d'espace, et donc la région est appelée région de charge d'espace. [34]

### 3.4.3 Structure de la cellule photovoltaïque standard :

La structure de clé d'une cellule solaire GaAs est une jonction PN, comme le montre la Figure 3.2. Ensuite, d'autres couches sont déposées autour de la jonction PN, telle que la couche de fenêtre, la couche antireflet, la couche arrière de surface, et des électrodes métalliques.



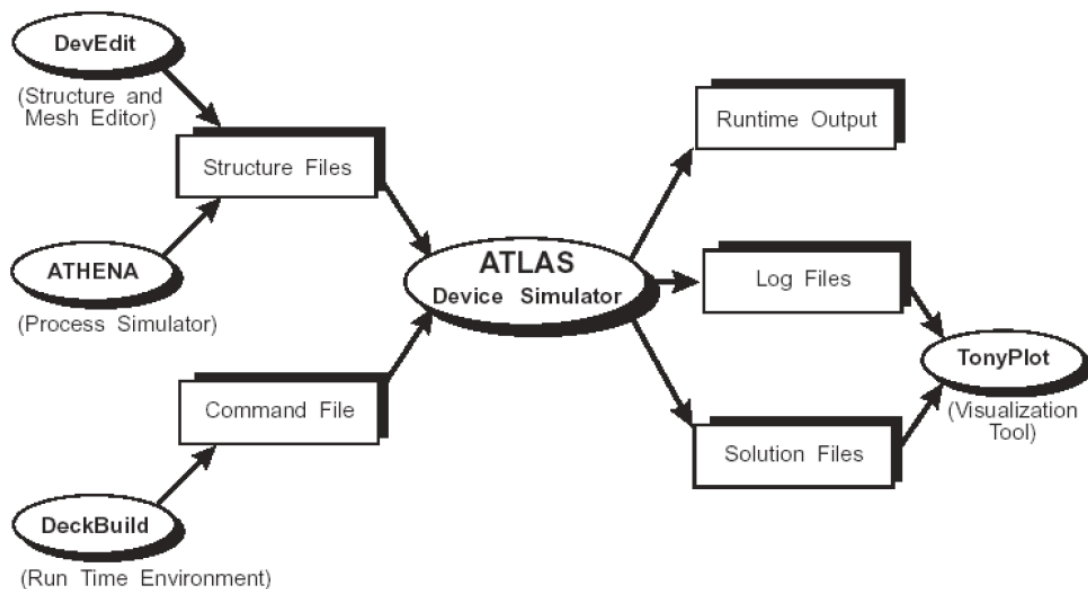
**Figure 3.2.** Structure d'une cellule photovoltaïque GaAs

La jonction PN est utilisée pour mettre en place le haut-champ électrique et l'espace zone de charge, qui sont les facteurs clés pour aider les porteurs photo-générés à l'écart et de produire de l'électricité. Les photons se propagent avec décroissance exponentielle dans les semi-conducteurs. En outre, la plupart des porteurs photo-générés, qui sont utiles pour le courant de photon, sont situés dans la région de diffusion et la région de dérive. Ainsi, la jonction PN devrait être proche de la surface supérieure de la cellule solaire. Par conséquent, la structure de jonction PN est généralement conçue pour avoir une couche supérieure plus épaisse et une plus mince couche inférieure, comme représenté sur la Figure 3.2. En outre, puisque la mobilité des trous est nettement plus faible que la mobilité des électrons, la partie supérieure plus mince est généralement réalisée sous la forme de type p et la région latérale inférieure plus épaisse est généralement réalisée sous la région de type n. En conséquence, les trous avec une faible mobilité auront une plus courte distance de dérive, et des électrons à haute mobilité auront plus à la dérive loin.



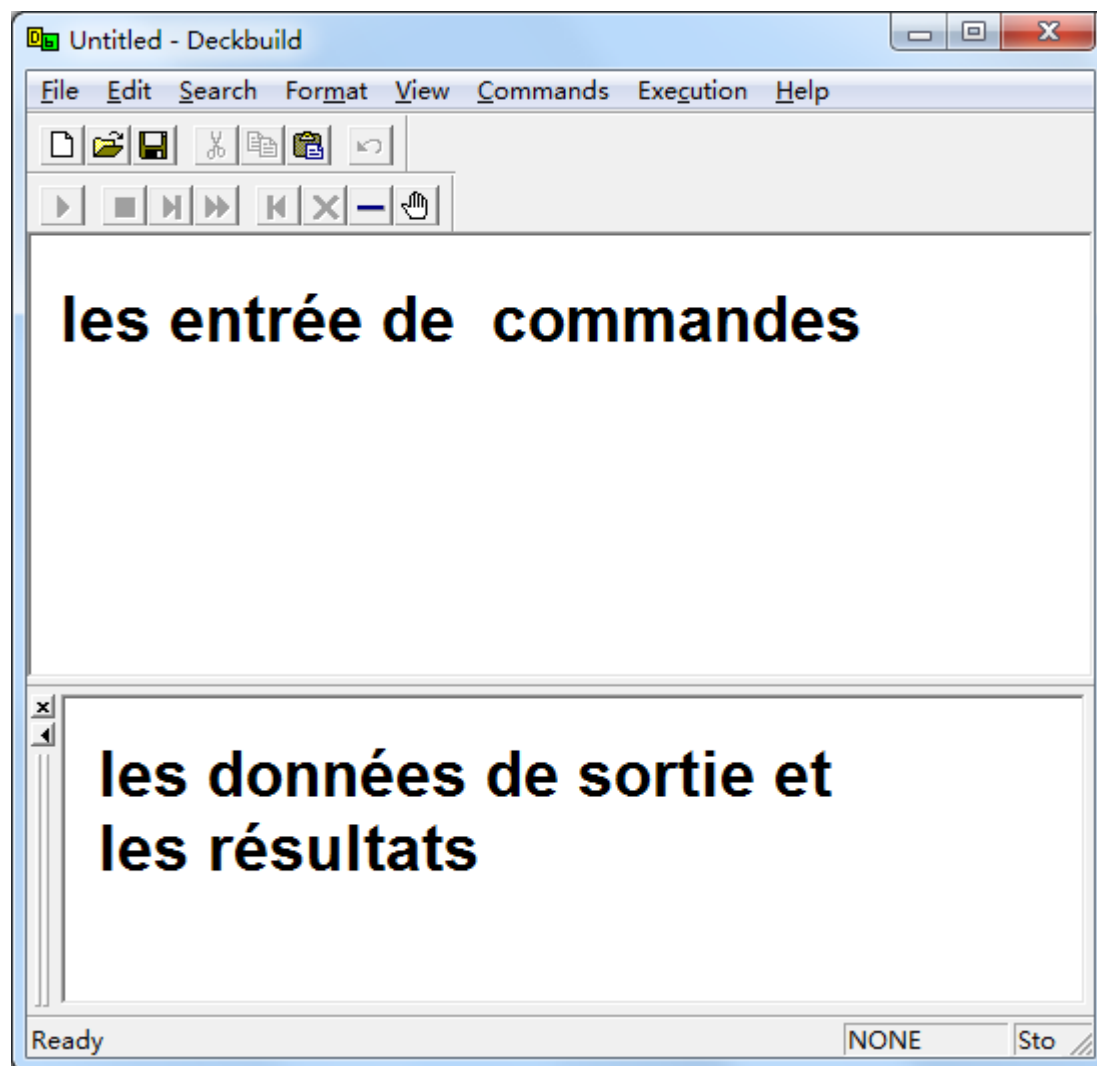
### Chapitre 3 : Modélisation de cellule photovoltaïque InAsN/GaAs à boîtes quantique

La couche de fenêtre est principalement utilisée pour réduire la recombinaison de surface avant. Pour les matériaux qui peuvent être choisis comme couche de fenêtre, il existe plusieurs exigences. Premièrement, il devrait avoir une meilleure transmission, et la plupart de la lumière ne doit pas être absorbé par cette couche. Ainsi, les matériaux semi-conducteurs ayant un intervalle de bande haute peuvent être utilisés comme couche de fenêtre. En outre, la couche doit être très mince pour réduire l'absorption de la lumière. D'autre part, pour un bon contact avec électrode métallique, la concentration de la couche de fenêtre doit être supérieure à la concentration de type p régions. La Figure 3.3 est le diagramme de bande d'énergie de la couche de fenêtre type p, qui peut aider à expliquer l'effet positif de la couche de fenêtre



**Figure 3.3.** Organigramme de Simulation de Silvaco TCAD [35]

Comme le montre la Figure III.3, Silvaco TCAD contient de nombreuses parties différentes, tels que des outils interactifs et DeckBuild, Tonyplot, Process Simulator ATHENA, ATLAS de simulateur de dispositif, la structure et maille éditeur DevEdit, et ainsi de suite. La Figure 3.3 décrit le diagramme de flux lors de la simulation grâce à Silvaco TCAD. Toutes ces pièces sont organisées conjointement par l'interface DeckBuild.



**Figure 3.4.** Interface d'outil de DeckBuild

La Figure 3.4 montre l'interface d'utilisateur graphique de Silvaco TCAD, qui est nommé DeckBuild. Dans la fenêtre supérieure de DeckBuild, l'utilisateur peut écrire la langue d'interface pour commander certaines actions et décrire comme la structure du dispositif, modèle de calcul physique, paramètres de sortie et ainsi de suite. Après la simulation et le calcul, les résultats et les données de sortie seront affichés dans la fenêtre inférieure de DeckBuild.

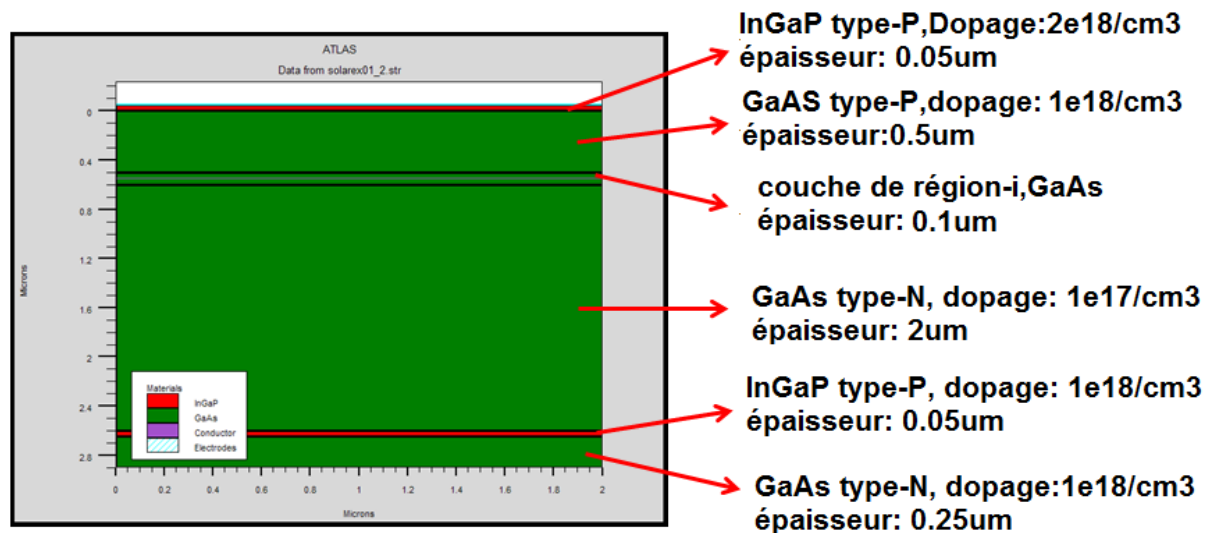
De la Figure 3.3, nous pouvons voir que le simulateur de dispositif ATLAS est la partie centrale d'un logiciel TCAD Silvaco. Il permet de simuler de nombreuses caractéristiques d'un dispositif semi-conducteur complètement, y compris comportement électrique, comportement optique, comportement thermique, et ainsi de suite. ATLAS fournit une plate-forme facile à utiliser, modulaire et extensible, qui

est basé sur la physique. En outre, ATLAS offre un grand nombre de modèles de calcul physiques pour les utilisateurs de choisir. [37]

### 3.5 Structure de la cellule photovoltaïque p-i-n :

Notre objectif dans cette thèse est de construire le modèle des simulations en utilisant Silvaco TCAD pour les cellules solaires et essayer de comparer les simulations avec des données de mesure réelles. Ainsi, nous avons utilisé les données et la mesure dans la recherche du Dr Bailey [38, 39].

La structure de cellule solaire provient une puce réelle de cellule solaire [38, 39], qui contient des données de mesure provenant d'expériences. La Structure que nous avons construit à simuler que dans la mesure [38, 39]. K



**Figure 3.5.** Structure de la norme p-i-n de cellule photovoltaïque

Comme le montre la Figure 3.5, le modèle utilisé dans cette simulation est une cellule photovoltaïque, qui a six couches au total. Deux couches rouges dans la Figure III.5 sont faites de InGaP, qui sont appelés couche de fenêtre et une couche de surface arrière, respectivement. Ils sont utilisés pour réduire la recombinaison de surface en haut et en bas de la cellule [39], et pour bloquer les porteurs minoritaires. Les quatre autres couches vertes sont faites de GaAs, qui sont des régions de type p émetteur, une région intrinsèque, la région de base de type n, de type n de la couche épitaxiale semences, respectivement [38, 39].

### **3.6 Modélisation de cellule photovoltaïque standard GaAs dans Silvaco TCAD :**

Comme décrit dans la figure 3.3, ATLAS est un sous-système important Silvaco TCAD dans la modélisation et la simulation. Il contient cinq groupes de déclarations, qui couvrent un ensemble complet de mesures dans le processus de simulation. Par conséquent, dans cette recherche de thèse, ATLAS est le simulateur clé que nous avons utilisé pour remplir nos tâches de simulation. Dans cette section, l'ensemble du processus de modélisation de la cellule solaire standard GaAs par ATLAS sera décrite.

#### **3.6.1 Les résultats de simulation la cellule photovoltaïque p-i-n :**

Après avoir terminé l'ensemble de la modélisation et la simulation des étapes dans ATLAS Silvaco TCAD, nous avons tous les résultats et les données dont nous avons besoin.

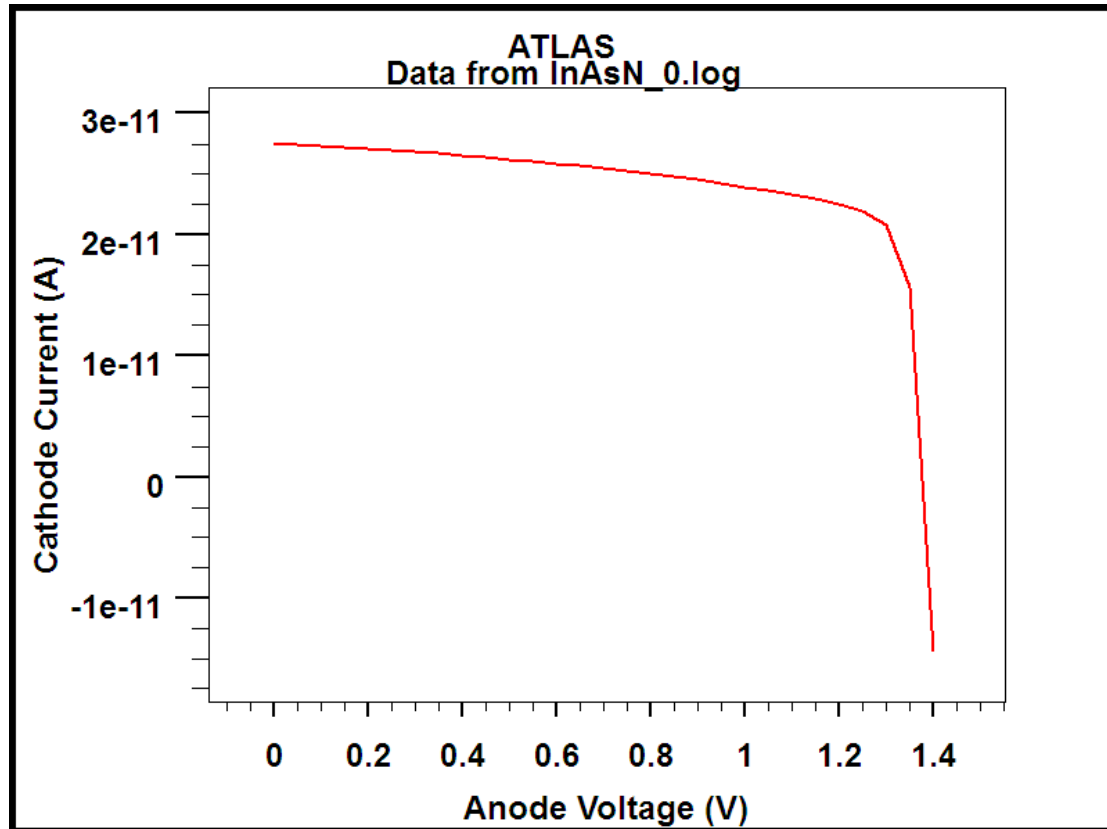
Le Tableau 3.2 montre les résultats de simulation de la cellule photovoltaïque p-i-n, qui contient de courant de court-circuit  $J_{sc}$ , tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ , facteur de remplissage FF, et l'efficacité de conversion. Ils sont les paramètres les plus importants pour définir des cellules photovoltaïques. Et nous allons comparer ces résultats avec les résultats d'une cellule à boîtes quantiques.

Jsc (mA/cm2)	Voc (v)	FF (%)	Eff (%)
27.5138	1.73602	72.3902	27.4068

**Tableau 3.2.** Résultats de simulation d'une cellule photovoltaïque

Après avoir simulé la structure d'une cellule photovoltaïque p-i-n sur ATLAS Silvaco nous avons obtenons une caractéristique présenté dans la figure suivant

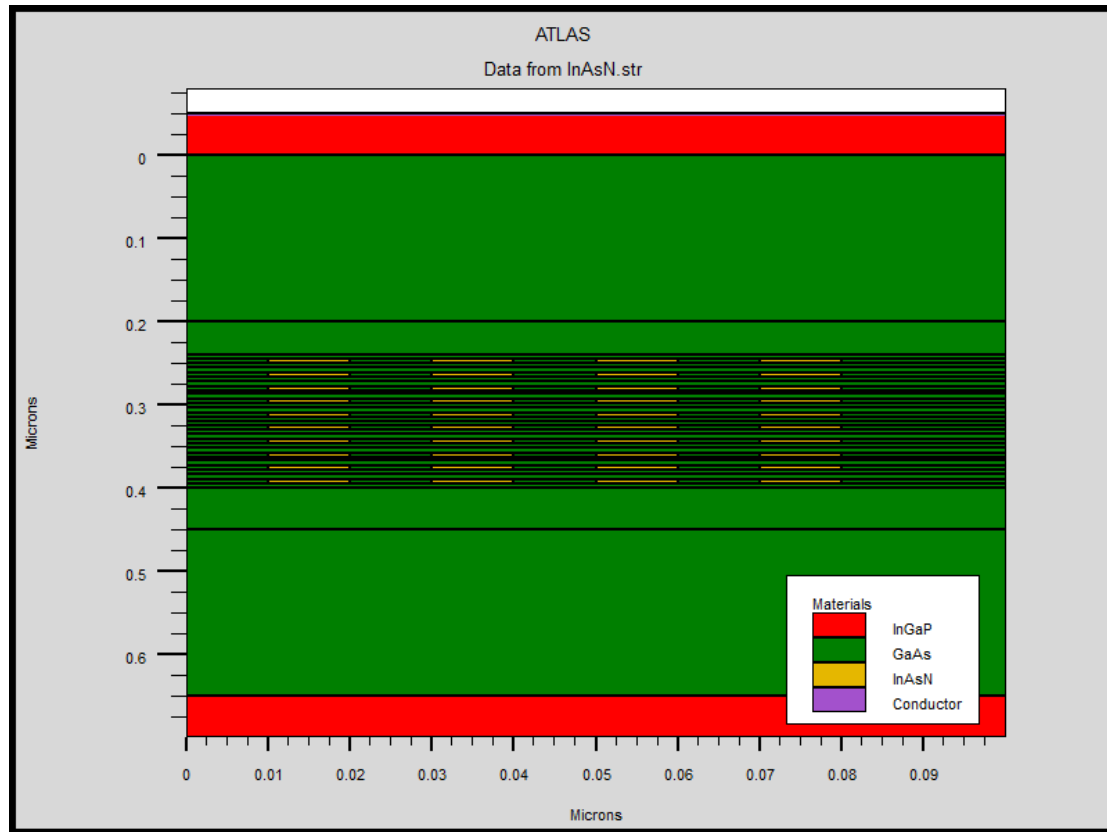
Qui représente le I(V).



**Figure 3.6.** La courbe de la cellule photovoltaïque p-i-n.

### **3.7. Modélisation de cellule photovoltaïque InAsN/GaAs TCAD à boîtes quantique dans Silvaco TCAD :**

Il existe six couches dans la structure en Figure 3.7. Ils ont tous les mêmes dimensions que les matériaux, et la structure qui est utilisée dans les simulations de cellules photovoltaïque sans boîtes, à l'exception de la région intrinsèque. Après l'insertion, les boîtes quantiques, la taille de la région intrinsèque a été modifiée et dépend du nombre de couches de points quantiques, comme le montre la Figure 3.7.



**Figure 3.7.** Structure de InAsN / GaAs d'une cellule photovoltaïques à boîtes quantiques avec 10 couches crée dans la région intrinsèque

### 3.7.1 Les résultats de simulation pour X=3, 16 et 20 :

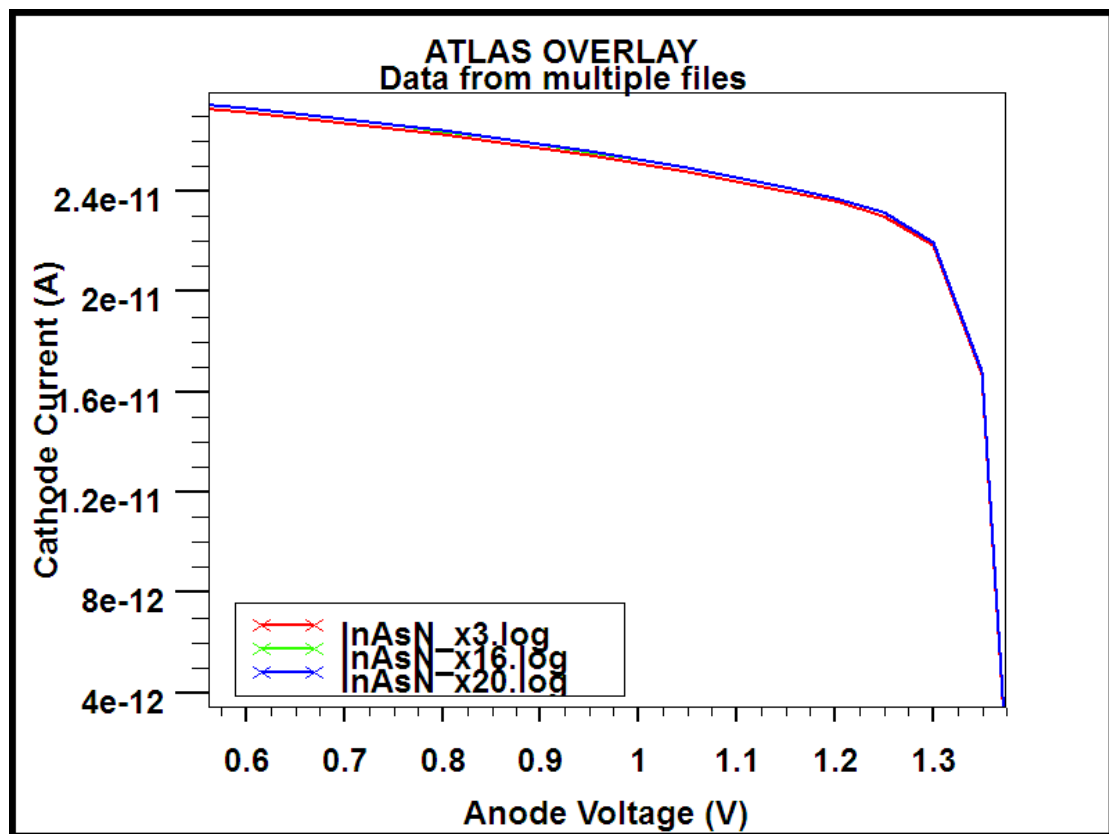
Dans cette section, les résultats de la simulation de la cellule photovoltaïques à boîtes quantiques de InAsN/ GaAs seront présentés. Tout d'abord, tous les paramètres importants de cellules solaires, tels que le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, le facteur de remplissage et l'efficacité de conversion, sont comparées entre les données de mesure de la structure sans boîtes et les résultats des simulations.

Le Tableau 3.3 montre les résultats de simulation de cellules photovoltaïques pour différents x, pour X=3, X=16 et X=20. On remarque que chaque fois de augmenter 'X' les paramètres de la cellule change, et on trouve que la valeur optimale est quand X=20

	Jsc(mA/cm2)	Voc(v)	FF(%)	Efficacité(%)
X=3%	29.0822	1.37788	72.2481	28.530
X=16%	28.6898	1.37742	72.2834	28.56649
X=20%	29.0822	1.37788	72.22481	28.9511

**Tableau 3.3.** Résultats de simulation d'une cellule photovoltaïque pour X=3,16 et 20

La figure 3.8 montre les courbes de I(V) de cellule Photovoltaïque à 10 boîtes quantique, qui sont tracée à partir des résultats de simulation. On remarque que la que courant de court-circuit ainsi la tension de circuit ouverte augmente. Alors la courbe de X=20 est la optimale par rapport à X=16 et X=3.



**Figure 3.8.** Courbes de comparaison de I(V) pour 10 boîtes avec X=3%, X=16% et X=20%

### 3.7.2 Les résultats de simulation pour 10, 20, 30 et 40 boîtes

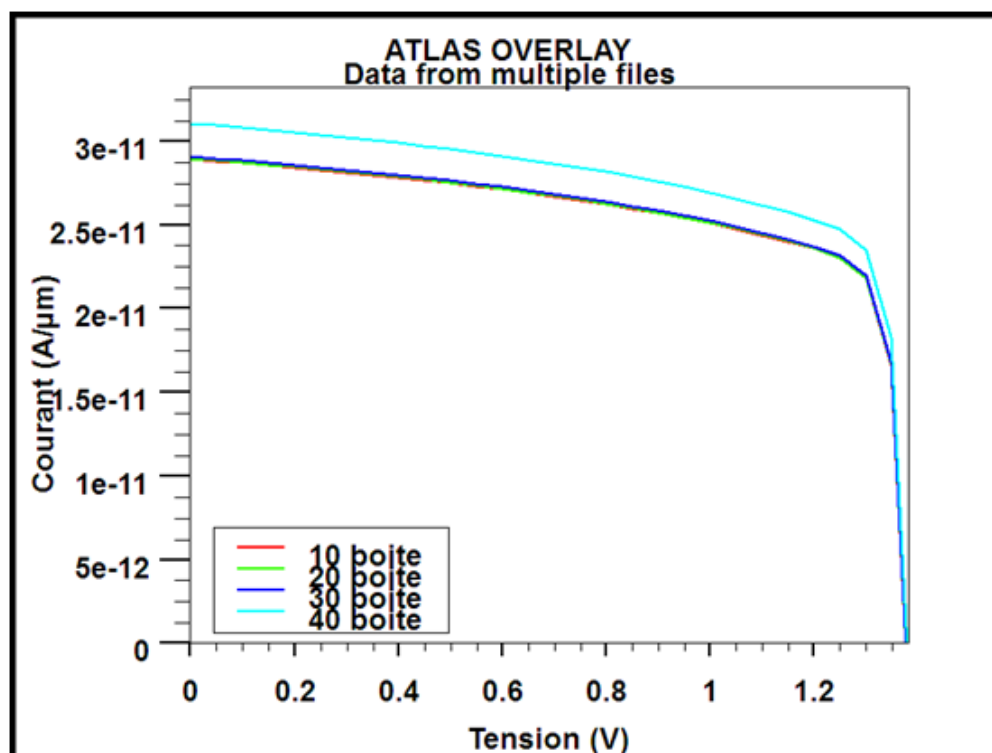
#### a) Effet de l'insertion des boîtes sur I(V) :

Le tableau suivant présente les paramètres de 4 structures à boîtes quantiques

	Jsc(mA/cm <sup>3</sup> )	Voc(V)	FF(%)	Eff(%)
10 boîtes	28.653	1.37737	72.269	28.5286
20 boîtes	29.3497	1.3782	72.2237	29.2143
30 boîtes	29.7172	1.37887	72.1721	29.7724
40 boîtes	31.0434	1.3802	72.0705	30.8794

**Tableau 3.4.** Résultats de simulation d'une cellule photovoltaïque pour 10, 20, 30 et 40 boîtes

D'après le tableau 3.4, lorsqu'on compare les résultats de la simulation on remarque qu'à chaque fois qu'on augmente les boîtes quantiques le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, le facteur de remplissage et l'efficacité, augmentent à chaque fois. Et si on compare avec les résultats de la structure p-i-n on remarque que le rendement augmente de 3%.

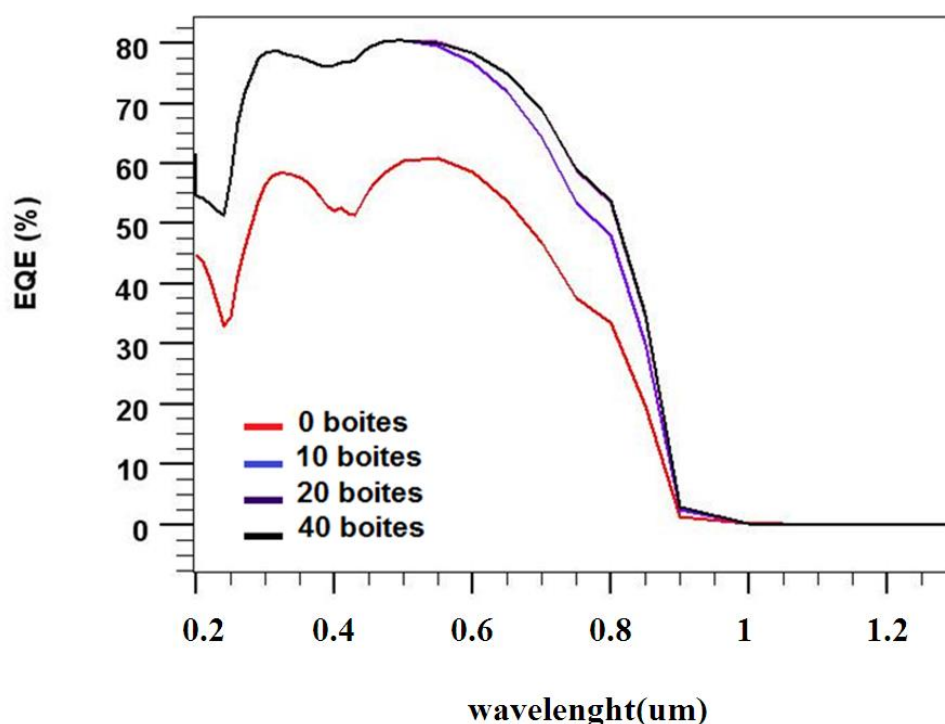


**Figure 3.9.** Courbes de comparaison de I(V) pour 10, 20, 30 et 40 boîtes



Comment la montre la figure 3.9, On voit clairement que le courant de court circuit ainsi la tension de circuit ouvert de la structure p-i-n augmente par l'insertion des boîtes quantiques grâce à l'absorption des paires électrons- trous supplémentaires photo générés. Une augmentation relative est obtenue si en comparant la structure à boîtes quantiques avec une structure sans boîtes.

b) effet de l'insertion des boîtes sur EQE :



**Figure 3.10.** Courbes de EQE tracées pour 0, 10, 20, et 40 boîtes

L'effet le plus important de boîtes quantiques est l'aide l'absorption des photons de moins énergies (de longues longueurs d'ondes) par la cellule photovoltaïque. L'énergie maximale absorbée par une cellule solaire pin à base de GaAs est 1.42 eV.

En effet dans cette étape on démontre l'évolution de EQE (le rendement quantique externe) avec l'augmentation du nombre de couches de boîtes comme nous le schématiser sur la figure 3.10. A partir de ce schéma on peut constater que 40 couches de boîte quantique nous donne un meilleur Rendement Quantique Externe donc 40 couches si la valeur optimal.

### **3.8 Conclusion :**

La cellule photovoltaïque GaAs est une cellule photovoltaïque typique qui a le potentiel pour atteindre une efficacité de conversion élevée. Avec l'aide de boîtes quantiques insérées, l'étude est basée sur la comparaison de plusieurs cellules photovoltaïques à boîtes quantiques pour la détermination de caractéristique  $I(V)$  le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, le facteur de remplissage et l'efficacité de conversion.

## **Conclusion générale et perspectives**

## Conclusion Générale et perspectives

---

### **Conclusion générale et perspectives :**

Dans ce travail, nous avons étudié la structure d'une cellule photovoltaïque, où les boîtes quantiques sont insérées à l'intérieur de la région intrinsèque. Cette structure provient d'une cellule photovoltaïque fabriquée réel. Silvaco TCAD Software est choisi comme simulateur pour faire le travail de modélisation et de simulation. Après la programmation et le renforcement bibliothèque complète de données de paramètres matériels, modèles avec des paramètres différents sont construits et simulés. Après analyse et la discussion des résultats de simulations, nous avons atteint plusieurs réalisations comme indiqué ci-dessous.

Dans un premier temps, nous avons présenté des notions sur l'alliage InAsN contraint sur substrat GaAs.

Dans le seconde chapitre nous avons présenté une étude sur l'énergie photovoltaïque et les enjeux de développements actuels du photovoltaïque. Nous avons ensuite présenté le fonctionnement d'une cellule en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque. Nous avons vu que la cellule présente une caractéristique  $I(v)$  non linéaire, Nous avons présenté des différents paramètres extérieurs sur cette caractéristique. Le courant de court-circuit évolue principalement avec l'éclairement et la tension à vide. Nous avons présenté les différentes technologies de cellules actuellement sur le marché. Nous avons aussi donné des notions sur les différentes filières de silicium.

Dans le troisième chapitre nous avons fait une simulation d'une cellule photovoltaïque GaAs sans point quantique, et nous avons obtenu des résultats et tous les paramètres importants pour une cellule photovoltaïque, comme courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, le facteur de remplissage et l'efficacité de conversion, et la caractéristique  $I(V)$ .

Deuxièmement, nous avons inséré des boîtes quantiques dans la région intrinsèque de cellule. Tous les résultats de ces trois modèles sont d'abord comparées avec les résultats de broches standard cellule solaire pour observer la tendance du changement, puis comparées avec les données de mesure de contrôler et de vérifier l'exactitude des simulations. À partir des résultats de simulation, nous pouvons découvrir que courant le court-circuit augmente et la tension en circuit ouvert reste

## Conclusion Générale et perspectives

---

presque le même  $\eta$ . Et en conséquence, les boîtes quantiques améliorent le rendement de conversion par rapport à la cellule photovoltaïque sans boîtes quantiques.

En un mot, que tous discuté ci-dessus, tous les résultats de la simulation dans cette thèse de recherche ont montré l'authenticité et l'exactitude. Lorsque l'on compare avec les données de mesure, ils sont très proches de ces résultats d'expériences. Par conséquent, cette thèse recherche permet de construire des modèles correctes, complètes et communes pour les deux GaAs cellule photovoltaïques et les boîtes quantiques, qui peut être utile pour la recherche future. Les résultats présentés dans cette thèse fournissent des données précieuses et de simulation valides, qui peuvent être utilisés comme base et le fondement pour les futures recherches et la fabrication des boîtes quantiques pour les cellules photovoltaïques.

## **Références et bibliographiques**

### Références et bibliographiques :

- [1] Alonso corine « contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Univercité Paul Sabatier Toulouse III, 2003
- [2] Angel Cid Pastor « conception et réalisation de modules photovoltaïque électroniques ». These de doctor. Institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2006
- [3] Cabal. Cédric « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008
- [4] Zhuang. Q, Godenir. A and Krier. A, "Photoluminescence in InAsN epilayers grown by molecular beam epitaxy" Journal of Applied Physics D, 41, 132002 (2008)
- [5] Egorov A. Yu, Zhukov, A. E, Kovsh, A. R, Ustinov, V. M, Mamutin, V. V, Ivanov, S. V, Zhmerik, V. N, Tsatsul'nikov, A. F, Bedarev, D. A and Kop'ev, P. S "GaAsN/GaAs and InGaAsN/GaAs Heterostructures grown by molecular beam epitaxy" Technical Physics Letters 24, 942 (1998)
- [6] Schmidtling, T, Klien, M, Pohl, U. W "Metal organic vapour phase epitaxy of GaAsN/GaAs multiple quantum wells using tertiarybutylhydrazone" MRS internet journal of nitride semiconductor research, 5 W3.43 (2000)
- [7] Choquette, K.D.; Klem, J.F.; Fischer, A.J.; Blum, O.; Allerman, A.A.; Fritz, I.J.; Kurtz, S.R.; Breiland, W.G.; Sieg, R.; Geib, K.M.; Scott, J.W.; Naone, R.L. "Room temperature continuous wave InGaAsN quantum well vertical-cavity lasers emitting at 1.3  $\mu\text{m}$ " Electronic Letters, 36, 1388 (2000)
- [8] Sato, S.; Nishiyama, N.; Miyamoto, T.; Takahashi, T.; Jikutani, N.; Arai, M.; Matsutani, A.; Koyama, F.; Iga, K. "Continuous wave operation of 1.26  $\mu\text{m}$  GaInNAs/GaAs vertical-cavity surface-emitting lasers grown by metalorganic chemical vapour deposition" electronic letter, 36, 2018 (2000)
- [9] Kitatani T, Nakahara K, Kondow M, Uomi K, and Tanaka T "A 1.3- $\mu\text{m}$  GaInNAs/GaAs Single-Quantum-Well Laser Diode with a High Characteristic Temperature over 200 K" Japanese Journal of Applied Physics, 39, L86 (2000)

## Références et bibliographiques

---

- [10] Borchert, B.; Egorov, A.Y.; Illek, S.; Komanda, M.; Riechert, H. "1.29  $\mu\text{m}$  GaInNAs multiple quantum-well ridge waveguide laser diodes with improved performance" *Electronic Letters*, 35, 2204 (1999)
- [11] Zhuang, Q.; Godenir, A. M. R.; Krier, A.; Lai, K. T.; Haywood, S. K. "Room temperature photoluminescence at 4.5  $\mu\text{m}$  from InAsN" *Journal of Applied Physics*, 103, 063520 (2008)
- [12] Lin, H. H, Shih, D. K., Lin, Y. H, Chiang, K. H." InAsN/DnGaAs/nP Quantum Well Structures for Mid-Infrared Diode Lasers" *IEEE Leos Annual Meeting Conference Proceedings*, 1 & 2, 806 (2003)
- [13] Wang, Jyh-Shyang; Lin, Hao-Hsiung; Song, Li-Wei; Chen, Guan-Ru "Growth of InAsN/InGaAs(P) quantum wells on InP by gas source molecular beam epitaxy" *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 19, 202 (2001)
- [14] Jang. Y. D, Yim. J. S, LEE. U. H, Lee. D, Jang. J. W, Park. K. H, Jeong. W. G,
- [15] Renard, C., "Hétérostructures Antimoniures/Arséniures pour les Applications Optoélectroniques dans le Moyen Infrarouge ", université paris VII, (30 septembre 2005).
- [16] Bethoux, J.-M., "Relaxation des Contraintes dans les Hétérostructures Epaissees (Al,Ga)n : une Piste Originale pour la Réalisation de Diodes Electroluminescentes à Cavité Résonante", Université de Nice Sophia-Antipolis, (24 September 2004). Lee. J. H, Oh. D. K "InAsN/GaAs quantum dots with an intense and narrow photoluminescence peak at 1.3  $\mu\text{m}$ " *Physica E*, 17, 127 (2003.)
- [17] K.W.FORD, <<Studies on the more efficient use of energy >>. Editor APS New York (1975)
- [18] D.M. CHAPIN, C.S. Fuller et G.L. Pearson, *Journal of Applied Physics* Vol.25 (1954), p.676  
p. 33-42
- [19] le baromètre du photovoltaïque. *Systèmes solaires* n°154, (2003), pp. 41-52.
- [20] PETIBON.S: << Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2009.
- [21] PLATZ, R.; VAUCHER, N.P.; FISCHER, D.; MEIER, J.; SHAH, A.; << Improved micromorph tandem cell performance through enhanced top cell currents >>,



## Références et bibliographiques

---

Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE, 29 Sept.-3 Oct. 1997, pp.691 – 694

[22] GOYA, S.; NAKANO, Y.; YAMASHITA, N.; MORITA, S.; YONEKURA, Y.; <<Development of amorphous silicon/microcrystalline silicon tandem solar cells >>, Photovoltaic Energy Conversion, 2003.

Proceedings of third World Conference on, Volume 2, 12-16 May 2003 pp.:1570 - 1573  
Vol.2

[23] HAHN, G.; SEREN, S.; KAES, M.; SCHONECKER, A.; KALEJS, J.P.; DUBE, C.; GRENKO, C.; BELOUET, C. <<Review on Ribbon Silicon Techniques for Cost Reduction in PV Photovoltaic Energy Conversion>>, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Volume 1, May 2006 PP.972 – 975 Digital Object Identifier 10.1109

[24] CLAVERIE.A, <<Etat de l'art mondial de la technique photovoltaïque et politique de promotion >>. Séminaire sur l'Électricité Photovoltaïque, Nice, 1994, p.13

[25] MATHIEU.H, <<Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques >>. Paris : Ed.Masson, 1990, p.458-473

[26] ORGERET.M, <<Les piles solaires, le composant et ses applications >>. Paris: Ed. Masson, 1985, p.247

[27] GREEN.M.A. <<Solar cell >>, Ed, University of New South Wales, 1992, p.336

[28] C. J. BRABEC, N. SEDAR SARICIFTCI, J. C. HUMMELEN, Adv. Funct. Mater. 11, 15 (2001)

[29] A. GOETZBERGER, C.HEBLING, Hans-Werner Schock, Materials Science and Engineering R, 40, 1 (2003)

[30](Virtual Wafer Fab) Manuel for from SILVACO International, version 5.14.0.R  
, Inc. ATLAS User's Manual. March 20, 2012

[31]A.Marti, N.Lopez, E.Antolin, et al, "Emitter degradation in quantum dot intermediate band solar cells," Applied Physics Letters, 2007.90(23):233510

[32]R.B.Laghurnavarapu, M.El-Emawy, N.Nuntawong, et al, "Improved device performance of InAs/GaAs quantum dot solar cells with GaP strain compensation layers," Applied Physics Letters, 2007.91(24):243115

[33]Rupo Xiao, Xinnan Yang, "The first practical silicon solar cell by Bell Laboratory," Modern Physics Knowledge, No.2 2013

## Références et bibliographiques

---

- [34]Enke Liu, Bingsheng Zhu, Jinsheng Luo, "Semiconductor Physics," Beijing: National Defence Industry Press, 2007:148-150
- [35]SILVACO,Inc. ATLAS User's Manual. March 20, 2012
- [36] M<sup>me</sup> DIB Wassila Née KAZI-TANI, "Modélisation des structures photovoltaïques : aspects fondamentaux et appliques Thèse de doctorat, Université Abou bekr belkïd de tlemcen. 2010
- [37]Hua Shao, "Learning materials of semiconductor simluation tool Silvaco TCAD," 2009
- [38]C.Bailey, S.Polly, R.Raffaelle, et al, "Open-circuit voltage improvement of InAs/GaAs quantum dot solar cells using reduced InAs coverage," IEEE Journal of Photovoltaics, Vol.2, No.3, July 2012, 269-275
- [39]C.Bailey, "Optical and mechanical characterization of InAs/GaAs quantum dot solar cells," a dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, Rochester Institute of Technology, January, 2012