

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electronique

Option : Microélectronique et hyperfréquences

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

*Thème*

**Caractéristique électrique d'une cellule  
solaire à hétérojonction a-Si: H/ $\mu$ c-Si**

Présenté par :

**Kahoul fouad**

Soutenu le : 05 Juin 2014

Devant le jury composé de :

M <sup>me</sup> Terghini warda	M.A.A	Président
M <sup>me</sup> Tobbeche souad	Pr.	Encadreur
Mr Boukerdine salaheddine	M.A.A	Examineur

**Année universitaire : 2013 / 2014**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electronique  
Option : Microélectronique et hyperfréquences

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

*Thème*

Caractéristique électrique d'une cellule solaire  
à hétérojonction a-Si: H / $\mu$ c-Si

Présenté par :

*Kahoul Fouad*

Avis favorable de l'encadreur :

*Tobbeche souad*

*Singature*

**Avis favorable du Président du Jury**

**Terghini warda**

**Cachet et signature**



## *Thème :*

# Caractéristique électrique d'une cellule solaire à hétérojonction a-Si: H / $\mu$ c-Si

Proposé par : Kahoul Fouad

Dirigé par : Pr.Tobbeche Souad

## Résumé

Dans ce travail, nous avons essayé d'améliorer le rendement des cellules solaires à base de silicium amorphe hydrogéné. Il consiste à l'utilisation des hétérojonctions a-Si: H/ $\mu$ c-Si: H appliquée sur une cellule solaire en a-Si: H de structure PIN. Notre étude est effectuée par simulation numérique à l'aide du logiciel Tcad Silvaco. Les caractéristiques électriques de la cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné trouvés sous un éclairage AM1.5 sont telles que la densité de courant de court-circuit  $J_{cc} = 11.54 \text{ mA/cm}^2$ , la tension de circuit ouvert  $V_{co} = 0.87 \text{ V}$ , la puissance maximale  $P_m = 7.22 \text{ mW/cm}^2$ , le facteur de forme  $FF=71.84\%$ , et le rendement  $\eta = 7.22\%$ . La cellule à hétérojonction ayant pour structure : a-Si: H (P)/ $\mu$ c-Si: H (I)/ a-Si: H (N) a fourni une densité de courant de court-circuit  $J_{cc} = 24.03 \text{ mA/cm}^2$ , une tension de circuit ouvert  $V_{co} = 0.61 \text{ V}$ , une puissance maximale  $P_m = 11.19 \text{ mW/cm}^2$ , un facteur de forme  $FF=76.11\%$ , et un rendement  $\eta = 11.19\%$ . Le plus haut rendement atteint par l'étude de l'influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque en  $\mu$ c-Si :H est de 11.91% pour une épaisseur 0.7  $\mu\text{m}$ .

## ملخص

في هذا العمل، حاولنا تحسين مردود الخلايا الشمسية من نوع السيليسيوم المهدرج غير المبلور الذي يعتمد على استخدام تكنولوجيا ثنائية الوصلة للمواد a-Si: H/ $\mu$ c-Si: H المطبقة على البنية PIN. تمت دراستنا بواسطة البرنامج TCAD – Silvaco. الخصائص الكهربائية للخلايا الشمسية للسيليسيوم المهدرج غير المبلور تم حسابها تحت تأثير شعاع الاضاءة AM1.5 والمتمثلة في كثافة التيار للدائرة القصيرة و تقدر قيمتها 11.54 مل امبير/سم<sup>2</sup>، جهد الدارة المفتوحة يساوي 0.87 ف ومعامل الشكل بنسبة 71.84 % والمردود التحويلي للخلية الشمسية بنسبة 7.22 %.

بنية الخلية الشمسية ثنائية الوصلة للمواد a-Si: H/ $\mu$ c-Si: H كالتالي:

a-Si: H (P)/ $\mu$ c-Si: H (I)/ a-Si: H (N). الخصائص الكهروضوئية لهذه الخلية هي : كثافة التيار للدائرة القصيرة تقدر قيمتها 24.04 مل امبير/سم<sup>2</sup>، جهد الدارة المفتوحة يساوي 0.61 ف، ومعامل الشكل بنسبة 76.11 %، والمردود التحويلي بنسبة 11.19 %. المردود التحويلي الأعلى من خلال دراسة تأثير سمك الطبقة (I) للمادة  $\mu$ c-Si :H المحقق هو 11.91 % من أجل سمك يساوي 0.7 متر جزئي.



# Sommaire

## Sommaire

Dédicace .....	I
Remerciement .....	II
Liste des tableaux .....	III
Liste des figures .....	IV
Introduction générale .....	1
Référence bibliographique .....	4

## Chapitre 1

### Propriétés du silicium amorphe hydrogéné et du silicium microcristallin

1.1. Introduction .....	5
1.2. Silicium amorphe hydrogéné a-Si: H .....	5
1.2.1. Structure de silicium amorphe .....	6
1.2.2. Diagramme de bande .....	7
1.2.3. Densité d'états dans a-Si: H .....	9
1.2.4. Propriétés optiques de l'a-Si: H .....	10
1.2.5. Métastabilité du silicium amorphe .....	11
1.2.6. Technique de dépôt du silicium amorphe hydrogéné a-Si: H .....	11
1.2.7. Fonction de probabilité d'occupation .....	12
1.2.7.1. Fonction de probabilité d'occupation à l'équilibre thermodynamique .....	13
1.2.7.2. Fonction de probabilité d'occupation à l'état hors équilibre thermodynamique .....	13
1.2.8. Densité de charges dans les états localisés .....	14
1.2.8.1. Densité de porteurs piégés à l'équilibre thermodynamique .....	15
1.2.8.2. Densité des porteurs piégés hors l'équilibre thermodynamique .....	15
1.2.9. Recombinaison dans les états localisés .....	16
1.3. Silicium Microcristalline hydrogéné $\mu$ c-Si: H .....	16
1.3.1. Structure de silicium microcristallin .....	16

1.3.2. Propriétés de $\mu\text{c-Si: H}$ .....	17
1.4. Conclusion .....	18
Référence bibliographique .....	19

## Chapitre 2

### Notions générales sur la cellule solaire

1.1. Introduction .....	20
2.2. Spectre solaire .....	20
2.3. Paramètre du rayonnement solaire .....	21
2.4. Notions élémentaire de physique des solides ; les électrons dans la matière .....	24
2.5. Interaction rayonnement matière .....	25
2.6. Absorption du rayonnement dans le matériau .....	26
2.7. Structure de collecte des porteurs .....	27
2.8. Génération du photocourant .....	28
2.9. Organisation d'une cellule photovoltaïque .....	29
2.9.1. Couche d'interface avec l'extérieur .....	29
2.9.2. Couche antireflet .....	29
2.9.3. Contacts .....	30
2.9.3.1. Contact supérieur .....	31
2.9.3.2. Contact inférieur .....	31
2.10. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire .....	31
2.11. Caractéristique $I(V)$ et schéma équivalent d'une cellule solaire .....	33
2.11.1. Influence des résistances série et shunt sur la caractéristique (I-V) .....	35
2.11.2. Extraction de la puissance .....	36
2.11.2.1. Facteur de forme (FF) .....	37
2.11.2.2. Rendement de conversion .....	37
2.11.3. Réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque .....	37
2.12. Structure d'une cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné a-Si: H .....	38

2.13. principe de fonctionnement d'une cellule solaire de structure pin .....	39
2.14. Jonction pin .....	41
2.15. Cellule à jonction multiple .....	41
2.16. Conclusion .....	42
Référence bibliographique .....	43

### Chapitre 3

#### Logiciel TCAD-SILVACO

3.1. Introduction .....	44
3.2. Bases physiques du principe de fonctionnement du simulateur TCAD SILVACO	44
3.3. Modules de simulation ATLAS et ATHENA .....	45
3.3.1. Module ATLAS .....	45
3.3.2. Entrées et Sorties d'ATLAS .....	46
3.3.3. Module ATHENA .....	47
3.3.3.1. Outils interactifs d'ATHENA .....	48
• DECKBUILD .....	48
• TONYPLOT .....	48
3.3.3.2. Entrées et Sorties d'ATHENA .....	48
3.4. Logique de programmation .....	49
3.5. Etapes de simulation dans SILVACO .....	50
3.5.1. Spécification de la structure .....	50
• Maillage .....	50
• REGION .....	51
• ELECTRODE .....	52
• DOPING .....	53
3.5.2. Spécification des modèles de couches .....	53
• MATERIAL .....	53
• MODELS .....	54
• CONTACT .....	54
• INTERFACE .....	54

• BEAM .....	54
3.5.3. Sélection de la méthode numérique .....	55
• METHOD .....	55
• SOLVE .....	55
• LOAD .....	55
• SAVE .....	55
3.5.4. Analyse des résultats .....	55
• EXTRACT .....	55
• TONYPLOT .....	56
3.6. Conclusion .....	56
Référence bibliographique .....	57

## Chapitre 4

### Simulation numérique de la cellule solaire et résultats de simulation

4.1. Introduction .....	58
4.2. Cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné .....	58
4.2.1. Structure de la cellule en silicium amorphe hydrogéné .....	58
4.2.2. Distribution et Profil du dopage dans la structure .....	60
4.2.3. Diagramme de bandes de la cellule solaire en a-Si : H .....	61
4.2.4. Paramètres d'entrées de la cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné .....	62
4.2.5. Caractéristiques électriques de la cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné .....	64
4.2.5.1. Caractéristiques courant-tension et puissance-tension .....	65
4.2.6. Effet de l'épaisseur .....	66
4.2.6.1. Réponse spectrale .....	67
4.3. Cellule solaire à hétérojonction en a-Si : H/ $\mu$ c-Si : H .....	68
4.3.1. Structure de la cellule à hétérojonction .....	68
4.3.2. Diagramme de bande .....	70
4.3.3. Paramètres d'entrées de la cellule à hétérojonction a-Si : H/ $\mu$ c-Si : H .....	77

---

4.3.4. Caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction en a-Si : H/ $\mu$ c-Si : H .....	72
4.3.4.1. Caractéristiques courant-tension et puissance-tension .....	72
4.3.5. Effet de l'épaisseur de la couche en $\mu$ c-Si: H sur la cellule solaire à hétérojonction .....	74
4.3.6. Réponse spectrale .....	75
4.4. Comparaison entre cellules en a-Si : H et à hétérojonction a-Si : H/ $\mu$ c-Si : H .....	75
4.16. Conclusion .....	78
Référence bibliographique .....	79
Conclusion générale .....	80

## Dédicace

Je dédie ce mémoire à notre prophète

sidna

'mouhamed el karim',

et à mes parents Azzedine et Khadra, mes  
frères,

ma fiancé et tous qui s'appelle ou connaisse  
le nom Kahoul, khenchoul  
et Bey.

Je dédie aussi ce mémoire à tous mes amis.

kahoul fouad

## Remerciements

Je remercie Mon dieu le Grand-Puissant de m'avoir donné la patience, la volonté et le courage de mener à terme ce mémoire.

Je tiens spécialement à remercier Pr. Tobbeche d'avoir accepté mon encadrement, de son intérêt constant qui m'a guidé dans mon travail, et de ses conseils au cours de mon travail.

Je voudrais aussi adresser mes plus vifs remerciements à Dr. Bakhouche pour ses encouragements.

Enfin, j'adresse mes vives reconnaissances à tous les enseignants et le personnel du département de Génie-Électrique filière électronique et spécialement les enseignants de la spécialité microélectronique, sans oublier les étudiants de master électronique et électrotechnique.

Kahoul Fouad

# Liste des tableaux

---

**Liste des tableaux**
**Chapitre 4**

Tableau 4.1	Paramètres de la cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné .....	62
Tableau 4.2	Paramètre des défauts du silicium amorphe hydrogéné .....	63
Tableau 4.3	Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné .....	66
Tableau 4.4	Effet de l'épaisseur de la couche intrinsèque sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en a-Si: H .....	67
Tableau 4.5	Paramètres d'entrées de la cellule à hétérojonction a-Si : H/ $\mu$ c-Si : H .....	71
Tableau 4.6	Paramètres des défauts de la couche en $\mu$ c-Si: H .....	72
Tableau 4.7	Effet de la variation de l'épaisseur de la couche intrinsèque sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à hétérojonction .....	74
Tableau 4.8	Paramètres photovoltaïques de deux cellules solaires en a-Si : H et à hétérojonction a-Si: H/ $\mu$ c-Si: H .....	77

# Table des figures

## Liste des figures

### Chapitre 1

#### Propriétés du silicium amorphe hydrogéné et du silicium microcristallin

Figure 1.1	Arrangement tétraédrique de liaison dans le Si cristallin .....	7
Figure 1.2	Réseau d'a-Si: H montrant des liaisons brisées d'atome de silicium, qui sont passivés par les atomes d'hydrogène .....	7
Figure 1.3	Représentation schématique des densités d'états, (a) dans le cas d'un solide cristallin et (b) dans le cas d'un matériau amorphe .....	8
Figure 1.4	Exemple de densité d'états $N(E)$ dans le gap d'une couche de silicium amorphe hydrogéné non dopée .....	10
Figure 1.5	Les spectres d'absorption d'a-Si: H en comparaison avec le silicium cristallin c-Si et le silicium microcristallin $\mu\text{c-Si: H}$ .....	11
Figure 1.6	Schéma de dépôt PECVD dans une boîte à plasma d'un module à l'a-Si: H .....	12
Figure 1.7	Propriétés du silicium amorphe hydrogéné et du silicium microcristallin .....	17

### Chapitre 2

#### Notions générales sur la cellule solaire

Figure 2.1	Schéma descriptif d'Air Mass .....	21
Figure 2.2	Domaines du spectre électromagnétique .....	22
Figure 2.3	Spectre solaire AM 1.5 normalisé .....	23
Figure 2.4	Les bandes d'énergie dans un métal, isolant et semiconducteur .....	24
Figure 2.5	Absorption du rayonnement dans un matériau .....	26
Figure 2.6	Principe de collecte de porteur .....	27
Figure 2.7	Texturation des surfaces supérieure et inférieure d'une cellule photovoltaïque .....	30
Figure 2.8	Structure (à gauche) et diagramme de bande (à droite) d'une cellule photovoltaïque .....	32
Figure 2.9	Caractéristiques $I(V)$ à l'obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque .....	34
Figure 2.10	Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque .....	34
Figure 2.11	Influence de résistance série sur la caractéristique $I(V)$ .....	35

Figure 2.12	Influence de résistance shunt sur la caractéristique I(V) .....	36
Figure 2.13	Caractéristique I(V) d'une cellule solaire .....	36
Figure 2.14	Architecture d'une jonction p-i-n .....	39
Figure 2.15	Principe de fonctionnement d'une cellule solaire en silicium amorphe ou microcristallin .....	40
Figure 2.16	(a) la jonction p-n n'a pas de caractère redresseur dans le cas de a-Si :H,(b) la structure pin présente un effet redresseur .....	41
Figure.2.17	représente schématiquement la coupe de cellules à jonctions multiples : (a) même gap ; (b) gaps différents et substrat en verre ; (c) gaps différents et substrat en acier inox .....	42

### Chapitre 3

#### Logiciel TCAD-SILVACO

Figure 3.1	Composantes d'ATLAS .....	46
Figure 3.2	Entrées et sorties d'ATLAS .....	47
Figure 3.3	Environnement TONYPLOT .....	48
Figure 3.4	Entrées et les sorties d'ATHENA .....	49
Figure 3.5	Ordre des groupes de commandes fondamentales dans le logiciel ATLAS .....	50
Figure 3.6	Maillage d'une cellule solaire dans Atlas .....	51
Figure 3.7	Matériaux et les régions d'une cellule solaire amorphe .....	51
Figure 3.8	Electrodes d'une cellule solaire amorphe .....	52
Figure 3.9	Dopage d'une cellule solaire amorphe hydrogénée .....	53
Figure 3.10	Courbe I(V) d'une cellule solaire obtenue par TONYPLOT du logiciel ATLAS .....	56

### Chapitre 4

#### Simulation numérique de la cellule solaire et résultats de la simulation

Figure 4.1	(a) Structure complète de la cellule solaire en a-Si: H, (b) Structure près des couches PIN de la cellule solaire .....	59
Figure 4.2	(a) Distribution du dopage dans la cellule solaire en a-Si : H (b) Profile du dopage du silicium amorphe hydrogéné dans les zones PIN .....	60
Figure 4.3	Diagramme de bande de la cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné .....	61
Figure 4.4	Diagramme de la densité d'états de l'a-Si: H .....	64
Figure 4.5	Caractéristique J(V) de la cellule solaire en a-Si : H Figure 4.6 Rendement .....	65
Figure 4.6	Caractéristique P(V) de la cellule solaire en a-Si : H .....	66
Figure 4.7	Rendement quantique externe la cellule solaire en silicium amorphe .....	68

---

	hydrogéné .....	
Figure 4.8	(a) Structure générale de la cellule solaire à hétérojonction a-Si: H/ $\mu$ c-Si: H (b) Structure près des couches PIN de la cellule solaire à hétérojonction .....	69
Figure 4.9	Diagramme de bandes de la cellule solaire à hétérojonction en a-Si : H/ $\mu$ c-Si : H .....	70
Figure 4.10	Caractéristique J(V) de la cellule solaire à hétérojonction a-Si: H/ $\mu$ c-Si: H .....	73
Figure 4.11	Caractéristique P(V) de la cellule solaire à hétérojonction a-Si: H/ $\mu$ c-Si: H .....	73
Figure 4.12	Rendement quantique externe pour cellule à hétérojonction a-Si: H/ $\mu$ c-Si: H .....	75
Figure 4.13	Caractéristique J(V) de deux cellules solaires en a-Si : H et à hétérojonction a-Si: H/ $\mu$ c-Si: H .....	76
Figure 4.14	Caractéristiques P(V) de deux cellules solaires en a-Si : H et à hétérojonction a-Si: H/ $\mu$ c-Si: H .....	76
Figure 4.15	Rendement quantique externe des cellules solaires en a-Si : H et à hétérojonction a-Si: H/ $\mu$ c-Si: H .....	77

# Introduction générale

## Introduction générale

De nos jours, plus de 85 % de nos approvisionnements en énergie commerciaux sont produits à partir de la combustion des combustibles fossiles, c-à-d. charbon, pétrole et gaz naturels. La demande et la consommation croissantes des ressources énergétiques fossiles posent maintenant des problèmes économiques et écologiques graves. En raison de ça, la nouvelle source d'énergie " photovoltaïque" du soleil de la nature et l'ami de l'environnement a été considérée comme une technique prometteuse pour la future alimentation d'énergie [1].

Le terme "photovoltaïque" désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le principe photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905 [2].

Le silicium sous sa forme monocristalline et polycristalline sont de quelques cent fois plus épais qu'a-Si: H afin d'absorber, la même quantité de rayonnement solaire [3]. Les cellules solaires en silicium ont une épaisseur de l'ordre de 150–200  $\mu\text{m}$  [4]. La production de silicium cristallin consomme d'importantes quantités d'énergie à partir de la matière première, l'idée ou la solution trouvée est d'utiliser une technologie en couches minces.

Depuis la découverte des propriétés photovoltaïques du silicium amorphe hydrogéné a-Si: H à l'université de Dundee, en 1975, et après la réussite de son dopage en 1975 par Spear et al [5] a déclenché un intérêt énorme pour ce matériau, les scientifiques et les industriels du monde entier ont déployé une intense activité dans le domaine des couches minces, qu'a été exploitée depuis les années 1980, et plus particulièrement celle basée sur ce matériau, qui est caractérisé par un gap de mobilité de 1.7 eV [4].

Cet engouement subi était dû principalement au fait que ces couches ont un coefficient d'absorption de la lumière solaire de plusieurs ordres de grandeur supérieur à celui du silicium cristallin et le silicium microcristallin.

Ainsi, un module photovoltaïque en couches minces peut-il être réalisé en une couche 400 fois plus mince qu'une cellule photovoltaïque cristalline et avec une surface 40 fois plus grande. Il semble naturel d'en conclure que les coûts devraient être beaucoup plus faibles, la disponibilité des matériaux de base plus grande et le procédé de fabrication des modules plus simple et moins cher [6].

Ce genre de cellule qui est classé dans la deuxième génération, parmi les technologies en couches minces qui sont exploitées : le silicium en couche mince de silicium amorphe hydrogéné, et de silicium microcristallin ; et l'autre technologie comme le tellure de cadmium CdTe, et 'Copper Indium Gallium Selenide' CIGS.

Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) sur un substrat. L'épaisseur de la couche varie entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres. Ces technologies qui étaient initialement chères étaient réservées aux applications spatiales (en raison de leur poids par watt crête plus faible) et aux technologies de concentration. Avec l'augmentation des volumes de production, le prix de revient de ces technologies a baissé pour devenir compétitif avec les technologies cristallines de la première génération.

Ces technologies sont caractérisées par des efficacités de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique allant de 5 à 7% pour le silicium amorphe hydrogéné et jusqu'à 9% pour le silicium microcristallin (silicium en couche mince), et 5 à 11% (CdTe Tellure de cadmium) [2].

Le manuscrit de notre travail est formé par quatre chapitres en plus d'une introduction générale et d'une conclusion générale.

Le premier chapitre présentera les propriétés électroniques des deux matériaux en a-Si: H et  $\mu$ c-Si: H, à partir de la structure, le diagramme de bande et la densité des états du silicium amorphe hydrogéné, on donnera aussi la technique de dépôt de ce matériau.

Dans le deuxième chapitre, on va décrire et donner les notions générales relatives aux cellules solaires pour comprendre les phénomènes physiques impliqués en cellules solaires en a-Si: H et  $\mu$ c-Si: H. On donnera aussi les mécanismes de transport des porteurs de charge dans une cellule solaire à base d'une structure PIN. Nous déterminerons le principe de fonctionnement de ces cellules et surtout la jonction PIN ainsi que les caractéristiques électriques des cellules solaires en silicium amorphe hydrogéné.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons le logiciel Silvaco qui est utilisé pour la simulation de la cellule solaire, et qui permet la modélisation du comportement physique et électrique d'une cellule à hétérojonction en a-Si: H/ $\mu$ c-Si: H.

Dans le quatrième chapitre, nous commençons par l'étude par simulation numérique de la cellule amorphe puis la simulation de la cellule solaire à hétérojonction en a-Si :

H/ $\mu$ c-Si: H. Une comparaison des paramètres photovoltaïques de ces deux cellules sera aussi examinée dans ce chapitre.

Nous clôturons notre travail par une conclusion générale sur l'ensemble des résultats trouvés au cours de ce travail.

# Référence bibliographique

**Référence de l'introduction générale**

- [1] **Tobias Roschek**, "Microcrystalline Silicon Solar Cells Prepared by 13.56 MHz PECVD", thèse de doctorat Bundesrepublik Deutschland(2003).
- [2] [http://www.IF\\_ENERGIE\\_Mod3\\_Fonctionnement\\_technologies\\_PV\\_FR.pdf](http://www.IF_ENERGIE_Mod3_Fonctionnement_technologies_PV_FR.pdf).
- [3] **Bouguenna Ibrahim Farouk**, "Modélisation et Optimisation d'une Cellule Solaire Tandem a-Si:H/a-SiGe", thèse de magister, université d'Oran (2009).
- [4] **Christoph Ellert**; 'Technologie énergie Solaire', 2011031\_Electrosuisse\_Ellert.pdf.
- [5] W.E. Spear, P.G. Le Comber Solid State Com., 1193, 1975.
- [6] **Alain Ricaud**, " les cellules solaires en couche mince", technique de l'ingenieur (2009).

# Chapitre 1

## Propriétés du silicium amorphe hydrogéné et du silicium microcristallin

## 1.1. Introduction

Les premiers types de panneaux solaires développés en laboratoire utilisaient du silicium monocristallin (cristal de silicium pur). En laboratoire, une simple jonction p-n de silicium monocristallin suffit pour atteindre des efficacités de plus de 20%.

D'autres types de silicium ont été explorés, comme le silicium amorphe hydrogéné a-Si : H qui possède un gap de 1.7 eV et peut être produit par dépôt en couches minces. Le silicium microcristallin  $\mu\text{-Si: H}$  peut également être fabriqué par dépôt en couches minces. Ce type de silicium possède un gap égal à  $\sim 1.1$  eV, plus petit que celui du silicium amorphe. Il peut donc absorber une plus grande partie du spectre solaire. Par contre, les temps de dépôt typiques du silicium microcristallin sont plus longs que ceux du silicium amorphe, rendant les coûts de production plus élevés [1].

Donc, ce premier chapitre permet d'étudier les propriétés physiques de ces deux matériaux utilisés dans la cellule solaire à hétérojonction a-Si: H/ $\mu\text{-Si: H}$ .

## 1.2. Silicium amorphe hydrogéné a-Si: H

L'a-Si produit sous vide ou par des méthodes de pulvérisation cathodique contient tellement de défauts que les états localisés dans la bande interdite interdisent son dopage. Des films minces au silicium amorphe ont été réalisés dès 1989 par la méthode de décharge électroluminescente 'glow discharge' [2].

Dans le procédé de décharge électroluminescente, la présence de 5 à 15 % d'hydrogène permet, grâce à la petite taille de cet atome de saturer les liaisons non satisfaites, réduisant par là même la densité d'états localisés dans la bande interdite.

Le silicium amorphe hydrogéné a-Si: H (figure 1.2) s'est fait connaître par l'annonce de W.E. Spear et P.E. Lecomber de l'Université de Dundee [3] qu'il était possible de contrôler le dopage N ou P à condition d'ajouter de l'hydrogène pendant le dépôt. Dès 1977, David Carlson et l'équipe de RCA proclamaient qu'une cellule solaire de 5,5 % avait été réalisée avec un matériau en film mince extrêmement économique. Depuis d'autres méthodes de saturation des liaisons pendantes ont été testées, notamment l'utilisation du fluor (cellules à 6,5 % par Ovshinsky dès 1980). Vint ensuite la période commerciale du marché des caulettes solaires avec Sanyo, Tayio-Yuden et Kaneka au début des années 1980, et des améliorations successives du procédé qui permirent de passer en 15 ans d'un rendement de 4 à 8 % [2].

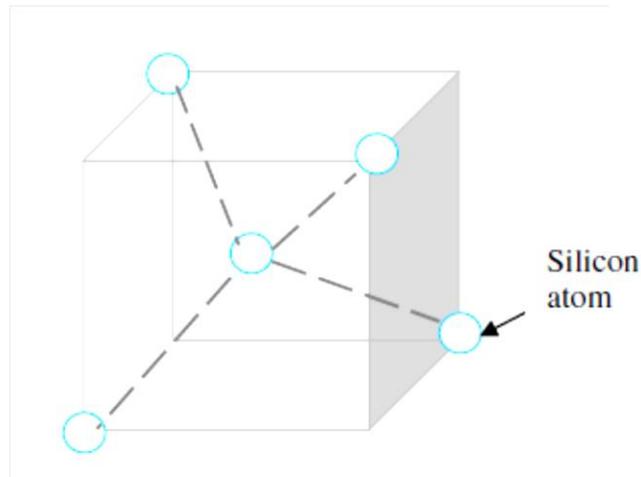
Le dopage de la face d'entrée par le carbone, puis le développement des jonctions tandem PIN-PIN et des jonctions triples dont la dernière est dopée au germanium ont permis d'atteindre des rendements de 12 % au laboratoire.

### 1.2.1. Structure de silicium amorphe

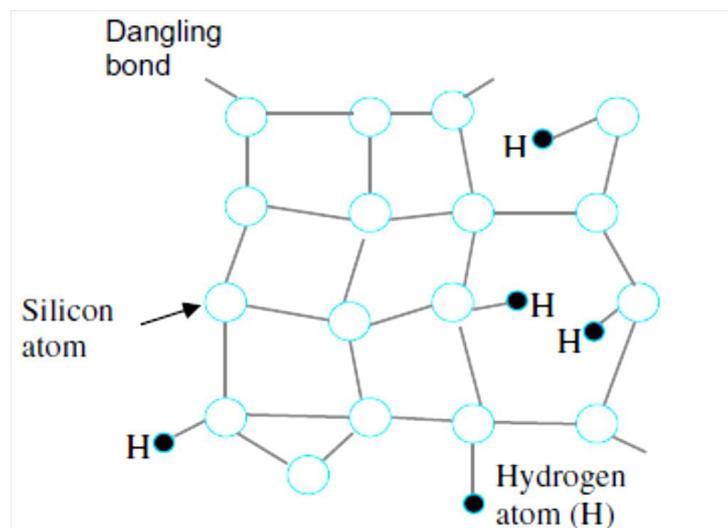
Le silicium amorphe possède la structure tétraédrique (l'atome de silicium est au centre de quatre liaisons covalentes), mais il présente des distorsions aléatoires, si bien qu'au bout de quatre ou cinq distances interatomiques, l'ordre disparaît. En conséquence de ce désordre, certaines liaisons se cassent pour former des liaisons pendantes 'dangling bond'.

Autrement dit, on retrouve des atomes de silicium avec un électron célibataire. Il en résulte une grande influence sur les propriétés électroniques. En effet, un second électron peut s'y fixer formant un centre chargé négativement. Dans ce cas, la liaison pendante constitue un piège à électron. L'électron célibataire peut quitter l'atome pour laisser un centre chargé positivement. Dans ce cas, la liaison pendante constitue un piège à trous. On dit que la liaison brisée présente un caractère amphotère.

A la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, le silicium amorphe ne présentait pas des propriétés intéressantes. En fait, lors du dopage, les porteurs préfèrent se fixer sur les liaisons pendantes. Mais en 1975, Chittik [4] et Spear et le Comber [5] ont réussi à doper des couches de silicium amorphe contenant près de 10% d'hydrogène, en montrant par le caractère semi-conducteur de cet alliage. L'hydrogène sature les liaisons pendantes tout en offrant un matériau présentant un grand intérêt technologique. Les figures 1.1 et 1.2 présentent la différence entre les deux structures le silicium cristallin et le silicium amorphe hydrogéné [6].



**Figure 1.1** Arrangement tétraédrique de liaison dans le Si cristallin.



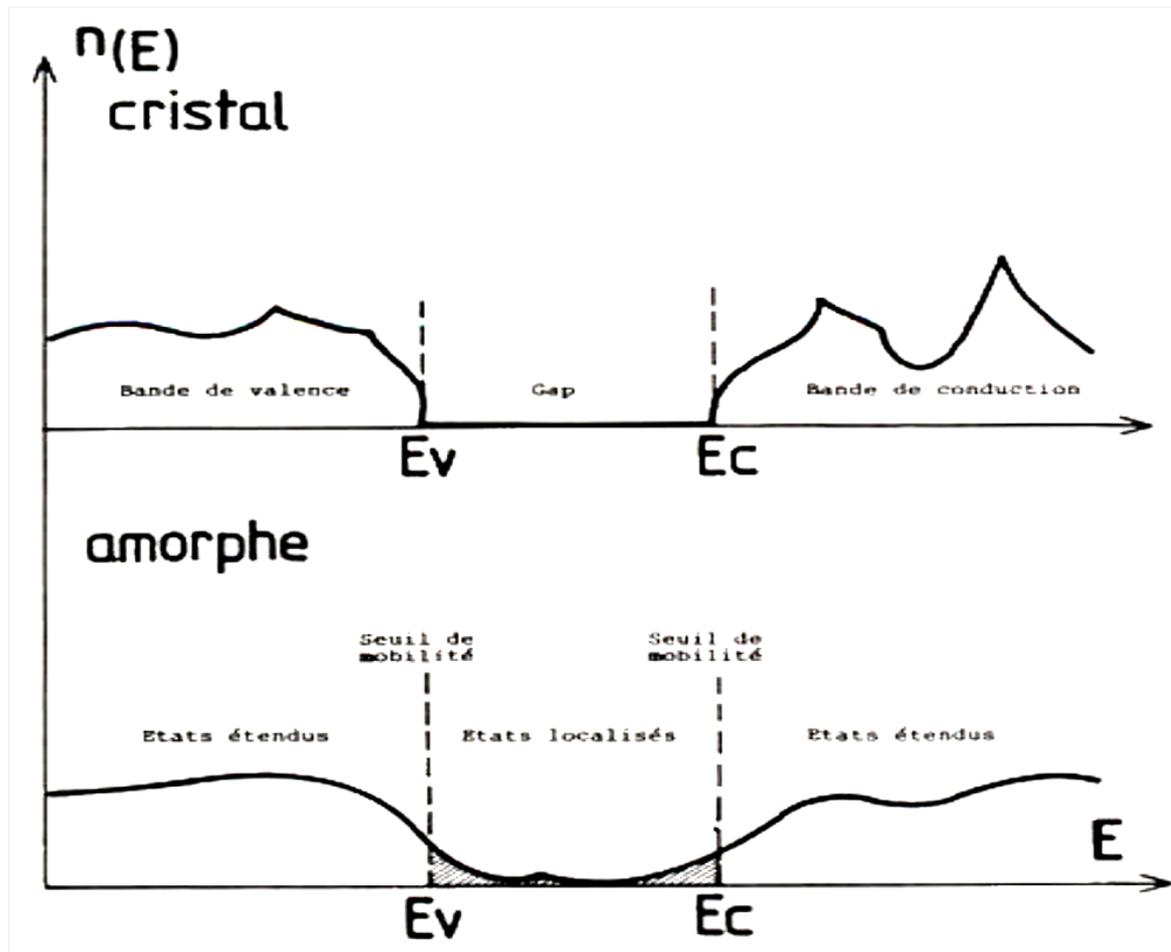
**Figure 1.2** Réseau d'a-Si: H montrant des liaisons brisées d'atome de silicium, qui sont passivés par les atomes d'hydrogène.

### 1.2.2. Diagramme de bande

Du fait des interactions entre atomes, les niveaux d'énergie sur lesquels se répartissent les électrons, sont différents suivant la phase, solide liquide ou gazeuse, sous laquelle se présente un matériau. Dans le cas d'un cristal, la théorie de Bloch, ou théorie des

bandes nous permet de faire le calcul complet de ces niveaux. En fonction de la position du niveau de Fermi par rapport aux différentes bandes d'énergies, on peut prévoir les propriétés électroniques ainsi que leurs variations en fonction de paramètres extérieurs.

Nous avons représenté sur la figure 1.3 les densités d'états électroniques des électrons en fonction de leur énergie, calculées dans le cas de semi-conducteurs cristallins et amorphe. On y reconnaît la bande de valence entièrement occupée et la bande de conduction vide. Elles sont séparées par un gap qui contient le niveau de Fermi et dans lequel on ne trouve aucun état électronique. Dans un semiconducteur amorphe, le désordre faisant varier les potentiels atomiques d'un électron d'un site à l'autre, engendre des états électroniques supplémentaires, notamment à l'intérieur du gap [7].



**Figure 1.3** Représentation schématique des densités d'états, (a) dans le cas d'un solide cristallin et (b) dans le cas d'un matériau amorphe.

Sur la figure 1.3 (b) a été représentée schématiquement la répartition des densités d'états d'un semi-conducteur amorphe. Elle est assez similaire à celle d'un semi-conducteur cristallin, et l'on peut assimiler les états étendus aux bandes de valences et de conduction, ainsi que les seuils de mobilité aux bords de bandes. Des états localisés viennent occuper le gap autour du niveau de Fermi, mais du fait de leur localisation ne changent pas le caractère semi-conducteur global du matériau.

### 1.2.3. Densité d'états dans a-Si: H

La description énergétique du silicium amorphe hydrogéné est plus compliquée à déterminer que celle du silicium cristallin. Une représentation du gap est à l'aide d'une densité d'états (DOS)  $N(E)$ . L'a-Si: H est caractérisé par des faibles mobilités des porteurs libres et la présence d'états localisés dans le gap près des bandes de valence et de conduction (queues de bandes) et près du niveau de Fermi (états profonds) [8].

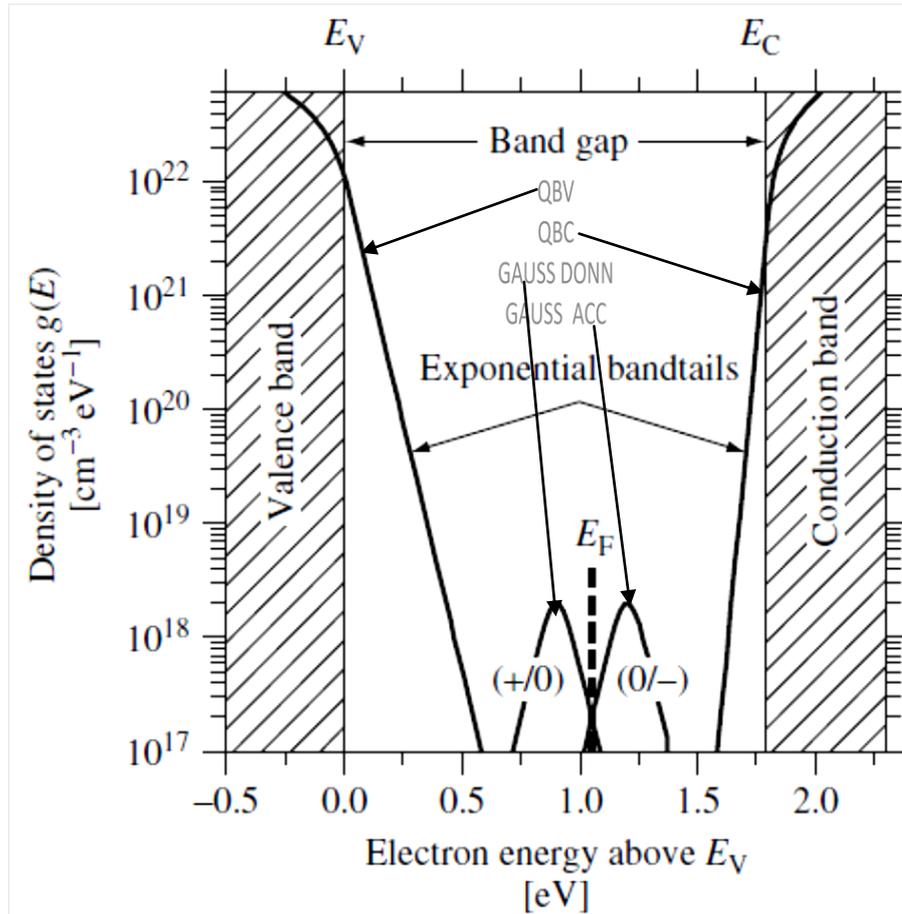
La définition la plus utilisée pour la densité d'états correspond au modèle introduit par Davis et Mott [9]. Dans ce modèle, la (DOS) est constituée de deux distributions exponentielles respectivement pour les queues de bandes de conduction (QBC) et de valence (QBV), et de distributions gaussiennes pour les états profonds. Les premières sont liées au désordre dans le matériau (angles et longueurs des liaisons interatomiques) tandis que les secondes dépendent de la coordination (liaisons pendantes notamment). En se limitant à deux gaussiennes d'états profonds en plus des deux queues de bandes, la DOS  $N(E)$  peut s'écrire :

$$N(E) = N_c e^{-\frac{E_c-E}{KT_c}} + N_{m1} e^{-\frac{(E_{m1}-E)^2}{2\sigma_1^2}} + N_{m2} e^{-\frac{(E_{m2}-E)^2}{2\sigma_2^2}} + N_v e^{-\frac{E-E_v}{KT_v}} \dots\dots\dots (1.1)$$

Où  $N_c$  ( $N_v$ ) est la densité d'états au bord de la bande de conduction (valence),  $T_c$  ( $T_v$ ) la température caractéristique de la QBC (QBV),  $N_{m1}$  et  $N_{m2}$  les densités d'états aux sommets des gaussiennes,  $E_{m1}$  et  $E_{m2}$  leurs positions dans le gap par rapport à  $E_c$  et  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  leur écart-type[10].

Un exemple de densité d'états constituée de deux distributions de types donneurs (QBV et Gauss-Donn) et deux autres de types accepteurs (QBC et Gauss-Acc) modélisée d'après l'équation (1.1) est donnée sur la figure 1.4. Lorsque les états localisés sont considérés comme états monovalents, on distingue les états donneurs des états accepteurs, qui peuvent prendre respectivement la charge  $+q/0$  et  $-q/0$  selon qu'ils

sont libres ou occupés par un électron. Ou on peut les définir comme des états amphotères ou corrélés, où dans ce cas ils peuvent tous prendre la charge  $+q/0/-q$  quand ils sont libres ou occupés par 1 ou par 2 électrons. Le modèle du ‘Defect Pool’ de Powell et Deane [11] considère une distribution d’états corrélés qui évolue avec l’introduction de dopants et avec le vieillissement du a-Si: H avec la lumière.



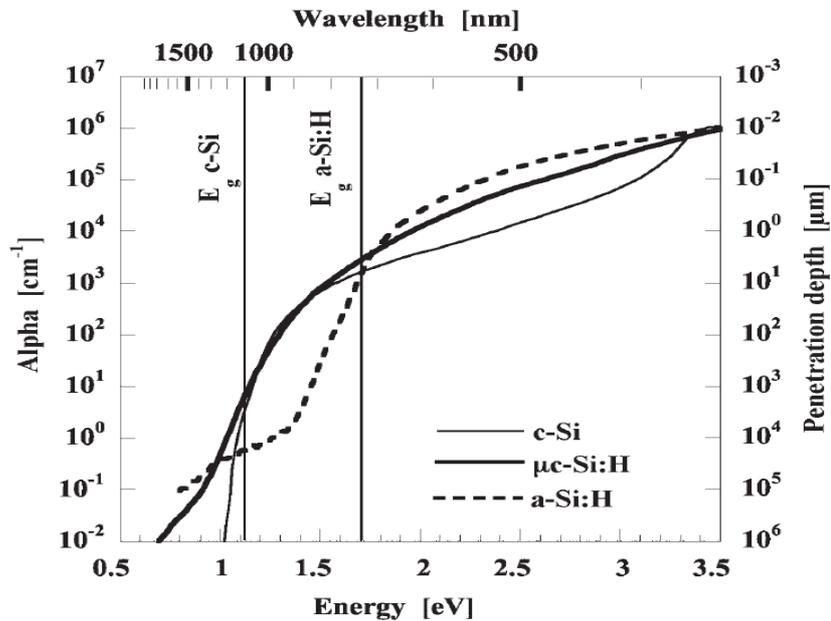
**Figure 1.4** Exemple de densité d’états  $N(E)$  dans le gap d’une couche de silicium amorphe hydrogéné non dopée.

$N(E)$  est constituée de deux queues de bandes exponentielles (QBV et QBC) et deux gaussiennes pour les états profonds selon le modèle introduit par Davis et Mott [9]. On distingue les états donneurs et accepteurs. Le niveau de Fermi est aussi indiqué sur la figure 1.4.

#### 1.2.4. Propriétés optiques de l’a-Si: H

Son coefficient d’absorption est supérieur à celui du silicium monocristallin aux énergies au-delà de 1.7 eV permet à seulement 1  $\mu\text{m}$  d’a-Si: H d’absorber 90% du

spectre solaire. Selon le type de silicium amorphe le gap optique est compris entre 1.7 et 1.8 eV. La mobilité des électrons varie de 10 à 20  $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  et celle des trous de 1 à 5  $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ .



**Figure 1.5** Les spectres d'absorption d'a-Si: H en comparaison avec le silicium cristallin c-Si et le silicium microcristallin  $\mu\text{c-Si:H}$ .

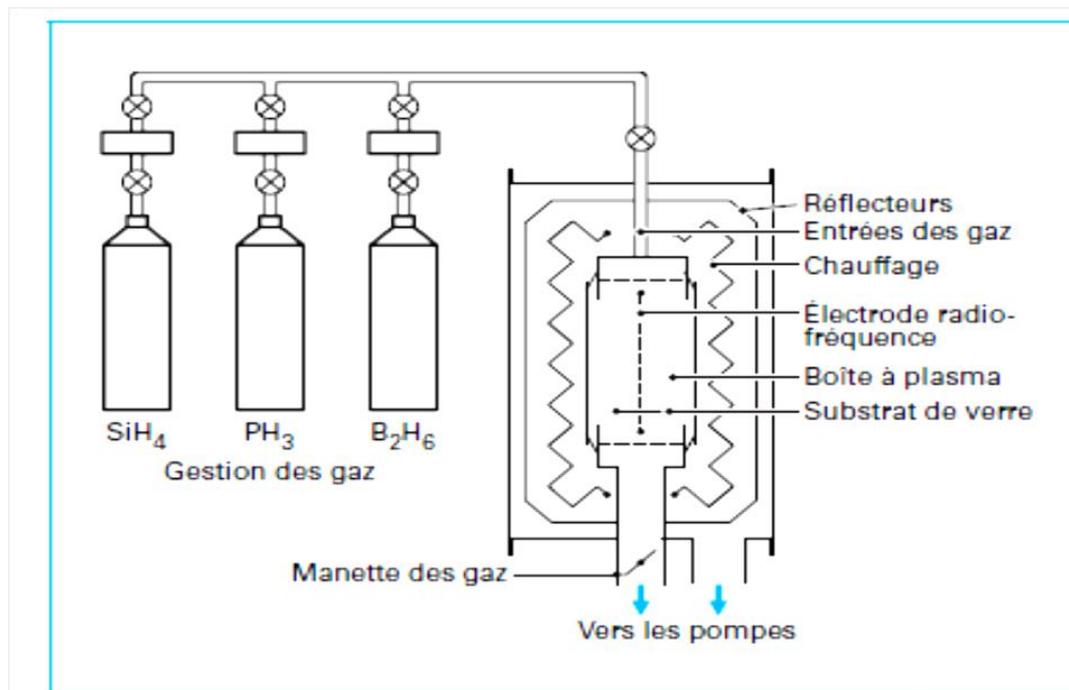
### 1.2.5. Métastabilité du silicium amorphe

Les propriétés du silicium amorphe hydrogéné évoluent défavorablement lorsque le matériau est soumis à un éclairage prolongé, un passage du courant, une injection de porteurs ou à certains d'autres phénomènes. On dit qu'il vieillit. L'effet le plus connu et le plus handicapant de la métastabilité est la création de défauts par éclairage prolongé. On désigne ce phénomène par 'effet Staebler et Wronski', du nom des premiers auteurs l'ayant étudié [12]. Ce phénomène est heureusement réversible en soumettant le matériau à un recuit à une température de l'ordre de 170°C [6].

### 1.2.6. Technique de dépôt du silicium amorphe hydrogéné a-Si: H

La méthode la plus courante de dépôt du silicium amorphe est la décomposition du silane en phase vapeur par une décharge électrique (un champ radiofréquence), encore appelée PECVD (pour plasma enhanced chemical vapour deposition) (figure 1.6). Le

gaz est envoyé à faible pression (13 à 1 300 Pa) dans une enceinte à vide propre, contenant deux électrodes. Pour une tension suffisante, une décharge électrique s'établit entre les électrodes conduisant à la décomposition du silane en éléments chimiques très actifs : radicaux Si, Si-H, Si-H<sub>2</sub><sup>+</sup>, Si-H<sub>3</sub><sup>+</sup> accompagnés des espèces ioniques correspondantes, Si-H<sub>4</sub><sup>+</sup>, Si-H<sub>3</sub><sup>+</sup>, et Si-H<sub>2</sub><sup>+</sup> et Si-H<sub>3</sub><sup>+</sup>. Le plasma contient aussi des électrons et des ions négatifs qui assurent la neutralité électrique globale [2].



**Figure 1.6** Schéma de dépôt PECVD dans une boîte à plasma d'un module à l'a-Si: H [13].

### 1.2.7. Fonction de probabilité d'occupation

Le semi-conducteur amorphe, un quasi-continu d'état existe dans le gap de mobilité. Leur distribution, comme assumés dans ce modèle, a été décrite dans la section gaussienne. Donc le nombre total  $P_T$  de trous piégés par  $cm^{-3}$  doit être calculé en intégrant les charges piégées dans tous les états donneurs. De même,  $N_T$  le nombre total des électrons piégés par  $cm^{-3}$ , est calculé par l'intégration des charges piégées dans les états accepteurs. Les états donneurs sont définis comme une charge positive s'ils sont vide, et sont neutres (a charge zéro).

Les états accepteurs sont définis comme une charge négative si occupé par un électron, et sont neutres s'ils sont à vide. Pour calculer les valeurs de  $N_T$  et  $P_T$  à l'équilibre thermodynamique, nous devons présenter la fonction de probabilité d'occupation.

**1.2.7.1. Fonction de probabilité d'occupation à l'équilibre thermodynamique**

La fonction de distribution habituelle de Fermi-Dirac :

$$f_0 = \frac{1}{1 + \exp [(E_t + E_{F0})/KT]} \dots\dots\dots (1.2)$$

Où  $f_0$  est la probabilité d'occupation d'un état pour un électron. La probabilité d'occupation d'un état par un trou est donnée par l'expression  $(1 - f_0)$ . Dans l'équation (1.2)  $E_t$  est la position d'un niveau d'énergie d'un défaut dans le gap de mobilité,  $E_{F0}$  est le niveau de fermi à l'équilibre thermodynamique, et T la température ambiante [14].

**1.2.7.2. Fonction de probabilité d'occupation à l'état hors équilibre thermodynamique**

Nous avons considéré les quatre équations suivant pour peupler et dépeupler un état particulier de défaut de densité  $N_T$  dans le gap de mobilité à partir du modèle de shockley-Read-Hall :

(a) coefficient d'émission des électrons  $e_n$

$$e_n = a_n f N_t \dots\dots\dots (1.3)$$

(b) coefficient de capture des électrons  $c_n$

$$c_n = n(1 - f) N_t \sigma_n v_{th} \dots\dots\dots (1.4)$$

(c) coefficient d'émission des trous  $e_p$

$$e_p = a_p (1 - f) N_t \dots\dots\dots (1.5)$$

(d) coefficient de capture des trous  $c_p$

$$c_p = p f N_t \sigma_p v_{th} \dots\dots\dots (1.6)$$

Où  $\sigma_n$  et  $\sigma_p$  sont les sections de capture des électrons et des trous dans les états  $N_T$  ( $cm^{-3}$ ),  $v_{th}$  est vitesse thermique,  $a_n$  et  $a_p$  sont des constantes à déterminer en utilisant la loi d'équilibre thermodynamique,  $f$  est la fonction de probabilité d'occupation. Pour n'importe quelle condition d'état stationnaire, les équations suivantes s'écrivent :

$$c_n - e_n = c_p - e_p = R \dots\dots\dots (1.7)$$

Où R est le taux de recombinaison en  $cm^{-3}S^{-1}$ .

A l'équilibre thermodynamique,  $R = 0$ , et  $f=f_0$ ,  $e_n = c_n$ ,  $n = n_0$ ,  $p = p_0$  on obtient :

$$n_1 = N_c \exp [-(E_c - E_t)/KT] \text{ Où } a_n = \sigma_n v_{th} n_1 \text{ et } n_1 = n_0 \frac{(1-f_0)}{f_0} \dots\dots\dots (1.8)$$

$$p_1 = N_v \exp [-(E_t - E_v)/KT] \text{ Où } a_p = \sigma_p v_{th} p_1 \text{ et } p_1 = p_0 \frac{f_0}{(f_0-1)} \dots\dots\dots (1.9)$$

Dans ce qui précède,  $n_0$  et  $p_0$  est la population d'électrons et des trous libre à l'équilibre thermodynamique et  $N_c$  et  $N_v$  la densité d'état effective dans la bande de conduction (valence). En remplaçant les expressions de  $a_n$  et  $a_p$  l'expression de la fonction de probabilité d'occupation  $f$  dans un état stationnaire sous potentiel de polarisation ou sous la lumière (sous éclairnement), nous obtenons :

$$f = (\sigma_n n + \sigma_p p_1) / [\sigma_n (n + n_1) + \sigma_p (p + p_1)] \dots\dots\dots (1.10)$$

Où  $n(p)$  sont les densités d'électrons (trous) libres à l'état hors équilibre thermodynamique.

**1.2.8. Densité de charges dans les états localisés**

Nous obtenons les densités  $P_T$  et  $n_T$  des trous et des électrons piégés dans les états localisés du gap en intégrant le produit de la densité d'état localisée du gap et la fonction d'occupation dans l'espace du gap de mobilité. Nous faisons ceci en divisant l'espace d'énergie en un grand nombre d'intervalles, assumant la densité d'état par

unité d'énergie,  $G_t$  constante dans chaque intervalle d'énergie  $[E_1 \text{ et } E_2]$ .  $G_t$  C'est la valeur de la densité de défauts au milieu de l'intervalle d'énergie, calculé dans les états localisés continus [14].

**1.2.8.1. Densité de porteurs piégés à l'équilibre thermodynamique**

Pour une bande d'états donneurs dans l'intervalle d'énergie  $[E_1 \text{ et } E_2]$  avec la densité de défaut constante  $G_t = G_D$ , la densité des trous piégés donnée par :

$$p_t = G_D \int_{E_1}^{E_2} (1 - f_0(E)) dE \dots\dots\dots (1.11)$$

Où  $f_0$  est la fonction de la probabilité d'occupation à l'équilibre thermodynamique donnée dans l'équation (1.2).

De même, pour une bande des états accepteurs dans l'intervalle d'énergie  $[E_1 \text{ et } E_2]$  avec la densité de défaut constante  $G_t = G_A$ , la densité des électrons piégés donnée par :

$$n_t = G_A \int_{E_1}^{E_2} f_0 dE \dots\dots\dots (1.12)$$

**1.2.8.2. Densité des porteurs piégés hors l'équilibre thermodynamique**

Dans ce cas, pour une bande des états donneurs dans l'intervalle d'énergie  $[E_1 \text{ et } E_2]$  avec la densité de défaut constante  $G_t = G_D$  la densité des trous piégés est donnée par :

$$p_t = G_D \int_{E_1}^{E_2} (1 - f) dE \dots\dots\dots (1.13)$$

Où  $f$  est la fonction de probabilité d'occupation à l'état hors équilibre thermodynamique donnée par l'équation (1.8).

$$n_t = G_A \int_{E_1}^{E_2} f dE \dots\dots\dots (1.14)$$

Où  $G_A$  est la densité constante des états accepteurs dans l'intervalle  $[E_1 \text{ et } E_2]$ .

### 1.2.9. Recombinaison dans les états localisés

Le terme de recombinaison paraît dans les deux équations de continuité. Pour développer l'équation du processus de recombinaison dans les états du gap nous employons le modèle de Shokley-Read-Hall en utilisant l'expression (1.13) pour la recombinaison R, nous obtenons :

$$R(cm^{-3}sec^{-1}) = \sigma_n \sigma_p v_{th} N_t \left[ \frac{(np - n_i^2)}{\sigma_n(n + n_1) + \sigma_p(p + p_1)} \right] \dots\dots\dots (1.15)$$

Où  $n_i$  est la densité intrinsèque des porteurs donnée par :

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left[\frac{-E_g}{2kT}\right]; E_g = E_c - E_v \dots\dots\dots (1.16)$$

Pour une bande d'états ( $N_t cm^{-3}$ ) dans l'intervalle d'énergie [ $E_1$  et  $E_2$  ] avec une densité de défauts constante  $G_T$  , l'expression pour la recombinaison devient [13] :

$$R(cm^{-3}sec^{-1}) = \sigma_n \sigma_p v_{th} G_t \int_{E_1}^{E_2} \left[ \frac{(np - n_i^2)}{\sigma_n(n + n_1) + \sigma_p(p + p_1)} \right] dE \dots\dots\dots (1.17)$$

## 1.3. Silicium Microcristalline hydrogéné $\mu\text{-Si: H}$

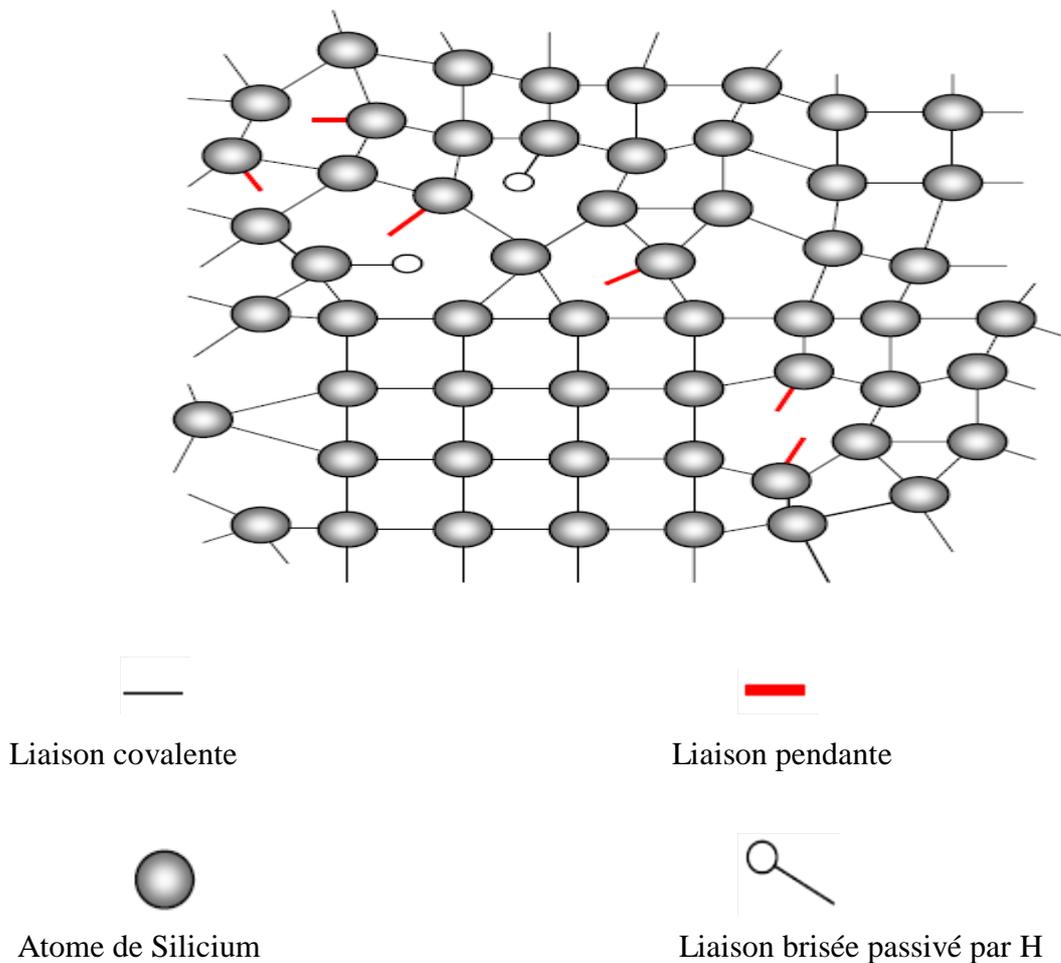
### 1.3.1. Structure de silicium microcristallin

Le Silicium microcristallin se présente sous la forme de grains monocristallins (cristallites) séparés par des joints de grains (Figure 1.7). Il est considéré comme intermédiaire entre le silicium amorphe et le silicium cristallin. La taille des grains du silicium microcristallin se situe entre quelques nanomètres à environ 1 micromètre.

Il est caractérisé par une technologie à faible cout de dépôt et une température faible en comparaison avec le silicium cristallin et proche de la celle d'a-Si: H. mais le  $\mu\text{-Si: H}$  a une structure ayant moins de défauts par rapport au a-Si: H du fait que:

- Sa structure est intermédiaire entre le silicium cristallin qu'est ordonné et le silicium amorphe hydrogéné qu'est désordonné.
- l'hydrogène assure la saturation des liaisons brisées.

La figure montre la structure du  $\mu\text{-Si: H}$ .



**Figure 1.7** Structure du matériau  $\mu\text{c-Si:H}$ .

### 1.3.2. Propriétés de $\mu\text{c-Si:H}$

Si la fraction cristalline est suffisamment grande, les propriétés électroniques sont dominées par la phase cristalline dans la matière. Donc, les propriétés de transport des porteurs de charge sont nettement supérieures à celles de  $\text{a-Si:H}$ . En outre, l'effet de la dégradation induite par la lumière est faible dans le  $\mu\text{c-Si:H}$  en comparaison avec l' $\text{a-Si:H}$ . En raison de la grande quantité de joints de grain (régions amorphes), les propriétés électroniques sont encore inférieures à celles de silicium monocristallin. La conductivité de  $\mu\text{c-Si:H}$  est de plusieurs ordres de grandeur supérieure à celle d' $\text{a-Si:H}$ . Il est bien admis que le  $\mu\text{c-Si:H}$  est plus ordonné que l' $\text{a-Si:H}$ . En raison de l'ordre, il y a une augmentation du nombre d'états de la queue délocalisés. Le  $\mu\text{c-Si:H}$  est caractérisé par un gap de 1.1 eV qui est proche de celui du silicium monocristallin [15].

Le matériau  $\mu\text{-Si: H}$  présente un coefficient d'absorption supérieur à celui du  $\text{c-Si}$  et inférieur à celui d' $\text{a-Si: H}$  (figure 1.5).

### **1.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons étudié les propriétés physiques des deux semiconducteurs; le silicium amorphe hydrogéné et le silicium microcristallin qui sont utilisés dans la simulation de notre cellule solaire à hétérojonction  $\text{a-Si: H}/\mu\text{-Si: H}$ . Car la compréhension des propriétés de ces deux semiconducteurs est nécessaire pour l'étude du fonctionnement et la simulation de notre cellule solaire objet de notre travail.

# Référence bibliographique

**Référence du chapitre 1**

- [1] **Sylvie FAÏĆ**, ‘l’oxyde de zinc par dépôt chimique en phase vapeur comme contact électrique transparent et diffuseur de lumière pour les cellules solaires’ ; Thèse de doctorat (2003), école polytechnique fédérale de Lausanne.
- [2] **Alain RICAUD**, ‘Filières technologiques photovoltaïques’, technique de l’ingénieur n<sup>o</sup> d 3940 – 1 ; /2009Cythelia.pdf.
- [3] **Lecomber**, Solid State Comm. 17 (1975) N<sup>o</sup> 1193.
- [4] **P.R.Bauquis**, Un point de vue sur les besoins et les approvisionnements en énergie à l’horizon 2050. Ecole doctorale, Fréjus, Mars 2003.
- [5] **Hubert Reeves**, ‘Mal de Terre, science ouverte’, éditions du seuil, mars 2003.
- [6] **RAHMOUNI Mawahib**, ‘Etude des cellules photovoltaïques HIT en vue d’améliorer leur rendement’, UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA THECHNOLOGIE D’ORAN-MOHAMED BOUDIAF (2009).
- [7] **A. MENELLE**, ‘détermination expérimentale de l’ordre local dans le silicium amorphe hydrogène diffusion des neutrons exafs au seuil k du silicium’ ; Thèse de doctorat, Université Pierre ET Marie Curie PARIS (1970).
- [8] R. A. Street, ‘Hydrogenated amorphous silicon’. Cambridge, Solid State Science Series, 1991.
- [9] **N. F. Mott**, E. A. Davis et N. F. Mott, Philosophical Magazine B, vol. 22, p. 903, 1970.
- [8] **Wilfried FAVRE**, ‘Silicium de type n pour cellules à hétérojonctions : caractérisations et modélisations’, université de paris (2011).
- [11] **M. Powell et S. Deane**: ‘Improved defect-pool model for charged defects in amorphous silicon’; Physical review 1993.
- [12] P.Chatterjee, R.Vanderhagen and B.Equer. J.Appl.Phys.87 (2000) N0 1874.
- [13] **Alain RICAUD**, ‘Photopiles solaires’, presses polytechniques et universitaires romandes.
- [14] **Parsathi Chatterjee**, J. Appl. Phys. 79 (1996) 7339.
- [14] **A. Poruba, A. Fejfar, Z. Remes, J. Springer, M. Vanecek, J. Kocka, J. Meier, P. Torres, A. Shah**, J. Appl. Phys. 88 (2000) 148.

# Chapitre 2

## Notions générales sur la cellule solaire

## 2.1. Introduction

Dans les années 70, les couches minces du Si et une gamme entière de nouveaux matériaux de semiconducteur (CIS, CdTe, InP, Zn<sub>3</sub>P<sub>2</sub>, Cu<sub>2</sub>Se, WSe<sub>2</sub>, GaAs, ZnSiAs) ont été développés. Ils sont presque toutes les matières alternatives employées par nouvelle industrie d'aujourd'hui de panneaux solaire, ainsi le silicium poly-cristallin et amorphe.

Les cellules solaires pin de silicium amorphe hydrogéné a-Si: H ont été intensivement étudiées pour l'usage en tant que les piles solaires peu coûteuses. L'utilisation pratique de pile solaire d'a-Si: H est comme puissance de source en courant électrique exigent des améliorations de coefficient d'absorption et de stabilité.

Dans ce chapitre, nous débuterons par donner les caractéristiques du rayonnement solaire et la description de la conversion photovoltaïque tout en étudiant les phénomènes physiques ayant lieu telle la génération des photoporteurs. Ensuite, nous décrivons le principe de fonctionnement et les caractéristiques des cellules solaires en général et les cellules solaires en a-Si: H en particulier.

## 2.2. Spectre solaire

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km).

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM.

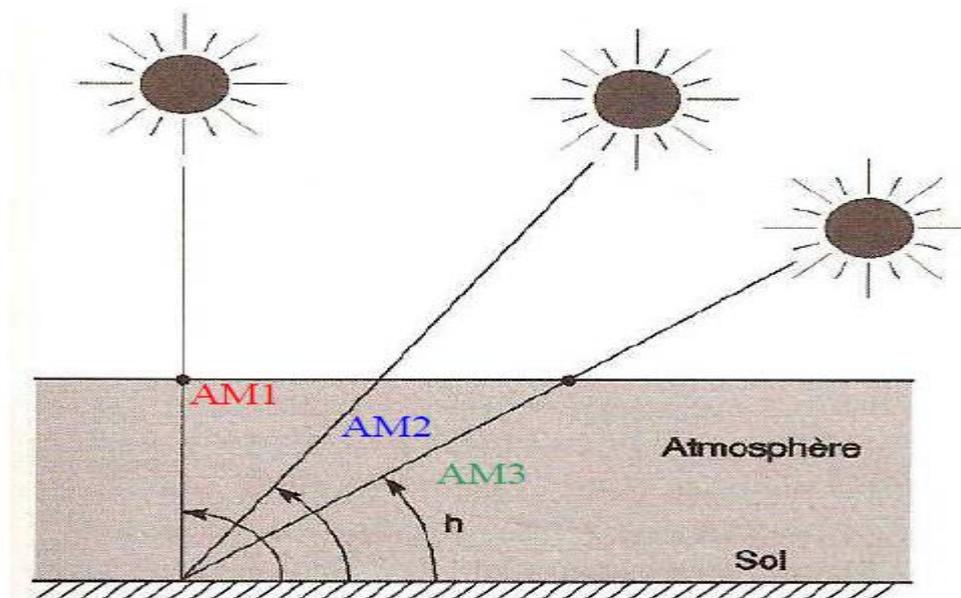
Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m<sup>2</sup> et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m<sup>2</sup>.

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D.

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 (correspondant à une inclinaison du soleil de  $45^\circ$  par rapport au zénith).

La lettre G représente le rayonnement "global" incluant le rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre, la lettre D tient compte seulement du rayonnement direct [1].

Pour mesurer l'effet de l'atmosphère on utilise l'air masse, défini par  $AM=1/\cos\alpha$  où  $\alpha$  représente l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale. AM1 correspond au soleil à la verticale ( $\alpha=0$ ), AM4 à l'horizon ( $\alpha=75^\circ$ ). AM0 est utilisé pour préciser les conditions au dessus de l'atmosphère. Un schéma descriptif d'Air Mass est représenté par la figure 2.1.



**Figure 2.1** Schéma descriptif d'Air Mass.

### 2.3. Paramètre du rayonnement solaire

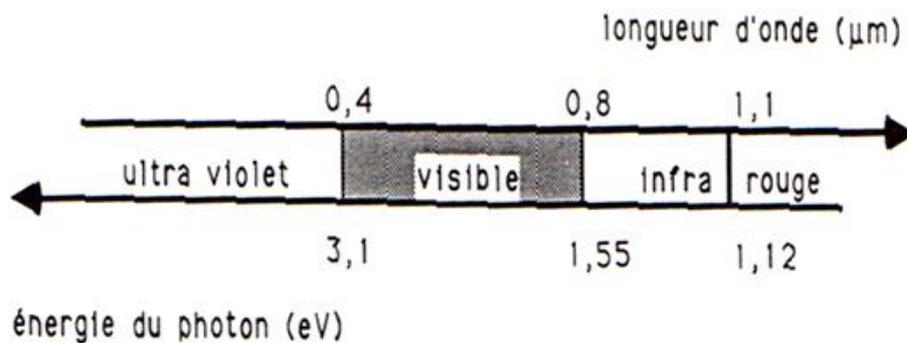
Le rayonnement solaire concerne directement le fonctionnement des cellules photovoltaïques à partir de ces caractéristiques essentielles.

La figure 2.2 présente la gamme de rayonnement électromagnétique entourant le spectre visible ainsi que les longueurs d'ondes correspondantes.

A chaque longueur d'onde  $\lambda$  peut être associé un photon d'énergie  $E_{ph} = h\nu$ , où  $h$  est la constante de Planck ( $h = 6.62 \times 10^{-34}$  J.s) et  $\nu$  la fréquence correspondant à la longueur d'onde  $\lambda$  ( $\lambda = c/n$ ),  $c$  étant la vitesse de la propagation de la lumière  $= 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$  et  $n$  l'indice de réfraction.

On rappelle la relation permettant de passer de la longueur d'onde  $\lambda$  en ( $\mu\text{m}$ ) à l'énergie  $E_{ph}$  du photon associé en (eV) :

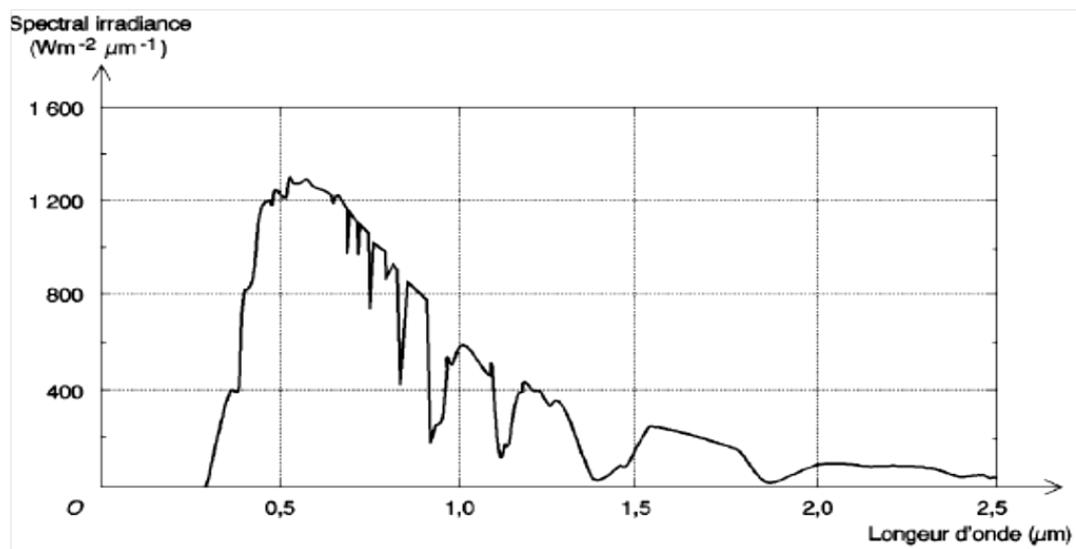
$$E_{ph}(\text{eV}) = \frac{1.24}{\lambda(\mu\text{m})} \dots\dots\dots (2.1)$$



**Figure 2.2** Domaines du spectre électromagnétique.

Hors atmosphère, l'amplitude et la distribution spectrale du rayonnement solaire sont parfaitement définies. Il n'en est pas de même au niveau du sol, ou en raison de multiples paramètres atmosphériques, cette amplitude et cette distribution peuvent varier dans des très grandes proportions.

La cellule photovoltaïque n'est sensible que dans un domaine précis de longueurs d'onde. Il est donc nécessaire de définir un spectre standard, appelé spectre de référence, qui puisse être adopté au niveau international pour que des mesures comparatives soient possibles. Le spectre présenté sur la figure 2.3 donne en fonction de la longueur d'onde l'irradiance spectrale, c'est-à-dire la puissance associée au rayonnement par tranche de longueur d'onde et par unité de surface. Cette grandeur est exprimée en  $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ [2].



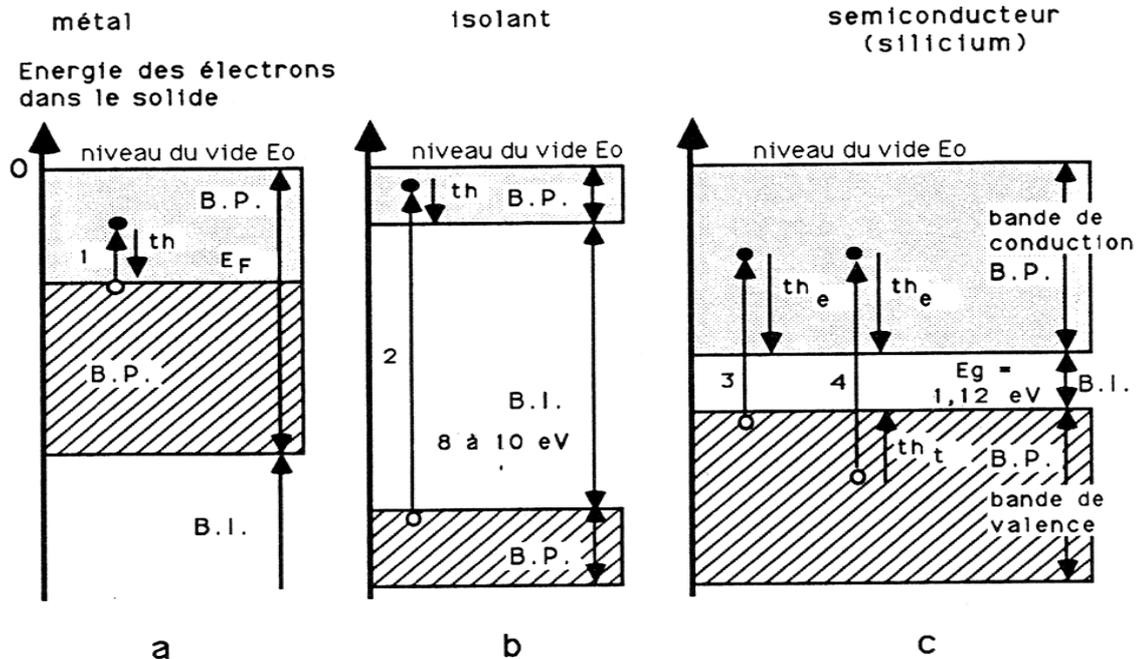
**Figure 2.3** Spectre solaire AM 1.5 normalisé [3].

L'intégration de cette irradiance spectrale sur toutes les longueurs d'onde donne l'irradiance de ce rayonnement de référence exprimé en ( $\text{Wm}^{-2}$ ). La valeur qui correspond à la figure 2.3 est égale à  $1 \text{ KWm}^{-2}$ . Ce spectre de référence correspond à la traversée par le rayonnement solaire de couche atmosphérique de référence qui est définie par le spectre A.M. 1.5.

On constate sur la figure 2.3 que le spectre solaire de référence s'étale de  $0.3\mu\text{m}$  à environ  $2\mu\text{m}$ , la plus grande partie l'énergie se situant vers les faibles longueurs d'onde [4].

## 2.4. Notions élémentaire de physique des solides ; les électrons dans la matière

La figure 2.4 présente la structure électronique des solides pour les trois grandes familles de matériaux : les métaux, les isolants et les semiconducteurs .



**Figure 2.4 :** Les bandes d'énergie dans un métal, isolant et semiconducteur.

En vertical est portée l'énergie des électrons dans le solide, l'origine étant prise de façon arbitraire au niveau  $E_0$  qui est le niveau du vide.

Les électrons du solide ne peuvent prendre n'importe quelle énergie et on observe une alternance de bande d'énergies autorisées (Bande permise B.P.) et de niveau énergétiques interdits (Bande interdite B.I.).

Toutes les bandes permises ne sont pas entièrement remplies d'électrons, et les zones hachurées correspondant aux niveaux énergétiques effectivement occupés par les électrons à basse température. Les propriétés électriques des matériaux sont directement liées à leur structure de bande, et la figure 2.4 va nous permettre d'expliquer pourquoi un seul semiconducteur peut permettre la conversion photovoltaïque du rayonnement solaire[2].

## 2.5. Interaction rayonnement matière

Lorsqu'un photon interagit avec un électron, il transfère intégralement son énergie à ce dernier, à la condition que le niveau énergétique finale de l'électron soit autorisé et libre. Ainsi dans un métal tous les niveaux supérieurs à  $E_F$  étant autorisés, et la quasi-totalité de ces niveaux étant occupés à température ambiante, toutes les longueurs d'onde pourront être absorbées (transition 1, figure 2.4(a)), malheureusement cet électron reviendra à l'état initial (transition  $th_e$ , figure 2.4(a)) en un temps très bref (de  $10^{-12}$  à  $10^{-13}$  s), l'énergie reperdue par l'électron étant transformée en chaleur, l'énergie apportée par le rayonnement a été perdue sous forme de phonons, au travers d'un processus appelé thermalisation de l'électron. Le métal absorbera le rayonnement mais il ne sera pas possible d'utiliser l'énergie reçue par les électrons que sous forme thermique.

Dans un isolant, le photon ne pourra interagir avec un électron que s'il peut fournir à cet électron une énergie supérieure à la largeur de la bande interdite  $E_g$ . Il faudra donc  $E_{ph} > 8$  eV soit  $\lambda < 0.15$   $\mu\text{m}$  (transition 2, figure 2.4(b)). on constate donc que le rayonnement solaire, qui est tel que  $\lambda > 0.3$   $\mu\text{m}$ , ne sera pas absorbé par les isolants pour ce qui est de l'interaction photon-électron.

Dans un semiconducteur, la largeur de bande interdite est plus faible que pour les isolants et varie, pour les matériaux qui nous intéressent, d'environ 0.6 eV et 2 eV ou plus. Elle est 1.12 eV pour le silicium cristallin à 300 K.

Les photons du spectre solaire pourront être absorbés si l'énergie du photon  $E_{ph} > E_g$  (transition 3, figure 2.4(c)).

- Pour le silicium cristallin tous les photons  $E_{ph} > 1.12$  eV, soit de longueur d'onde  $\lambda < 1.1$   $\mu\text{m}$  pourront fournir de l'énergie à un électron de la bande de valence du silicium. Après absorption de l'énergie du photon, cet électron libéré aura une énergie située dans la bande de conduction. Si l'énergie  $E_{ph} > E_g$ , l'excès d'énergie  $E_{ph} - E_g$  est immédiatement perdu par thermalisation (transition  $th_e$ , figure 2.4(c)) et transféré au réseau sous forme de chaleur.
- La transition électronique (transition  $th_e$ , figure 2.4(c)) a généré deux types de porteurs de charge :
  - Des électrons libres dans le réseau du silicium, électrons "arrachés" aux liaisons chimiques.

- Des lacunes dans l'électrons de valence, appelées "trous".

On dit que l'on a créé une paire électron-trou, les deux peuvent se mouvoir dans le matériaux . un trou est en effet l'absence de l'électron d'une liaison Si-Si, et de proche en proche ce "défaut" peut se déplacer dans le matériau (saut d'un électron de liaison chimique en liaison chimique en sens inverse [4].

## 2.6. Absorption du rayonnement dans le matériau

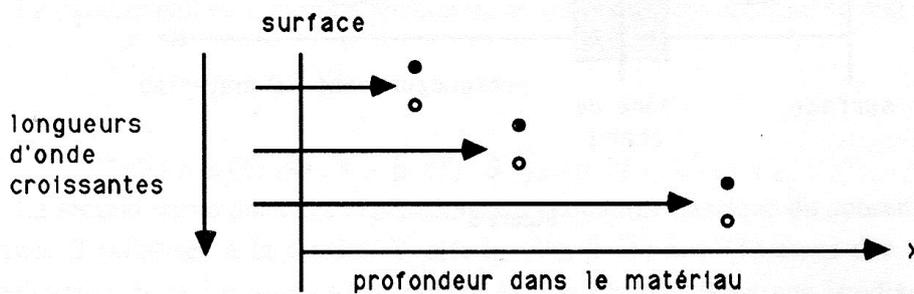
Si  $\varphi_0$  est le flux du rayonnement incident (partie non réfléchié par la surface), le flux à une profondeur  $x$  dans le matériau est donnée par :

$$\varphi(x) = \varphi_0 e^{-\alpha(\lambda)x} \dots\dots\dots (2.2)$$

Où  $\alpha(\lambda)$  est le coefficient d'absorption du matériau ; il est en fonction de la longueur d'onde .

Ce coefficient d'absorption  $\alpha(\lambda)$  diminue lorsque  $\lambda$  augmente (il est nul si  $\lambda > \lambda_s$ , où  $\lambda_s$  étant la longueur d'onde seuil correspondant à  $E_g$ , soit  $1.1 \mu\text{m}$  pour le silicium).

Les faibles longueurs d'onde sont absorbées près de la surface du matériau, créant donc des paires électron-trou près de la surface, et que les plus grandes longueurs d'onde seront les longueurs d'onde plus loin de la surface seront générées les paires électron-trou (voir figure 2.5).



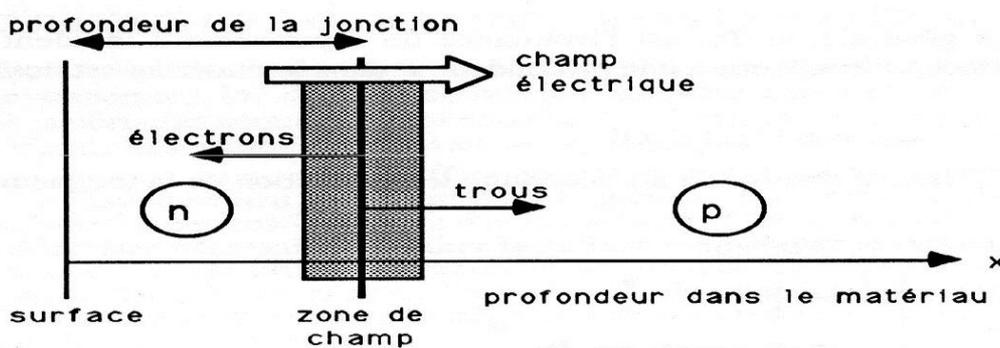
**Figure 2.5** Absorption du rayonnement dans un matériau.

En raison de très nombreux défauts présents, la surface du silicium est une zone privilégiée pour la recombinaison et donc l'annihilation des paires électron-trou.

On peut concevoir que ces paires générées près de la surface par des photons de faible longueur d'onde ne seront pas utilisables[2].

### 2.7. Structure de collecte des porteurs

Pour être utilisable, les paires doivent être dissociées dans le volume du matériau et il faut une structure de collecte qui puisse drainer les électrons vers une face de la plaquette et les trous en sens inverse. Ceci est obtenu en réalisant une jonction PN, le matériau de départ étant généralement de type p. La cellule photovoltaïque est donc une diode de grande surface. Il suffit de noter qu'une telle jonction crée entre zone n et zone p, une zone de champ électrique élevé résultant du seul contact entre les deux matériaux n et p. Tout porteur, électron ou trou, ayant pu diffuser jusqu'à cette zone de champ sera drainé préférentiellement d'un côté (électron vers la zone n et le trou vers la zone p) (Figure 2.6).



**Figure 2.6** Principe de collecte de porteur.

Si l'on compare la figure (2.5) et (2.6), on observe que la position de la zone de champ dans la cellule (profondeur de la jonction) va jouer un rôle sur la sensibilité de la cellule, car ce sont les paires électron-trou générées près de la zone de champ qui auront la plus grande probabilité d'être collectés. Ainsi si la jonction est près de la surface la cellule sera efficace pour convertir les faibles longueurs d'onde.

## 2.8. Génération du photocourant

Deux électrodes sont élaborées sur la plaquette de silicium, l'une qui recouvre la totalité de la face arrière pour assurer le contact avec la zone p, et l'autre en forme de grille sur la face avant, la géométrie de cette grille étant un bon contact électrique avec la zone n.

Si ces deux électrodes sont court-circuitées à travers un ampèremètre, les électrons drainés par le champ interne de la jonction vers la zone n rejoindront les trous de la zone p via la connexion extérieure à la cellule photovoltaïque, donnant ainsi naissance au courant de court-circuit  $I_{cc}$  de cette structure sous éclairage qui correspond au photocourant  $I_{ph}$  généré par le rayonnement. Ce photocourant est proportionnel au nombre de porteurs générés et drainés par unité de temps. Il est donc proportionnel, pour une distribution spectrale donnée, au flux du rayonnement incident  $\varphi$  (en  $\text{Wm}^{-2}$ ) et également à la surface de captation  $S$  (en  $\text{m}^2$ ) de la cellule photovoltaïque.

$$I_{ph} = \alpha(T) \varphi S \dots\dots\dots (2.3)$$

Où  $\alpha(T)$  est un coefficient dépendant faiblement de la température  $T$  ; pour les cellules photovoltaïque sur les silicium mono ou multicristallin, il est de l'ordre de  $0.35 \text{ AW}^{-1}$

Si la cellule est laissée en circuit-ouvert sous illumination, les porteurs générés par le rayonnement et séparés par le champ interne de la jonction vont s'accumuler dans la zone n pour les électrons et la zone p pour les trous. ceci va conduire à une auto-polarisation dans le sens passant de la diode. La tension mesurée alors entre les électrodes sera la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ . Cette tension est la tension qu'il faudrait appliquer dans le sens passant à la diode non illuminé pour qu'elle passe un courant  $I_D$  égal au photocourant  $I_{ph}$ .

En résumé :

- Si la cellule est en court-circuit , tout le photocourant  $I_{ph}$  passe dans le circuit extérieur; on registre un courant de court-circuit  $I_{cc} = I_{ph}$  mais aucune puissance ne peut être extraite puisque la tension est nulle.
- Si la cellule est en circuit ouvert, on mesure une tension de circuit ouvert  $V_{co}$ .  
Le photocourant  $I_{ph}$  n'est pas extrait de la cellule et est compensé par le courant de diode à la tension  $V_{co}$  :  $I_D(V_{co})$ . Aucune puissance ne peut être extraite puisque le courant dans le circuit extérieur est nul.

## **2.9. Organisation d'une cellule photovoltaïque**

Une cellule photovoltaïque peut être schématiquement représentée par une couche supérieure d'interface avec l'extérieur, le plus souvent du verre, d'une couche antireflet, d'un contact électrique avant, de la jonction pn, d'un contact arrière et d'un substrat.

### **2.9.1. Couche d'interface avec l'extérieur**

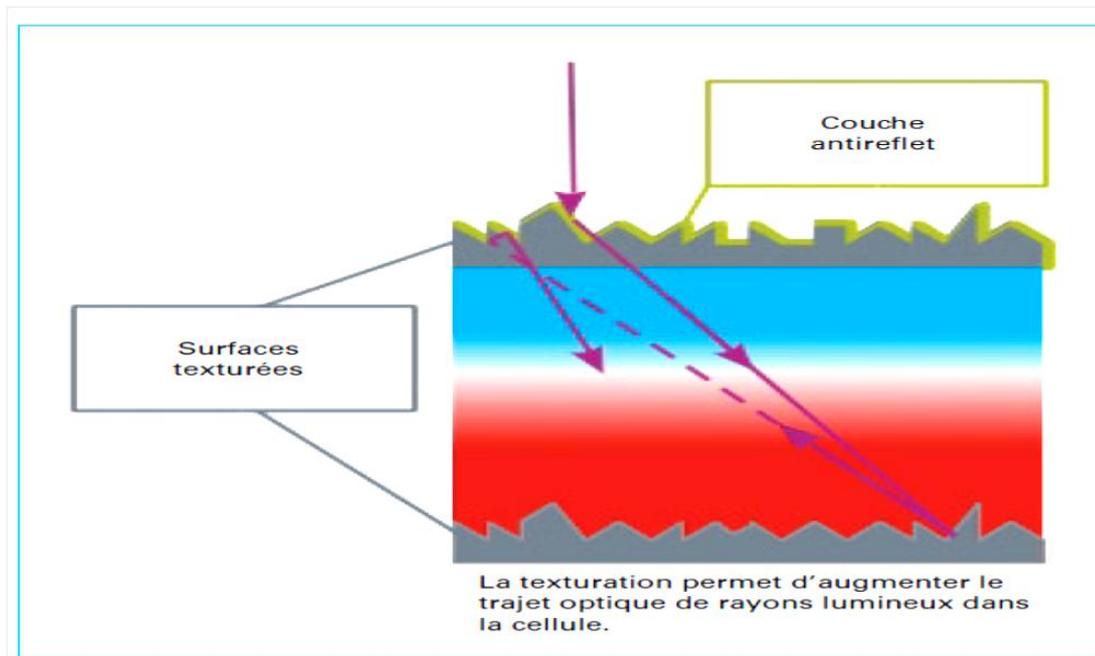
Cette couche doit protéger la cellule photovoltaïque des conditions extérieures tout en laissant passer la lumière. Elle doit notamment être étanche et résistante à des expositions longues aux radiations ultraviolettes et à des cycles de température importants.

Les verres trempés à très faible teneur en fer sont le matériau de choix pour ces couches d'interface avec l'extérieur en raison de leur faible coût, de leur résistance ainsi que de leur capacité à se nettoyer facilement.

### **2.9.2. Couche antireflet**

Cette couche vise à éviter qu'une partie de l'énergie potentiellement disponible ne soit réfléchi par le matériau utilisé dans la jonction pn. Dans le cas du silicium massif par exemple un cinquième de la puissance lumineuse à 600 nm est réfléchi par l'interface entre le silicium et l'air. Toutefois, comme on vient de le voir, les matériaux constituant la jonction pn ne sont pas directement en contact avec l'extérieur. Les verres trempés ont un indice optique de l'ordre de 1,5 et assurent ainsi une partie de l'adaptation d'indice nécessaire à une minimisation de la réflexion.

Dans le cas de dispositifs en couches minces, l'électrode supérieure transparente peut jouer seule ou en multicouches le rôle d'adaptation d'indice.



**Figure 2.7** Texturation des surfaces supérieure et inférieure d'une cellule photovoltaïque.

Afin de maximiser l'effet antireflet, l'épaisseur de la couche ou des couches doit être de l'ordre du quart de la longueur d'onde correspondant au gap du matériau composant la jonction pn. Pour des cellules fonctionnant dans le visible, ces épaisseurs varient de 100 à 200 nm. Ainsi des transmissions de plus de 90 % sont réalisées.

En supplément aux couches antireflet, il est possible de texturer la surface supérieure à l'aide d'une attaque chimique (figure 2.7).

Des cônes et des pyramides sont ainsi créés et réfléchissent vers la cellule et dans des directions non normales au plan de la cellule les rayons lumineux qui seraient sinon ressortis et qui ont ainsi une nouvelle chance d'être absorbés. Cette solution présente toutefois un inconvénient majeur, des surfaces présentant ce type de traitement tendent à devenir sales plus rapidement étant moins lavées par la pluie [5].

### 2.9.3. Contacts

Les matériaux utilisés pour les contacts servent tout d'abord à collecter les porteurs de charge. Néanmoins, ils peuvent également assurer d'autres fonctions.

### **2.9.3.1. Contact supérieur**

Le contact supérieur doit être transparent afin de laisser passer la lumière et bien sûr conducteur. Son épaisseur doit donc être contrôlée précisément afin de maximiser le flux de photons incidents ayant une longueur d'onde adéquate. Des oxydes conducteurs tels que ZnO ou SnO<sub>2</sub> sont par exemple communément employés.

Si ses propriétés (notamment mécaniques) lui permettent, il peut éventuellement également servir de couche d'interface avec l'extérieur.

Si des contacts non transparents sont utilisés, Il faut donc choisir un métal ayant une faible résistance de contact ohmique et trouver le bon compromis entre des contacts épais permettant une bonne conduction et des contacts fins permettant de minimiser l'écrantage du rayonnement solaire.

### **2.9.3.2. Contact inférieur**

Les contraintes technologiques sur les contacts inférieurs ou arrière sont moindres. En effet, le matériau utilisé n'a pas besoin d'être transparent et la tolérance vis-à-vis de la diffusion dans le semi-conducteur est plus grande. Néanmoins, ce matériau doit avoir une faible résistance thermique afin de minimiser les contraintes mécaniques dues aux cycles thermiques que va subir la cellule. De plus, il doit, bien sûr, être étanche.

Ce contact inférieur ou arrière est souvent réalisé en aluminium ou en molybdène recouvert à l'extérieur d'un film polymère fait en Tedlar. Dans ce cas, la diffusion du métal dans le semi-conducteur permet d'assurer une forte cohésion de l'ensemble. Par ailleurs, en réfléchissant les photons incidents qui auraient traversé la jonction pn, cette couche métallique permet d'augmenter l'efficacité de la cellule.

## **2.10. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire**

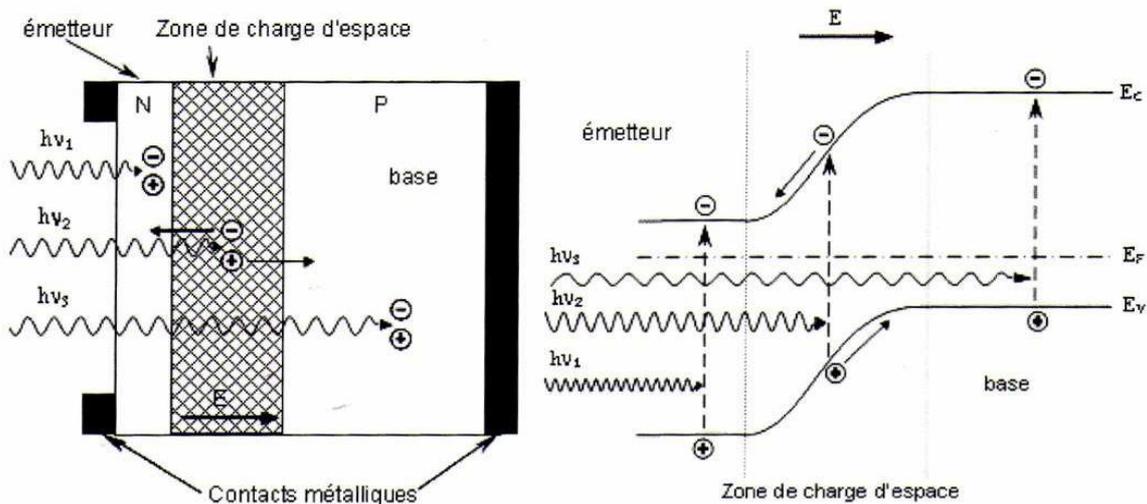
La cellule solaire est une photodiode à jonction PN de grande surface qui génère un signal électrique sans l'aide d'une source d'énergie auxiliaire. Lorsque les photons issus du soleil frappent la cellule, certains sont réfléchis et d'autres sont transmis ou absorbés dans la cellule solaire, seuls les photons absorbés participent à l'effet photoélectrique.

La conversion photovoltaïque met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés :

- L'absorption de la lumière dans le matériau,
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques,
- La collecte des charges.

Il est donc clair que les matériaux constituant une cellule solaire doivent avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque.

Dans le but de collecter les paires électron-trou générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons /trou créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction PN. Le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure 2.8.



**Figure 2.8** Structure (à gauche) et diagramme de bande (à droite) d'une cellule photovoltaïque.

Les photons incidents génèrent des paires électron-trou dans les régions de type N et P et dans la zone de charge d'espace. Les paires électron-trou générés se comportent différemment suivant la région :

- Dans la zone N et P, les porteurs minoritaires diffusent. Ce qui atteint la zone de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la zone P (pour les trous) et vers la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. Ce transport de porteurs de charges engendre un photocourant de diffusion.

- Dans la zone de charge d'espace, les paires électron-trou photogénérés vont être entraînés par le champ électrique vers la région N (électrons) et la région P (trous). Ce déplacement des photoporteurs donne naissance à un photocourant de génération.

Ces deux contributions ensemble ont pour résultat de donner un photocourant total  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [6].

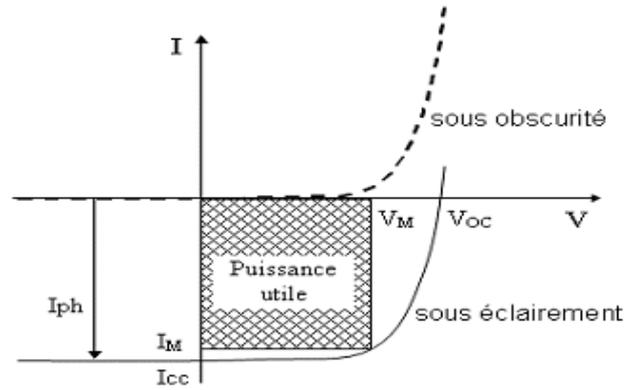
### 2.11. Caractéristique $I(V)$ et schéma équivalent d'une cellule solaire

Une cellule solaire reliée à une résistance électrique et soumise à l'éclairement solaire débite un courant qui va se répartir entre la résistance et sa structure interne de diode. Sa caractéristique  $I(V)$  correspond à la soustraction du photocourant et du courant de la diode à l'obscurité par:

$$I(V) = I_{obs}(V) - I_{ph} = I_s \left( \exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right) - I_{ph} \dots\dots\dots (2.4)$$

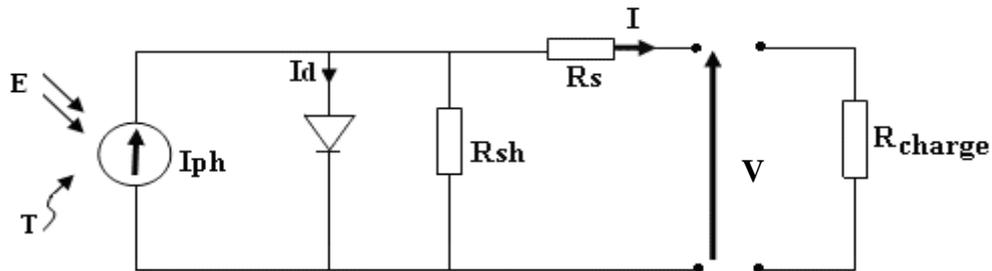
Avec  $I_{ph}$  le photocourant,  $I_{obs}$  le courant d'obscurité,  $I_s$  le courant de saturation de la diode,  $q$  la charge élémentaire,  $K$  la constante de Boltzmann et  $T$  la température.

La caractéristique d'une cellule à l'obscurité est identique à celle d'une diode. Nous avons représenté sur la figure 2.9, les deux caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire à l'obscurité en pointillés, et sous illumination en trait plein. On remarque que la courbe sous illumination est simplement décalée par rapport à la première d'une valeur  $I_{cc}$ , qui traduit la génération constante du courant par la lumière. Cette valeur est appelée courant de court-circuit, puisque c'est le courant que génère la cellule sous lumière à tension nulle. La valeur  $V_{co}$ , à l'inverse, est la tension de circuit ouvert. Il représente en fait l'égalité du courant de génération par la lumière et du courant à l'obscurité.



**Figure 2.9** Caractéristiques I(V) à l'obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque.

Son schéma équivalent est représenté par une diode idéale montée en parallèle avec une source de courant (figure 2.10). Les résistances série  $R_s$  et shunt  $R_{sh}$  modélisent les pertes engendrées par la résistivité des couches et la présence de courants de fuite [7].



**Figure 2.10** Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque

Le courant  $I$  peut s'écrire :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \dots\dots\dots (2.5)$$

Selon le schéma équivalent d'une cellule solaire dans la figure (2.10), on a :

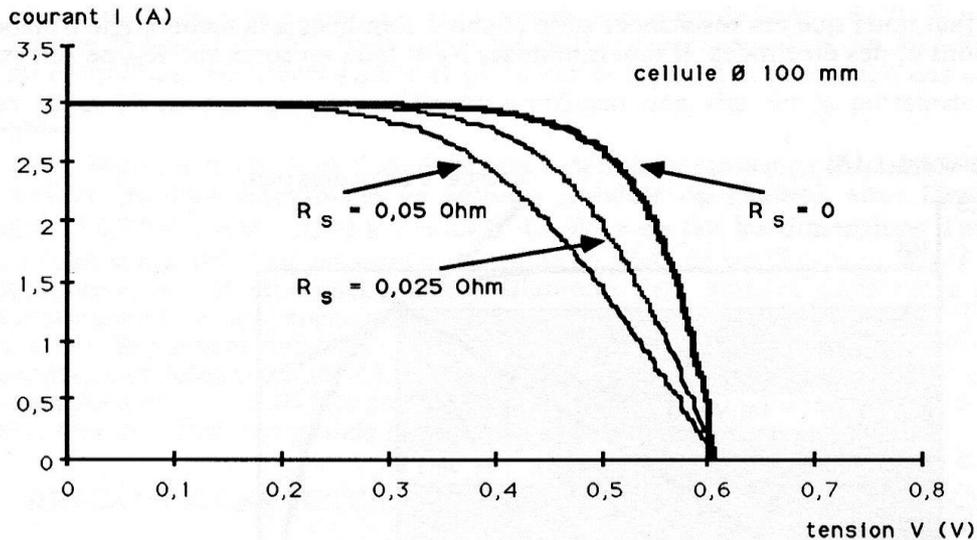
$$I = I_{ph} - I_d - \left( \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \right) \dots\dots\dots (2.6)$$

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V+I.R_s}{A.U_r}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V+I.R_s}{R_{sh}}\right) \dots\dots\dots (2.7)$$

Avec A : Facteur de qualité et  $U_r = \frac{K.T}{q}$ .

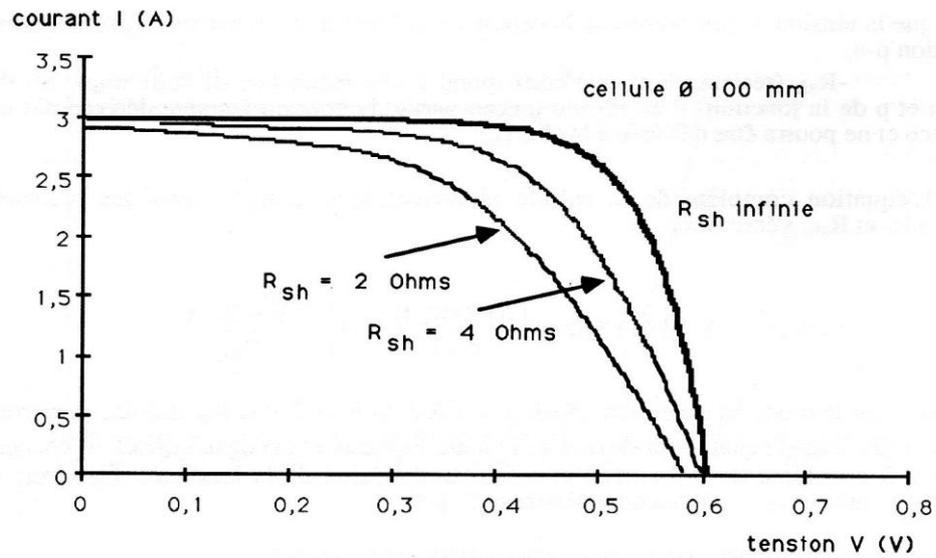
### 2.11.1. Influence des résistances série et shunt sur la caractéristique (I-V)

Les résistances parasites indiquées sur la figure 2.11 vont modifier la caractéristique I-V de la figure 2.10. Cette figure montre l'influence de la résistance série. La tension de circuit ouvert n'est pas modifiée, mais la caractéristique se déforme très rapidement.



**Figure 2.11** Influence de résistance série sur la caractéristique I(V).

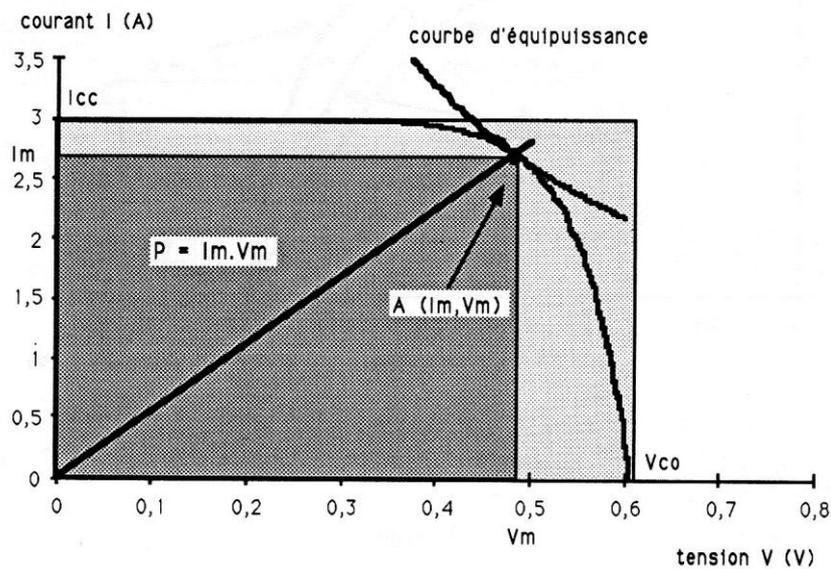
La figure 2.12 présente l'influence de la résistance shunt : la tension de circuit ouvert est diminuée et la zone basse tension présente une pente. Ces résistances série et shunt sont liées à la technologie d'élaboration des jonctions et des électrodes. Il faut minimiser  $R_s$  et faire en sorte que  $R_{sh}$  ne soit pas trop faible [2].



**Figure 2.12** Influence de résistance shunt sur la caractéristique  $I(V)$ .

### 2.11.2. Extraction de la puissance

La puissance sera maximale lorsque l'impédance sera telle que le produit  $I$  et  $V$  soit maximum, soit pour le point de fonctionnement  $A(I_m, V_m)$  sur la figure 2.13.



**Figure 2.13** Caractéristique  $I(V)$  d'une cellule solaire.

### 2.11.2.1. Facteur de forme (FF)

Le facteur de forme est le rapport de  $I_m \cdot V_m$ , valeur maximale de la puissance pouvant être extraite, au produit  $I_{cc} \cdot V_{co}$  (figure 2.13).

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{cc} V_{co}} \dots\dots\dots (2.8)$$

### 2.11.2.2. Rendement de conversion

Le rendement de conversion de la cellule est le rapport de la puissance électrique maximale pouvant être extraite, à la puissance du rayonnement incident sur la surface  $S$  de la cellule.

$$\eta = \frac{I_m V_m}{\Phi S} \dots\dots\dots (2.9)$$

### 2.11.3. Réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque

La réponse spectrale  $RS$  d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant de court-circuit généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident.

La réponse spectrale  $RS$  est donnée par la relation suivante [7]:

$$RS(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_{inc}(\lambda)} (A/W) \dots\dots\dots (2.10)$$

Le rendement quantique externe  $EQE$  de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents pour chaque longueur d'onde, il est relié à la réponse spectrale par :

$$EQE(\lambda) = SR(\lambda) \frac{hc}{\lambda q} \dots\dots\dots (2.11)$$

Le rendement quantique interne  $IQE$  de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons pénétrant dans le matériau, il est relié au rendement quantique externe  $EQE$  par l'équation :

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1-R(\lambda)} \dots\dots\dots (2.13)$$

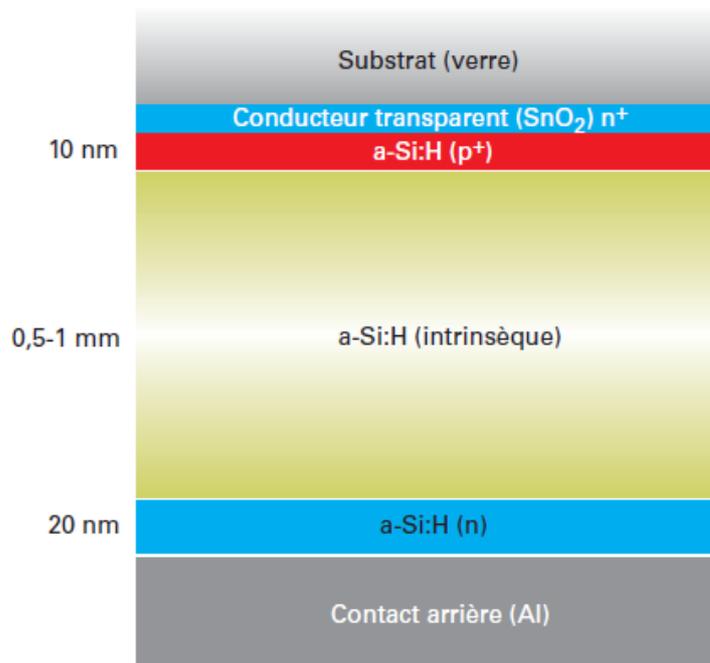
Où  $R(\lambda)$  représente le coefficient de réflexion pour la longueur d'onde  $\lambda$ .

### 2.12. Structure d'une cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné a-Si: H

Le seul matériau communément utilisé sous forme massive pour réaliser des jonctions pn dans les cellules photovoltaïques est le silicium. Il est également utilisé sous forme de couche mince sous différentes formes (amorphe, microcristallin, etc.).

Dans le cas des couches minces, les électrodes sont toujours des oxydes conducteurs transparents. Les matériaux les plus couramment utilisés sont ZnO, SnO, InSnO, Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> ; ce dernier présentant la meilleure conductivité et la meilleure transparence [6], mais la présence de cadmium constitue un handicap majeur.

On a mentionné précédemment que les couches minces de silicium amorphe sont soumises à l'effet Staebler-Wronski qui entraîne une diminution des performances de la cellule lorsqu'elle est illuminée pendant un temps donné avant que ses performances ne se stabilisent. Une façon de limiter cet effet est de tirer partie du fort taux d'absorption du silicium amorphe pour réaliser des multicouches. On parle alors de cellule p-i-n (figure 2.14) où la couche supérieure est une couche de moins de 10 nm d'épaisseur dopée p. Cette épaisseur réduite permet à la lumière de la traverser pour générer des porteurs dans la couche intermédiaire qui est une couche intrinsèque plus épaisse [5].

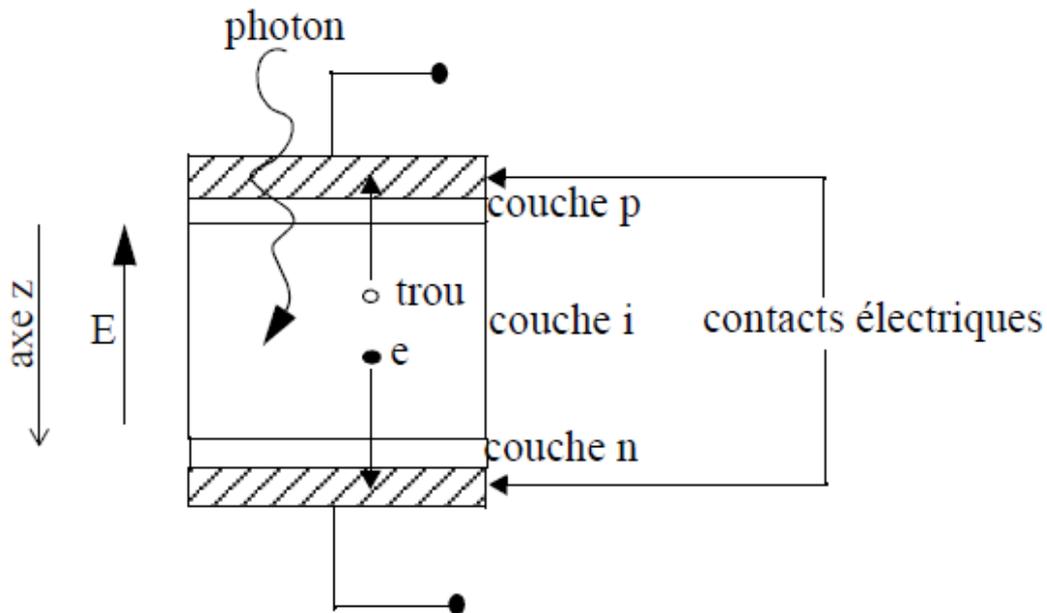


**Figure.2.14** Architecture d'une jonction p-i-n.

Enfin, une couche dopée n de 20 nm est déposée dessous. Ces couches n et p vont générer des charges et donc un champ électrique dans la couche intrinsèque, entraînant de ce fait les porteurs générés dans la couche intrinsèque vers les électrodes. Des architectures plus évoluées à base d'empilement de jonctions p-i-n permettent de réduire l'épaisseur de la couche intrinsèque qui est responsable des dégradations de performances liées à l'effet Staebler-Wronski. Ces empilements nécessitent l'introduction de jonctions tunnels entre les jonctions p-i-n adjacentes afin d'éviter l'effet bloquant de la jonction pn inverse qui se crée entre la partie inférieure n d'une jonction p-i-n et la partie supérieure p de la jonction p-i-n suivante.

### 2.13. principe de fonctionnement d'une cellule solaire de structure pin

Le principe de base d'une cellule solaire faite avec un matériau semi-conducteur comme le silicium amorphe ou microcristallin consiste en une jonction p-i-n, c'est à dire: une zone de silicium dopée p - une zone de silicium non dopée (intrinsèque) - une zone de silicium dopée n [Shah 1992]. La Figure 2.15 schématise le fonctionnement d'une cellule solaire de ce type:



**Figure. 2.15** Principe de fonctionnement d'une cellule solaire en silicium amorphe ou microcristallin.

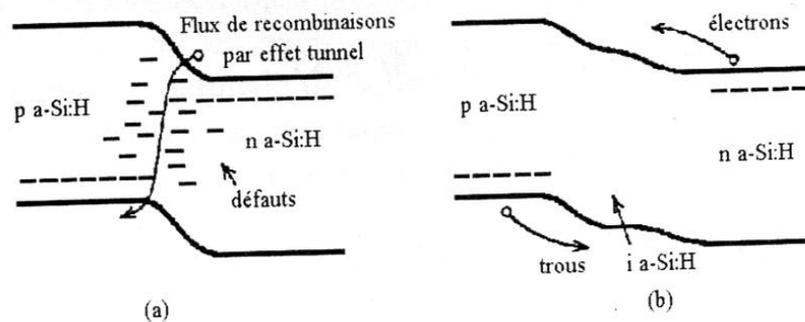
Lorsqu'un photon d'énergie supérieure au gap du silicium atteint la zone intrinsèque, il est absorbé pour créer une paire "électron-trou". Un courant électrique est alors généré par la séparation de cette paire "électron-trou", en direction des deux bornes opposées de la cellule. Cette séparation se fait sous l'action du champ électrique présent dans la zone de silicium intrinsèque.

Le trou et l'électron créés dans la couche "i" doivent traverser les couches de silicium dopées ("p" et "n") avant d'atteindre les bornes de la cellule solaire. Malheureusement, ces couches dopées de silicium amorphe ou microcristallin possèdent énormément de "défauts" divers qui provoquent la recombinaison des électrons et trous dans ces couches avant que ceux-ci aient pu atteindre les bornes de la cellule. C'est pourquoi on donne à ces couches dopées le moins d'épaisseur possible [8].

Deux couches conductrices de courant placées aux bornes de la cellule vont récupérer l'électron et le trou qui n'auront alors plus beaucoup de risques de se recombiner.

### 2.14. Jonction pin

La structure type d'une cellule photovoltaïque au silicium amorphe ne peut pas être basée sur une simple jonction pn. En effet, de telles jonctions ne présentent pas l'effet redresseur habituel ; à cause de la densité d'états importante dans le gap, elles ont plutôt un comportement de contact ohmique auquel s'ajoute un fort courant tunnel comme cela est indiqué sur la figure 2.16. Mise à part les structures MIS pas très performantes, la seule structure qui ait les propriétés d'une diode est la jonction pin [4].



**Figure.2.16** (a) la jonction p-n n'a pas de caractère redresseur dans le cas de a-Si :H, (b) la structure pin présente un effet redresseur.

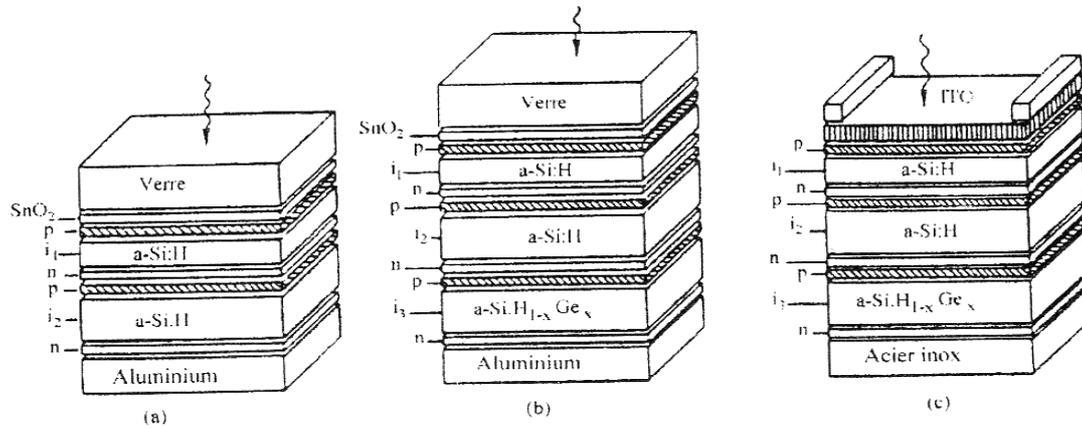
### 2.15. Cellule à jonction multiple

La contrainte de la dégradation sous lumière a poussé les chercheurs et les industriels à trouver des astuces dans l'architecture dispositif pour minimiser cet effet. Les *cellules à jonctions multiples* (figure 2.17), en plus de leur rendement quantique étendu dans le rouge, répondent à ce souci ; en effet, on y multiplie le nombre de jonctions avec des matériaux à gap légèrement différent tout en réduisant l'épaisseur de chacune.

Les difficultés à surmonter sont [4] :

- un *bon appariement des courants*, puisque c'est la cellule la plus mauvaise qui va imposer son courant ; typiquement, les épaisseurs optimales pour un tandem sont  $I_1$ , 60 nm et pour  $I_2$ , 300 nm ;

- des *interfaces fortement recombinaires*, le plus souvent réalisées avec du silicium microcristallin.



**Figure .2.17** représente schématiquement la coupe de cellules à jonctions multiples : (a) même gap ; (b) gaps différents et substrat en verre ; (c) gaps différents et substrat en acier inox.

## 2.14. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté les bases fondamentales à la compréhension de la cellule solaire. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres qui influent sur leurs caractéristiques. Puis nous avons présenté quelques notions sur les cellules solaires à base d'a-Si: H.

# Référence bibliographique

## Référence du chapitre 2

- [1] [http / : www.Energie solaire photovoltaïque.doc](http://www.Energie_solaire_photovoltaique.doc) / B. Flèche - D. Delagnes / juin (2007).
- [2] **Bernard Equer** : “Energie solaire photovoltaïque” ; volume 1 de physique et technologie de la conversion photovoltaïque.
- [3] **Anne Labouret • Pascal Cumunel Jean-Paul Braun • Benjamin Faraggi** : “Les bases de l’énergie photovoltaïque”, Dunod, Paris, (2010).
- [4] **Alain Ricaud**, “photopiles solaires” : de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés. Presses polytechnique et universitaire romandes (1997).
- [5] **Alain RICAUD**, ‘Filières technologiques photovoltaïques’, technique de l’ingénieur n° d 3940 – 1 ; /modules\_photovoltaiques\_-\_filires.pdf
- [6] H. Mathieu, "Physique des semiconducteurs et des composants électroniques", 2ème Edition, Masson, 1990.
- [7] **Kateb mohamed Nadjib, Mokrani zakaria**, "Conception et simulation électrique d’une cellule solaire en Si par le logiciel Tcad-Silvaco", mémoire de master, université Biskra, 2011.
- [8] **Sylvie FAÏ**: Thèse “l’oxyde de zinc par dépôt chimique en phase vapeur comme contact électrique transparent et diffuseur de lumière pour les cellules solaires” ; ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE (2003).

# Chapitre 3

## Logiciel TCAD-SILVACO

### 3.1. Introduction

Le logiciel TCAD (Technology Computer Aided Design)-SILVACO (SiliconValley Corporation) a été fondé par Dr. Ivan Pesic en 1984, la société Silvaco a pour siège dans Santa Clara en Californie, elle est composée par huit bureaux dans USA, Austin, Texas, Chelmsford du nord, Massachusetts, Phoenix et Arizona.

Tcad Silvaco permet la modélisation du comportement physique et électrique d'un composant électronique, dans le but d'économiser le temps et le coût de développement, et ainsi de pouvoir envisager et optimiser des solutions pour améliorer les performances des dispositifs [1].

La société Silvaco concerne les logiciels de CAO Technologique (TCAD) : Athena, pour la simulation de « process » 1 ou 2 D, et Atlas, pour la simulation de dispositifs en 1, 2 ou 3D.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le logiciel de simulation TCAD-SILVACO, son principe de fonctionnement, et ces modules de simulation : ATHENA pour la simulation des processus technologiques [2], et ATLAS pour la simulation du comportement électrique des composants [3]. Nous allons aussi donner les différentes commandes (instructions) et les bases physiques du principe de fonctionnement du simulateur ATLAS.

### 3.2. Bases physiques du principe de fonctionnement du simulateur TCAD SILVACO

Ce simulateur de dispositifs est basé sur la résolution simultanée de l'équation de Poisson et de l'équation de continuité. Il calcule à chaque instant et en tout point de l'espace en une suite d'éléments finis, la concentration des électrons et des trous et la valeur du potentiel électrostatique.

L'équation de Poisson montre une relation entre le potentiel et la densité des porteurs:

$$\Delta V = - \frac{q}{\epsilon} [p - n + N_D^+ + N_A^-] \dots\dots\dots (3.1)$$

Où  $\epsilon$  est le constant diélectrique,  $\Delta V$  est le Laplacien du potentiel est le potentiel électrique,  $q$  est la charge élémentaire d'électron,  $p$  et  $n$  sont les concentrations des électrons et des trous.

Les équations de continuité pour les trous et les électrons sont :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_p + G_p - R_p \dots\dots\dots (3.2)$$

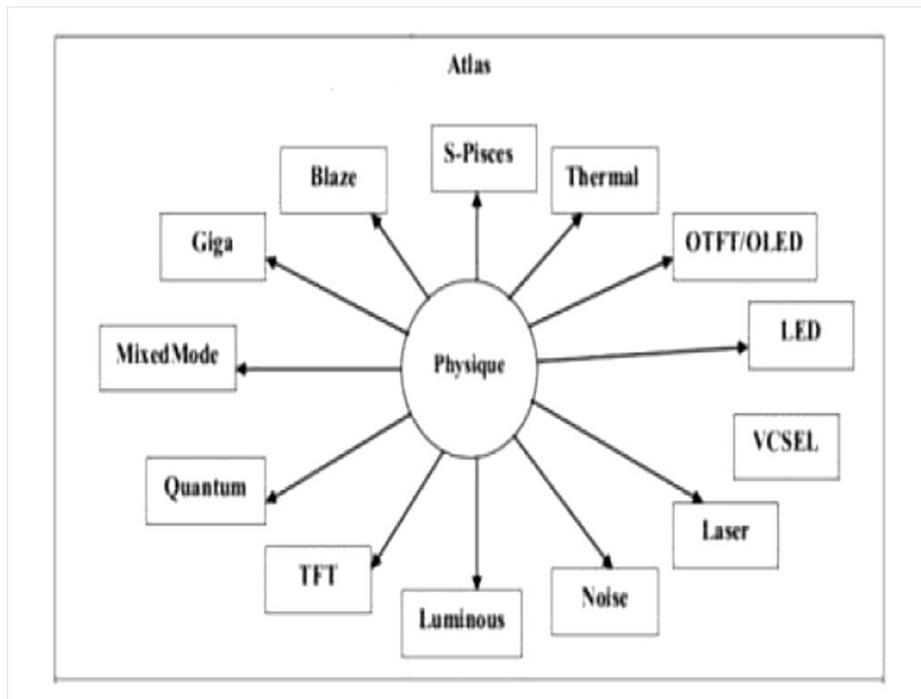
$$\frac{\partial n}{\partial t} = +\frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_n + G_n - R_n \dots\dots\dots (3.4)$$

Où  $J_n$  et  $J_p$  sont les densités de courant des électrons et des trous,  $G_p$  et  $G_n$  les taux de génération pour les trous et les électrons,  $R_n$  et  $R_p$  sont les taux de recombinaisons pour les électrons et les trous.

### 3.3. Modules de simulation ATLAS et ATHENA

#### 3.3.1. Module ATLAS

Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle de composants capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semiconducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel. En plus du comportement électrique "externe", il fournit des informations sur la distribution interne de variables telles que les concentrations des porteurs, les lignes de courant, le champ électrique ou le potentiel, etc. autant de données importantes pour la conception et l'optimisation des procédés technologiques. Ceci est réalisé en résolvant l'équation de Poisson et les équations de continuité des électrons et des trous en deux ou trois dimensions en un nombre fini de points formant le maillage de la structure [4]. La figure 3.1 comporte les composantes d'ATLAS.



**Figure 3.1** Composantes d'ATLAS [5][6].

### 3.3.2. Entrées et Sorties d'ATLAS

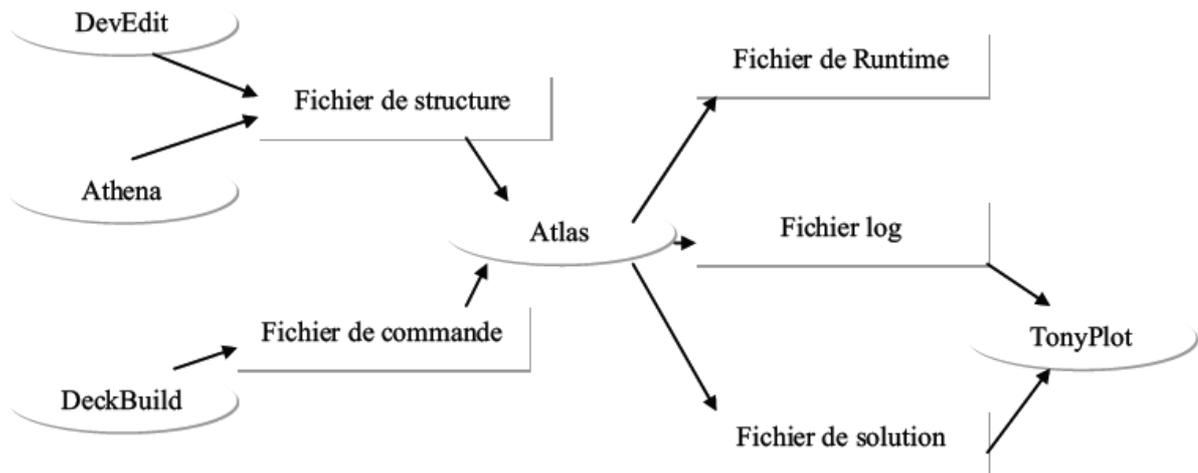
Ce simulateur est composé de deux parties :

- Une partie de traitement numérique (méthode d'intégration, de discrétisation...),
- Une partie formée des modèles physiques des composants semiconducteurs les plus récents : modèles de recombinaisons, d'ionisation par impact, de mobilités en fonction de la température et statistiques de Fermi-Dirac et de Boltzmann notamment. ATLAS a été conçu de façon à pouvoir utiliser d'autres outils qui facilitent son utilisation. Ces outils sont les suivants :

- DEVEDIT : environnement où est dessinée la structure (dimension, dopage, ...) et son maillage,
- DECKBUILD : environnement où est défini le programme de simulation. La structure et son maillage peuvent également être définis dans Deckbuild,
- TONYPLOT : environnement où sont visualisés les résultats de simulations (structure du composant, distributions de grandeurs diverses dans celui-ci, caractéristiques électriques...),
- MASKVIEW : éditeur de layout,

- OPTIMIZER : optimise les paramètres de la structure de façon à obtenir en final la valeur du paramètre que nous lui avons définie au préalable.

Dans la figure 3.2 sont représentés les types d'informations qui circulent en entrée et en sortie d'ATLAS.



**Figure 3.2** Entrées et sorties d'ATLAS.

### 3.3.3. Module ATHENA

Le logiciel ATHENA de TCAD SILVACO fournit des possibilités générales pour la simulation des procédés utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs : diffusion, oxydation, implantation ionique, gravure, lithographie, procédés de dépôt. Il permet des simulations rapides et précises de toutes les étapes de fabrication utilisées dans la technologie pour plusieurs composants électronique, optoélectronique et composants de puissance [6]. Il permet de fournir des informations importantes pour la conception et procédés technologiques telles que les concentrations des porteurs, les profondeurs de jonctions ... etc. Le programme de simulation du processus technologique et les phénomènes physiques s'établit avec le module DECKBUILD de TCAD-SILVACO, puis la visualisation de la structure de sortie s'effectue avec le module TONYPLOT .

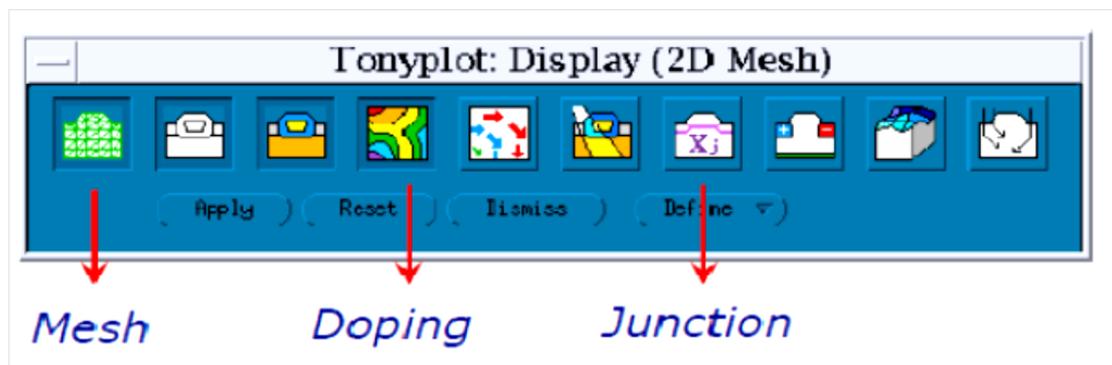
### 3.3.3.1. Outils interactifs d'ATHENA

- **DECKBUILD**

C'est l'environnement où est défini le programme de simulation à travers des commandes spécifiques. De multiples simulateurs peuvent être utilisés avec DECKBUILD, chaque outil de simulation possède son propre langage de programmation.

- **TONYPLOT**

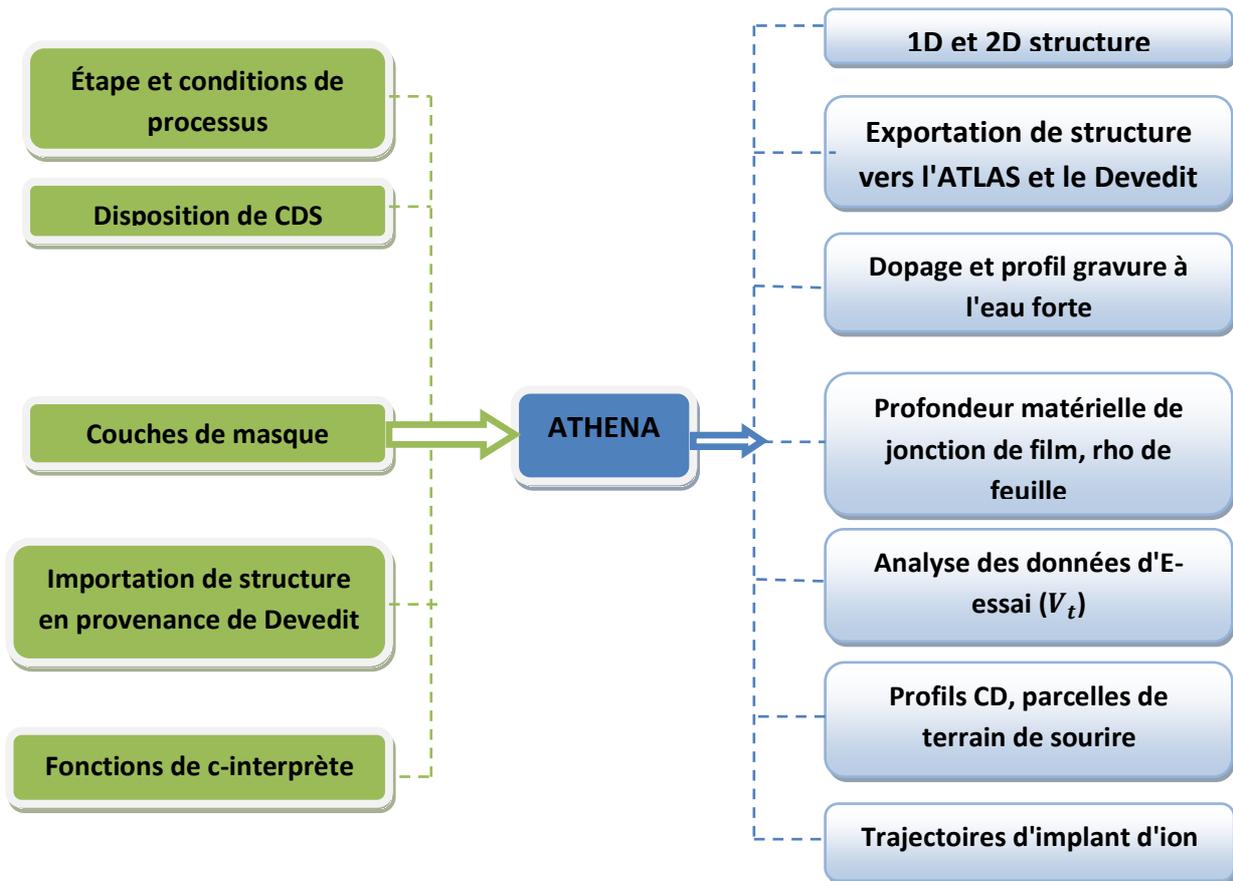
C'est l'environnement où sont visualisés les résultats des simulations. Il donne des possibilités complètes pour la visualisation et l'analyse des caractéristiques de sortie (structure du composant électronique, profil de dopage, et caractéristiques électriques). Selon le programme de simulation, TONYPLOT peut donner des caractéristiques de sortie en une dimension (1D), deux dimensions (2D), ou trois dimensions (3D). Figure 3.3 montre les icônes liés à la simulation d'une structure dans TONYPLOT.



**Figure 3.3** Environnement TONYPLOT.

### 3.3.3.2. Entrées et Sorties d'ATHENA

Le schéma de la figure 3.4 décrit les entrées et sorties d'ATHENA.



**Figure 3.4** Entrées et les sorties d'ATHENA.

### 3.4. Logique de programmation

Après la présentation du logiciel TCAD-SILVACO, sa composition interne et le fonctionnement d'ATHENA et ATLAS, nous allons maintenant présenter l'ordre des commandes propres à la logique de programmation d'ATLAS. Il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés correctement (voir figure 3.5). Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparaît et le programme ne s'exécute pas d'une façon correcte. Par exemple, si les paramètres ou les modèles de matériaux ne sont pas placés dans l'ordre approprié, le simulateur ne les prend pas en considération.

<i>Group</i>		<i>Statements</i>
1. Structure Specification	————	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Material Models Specification	————	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Numerical Method Selection	————	METHOD
4. Solution Specification	————	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Results Analysis	————	EXTRACT TONYPLOT

**Figure 3.5** Ordre des groupes de commandes fondamentales dans le logiciel ATLAS.

### 3.5. Etapes de simulation dans SILVACO

#### 3.5.1. Spécification de la structure

- **Maillage :**

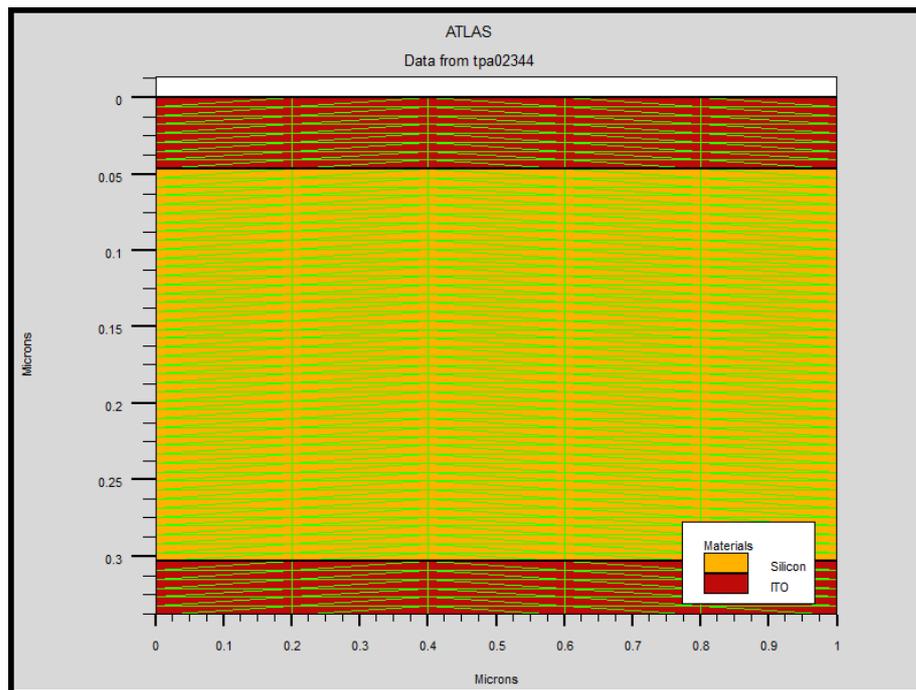
- MESH : cette commande génère un maillage ou lit un maillage qui a été défini auparavant.

Le format général de définition de maillage est:

X.MESH LOCATION = <VALUE> SPACING = <VALUE>

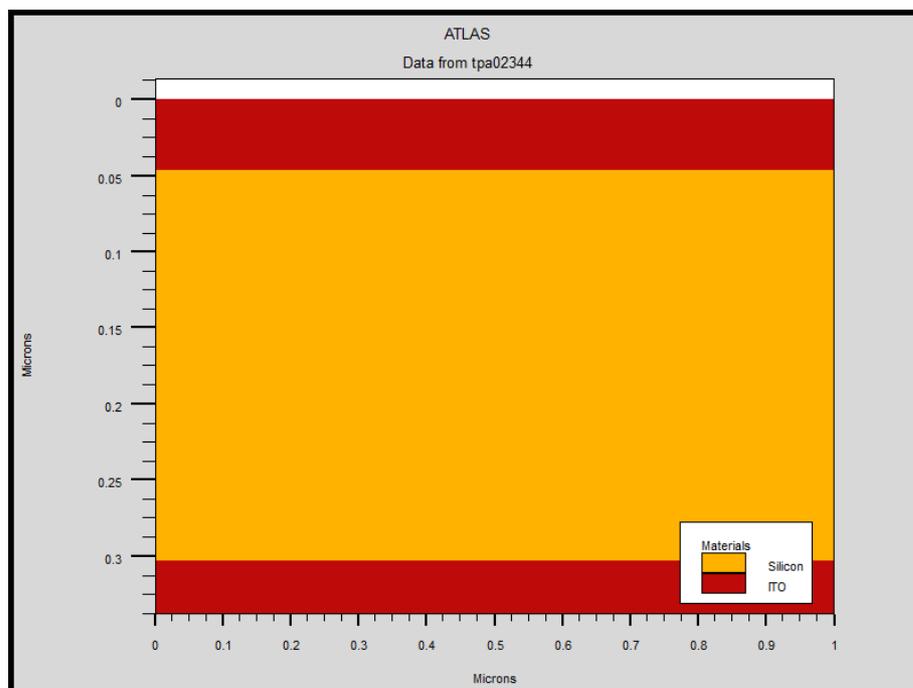
Y.MESH LOCATION = <VALUE> SPACING = <VALUE>

La figure 3.6 est un maillage d'une structure effectuée dans ATLAS.



**Figure 3.6** Maillage d'une cellule solaire dans Atlas.

- **REGION :**



**Figure 3.7** Matériaux et les régions d'une cellule solaire amorphe.

La figure 3.7 sont représentées des régions d'une structure et qui sont effectuées par Atlas.

Après avoir défini le maillage, il est nécessaire de définir les régions dont le format de définition des régions est le suivant:

REGION nombre = <integer> <material\_type> < position des paramètres >.

- **ELECTRODE**

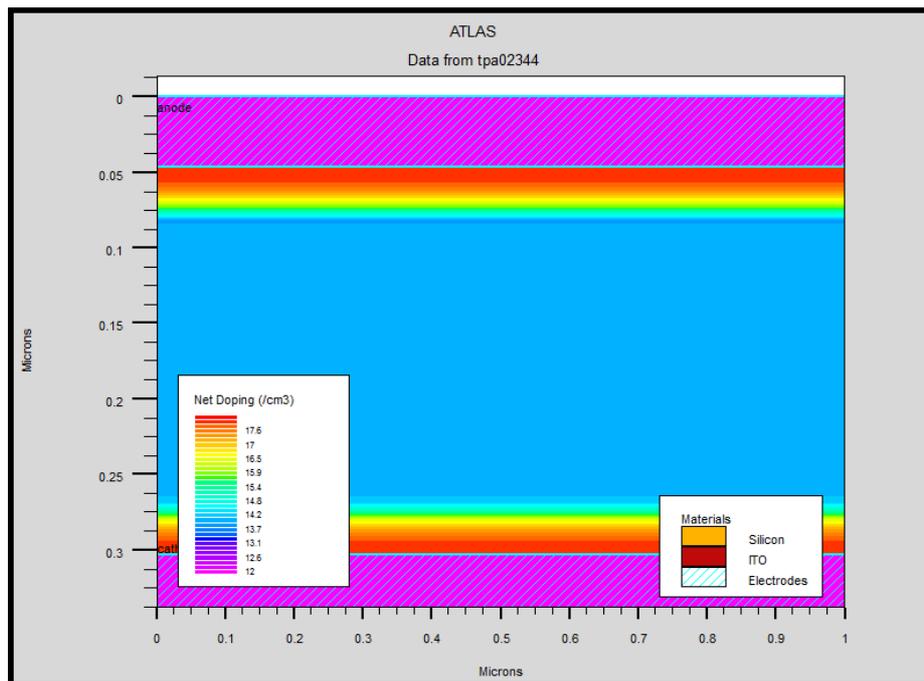
Atlas a une limite de 50 électrodes qui peuvent être définies. Le format de définition d'électrodes est comme suit:

ELECTRODE NAME = < nom de l'électrode > < position des paramètres >

De la figure 3.8, nous avons:

```
elec num=1 name=anode y.max=0.05 material=ITO
```

```
elec num=2 name=cathode y.min=0.30 y.max=0.35 material=ITO
```



**Figure 3.8** Electrodes d'une cellule solaire amorphe.

- **DOPING :**

Le dernier aspect de la spécification de la structure qui doit être défini est le dopage.

Le format de la déclaration de dopage dans « Atlas » se présente comme suit:

DOPING < type de distribution > < type de dopant > < position des paramètres >

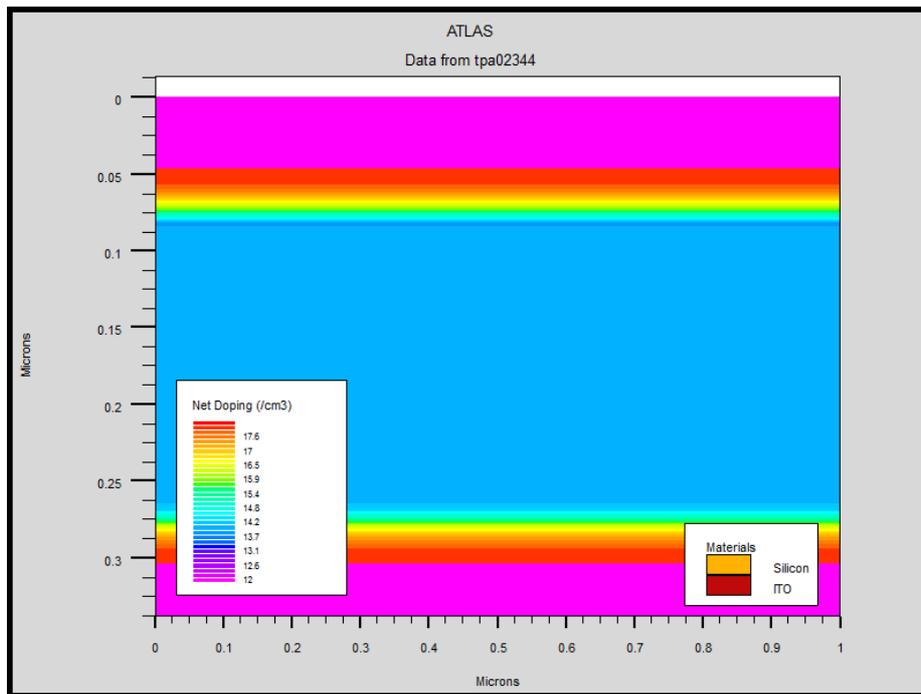
Exemple :

```
Doping uniform conc=1e14 n.type
```

```
Doping gaus peak=0.05 char=0.01 conc=1e18 p.type dir=y
```

```
Doping gaus peak=0.30 char=0.01 conc=1e18 n.type dir=y
```

La figure 3.9 représente la distribution du dopage dans une structure.



**Figure 3.9** Dopage d'une cellule solaire amorphe hydrogénée.

### 3.5.2. Spécification des modèles de couches

- **MATERIAL**

Le format de la déclaration du matériau est le suivant :

MATERIAL < localisation > < définition du matériau >

- **MODELS**

Nous pouvons citer comme modèles physiques dans ATLAS :

-Mobilités des porteurs de charges, mécanismes de génération-recombinaison, les statistiques de transport, l'ionisation par impact et l'effet tunnel.

-La syntaxe de la déclaration du modèle est la suivante:

MODEL< paramètres générales > < paramètres du modèle >

-Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation.

Exemple : SRH FLDMOB CONMOB

SRH est le modèle de Shockley-Read-Hall.

CONMOB est le modèle de la mobilité dépendante de la concentration.

FLDMOB est le modèle de la mobilité dépendante du champ électrique.

- **CONTACT**

Le contact détermine les attributions des électrodes. La syntaxe du contact est la suivante :

Contact NAME = < name >

Exemple :

CONTACT NAME = anode

- **INTERFACE**

Les limites du semi-conducteur ou de l'isolant sont déterminées dans la déclaration d'interface. La syntaxe est la suivante:

INTERFACE <parameters>

- **BEAM**

La lumière est modélisée dans ATLAS par la déclaration :

BEAM <parameters>

L'origine du faisceau lumineux est défini par parameters en indiquant ces paramètres X.ORIGIN et Y.ORIGIN, le paramètre ANGLE spécifie la direction de propagation du faisceau relativement à l'axe x tandis que ANGLE=90 décrit que l'illumination est verticale à partir de la surface supérieure de la cellule solaire [7].

### 3.5.3. Sélection de la méthode numérique

- **METHOD**

Après la précision du modèle de matériaux, la sélection de la méthode numérique doit être indiquée. Parmi les différentes méthodes numériques de résolution des systèmes d'équation, trois types de techniques sont utilisées dans Silvaco-Atlas:

- Méthode de Gummel
- Méthode de Newton
- Méthode des blocs

L'exemple suivant illustre l'utilisation de la déclaration de méthode :

```
METHOD Newton
```

Dans cet exemple, les équations sont résolues par la méthode NEWTON.

- LOG : Log enregistre toutes les caractéristiques terminales dans un fichier de données.

L'exemple suivant montre un exemple d'utilisation de l'instruction LOG.

```
LOG OUTFILE = myoutputfile.log
```

L'exemple montre l'enregistrement de données dans le fichier « myoutputfile.log ».

- **SOLVE :**

L'instruction SOLVE suit l'instruction LOG. Elle effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation. Ce qui suit est un exemple de l'instruction SOLVE.

```
SOLVE V2 = 0.8
```

```
SOLVE V2 = 0.9
```

- **LOAD :**

L'instruction LOAD introduit, à partir d'un fichier existant, pour chaque point de polarisation les solutions précédentes en tant que proposition initiale.

- **SAVE :**

L'instruction SAVE permet l'enregistrement de toutes les informations obtenues pour un nœud dans un fichier de sortie

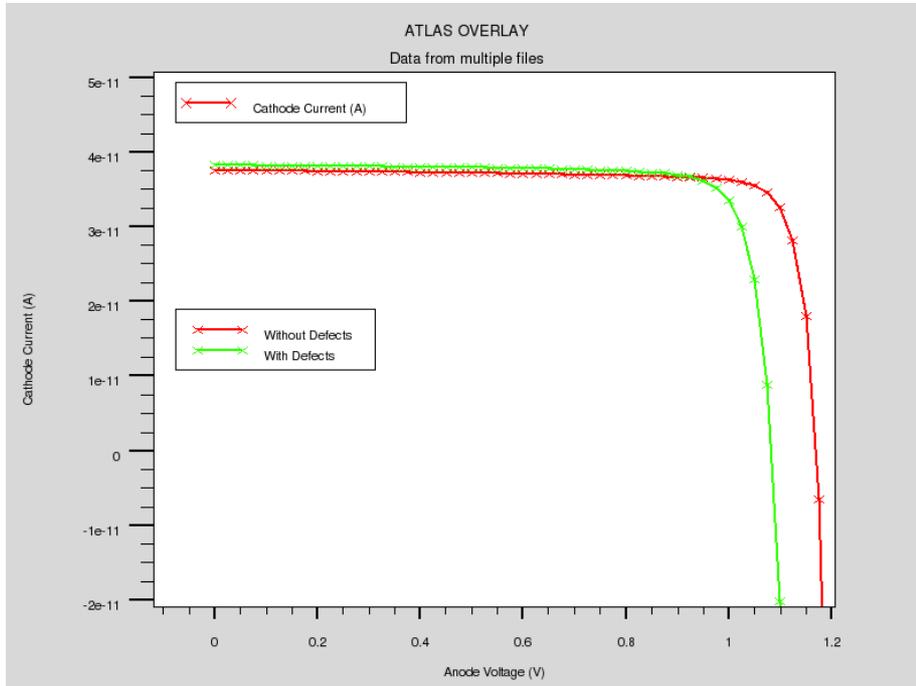
### 3.5.4. Analyse des résultats

- **EXTRACT :**

Cette commande est utilisée pour extraire des valeurs de paramètres bien précis du fichier log et du fichier solution.

- **TONYPLOT :**

Les résultats et les informations obtenues par la simulation peuvent être affichés graphiquement avec " TonyPlot " (exemple figure 3.10) :



**Figure 3.10** Courbe I(V) d'une cellule solaire obtenue par TONYPLOT du logiciel ATLAS.

### 3.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le logiciel de simulation TCAD-SILVACO, les bases physiques du principe de son fonctionnement, son mode de fonctionnement et ces modules de simulation ATHENA et ATLAS utilisés pour la simulation des procédés technologiques et du comportement électrique des composants électroniques. Nous avons aussi donné les différentes commandes (instructions) nécessaires pour la programmation dans ATLAS ainsi que des exemples illustratifs obtenus par le logiciel ATLAS.

# Référence bibliographique

### Référence du chapitre 3

- [1] Silvaco Source: <http://en.wikipedia.org/>
- [2] Athena User's Manual, Silvaco International, 2012.
- [3] Atlas User's Manual, Silvaco International, 2012.
- [4] **H.Michel:** 'Modeling of operation temperature of triple junction solar cells using silvac's Atlas, NAVAL School California 2007.
- [5] **R.Jaeger, M.Gleria :** 'Inorganic polymers' 2007.
- [6] **L.Than and P.J.Balk :** 'Elimination and generation of Si-SiO<sub>2</sub> interface traps by low temperature hydrogen annealing', J.Electrochem.
- [7] **Mansour Hayatte;** 'Simulation numérique d'une cellule solaire à hétérojoncton HIT en silicium par le logiciel T-cad SILVACO (2013).

## Chapitre 4

### Simulation numérique de la cellule solaire et résultats de simulation

## 4.1. Introduction

Le logiciel de simulation Atlas est un simulateur de modélisation des caractéristiques électriques des composants à semiconducteurs, nous allons utiliser ce logiciel pour la simulation électrique de la cellule solaire sujet de notre travail.

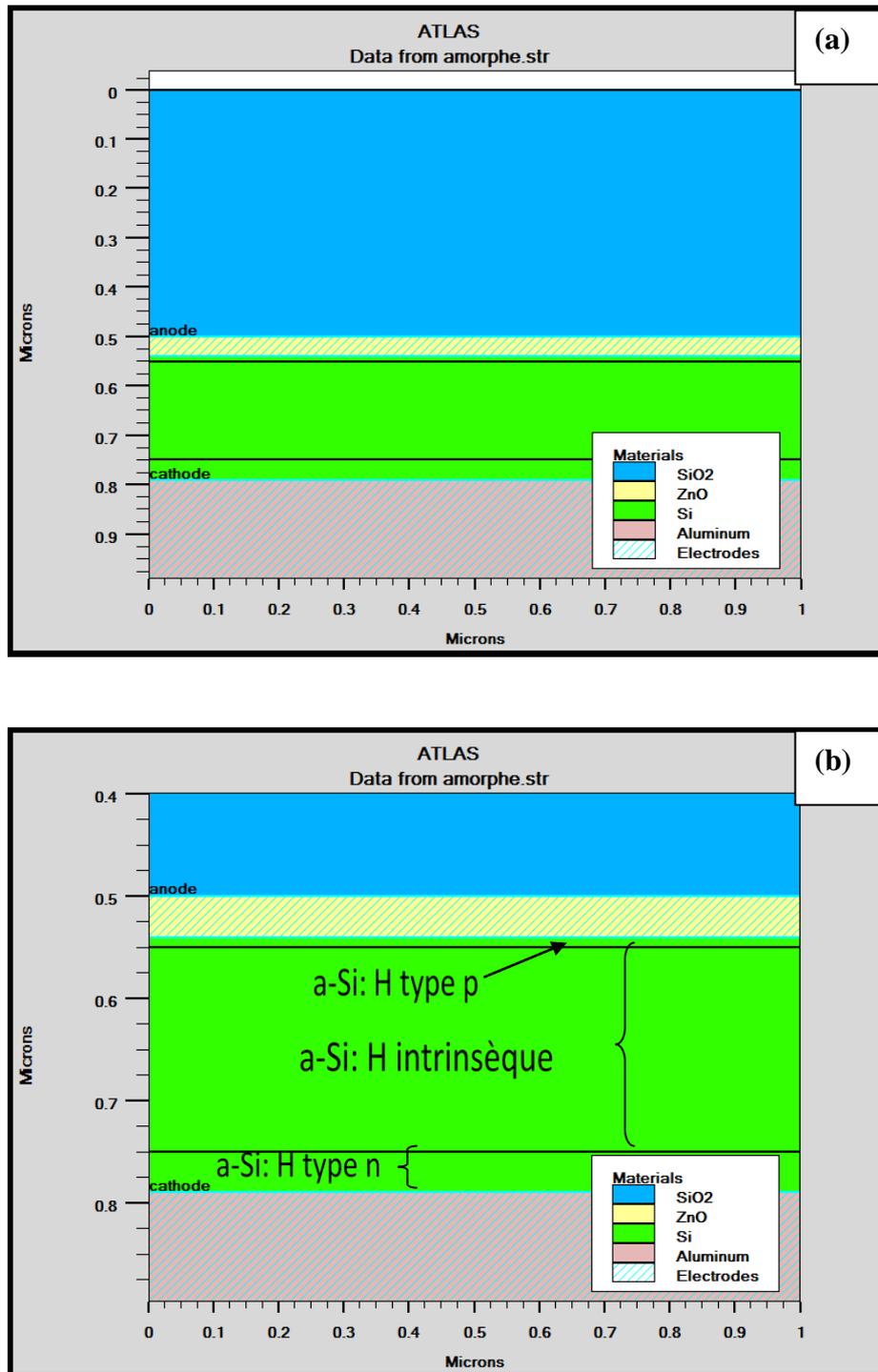
Dans ce chapitre, nous allons premièrement présenter la structure (profil du dopage, diagramme de bandes) de la cellule solaire simulée dans Atlas, après cela nous allons présenter les paramètres physiques des matériaux constituant la cellule solaire ainsi que les modèles utilisés pour la simulation des caractéristiques électriques de la cellule solaire. Dans ce travail nous allons simuler en premier lieu une cellule solaire en a-Si : H de structure PIN et extraire ces caractéristiques électriques et en second lieu nous allons simuler une cellule solaire à hétérojonction, de structure PIN telle que la couche P et la couche N sont en a-Si: H et la couche I en  $\mu\text{-Si: H}$  et extraire ces paramètres photovoltaïques. Une comparaison des caractéristiques électriques (le courant de court circuit, la tension en circuit ouvert, le facteur de forme, le rendement de conversion et le rendement quantique externe) sera aussi présentée dans ce chapitre.

## 4.2. Cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné

### 4.2.1. Structure de la cellule en silicium amorphe hydrogéné

La structure de base d'une pile solaire en a-Si : H est représenté sur la figure 4.1, dans laquelle sont illustrées ses différentes couches.

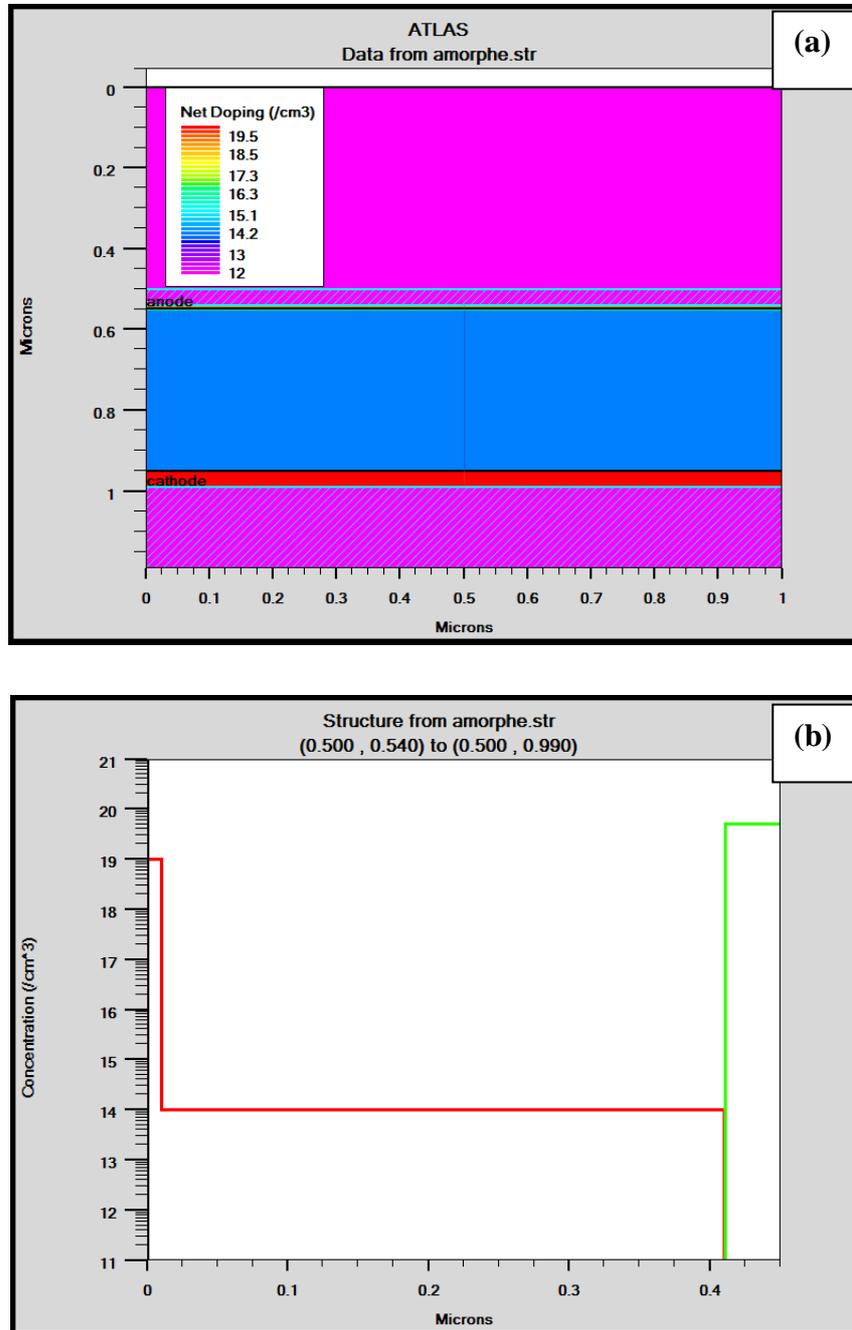
La première couche est en oxyde  $\text{SiO}_2$  et son épaisseur est de  $0.5 \mu\text{m}$ , la deuxième couche en  $\text{ZnO}$  transparente pour améliorer l'absorption des photons dans la cellule et de l'autre côté pour assurer le contact électrique (anode) pour les cellules solaires en couches minces, son épaisseur est de  $0.04 \mu\text{m}$ . La troisième, la quatrième et la cinquième couche représentent les trois régions de la cellule solaire PIN en a-Si :H, la région en a-Si: H de type p est d'épaisseur  $0.01 \mu\text{m}$  avec une concentration des accepteurs  $N_a=10^{19}\text{cm}^{-3}$ , la région en a-Si: H intrinsèque est d'épaisseur  $0.4 \mu\text{m}$ , et la région en a-Si: H de type n est d'épaisseur  $0.04 \mu\text{m}$  avec une concentration des donneurs  $N_d=5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ . La dernière couche représente la cathode de la cellule, elle est en aluminium et son épaisseur est de  $0.2 \mu\text{m}$ .



**Figure 4.1** (a) Structure complète de la cellule solaire en a-Si: H, (b) Structure près des couches PIN de la cellule solaire.

#### 4.2.2. Distribution et Profil du dopage dans la structure

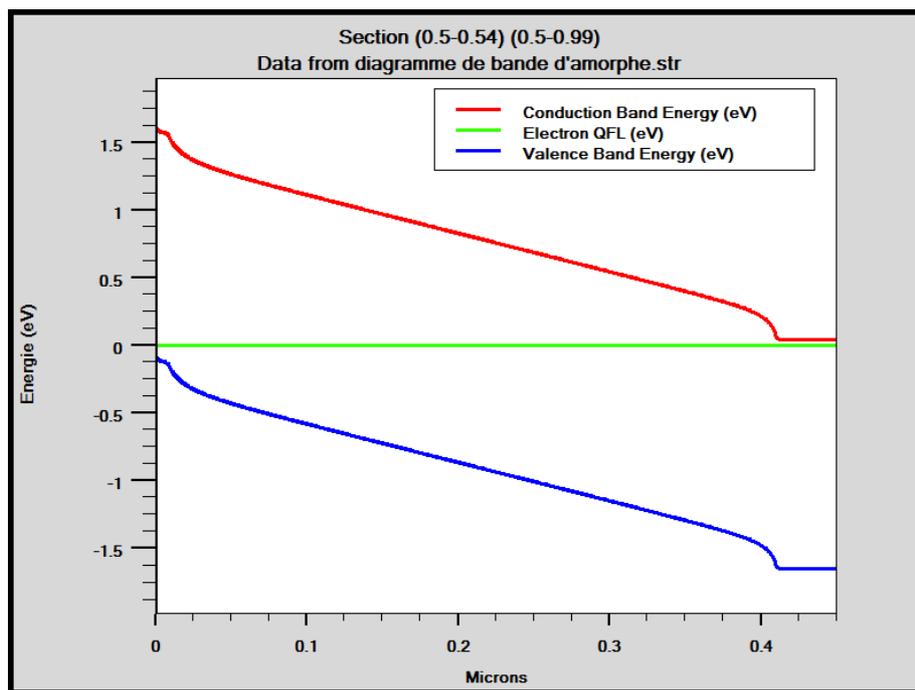
Les figures 4.2 (a)-(b) montrent la distribution et le profil du dopage dans la cellule solaire.



**Figure 4.2** (a) Distribution du dopage dans la cellule solaire en a-Si : H , (b) Profile du dopage du silicium amorphe hydrogéné dans les zones PIN.

### 4.2.3. Diagramme de bandes de la cellule solaire en a-Si : H

Figure 4.3 représente le diagramme de bandes simulé à l'équilibre thermodynamique. C'est une représentation de l'énergie en fonction de l'épaisseur de la cellule solaire dans laquelle figure l'énergie du minimum de la bande de conduction  $E_c$  en couleur rouge, l'énergie du maximum de la bande de valence  $E_v$  en couleur bleu, et le niveau de Fermi  $E_F$  en couleur verte, la position du niveau de Fermi dans le gap dépend du dopage introduit dans le matériau. D'après cette figure, le niveau d'énergie  $E_c = 1.6$  eV, et le niveau  $E_v = -0.1$  eV donc l'énergie du gap  $E_g = E_c - E_v = 1.7$  eV qui correspond à l'énergie du gap d'a-Si : H. Cette énergie du gap de 1.7 eV est la même sur toute l'épaisseur de la cellule solaire. Dans l'intervalle entre 0 et 0.01  $\mu\text{m}$ , le niveau de Fermi est proche de la bande de valence (couche de type p) et dans la gamme entre 0.41 et 0.45  $\mu\text{m}$  le niveau de Fermi est proche de la bande de conduction (couche de type n).



**Figure 4.3** Diagramme de bande de la cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné.

#### 4.2.4. Paramètres d'entrées de la cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné

Pour faire une simulation d'un dispositif il faut définir les paramètres des matériaux employés dans la fabrication de ce dispositif tel que l'énergie du gap  $E_g$  (eV), les concentrations des accepteurs  $N_a$ ( $\text{cm}^{-3}$ ) et des donneurs  $N_d$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) pour les trois régions en a-Si: H (p), a-Si: H (i), a-Si: H (n), les densités des états de la bande de conduction  $N_c$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) et de la bande de valence  $N_v$  ( $\text{cm}^{-3}$ ). En plus de ceci, la mobilité pour les électrons et les trous en ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ ), la permittivité et l'affinité électronique en (eV). Ces paramètres sont définis et groupés dans le tableau 4.1.

Paramètres	a-Si:H (p)	a-Si:H (i)	a-Si:H (n)
Epaisseur ( $\mu\text{m}$ )	0.01	0.4	0.04
$E_g$ (eV)	1.7	1.7	1.7
$N_a$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$10^{19}$	$10^{14}$	0
$N_d$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	0	0	$5 \cdot 10^{19}$
$N_c$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{20}$
$N_v$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{20}$
Mobilité des électrons (trous) ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )	10(4)	10(4)	10(4)
Permittivité	11.9	11.9	11.9
Affinité électronique (eV)	3.89	3.89	3.89

**Tableaux 4.1** Paramètres de la cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné.

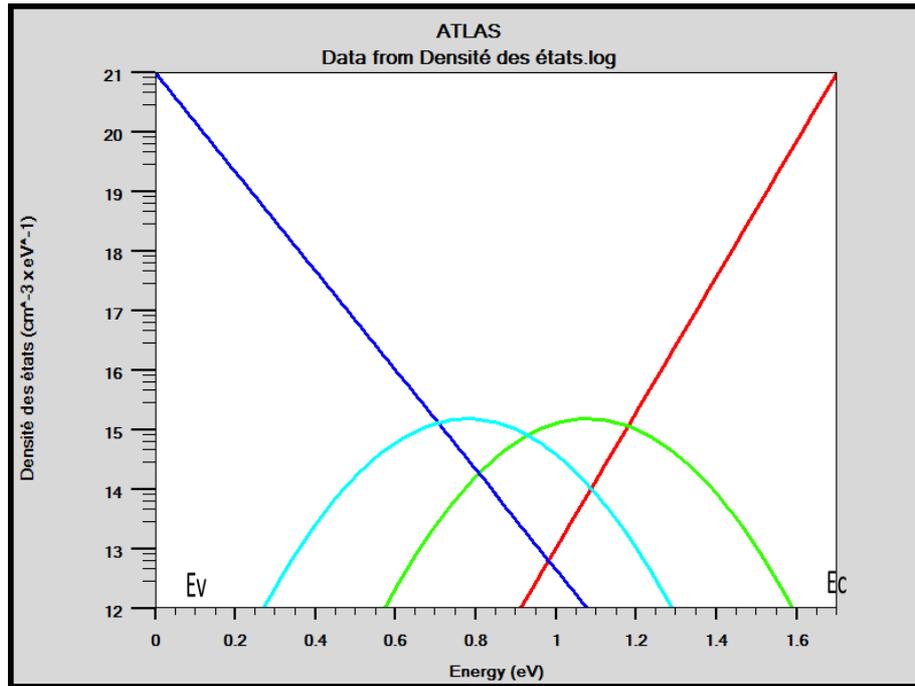
Nous avons aussi groupé les paramètres des défauts du silicium amorphe hydrogéné dans le tableau 4.2 avec NTA et NTD les densités d'états des niveaux d'énergie  $E_c$  et  $E_v$  respectivement et WTA et WTD représentent les énergies caractéristiques des queues de bandes de conduction et de valence respectivement. NGA et NGD sont les densités totales d'états dans les gaussiennes accepteurs et donneurs ; EGA et EGD sont les niveaux d'énergie correspondants aux sommets des gaussiennes accepteurs et donneurs déterminés respectivement à partir de la bande de conduction et de la bande de valence, WGA et WGD sont les écarts type des gaussiennes. SIGTAE and SIGGAE sont les sections de capture des électrons par les états accepteurs de queue de bande et de la gaussienne respectivement. SIGTAH and SIGGAH sont les sections

de capture des trous par les états accepteurs de queue de bande et de la gaussienne respectivement et SIGTDE, SIGGDE, SIGGDH et SIGGDH sont leurs équivalents pour les états donneurs.

Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs
NTA ( $\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ )	$10^{21}$	WGD (eV)	0.188
NTD ( $\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ )	$10^{21}$	SIGTAE	$10^{-16}$
WTA (eV)	0.038	SIGTAH	$10^{-17}$
WTD (eV)	0.052	SIGTDE	$10^{-17}$
NGA ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1.5 \times 10^{15}$	SIGTDH	$10^{-16}$
NGD ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1.5 \times 10^{15}$	SIGGAE	$2 \times 10^{-16}$
EGA (eV)	0.62	SIGGAH	$2 \times 10^{-17}$
EGD (eV)	0.78	SIGGDE	$2 \times 10^{-17}$
WGA (eV)	0.188	SIGGDH	$2 \times 10^{-16}$

**Tableau 4.2** Paramètres des défauts du silicium amorphe hydrogéné.

La figure 4.4 représente la distribution des états des queues de bande de conduction et de valence et les deux gaussiennes pour les états accepteurs et les états donneurs dans l'a-Si: H.



**Figure 4.4** Diagramme de la densité d'états de l'a-Si: H.

Les modèles que nous avons utilisés dans notre simulation sont décrits dans la documentation Silvaco et dans la littérature [1]. Le modèle de recombinaison est le modèle de Shockley-Read-Hall (SRH) [1], nous avons aussi utilisé la méthode de Newton pour la résolution numérique dans Atlas. A chaque itération, le système des équations est résolu ensemble. La simulation électrique de la cellule solaire démarre par une polarisation nulle sur toutes les électrodes (état de l'équilibre thermodynamique). Une fois la solution de l'état de l'équilibre thermodynamique est trouvée, elle est utilisée pour l'initialisation de la cellule à l'état illuminé et polarisé. Les solutions obtenues sont assurées soit par une interface graphique (TONYPLOT) ou par extraction des résultats.

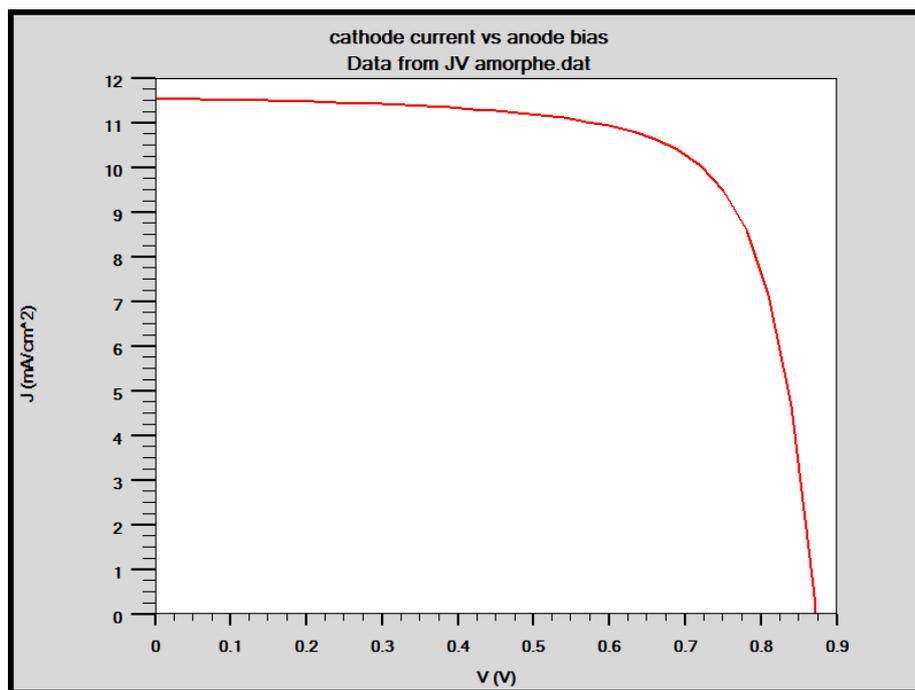
## 4.2.5. Caractéristiques électriques de la cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné

### 4.2.5.1. Caractéristiques courant-tension et puissance-tension

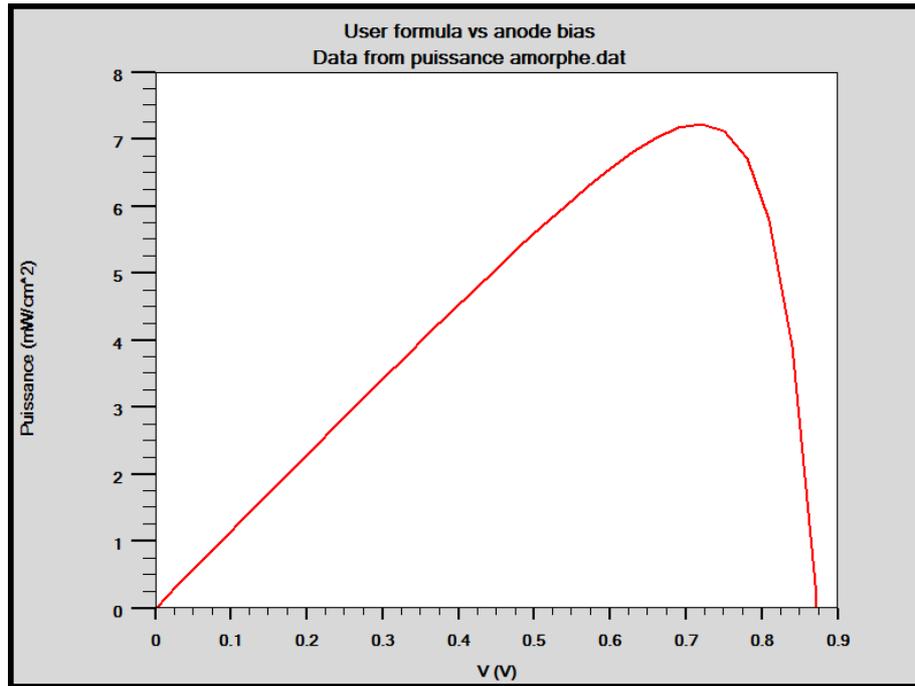
Les caractéristiques électriques de la densité de courant  $J(V)$  et de la densité de puissance  $P(V)$  sous illumination par le spectre solaire AM1.5 d'intensité  $100 \text{ mW/cm}^2$  sont représentées sur les figures 4.5 et 4.6.

A partir de la caractéristique  $J(V)$  nous pouvons déterminer la tension en circuit ouvert  $V_{co} = 0.87 \text{ V}$  et la densité de courant de court-circuit  $J_{cc} = 11.54 \text{ mA/cm}^2$ .

La densité de puissance délivrée par la cellule a pour expression  $P = J.I$ , pour chaque point de la figure 4.5, on peut calculer la puissance  $P$  et tracer la courbe  $P = f(V)$  (figure 4.6).



**Figure 4.5** Caractéristique  $J(V)$  de la cellule solaire en a-Si : H.



**Figure 4.6** Caractéristique P(V) de la cellule solaire en a-Si : H.

D'après ces deux figures nous avons déduit les paramètres de la cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné qui sont groupés dans le tableau 4.3.

Paramètres	$J_{cc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{co}$ (V)	$I_m$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_m$ (V)	$P_m$ (mW/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)
Valeurs	11.54	0.87	10.04	0.72	7.22	71.84	7.22

**Tableau 4.3** Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné.

Le rendement qu'est égale à 7.23% est en bon accord avec le rendement trouvé expérimentalement entre 5 et 7% pour une cellule solaire en a-Si :H.

#### 4.2.6. Effet de l'épaisseur

Il est important d'avoir une épaisseur de silicium suffisante pour absorber un maximum de la lumière qui traverse la couche i.

En effet, le silicium amorphe a un fort coefficient d'absorption et la lumière absorbée dans cette couche défectueuse serait perdue.

Nous avons étudié l'influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque sur les paramètres de sortie de la cellule. Pour cela nous avons fait varier l'épaisseur de 0.2  $\mu\text{m}$  à 0.5  $\mu\text{m}$ . Les résultats sont présentés dans le tableau 4.4.

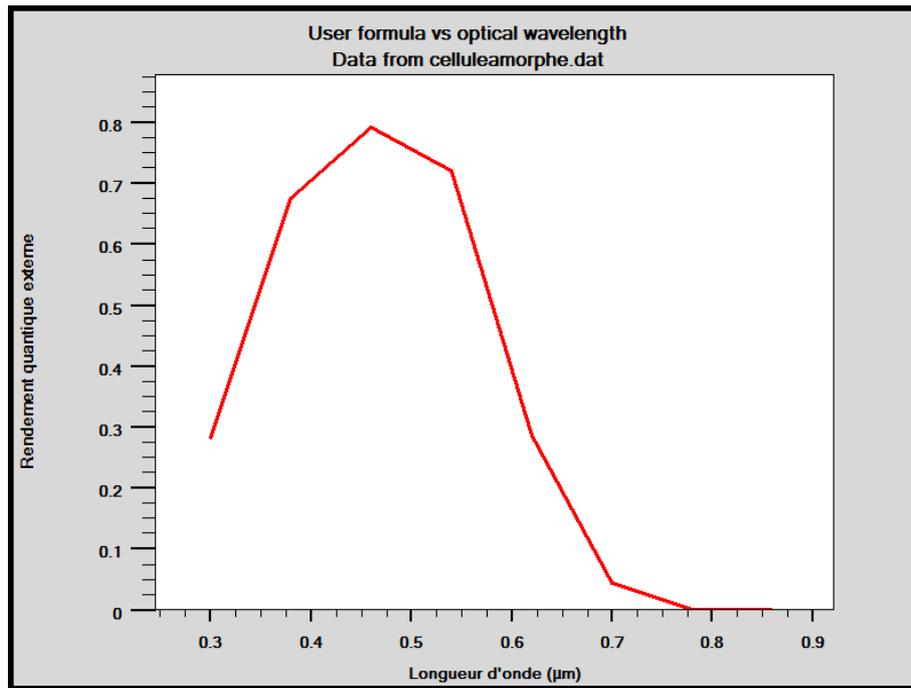
Paramètre Epaisseur ( $\mu\text{m}$ )	$J_{cc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	$V_{co}$ (V)	FF (%)	$\eta$ (%)
0.2	9.82	0.89	78.70	6.93
0.3	10.87	0.88	75.66	7.24
0.4	11.54	0.87	71.84	7.22
0.5	11.97	0.86	67.84	7.03

**Tableau 4.4** Effet de l'épaisseur de la couche intrinsèque sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en a-Si: H.

Le tableau 4.4 indique que le rendement atteint son maximum 7.24% pour une épaisseur de 0.3  $\mu\text{m}$ , puis subit une diminution pour une épaisseur entre 0.4 et 0.5  $\mu\text{m}$ . Par ailleurs,  $V_{co}$  est presque constante avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche intrinsèque.  $J_{cc}$  augmente avec l'épaisseur de la couche intrinsèque et atteint sa valeur 11.97  $\text{mA}/\text{cm}^2$  pour une épaisseur de 0.5  $\mu\text{m}$ . le facteur de forme diminue avec l'augmentation de l'épaisseur et atteint la valeur 67.84 % pour une épaisseur 0.5  $\mu\text{m}$ .

#### 4.2.7. Réponse spectrale

La figure 4.7 représente le rendement quantique externe de la cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné. Nous remarquons que le rendement présente un maximum dans une gamme de longueurs d'onde de la lumière entre 0.4 et 0.55  $\mu\text{m}$  puis il chute aux basses et aux hautes longueurs d'onde. A partir de cette figure, le rendement quantique externe s'annule pour une longueur d'onde de l'ordre de 0.78  $\mu\text{m}$  qui correspond bien à la longueur d'onde seuil  $\lambda_{seuil} = 0.72 \mu\text{m}$  du spectre solaire pour le silicium amorphe hydrogéné.

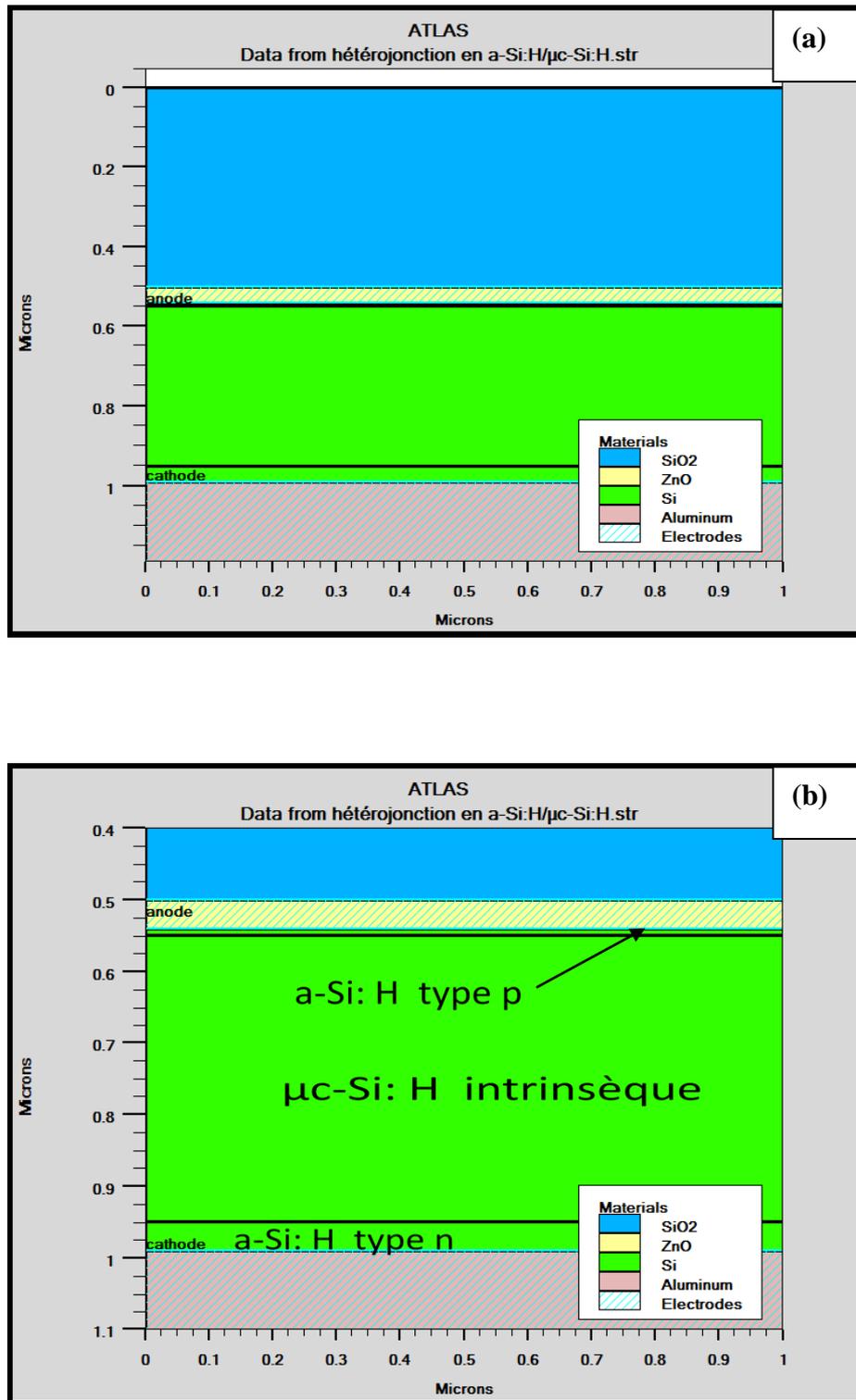


**Figure 4.7** Rendement quantique externe la cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné.

### 4.3. Cellule solaire à hétérojonction en a-Si : H/ $\mu$ c-Si : H

#### 4.3.1. Structure de la cellule à hétérojonction

La structure de base de la nouvelle pile solaire en a-Si : H/ $\mu$ c-Si : H est représenté sur la figure 4.8. Elle est la même que la structure de la cellule solaire en a-Si: H sauf que nous avons remplacé la couche intrinsèque en a-Si: H par une couche en  $\mu$ c-Si :H.



**Figure 4.8** (a) Structure générale de la cellule solaire à hétérojonction a-Si: H/μc-Si: H (b) Structure près des couches PIN de la cellule solaire à hétérojonction.

### 4.3.2. Diagramme de bande

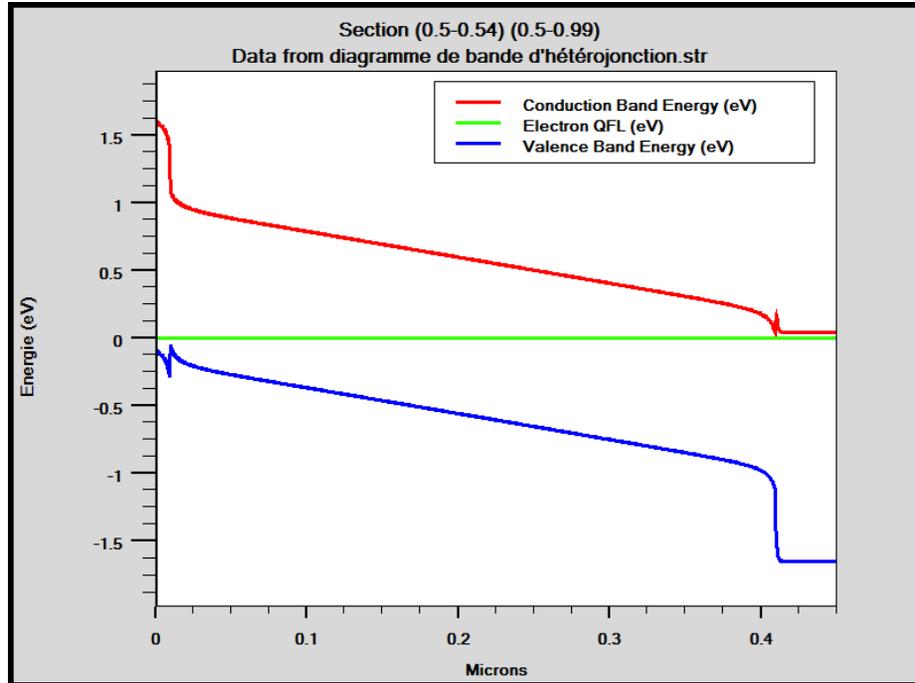
Le diagramme de bande (figure 4.9) de notre nouvelle cellule à hétérojonction est presque le même diagramme de la cellule en silicium amorphe hydrogéné, la seule différence réside dans l'énergie du gap du  $\mu\text{c-Si}:\text{H}$  de l'ordre de 1.1 eV.

Entre [0 - 0.01  $\mu\text{m}$ ], on remarque que  $E_c = 1.6$  eV et  $E_v = -0.1$  eV, donc  $E_g = 1.7$  eV qui correspond à l'énergie du gap du silicium amorphe hydrogéné (la couche p en a-Si:H).

Entre [0.01 - 0.025  $\mu\text{m}$ ], on remarque qu'il y a une création d'un pic près de 0.01  $\mu\text{m}$ , Les valeurs des énergies :  $E_c = 1$  eV et  $E_v = -0.1$  eV, donc  $E_g = 1.1$  eV qui correspond à l'énergie du gap du silicium microcristallin (la couche intrinsèque en  $\mu\text{c-Si}:\text{H}$ ).

Entre [0.41 - 0.45  $\mu\text{m}$ ], on remarque qu'il y a une création d'un autre pic près de 0.41  $\mu\text{m}$ . Les valeurs des énergies :  $E_c = 0.1$  eV et  $E_v = -1.6$  eV, donc  $E_g = 1.7$  eV qui correspond à l'énergie du gap du a-Si:H (la couche n en a-Si:H).

L'apparition des pics revient à la transition d'énergie du gap d'un matériau à un autre matériau (hétérojonction).



**Figure 4.9** Diagramme de bandes de la cellule solaire à hétérojonction en a-Si:H/ $\mu\text{c-Si}:\text{H}$ .

### 4.3.3. Paramètres d'entrées de la cellule à hétérojonction a-Si : H/ $\mu$ c-Si : H

Les paramètres d'entrées de notre cellule d'a-Si : H/ $\mu$ c-Si : H sont représentés dans le tableau 4.5.

Nous avons défini ces paramètres tels que la bande du gap d'a-Si : H/ $\mu$ c-Si : H qu'est égale 1.16 eV, les concentrations de les densités des états de la bande de conduction  $N_c$  et de la bande de valence  $N_v$  en  $\text{cm}^{-3}$ , la mobilité des électrons et des trous en  $\text{cm}^2/\text{V.s}$ , et la durée de vie des électrons et des trous en s, la permittivité et l'affinité électronique en eV.

Paramètres	a-Si: H (p)	$\mu$ c-Si: H (i)	a-Si: H (n)
Epaisseur ( $\mu\text{m}$ )	0.01	0.4	0.04
$E_g$ (eV)	1.7	1.1	1.7
$N_a$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$10^{19}$	0	0
$N_d$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	0	0	$5 \times 10^{19}$
$N_c$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2 \times 10^{20}$	$3.5 \times 10^{20}$	$2 \times 10^{20}$
$N_v$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2 \times 10^{20}$	$3.5 \times 10^{20}$	$2 \times 10^{20}$
Mobilité des électrons (trous) ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )	10(4)	40(4)	10(4)
Permittivité	11.9	11.8	11.9
Affinité électronique (eV)	3.89	4.17	3.89

**Tableau 4.5** Paramètres d'entrées de la cellule à hétérojonction a-Si : H/ $\mu$ c-Si : H.

Nous avons présenté les paramètres des défauts de la couche en  $\mu$ c-Si: H dans le tableau 4.6.

Paramètres	Valeurs
NTA ( $\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ )	$5 \times 10^{19}$
NTD ( $\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ )	$5 \times 10^{19}$
WTA (eV)	0.01
WTD (eV)	0.02
SIGTAE	$10^{-16}$
SIGTAH	$10^{-17}$
SIGTDE	$10^{-17}$
SIGTDH	$10^{-16}$

**Tableau 4.6** Paramètres des défauts de la couche en  $\mu\text{-Si}:\text{H}$ .

#### 4.3.4. Caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction en a-Si : H/ $\mu\text{-Si}:\text{H}$

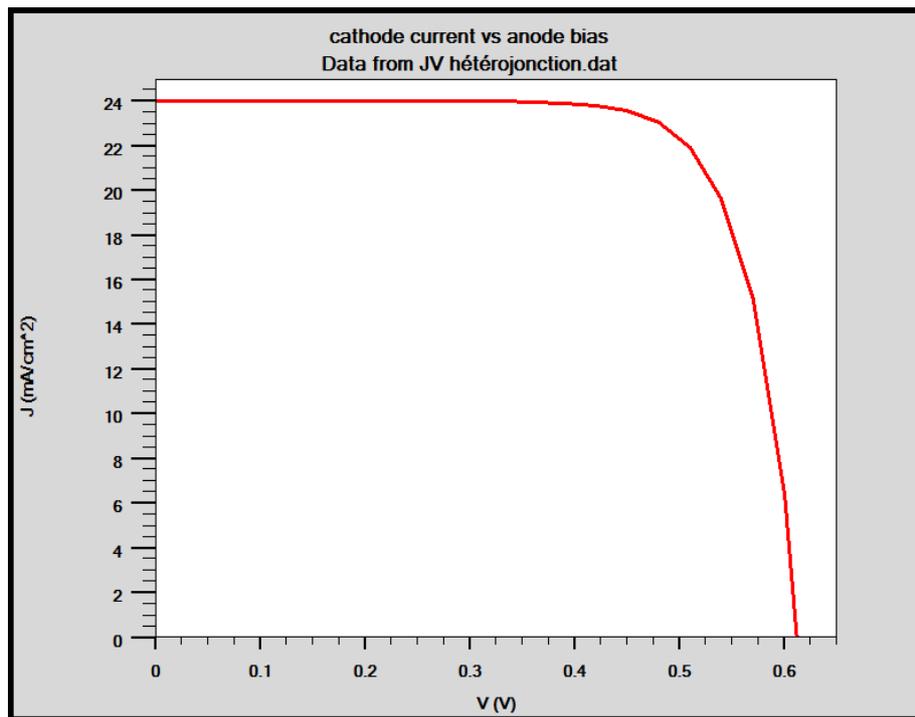
##### 4.3.4.1. Caractéristiques courant-tension et puissance-tension

La figure 4.10 représente la densité de courant en fonction de la tension pour la cellule solaire à hétérojonction en a-Si : H/ $\mu\text{-Si}:\text{H}$ , où la tension de circuit ouvert  $V_{\text{co}} = 0.61 \text{ V}$ , et la densité de courant de court-circuit  $J_{\text{cc}} = 24.04 \text{ mA/cm}^2$ .

La figure 4.11 représente la densité de puissance de la cellule solaire à hétérojonction en a-Si : H/ $\mu\text{-Si}:\text{H}$  en fonction de la tension.

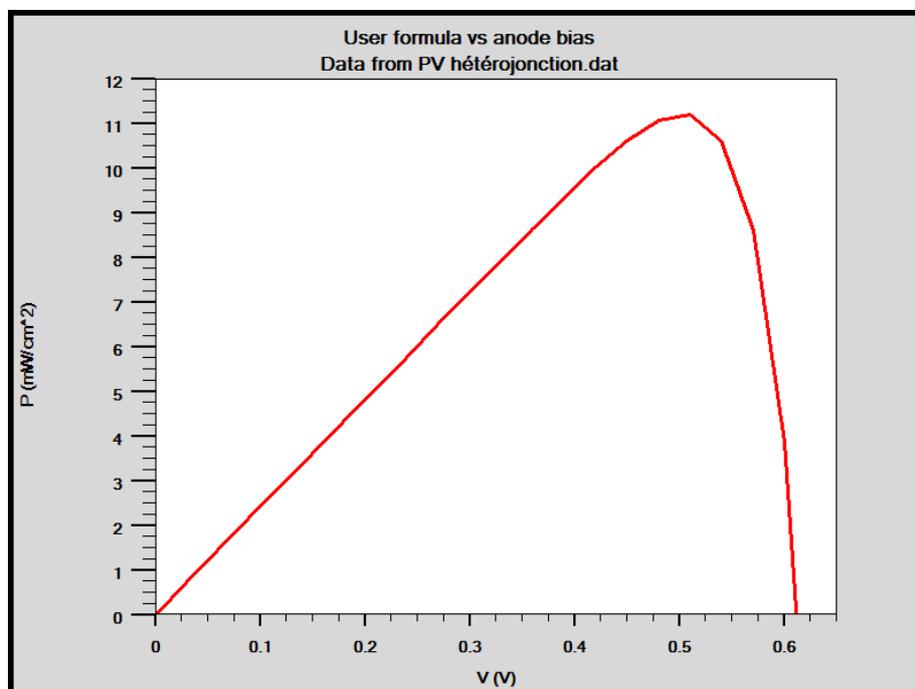
Le nouveau point de la densité de puissance maximale, est défini pour  $I_{\text{m}} = 21.94 \text{ mA/cm}^2$  et  $V_{\text{m}} = 0.51 \text{ V}$ .

Nous pouvons voir qu'il y'a une amélioration de la densité de courant-circuit, de la puissance maximale, et une diminution de la tension en circuit-ouvert pour la cellule solaire à hétérojonction a-Si : H/ $\mu\text{-Si}:\text{H}$  en comparaison avec la cellule solaire amorphe.



**Figure 4.10** Caractéristique  $J(V)$  de la cellule solaire à hétérojonction a-Si: H/ $\mu\text{c-Si}$ :

H.



**Figure 4.11** Caractéristique  $P(V)$  de la cellule solaire à hétérojonction a-Si: H/ $\mu\text{c-Si}$ :

H.

### 4.3.5. Effet de l'épaisseur de la couche en $\mu\text{-Si : H}$ sur la cellule solaire à hétérojonction

Pour déterminer l'effet des paramètres technologiques telle que l'épaisseur sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire, nous choisissons d'étudier les variations de l'épaisseur de la couche intrinsèque en  $\mu\text{-Si :H}$  sur les paramètres et son importance dans la détermination des performances de la cellule solaire.

Nous avons varié l'épaisseur de la couche intrinsèque dans la gamme entre de 0.1  $\mu\text{m}$  à 0.8  $\mu\text{m}$ . Dans le tableau 4.7 sont groupées les variations des paramètres photovoltaïques de la cellule avec la variation de l'épaisseur.

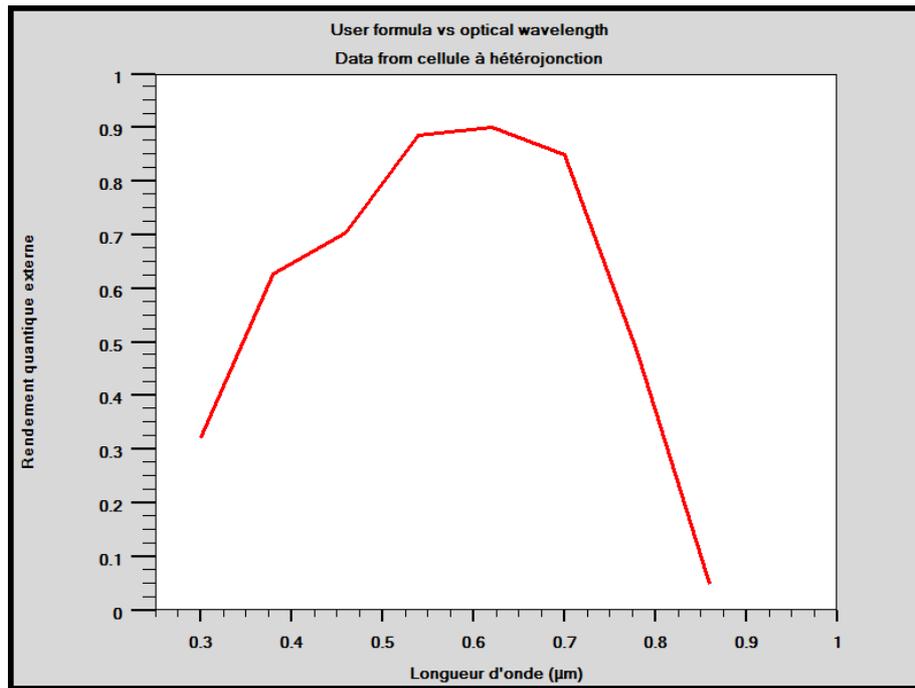
Paramètres Epaisseur $\mu\text{m}$	$J_{cc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	$V_{co}$ (V)	FF (%)	$\eta$ (%)
0.1	18.07	0.68	78.95	9.69
0.2	20.94	0.64	77.81	10.51
0.3	22.10	0.63	76.59	10.91
0.4	24.04	0.61	76.11	11.19
0.5	25.13	0.61	75.17	11.39
0.6	26.08	0.59	74.98	11.62
0.7	26.93	0.58	74.65	11.91
0.8	27.71	0.58	74.05	11.91

**Tableau 4.7** Effet de la variation de l'épaisseur de la couche intrinsèque sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à hétérojonction.

On remarque que le courant de court-circuit croît rapidement avec l'augmentation de l'épaisseur. Nous avons reporté l'influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque sur la tension en circuit ouvert; nous remarquons que  $V_{co}$  diminue avec l'augmentation de l'épaisseur, et que le facteur de forme est presque constant avec l'augmentation de l'épaisseur, de plus le rendement photovoltaïque croît rapidement avec l'augmentation de l'épaisseur. De ce tableau nous constatons que le rendement prend sa valeur optimale pour une épaisseur 0.7  $\mu\text{m}$ , à partir de cette valeur le rendement est constant.

### 4.3.6. Réponse spectrale

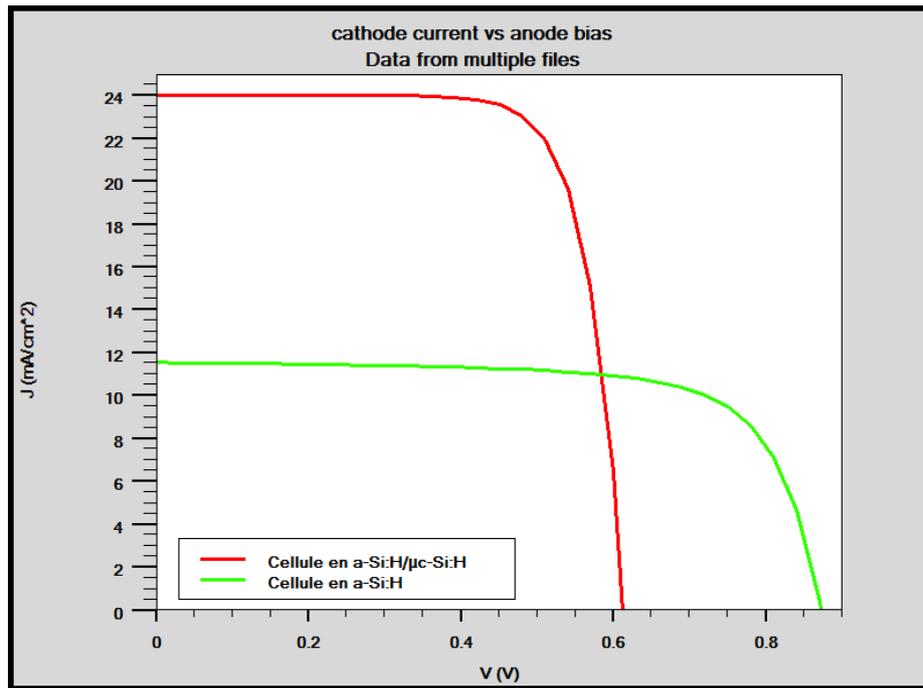
Nous avons simulé le rendement quantique externe de la cellule solaire à hétérojonction représenté sur la figure 4.12. Le rendement quantique externe maximum est de l'ordre de 0.9 autour de la longueur d'onde 0.6  $\mu\text{m}$  puis il diminue pour les faibles et les hautes longueurs d'onde.



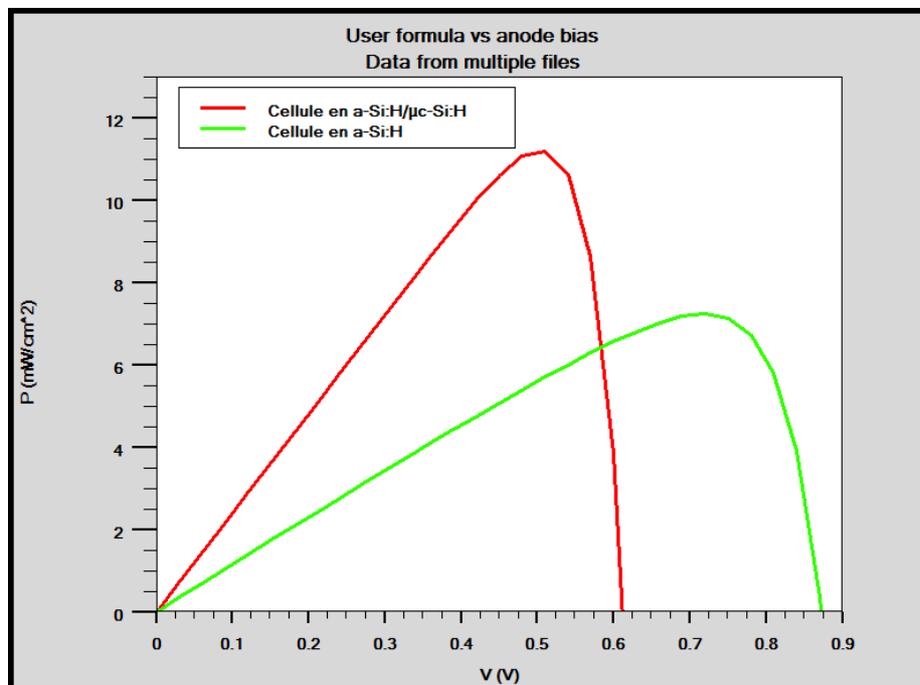
**Figure 4.12** Rendement quantique externe pour cellule à hétérojonction a-Si: H/ $\mu\text{c}$ -Si: H.

### 4.4. Comparaison entre cellules en a-Si : H et à hétérojonction a-Si : H/ $\mu\text{c}$ -Si : H

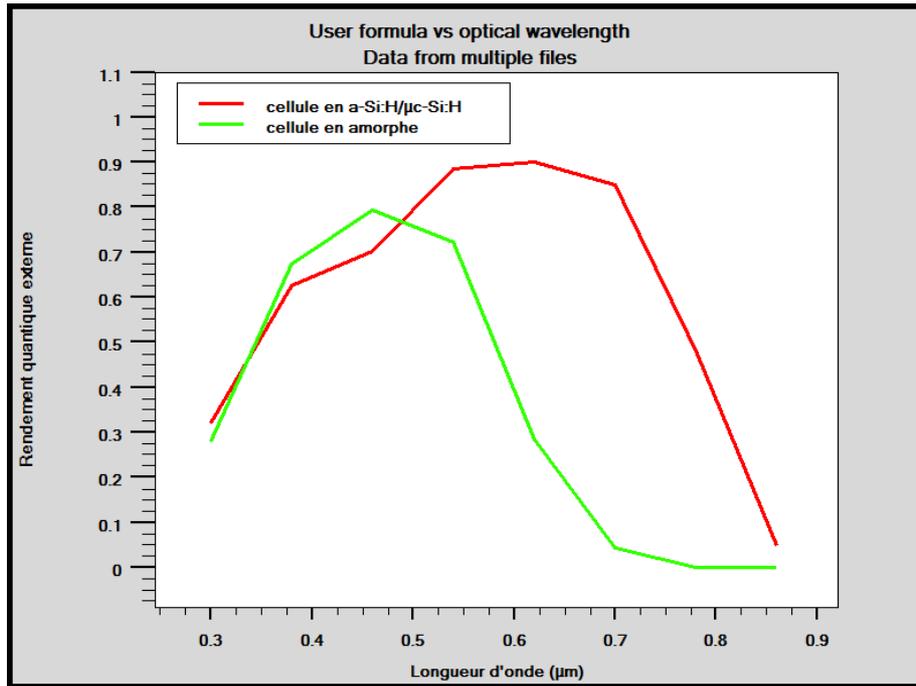
La figure 4.13 représente la caractéristique  $J(V)$ , la figure 4.14 pour la caractéristique  $P(V)$  et la figure 4.15 du rendement quantique externe de deux cellules solaires en a-Si : H et à hétérojonction a-Si: H/ $\mu\text{c}$ -Si: H.



**Figure 4.13** Caractéristique  $J(V)$  de deux cellules solaires en a-Si : H et à hétérojonction a-Si: H/ $\mu$ c-Si: H.



**Figure 4.14** Caractéristiques  $P(V)$  de deux cellules solaires en a-Si : H et à hétérojonction a-Si: H/ $\mu$ c-Si: H.



**Figure 4.15** Rendement quantique externe des cellules solaires en a-Si : H et à hétérojonction a-Si: H/ $\mu$ c-Si: H.

Dans le tableau 4.8 sont groupés les paramètres photovoltaïques de la cellule en a-Si: H et à hétérojonction a-Si :H/ $\mu$ c-Si :H .

Grandeurs photovoltaïques	Cellule à hétérojonction a-Si: H/ $\mu$ c-Si: H	Cellule en a-Si: H
$J_{cc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	24.04	11.54
$V_{co}$ (V)	0.61	0.87
$I_m$ (mA/cm <sup>2</sup> )	21.94	10.04
$V_m$ (V)	0.51	0.72
$P$ (mW/cm <sup>2</sup> )	11.19	7.22
FF (%)	76.11	71.84
$\eta$ (%)	11.19	7.22

**Tableaux 4.8** Paramètres photovoltaïques de deux cellules solaires en a-Si : H et à hétérojonction a-Si: H/ $\mu$ c-Si: H.

On remarque que la cellule à hétérojonction a-Si: H/ $\mu$ c-Si: H donne de meilleures grandeurs photovoltaïques par rapport à la cellule en a-Si: H. On observe qu'il y'a

une amélioration du courant de court-circuit  $I_{cc}$ , la puissance  $P$ , du facteur de forme  $FF$  et du rendement de conversion  $\eta$ . Le courant augmente de  $11.54 \text{ mA/cm}^2$  à  $24.04 \text{ mA/cm}^2$ , la puissance de  $7.22 \text{ mW/cm}^2$  à  $11.19 \text{ mW/cm}^2$  et le rendement de  $7.22\%$  à  $11.19\%$ . Tandis que nous remarquons qu'il y'a une diminution de la tension en circuit ouvert  $V_{co}=0.61 \text{ V}$  de la cellule solaire à hétérojonction en comparaison avec celle de la cellule solaire amorphe qui est de l'ordre de  $0.87 \text{ V}$ . Cette diminution de  $V_{co}$  est due à la présence de la couche intrinsèque en  $\mu\text{-Si: H}$  qui est caractérisée par une énergie du gap de l'ordre de  $1.1 \text{ eV}$  inférieure à l'énergie du gap du  $\text{a-Si: H}$  ( $1.7 \text{ eV}$ ). La figure 4.15 montre la variation du rendement quantique externe en fonction de la longueur d'onde de deux cellules solaires en  $\text{a-Si: H}$  et à hétérojonction  $\text{a-Si: H}/\mu\text{-Si: H}$ . Nous constatons que dans la gamme de longueurs d'onde supérieures à  $0.5 \mu\text{m}$ , la cellule à hétérojonction  $\text{a-Si: H}/\mu\text{-Si: H}$  a un meilleur rendement quantique externe que celle de la cellule solaire amorphe.

#### 4.16. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé l'outil Atlas du logiciel Silvaco pour l'étude du comportement électrique de deux cellules solaires en  $\text{a-Si: H}$  et à hétérojonction  $\text{a-Si: H}/\mu\text{-Si: H}$ .

Afin de visualiser l'importance de la couche intrinsèque en  $\mu\text{-Si: H}$  dans les cellules solaires amorphes, on a fait une étude comparative entre les deux cellules solaires en  $\text{a-Si: H}$  et à hétérojonction  $\text{a-Si: H}/\mu\text{-Si: H}$ . Nous avons trouvé que la cellule avec couche en  $\mu\text{-Si: H}$  donne de meilleurs résultats par rapport à la cellule solaire amorphe.

Nous avons aussi essayé de trouver les meilleurs paramètres photovoltaïques des deux cellules solaires par l'étude de l'effet de l'épaisseur de la couche intrinsèque.

# Référence bibliographique

## Références du chapitre 4

[1] Atlas User's Manual, Silvaco International, 2012.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

Ce travail a permis d'améliorer les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire pin de structure : a-Si: H type p/ a-Si: H type i/ a-Si: H type n par l'utilisation d'une couche en silicium microcristallin intrinsèque à la place de la couche en a-Si :H intrinsèque dans une cellule solaire de configuration : a-Si: H type p/  $\mu$ c-Si: H type i/ a-Si: H type n. Cette étude est effectuée par le logiciel Tcad-Silvaco pour la simulation des composants électroniques à semiconducteurs.

Dans le premier chapitre, nous avons étudié les propriétés électroniques des deux matériaux (a-Si :H et  $\mu$ c-Si :H). Le silicium amorphe hydrogéné est caractérisé par des défauts dans le gap, l'énergie de son gap est égale 1.7eV, et il a une forte absorption de la lumière, tandis que le silicium microcristallin ayant moins de défauts et son énergie du gap est égale 1.1 eV.

Dans le deuxième chapitre, on a étudié les cellules solaires à base de silicium amorphe hydrogéné dont le rendement est situé entre 5 et 7%.

Le troisième chapitre, décrit les modules de simulation Athena et Atlas du logiciel Tcad-Silvaco, qui est utilisé pour la simulation électrique à partir de la structure de la cellule solaire en a-Si: H et à hétérojonction en a-Si: H/ $\mu$ c-Si: H.

Notre travail de simulation est présenté dans le quatrième chapitre, nous commençons par la simulation de la cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné en spécifiant les régions, les électrodes, et le dopage, après nous déterminons les défauts de la densité de cette cellule solaire, ainsi la densité des défauts dans le gap. Les paramètres photovoltaïques de cette cellule en a-Si: H sont :  $J_{cc} = 11.54 \text{ mA/cm}^2$ ,  $V_{co} = 0.87 \text{ V}$ ,

$P_m = 7.22 \text{ mW/cm}^2$ ,  $FF = 71.84 \%$  et  $\eta = 7.22 \%$ . Et on résulte la valeur optimale du rendement de cette cellule qu'est égale 7.24 % pour une épaisseur 0.3  $\mu\text{m}$  de la couche intrinsèque, le rendement de cette cellule est en bon accord avec le rendement trouvé expérimentalement. Le rendement quantique externe de la cellule amorphe est maximum pour des longueurs d'onde  $0.4 < \lambda < 0.55 \mu\text{m}$ .

La simulation numérique de la cellule solaire à hétérojonction en a-Si: H/ $\mu$ c-Si: H nous a permis de calculer les paramètres photovoltaïques qui caractérisent cette cellule solaire sont :

La densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) = 24.04, et la tension de la circuit ouvert  $V_{co}$  (V) = 0.61, la puissance maximale  $P_m$  ( $\text{W}/\text{cm}^2$ ) = 11.19, le facteur de forme FF (%) = 76.11, et le rendement  $\eta$  (%) = 11.19.

Les cellules à hétérojonction de tels matériaux, ainsi que leur intérêt pour atteindre les hauts rendements, ont donc été démontrés. Le rendement quantique a augmenté pour la cellule solaire à hétérojonction pour des longueurs d'ondes  $0.5 < \lambda < 0.75 \mu\text{m}$ . Nous avons aussi étudié l'influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque en  $\mu\text{c-Si:H}$  sur cette cellule et nous avons déduit que l'épaisseur de la couche intrinsèque doit être de l'ordre  $0.7 \mu\text{m}$  fournissant un rendement maximum de 11.91 %.

