



**République Algérienne Démocratique et
Populaire**



**Ministère de l'enseignement Supérieur et de la
Recherche scientifique**

Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued

Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Études

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Thème

**Simulation numérique d'une cellule solaire tandem à couche
mince**

Réalisées par :

Ben Aicha Amina

Cherifi Souad

Frioua Chaima

Soutenu en Juin 2019 devant le jury composé de:

Dr. LAKHDAR Nacereddine

MCA

Directeur du mémoire

Dr. MEDJOURI Abdelkader

MCA

Président

M. HIMA Abdelkader

MAA

Examineur

Année Universitaire : 2018/2019

Dédicace

Le dédie ce travail

A mon cher père

A ma cher mère

A mon cher mari

A mon chers frères

A mes chères sœurs

A tous mes proches et mes amis

Cherifi Souad



Dédicace

Je dédie ce travail

A mon cher père

A ma cher mère

A mon chers frères

A mes chères sœurs

A tous mes proches et mes amis

Ben Aicha Amina

Frioua Chaima



Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail. En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Dr. LAKHDAR Nacereddine, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail. Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions. Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail

Liste des figures

Liste de figure

Chapitre I

Figure I.1: Physicien Edmond-Becquerel.....	6
Figure I.2: Premiers satellites avec panneaux solaires.....	7
Figure I. 3: les Cellules photovoltaïque.....	8
Figure I.4 Structure (gauche) et diagramme de bande (droit) d'une cellule solaire photovoltaïque. (Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées).....	9
Figure I.5 Schéma électrique réel d'une cellule solaire	10
Figure I.6 Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule solaire.....	12
Figure I.7 Association en série de Ns cellules solaires	13
Figure I.8 Association en parallèle de Np cellules solaires identiques.....	13
Figure I.9 Association mixte de NSP branches et de NMS modules composés de Nc cellules solaires identiques	14
Figure I.10 Photo d'un substrat de silicium polycristallin (échelle : 10×10 cm²).....	15
Figure I.11 : Cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin	16
Figure I.12 Schéma d'une structure tandem	18
Figure I.13 Principe de la cellule à hétérojonction	19
Figure I.14 Schéma de principe d'un concentrateur photovoltaïque.....	20
Figure I.15 Schéma du principe de fonctionnement d'une CSSC	22
Figure I.16 Fabrication de cellules en couches minces par procédé roll-to-roll. b) Cellule flexible à base de CIGS (Global Solar).....	24

Chapitre II

Figure II.1 La suite d'outils TCAD de SILVACO.....	30
Figure II.2 Organigramme de la structure VWF.....	31
Figure II.3 Entrées et sorties d'ATLAS	33
Figure II.4 Ordre des groupes des commandes d'Atlas (Les commandes fondamentales afférentes).....	34
Figure II.5 Exemple de maillage d'une cellule solaire simple.....	35
Figure II.6 Régions avec les matériaux définis.....	35
Figure II.7 Les électrodes dans une cellule solaire à base de silicium cristallin...	36
Figure II.8 Atlas dopage, exemple cellule solaire à base de silicium cristallin....	37
Figure II.9 Environnement TONYPLOT.....	40

Chapitre III

Figure III.1 Structure de cellule simple jonction	44
Figure III.2 Maillage de la cellule simple.....	46
Figure III.3 Caractéristique J(V) de la cellule solaire en a-Si:H.....	47
Figure III.4 Structure de cellule solaire tandem.....	49
Figure III.5 Maillage de la cellule tandem.....	51
Figure III.6 Caractéristique J(V) des deux cellules solaires simple et à double jonctions	52

Liste des tableaux

Liste des tableau

Tableau III. 1: Paramètres de simulation de la cellule solaire a-Si : H.....	45
Tableau III 2: Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en a-Si:H.....	48
Tableau III 3: Paramètres utilisés dans la simulation.....	50
Tableau III 4 : Paramètres photovoltaïques des différentes cellules solaires.....	53

Liste des symboles

Liste des Symboles

η = Le rendement de conversion d'énergie

τ_{n0} = Durée de vie des électrons

τ_{p0} = Durée de vie des trous

E_g = Bande gab

FF = Le facteur de forme

I_{cc} = Le courant de court-circuit

I_m = courant maximale

N_c = Densité d'états des électrons

N_{MS} = nombre de modules par branche

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

N_{SP} = nombre de branche

N_v = Densité d'états des trous

P_m = puissance maximale

P_t = La puissance totale

R_c = la résistance de charge

R_{opt} = la résistance optimale

R_s = résistance série

R_{sh} = résistance shunt

S_n = Vitesse de recombinaison en surface en jonction N

S_p = Vitesse de recombinaison en surface en jonction P

V_{co} = La tension en circuit ouvert

V_m = tension maximale

Sommaire

Sommaire

Dédicace.....	I
Remerciements.....	III
Liste des figures.....	V
Liste des tableaux	VIII
Liste des symboles	X
Introduction général.....	1

Chapitre I

Notions générales sur la cellule solaire

I .1.Introduction.....	5
I .2. Historique	6
I .3. Cellule photovoltaïque.....	8
I .4. Fonctionnement d'une cellule solaire.....	8
I .5. Schéma électrique équivalent.....	10
I .6. Caractéristiques électriques d'une cellule solaire.....	10
I .6.1. Courant de court-circuit.....	10
I .6.2. Tension de circuit ouvert.....	11
I .6.3. Facteur de forme.....	11
I .6.4. Rendement de conversion.....	11
I .7. Groupement des cellules solaires.....	12
I .7.1. Branchement série.....	13

I .7.2. Branchement parallèle	13
I .7.3. Branchement mixte.....	14
I .8. Types De Cellules Photovoltaïques.....	15
a- Cellules cristallines.....	15
• Cellules en silicium polycristallin.....	15
• Cellules en silicium monocristallin.....	16
b- Cellules à base de couches minces.....	16
• Cellules en silicium amorphe.....	16
• Cellules CIGS.....	17
• Cellules CdTe.....	17
c- Cellules à haut rendement	17
• Cellules à jonction	17
• Cellules tandem.....	17
• Cellules multi-jonctions.....	19
d- Cellules organique.....	20
• Principe de fonctionnement.....	21
e-Cellules solaires sensibilisées par colorant.....	21
• Principe de fonctionnement.....	22
I .9.Les couches minces.....	23
I .9.1. Définition d'une couche mince.....	23
I .9.2. Caractéristiques.....	23

I .10. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	24
I .10.1. Les avantages.....	24
I .10.2. les inconvénients	25
Conclusion.....	26

Chapitre 2

Le simulateur Atlas TCAD Silvaco

II .1. Introduction.....	28
II .2. SILVACO.....	29
II .3. ATLAS.....	31
II .4 Ordres de commandes d'Atlas	33
II .5. Etapes de simulation dans SILVACO.....	34
II .5.1. Spécification de la structure.....	34
<input type="checkbox"/> MESH	34
<input type="checkbox"/> Région.....	35
<input type="checkbox"/> Electrode.....	36
<input type="checkbox"/> Doping.....	37
II .5.2. Spécification des modèles des matériaux	37
<input type="checkbox"/> Material.....	37
<input type="checkbox"/> Models.....	38
<input type="checkbox"/> Contact.....	38

<input type="checkbox"/> Interface	38
<input type="checkbox"/> Beam	38
II .5.3. Sélection de la méthode	39
<input type="checkbox"/> Méthode	39
II .5.4. Spécification de Solution	39
<input type="checkbox"/> Log	39
<input type="checkbox"/> Solve	39
<input type="checkbox"/> Load	39
<input type="checkbox"/> Save	40
II .5.5. Analyse des résultats	40
<input type="checkbox"/> Extract	40
<input type="checkbox"/> Tonyplot	40
conclusion	41

Chapitre III

Simulation de la cellule solaire tandem

III . 1 . Introduction	43
III.2. Etude de la cellule solaire simple jonction	44
III.2.1. Structure de la cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné	
a-Si : H	44

III.2.2. Paramètres de simulation de la cellule solaire en a-si : H.....	45
III.2.3. Maillage.....	46
III.3. Caractéristiques électriques de la cellule solaire en a-Si:H.....	47
III.4. Simulation de la cellule solaire tandem en a-Si:H/ μ c-Si:H.....	48
III.4.1. Structure de la cellule tandem	48
III.4.2. Paramètres de simulation de la cellule tandem a-Si:H/ μ c-Si:H.....	49
III.4.3. Maillage.....	51
III.5. Caractéristiques électriques de la cellule solaire a-Si:H/ μ c-Si:H.....	51
Conclusion.....	54
Conclusion général.....	55
Bibliographie.....	56

Introduction général

Introduction Générale

L'énergie a été depuis l'antiquité le moteur de l'activité humaine, elle joue un rôle très important dans la vie quotidienne et dans le développement des nations. Parmi ces sources d'énergie on trouve le soleil, qui est contrairement aux autres sources d'énergies renouvelables, abondante et propre, d'autre part annuellement elle fournit à la terre une énergie supérieure à celle de la consommation mondiale.

L'électricité est l'une des formes non polluantes et silencieuses de conversion de l'énergie solaire, elle se produit au moyen d'un dispositif de conversion appelée « Cellule solaire » basé sur un effet dit « Effet photovoltaïque ». Les cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser le meilleur rapport entre le rendement énergétique et le prix de revient. Pour diminuer à la fois le poids et le prix de ces dispositifs tout en augmentant leurs surfaces et leurs souplesses, des cellules en couches minces ont été réalisés.

Le silicium amorphe est la forme non cristalline du silicium utilisé pour les cellules solaires et les transistors en couche mince dans les LCDs. Le silicium microcristallin est du silicium amorphe mais contient également de petits cristaux. Il absorbe un plus large spectre de la lumière et est flexible. La technologie de module de silicium micro-morphe combine deux types différents de silicium, silicium amorphe et microcristallin, dans une cellule solaire supérieure et inférieure.

L'objectif de ce présent mémoire est de faire une étude par simulation numérique d'une cellule solaire tandem a couche mince à base de silicium en utilisant le simulateur Silvaco afin d'améliorer les performances électriques d'une cellules solaire simple pour les applications à rendement de conversion élevé . Par conséquent, le travail s'articule sur trois chapitres.

Introduction Générale

Dans le premier chapitre, on fait appel aux notions générales sur l'énergie photovoltaïque. Ensuite, le principe de fonctionnement d'une cellule solaire, ses paramètres photovoltaïques ainsi qu'à la technologie qui lui est associée.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du logiciel de simulation atlas TCAD Silvaco et notamment les différents blocs utilisés dans la simulation des dispositifs semiconducteurs. Par la suite, nous démontrons les diverses commandes utilisés pour la modélisation des dispositifs et en particulier les cellules solaires.

Le dernier chapitre consiste à l'exploitation du logiciel atlas TCAD Silvaco pour effectuer des simulations d'une cellule solaire tandem a-Si:H/ μ c-Si:H dont le but d'augmenter les performances électriques par rapport à une cellule simple à base de μ c-Si:H.

Chapitre I:

Notions générales sur la cellule solaire

I.1 Introduction :

La production des énergies reste toujours un des soucis de l'homme. L'énergie Photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables très prometteuse pour avoir un monde propre et non pollué. Elle présente l'intérêt de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique (génération de paire électron-trou) et exploiter tout le spectre lumineux. Plusieurs matériaux à caractère semi-conducteur sont utilisés dans cette conversion. Le silicium est le matériau de base le plus utilisé dans le monde. Pour cela, ce chapitre est dédié à une étude de la cellule solaire, son principe de fonctionnement, ses paramètres photovoltaïques ainsi qu'à la technologie qui lui est associée. [1]

I.2 Historique :

Considéré dans l'Antiquité comme un dieu, le soleil est aujourd'hui réduit au statut d'énergie, une énergie qu'il nous faut apprendre à capter, transformer, à stocker...

La conversion de la lumière en électricité, appelé effet photovoltaïque, a été découverte en 1839 par un physicien français, Alexandre Edmond Becquerel (en irradiant une électrode en argent dans un électrolyte, il obtint une tension électrique).

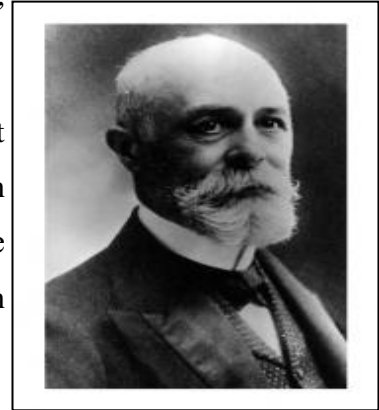


Figure I-1: physicien Edmond Becquerel

En 1875, le physicien Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

Et la première cellule solaire fonctionnelle fut construite en 1883 par Charles Fritts. Mais le rendement de sa cellule, étant très faible, empêcha à l'époque son utilisation.

Seulement, le phénomène est encore considéré comme anecdotique jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale. Les premières vraies cellules sont apparues en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium.

Les recherches d'après guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille et ce n'est qu'en 1954 que trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince mettent au point une cellule photovoltaïque au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell téléphone. On entrevoit alors la possibilité de fournir de l'électricité grâce à ces cellules. Au même moment, l'industrie spatiale naissante, cherche de nouvelles solutions (autre que le procédé nucléaire) pour alimenter ses satellites.

Le premier satellite scientifique Américain l'Explorer-6 lancé en aout 1959 il est équipé de panneaux solaires , il a une masse de 40 Kg et dispose d'une caméra sommaire pour voir la terre .(Doc NASA 1959)

C'est en 1958, que les premiers satellites avec panneaux solaires sont envoyés dans l'espace et au même moment une cellule avec un rendement de 9% est mise au point.

Mais il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industries investissent dans la technologie photovoltaïque. En effet des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. Et en 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

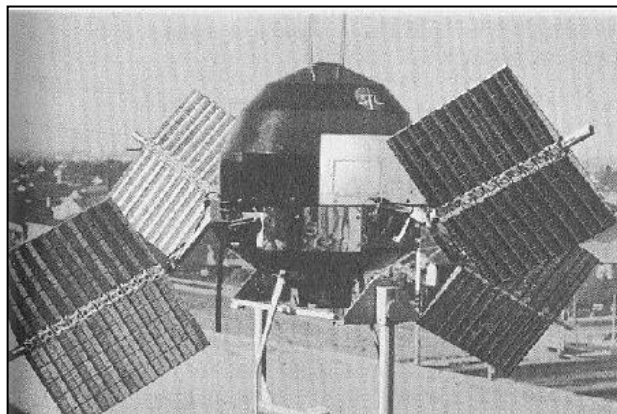


Figure I- 2: premiers satellites avec panneaux solaires

Ainsi au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts. La croissance de l'industrie fut spectaculaire, et notamment à travers de nombreux produits de faible puissance fonctionnant grâce à l'énergie solaire, tel que : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires. En 1983 la première voiture, alimentée par énergie photovoltaïque, parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

En 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseauont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis2001. Bien que le prix se soit peu stabilisé, la quantité de modules...photovoltaïques expédiés chaque année ne cesse d'augmenter... [2]



Figure I- 3: les Cellules photovoltaïque

I.3 Cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est dispositif électronique destine à transforme la lumière en électricité, sa structure une fonction PN c'est-à-dire est composée de deux couches : une couche P et une couche N.

La cellule solaire est basée d'un semi-conducteur qui est en silicium, c'est un convertisseur instantané fournissent de l'énergie électrique s'il reçoit une énergie solaire sous forme de rayonnement. Se comporte alors comme en génération de courant continue. [3]

I.4 Fonctionnement d'une cellule solaire :

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

- Absorption des photons (dont d'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron /trou dans la matériau semi-conducteurs.

- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

A fin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron/trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction PN d'autres structures, comme les hété-jonctions et les Schottky peuvent également être utilisées. Le fonctionnement des cellules photovoltaïque est illustré sur la figure(I-4).

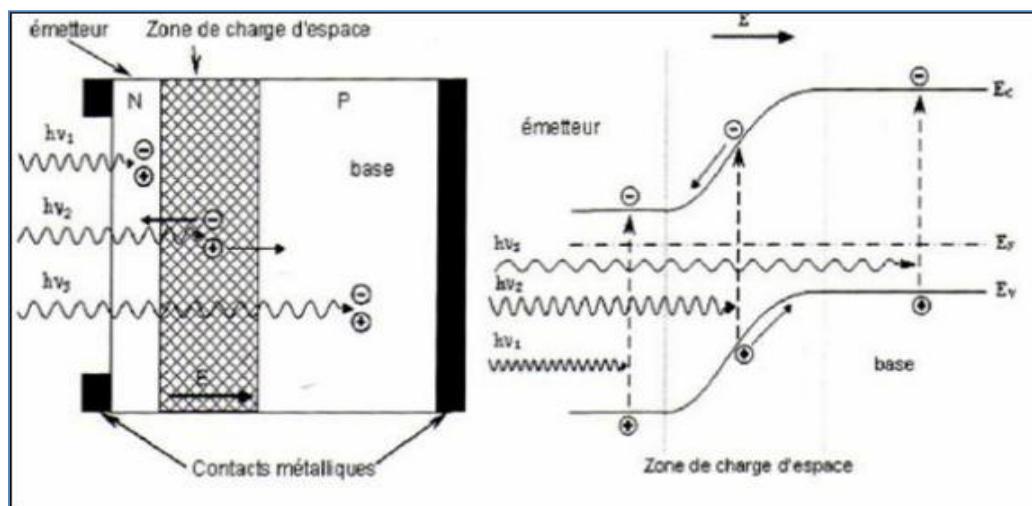


Figure I- 4 : Structure (gauche) et diagramme de bande (droit) d'une cellule solaire photovoltaïque. (Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées)

Les photons incidents créent des porteurs dans la zone N et P et dans la zone de charge d'espace [1].

I.5 Schéma électrique équivalent:

Son schéma équivalent est représenté par une diode idéale montée en parallèle avec une source de courant (figure 5). 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 [4].

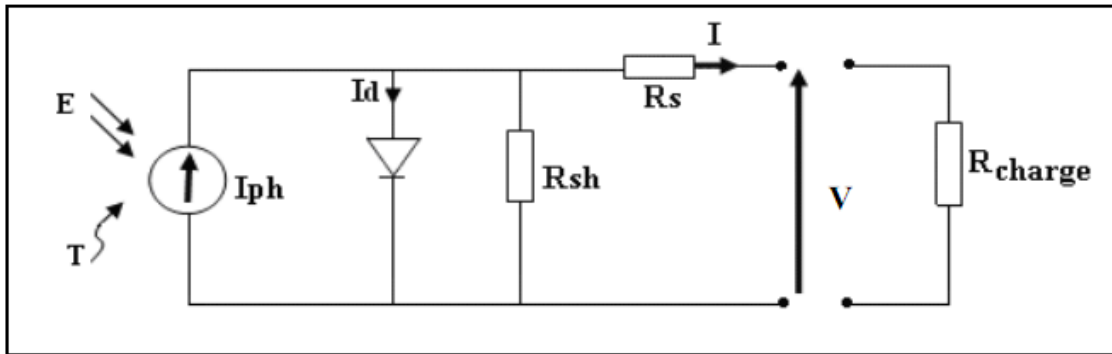


Figure I- 5: Schéma électrique réel d'une cellule solaire

I.6 Caractéristiques électriques d'une cellule solaire :

Les grandeurs caractéristiques principales des cellules solaires sont :

- Le courant de court-circuit **I_{cc}**
- La tension en circuit ouvert **V_{co}**
- Le facteur de forme **FF**
- Le rendement de conversion d'énergie η

I.6.1 Courant de court-circuit I_{cc} :

Ce courant est obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule, il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement et de la température.

I.6.2 Tension de circuit ouvert V_{co} :

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul.

I.6.3 Facteur de forme FF :

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_m) pour un point de fonctionnement $P_m (I_m, V_m)$ de la courbe courant-tension. Le facteur de forme est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}}$$

1.6.4 Rendement de conversion η :

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

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_{in}}$$

P_{in} : la puissance incidente est égale à la puissance solaire $P_{solaire}$ ($P_{solaire} = 100 \text{ mW/cm}^2$).

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

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

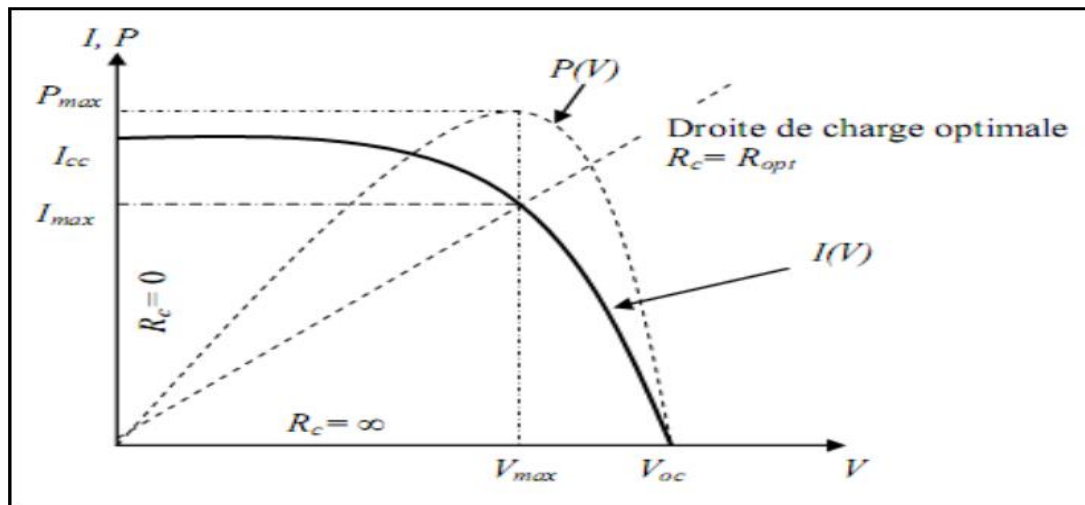


Figure I- 6 : Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule solaire.

I.7 Groupement des cellules solaires :

Les cellules solaires sont rarement employées seules, si ce n'est pour l'alimentation de très petits circuits. Dans la plupart des cas, elles sont regroupées et associées en un grand nombre. En général la puissance fournie par une cellule individuelle étant très petite, nous sommes donc appelés à réaliser des groupements séries ou parallèles des cellules afin de recueillir la tension et le courant nécessaires à une certaine application en fonction de la charge variable ou fixe à alimenter.

La forme générale de la caractéristique **$I(V)$** d'un module solaire ou photovoltaïque est identique à celle d'une cellule solaire élémentaire.

I.7.1 Branchement série :

Les tensions de circuit ouvert de modules peuvent être différentes mais le courant de court circuit qui les traverse est le même. La tension de l'ensemble est égale à la somme des tensions de circuit ouvert (figure I- 7).

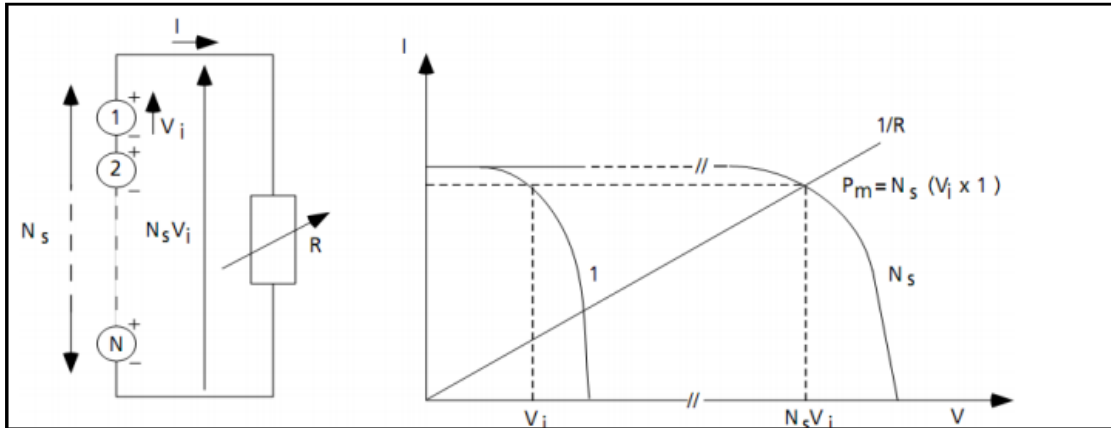


Figure I- 7: Association en série de Ns cellules solaires [3].

I.7.2 Branchement parallèle :

Dans un tel montage, les modules ont la même tension de circuit ouvert et des courants de court circuit différents, on aura donc un courant égal à la somme des courants de chaque module alors que la tension sera celle du module (figure I- 8).

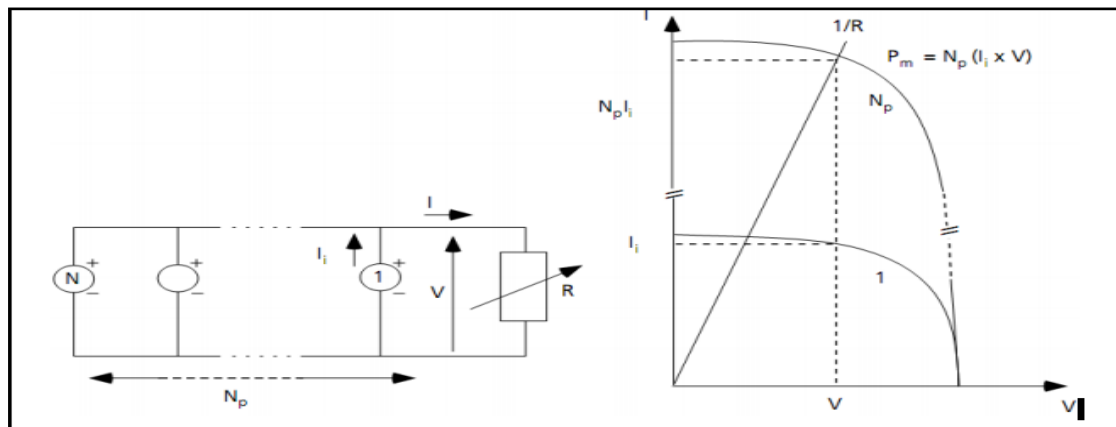


Figure I- 8 : Association en parallèle de Np cellules solaires identiques [4].

I.7.3 Branchement mixte :

Si pour une application donnée il est nécessaire de faire augmenter le courant et la tension délivrée par les cellules solaires, on réalise un groupement mixte ou groupement série-parallèle.

On parlera dans ce cas de module et de panneaux solaires. Un panneau solaire est par définition un ensemble de modules regroupés selon un montage mixte, le module étant à son tour composé d'un ensemble de cellules montées généralement en série. Il est possible d'utiliser un montage de N_c cellules identiques en série sur un module, N_{SP} nombre de branche (placées en parallèle) et N_{MS} nombre de modules par branche (figure I- 9) [5].

La puissance totale disponible P_T , dans ces conditions, est égale à :

$$P_T = N_{MS} \cdot N_{SP} \cdot P_M$$

La résistance optimale est donnée par: $R_{opt} = (N_{MS} / N_{SP}) \cdot R_{optm}$

Où R_{optm} est la résistance optimale du module dans les mêmes conditions.

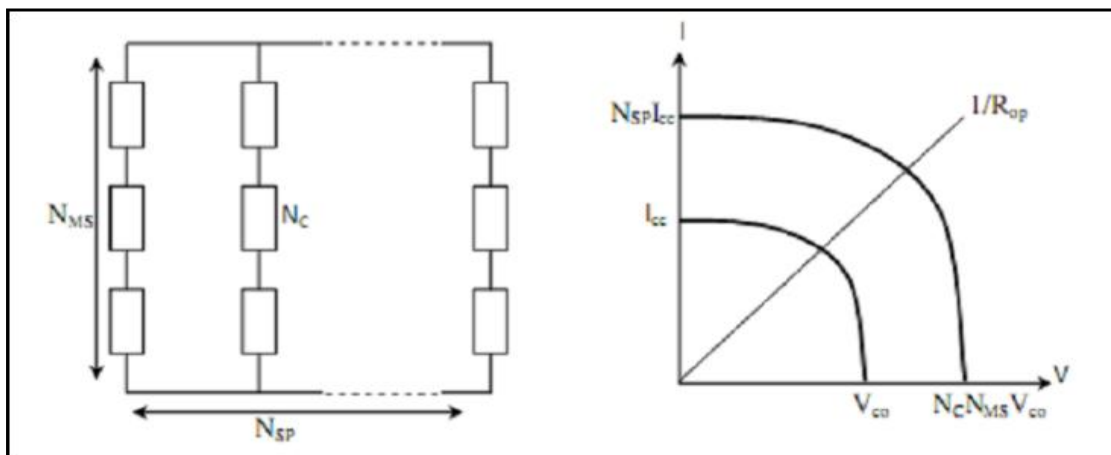


Figure I- 9 : Association mixte de N_{SP} branches et de N_{MS} modules composés de N_c cellules solaires identiques [6].

I.8 Types De Cellules Photovoltaïques :

a- Cellules cristallines :

Ces cellules, généralement en silicium, ne comprennent qu'une seule jonction p-n.

On distingue deux types de cellules cristallines:

*Cellules en silicium polycristallin :

Les techniques de production du silicium polycristallin sont beaucoup plus simples que celles du silicium monocristallin, et donc bien moins chères à mettre en œuvre. Néanmoins, la qualité de ce matériau est moins bonne à cause de la présence de joints de grains qui introduisent des zones fortement recombinantes et un taux assez élevé des impuretés métalliques et autres. Ces joints sont constitués par les surfaces adjacentes des grains d'orientations cristallographiques différentes et contiennent beaucoup de liaisons pendantes. Ils ont pour effet de réduire la durée de vie globale des porteurs.

En outre, ces joints de grains bloquent le flux de porteurs et ils constituent une voie éventuelle d'un courant de fuite à travers la jonction. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux [7].



Figure I- 10: Photo d'un substrat de silicium polycristallin (échelle : 10×10 cm²) [7].

***Cellules en silicium monocristallin :**

Les cellules au silicium monocristallin offrent le meilleur rendement parmi les panneaux solaires disponibles dans le commerce : entre 13 à 15%. Il faudra donc moins de cellules pour atteindre la puissance désirée, mais comme le silicium monocristallin est aussi le plus cher, son seul avantage est finalement d'utiliser une surface réduite : il faut environ 7m² pour obtenir 1 kilo-Watt-crête (kWc).

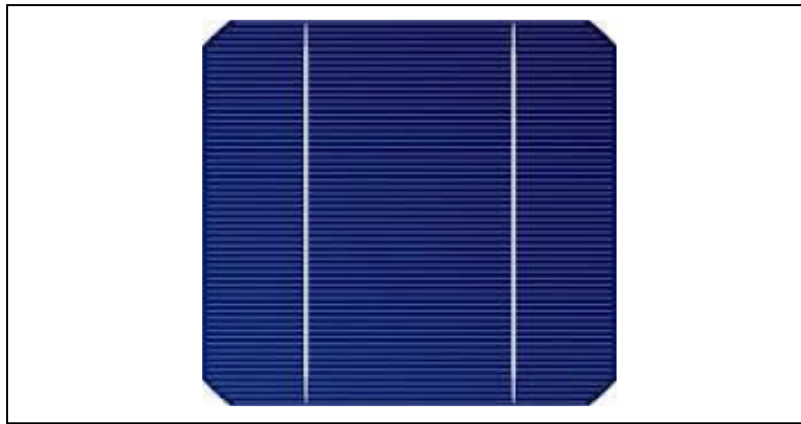


Figure I- 11: Cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin [7].

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

Ses atomes sont donc agencés sans réelle organisation, ce qui leur permet de mieux capter la lumière (par rapport au silicium cristallin).

Problème : les charges générées ont plus de difficulté pour se déplacer à cause de la désorganisation de la matière, ce qui se traduit par un mauvais coefficient de conversion. Par conséquent, leur rendement est faible. La désorganisation atomique a d'autres conséquences. Les électrons de valence des atomes de Si ne forment pas toujours des liaisons covalentes au sein du semi-conducteur. Il apparaît alors des liaisons pendantes qui peuvent dénaturer les propriétés électroniques du matériau. Pour limiter ce phénomène, les couches de silicium sont régulièrement passivées avec

de l'hydrogène (a-Si:H). Des atomes d'hydrogène établissent des liaisons avec les électrons restés libres, et réduisent ainsi le nombre de liaisons pendantes [8].

***Cellules CIGS :**

Les cellules CIGS renferment un absorbant composé de cuivre, de gallium, d'indium et de sélénium. Cette couche de 1 à 2,5 μm d'épaisseur étant dopée p, elle doit être recouverte d'un matériau de type n, par exemple du sulfure de cadmium (CdS).

Tiens donc, du cadmium... mais sur une épaisseur de seulement 0,04 à 0,07 μm , autant dire qu'il est présent en infime quantité. Puisqu'il y a deux semi-conducteurs différents, les cellules CIGS sont elles aussi à hétérojonction. Comme son homologue au silicium amorphe, la cellule CIGS résiste mieux à l'échauffement que les cellules au silicium cristallin, mais moins bien que les cellules au CdTe. En plus, elle capte un peu mieux la lumière en début et en fin de journée (quelques pour cent), comme toutes les couches minces [8].

***Cellules CdTe :**

Le faible rendement des cellules à base de silicium amorphe ont motivé les scientifiques à chercher des alternatives. Le matériau le plus prometteur est le tellure de cadmium (CdTe) qui offre la possibilité de produire des modules à des coûts plus faibles avec un rendement de 10%, et un avantage qui réside dans la forte absorption du tellure de cadmium. Cependant la toxicité du matériau freine le développement de cette technologie [8].

c- Cellules à haut rendement :***Cellules à jonction****• Cellules tandem :**

Les cellules tandem sont obtenues à partir de deux cellules simples empilées l'une sur l'autre, par exemple, une couche mince de silicium amorphe empilée sur une couche silicium cristallin. Ce tandem est censée optimiser le rendement comparé à celui produit par des cellules simples seules et ce qu'elles que soient leur caractéristiques, amorphes, cristallines ou microcristallines. Il s'agit de l'empilement

de deux cellules l'une sur l'autre. Ces deux cellules sont mises en série grâce à une couche de recombinaison des porteurs de charges.

La tension de circuit ouvert du dispositif est donc la somme des tensions de circuit ouvert des cellules si elles étaient prises seules, et le courant de court-circuit est le plus faible des deux cellules. Cette structure offre l'avantage de pouvoir utiliser deux matériaux dont les bandes interdites (Spectres d'absorption) diffèrent. Ce dispositif est capable d'absorber la somme des deux spectres d'absorption. Les couches actives peuvent être composées de mélanges polymère/fullerène ou de petites molécules. On peut par ailleurs utiliser différents types de matériaux dans les deux couches, ce qui donne une grande latitude quant à la fabrication de la cellule.

La première des cellules tandem était par exemple composée d'une couche de petites molécules évaporées pour la première cellule et d'une couche polymère déposée par voie humide pour la seconde. Par la suite, des cellules tandem utilisant différents matériaux ont été testées, jusqu'à atteindre des rendements de 6,7% grâce à l'utilisation d'une couche de recombinaison en TiOx et de deux polymères dont les bandes interdites sont différentes [9].

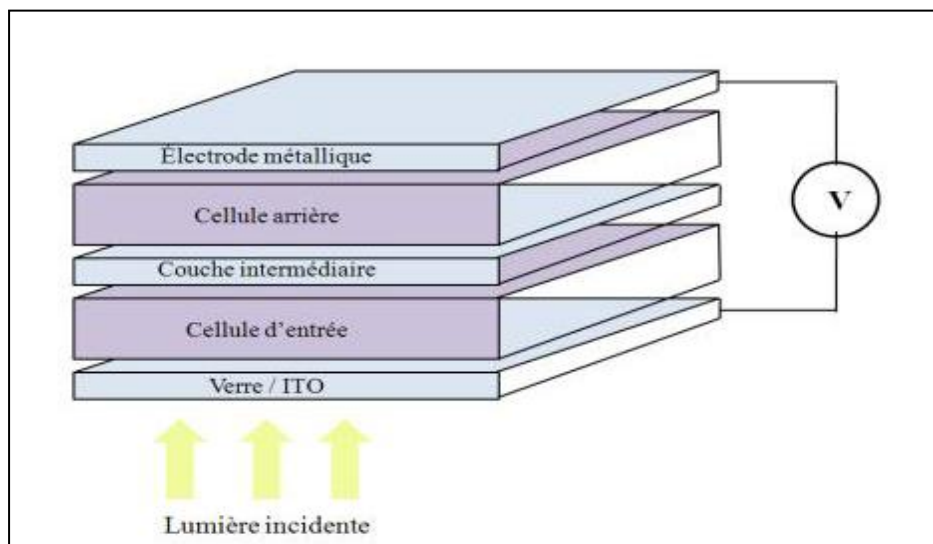


Figure I- 12 : Schéma d'une structure tandem [9].

- **Cellules multi-jonctions :**

Les cellules multi-jonction sont constituées à partir de différentes couches minces, ce qui optimise le travail d'absorption des calories solaires, puisées plus largement, et ce qui permet un meilleur rendement et une plus grande production.

Ce type de cellules n'est pas vendu à des fins commerciales et reste utilisée dans le domaine spatial. Et pour cause, les techniques d'exploitation sont très complexes. On parle de jet moléculaire ou d'épitaxie. Le fonctionnement de ces cellules réside sur le même principe que celui des cellules Tandem. Les cellules multi-jonction sont composées d'un grand nombre de semi-conducteurs (GaAs, Ge, GaInP2...) possédant chacun un spectre limité.

En choisissant des matériaux dont les longueurs d'onde limites sont les plus proches possibles les unes des autres, l'ensemble des cellules absorbe un spectre, le plus complet possible donnant à l'ensemble un rendement très élevé pouvant atteindre 50%. Le gros défaut de ces cellules est leur coût de fabrication, car aucune production industrielle n'a encore pu être mise en place.

Ces cellules limitent les pertes d'énergie car il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants, (Figure 13). Ainsi il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de conversion très importants [10].

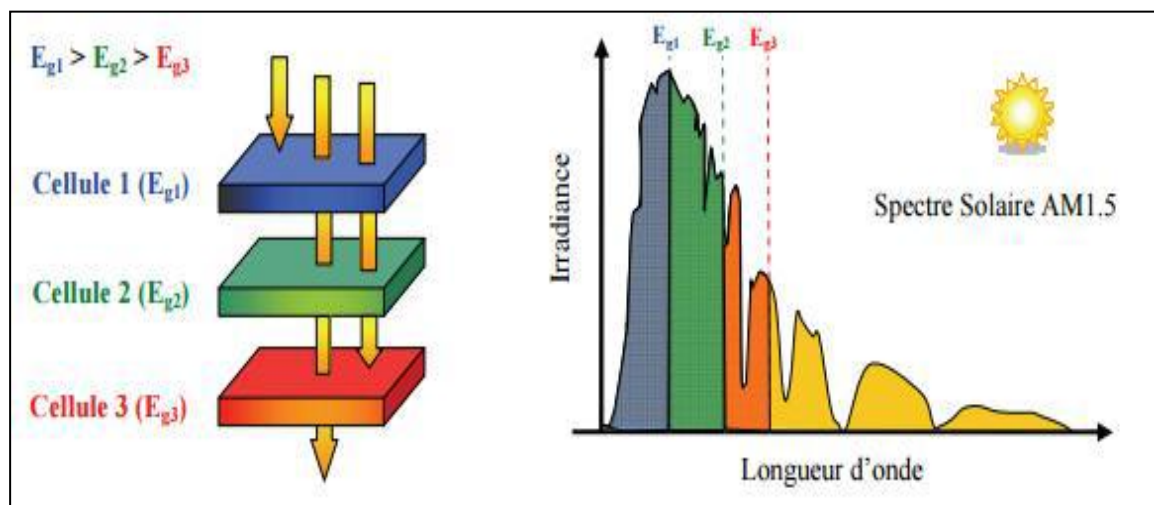


Figure I- 13 : Principe de la cellule à hétérojonction [10].

En utilisant des concentrateurs solaires, certains pensent pouvoir baisser les prix (moins de surface de cellule utilisée) et prendre une place dans le marché conventionnel terrestre. Ainsi, si on compare le meilleur rendement sans concentrateur d'une triple jonction GaInP/GaAs/Ge atteignant les 32%, cette même cellule arriverait à 40.7% avec concentrateur. On peut même envisager des rendements encore plus importants avec des cellules complexes de 4 à 6 jonctions voir plus [10].

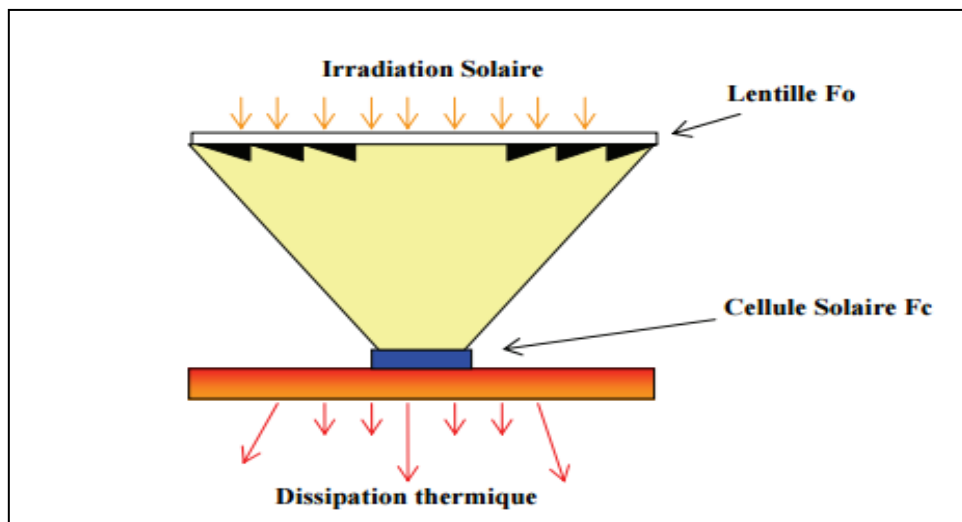


Figure I- 14 : Schéma de principe d'un concentrateur photovoltaïque [10].

d- Cellules organique :

Face à la technologie utilisant les matériaux inorganiques, les cellules solaires à base de composés organiques connaissent un développement considérable. L'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent beaucoup d'avantages : la possibilité d'être déposée en grande surface, la facilité de fabrication et de manipulation, la possibilité de réaliser ces cellules sur des substrats flexibles, et grâce à des coûts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient dans l'ensemble revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes. Elles possèdent en revanche à l'heure actuelle des durées de vie jugées inférieures à celles des cellules inorganiques, et des rendements de conversion plus faibles [11].

***Principe de fonctionnement :**

Après absorption des photons par le polymère, des paires électron-trou liées (excitons) sont générées, puis dissociées. Compte tenu des limitations propres aux matériaux organiques (durée de vie des excitons, faible mobilité des charges), seule une faible fraction des paires électron-trou générées par les photons contribue effectivement au photo-courant. L'une des idées majeures est de distribuer en volume les sites de photo génération pour améliorer la dissociation des excitons. Cette démarche est basée sur l'augmentation de la surface de la jonction, grâce à la mise en oeuvre d'un réseau interpénétré de type donneur/accepteur (D/A) assurant le transport des trous (P+) vers l'anode (ITO) et le transport des électrons (e-) vers la cathode métallique (en aluminium Al, par exemple). Si le rendement quantique de séparation des charges photo-induites des systèmes associant un polymère semi conducteur à un dérivé du fullerène (PCBM) est ainsi proche de l'unité, l'enjeu est désormais de limiter les phénomènes de recombinaison et de piégeage qui limitent le transport et la collection des charges aux électrodes, afin d'augmenter l'efficacité globale des dispositifs qui demeure encore aujourd'hui faible (inférieure à 5%). L'essor de la filière est également très fortement conditionné par la maîtrise et la compréhension des mécanismes de vieillissement des cellules mais aussi par la maîtrise des technologies en couches minces pour la protection des dispositifs vis-à-vis de l'oxygène et de la vapeur d'eau atmosphériques [12].

e- Cellules solaires sensibilisées par colorant : (CSSC)

Inspiré par la photosynthèse, l'équipe de Michael Grätzel a développé au début des années 90 des cellules solaires composées d'un électrolyte, d'un colorant et d'un oxyde semi-conducteur inorganique. Le meilleur rendement certifié est de 10,4% pour une cellule de 1 cm², réalisé par la société Sharp [13].

***Principe de fonctionnement :**

Comme dans le cas de la photosynthèse naturelle, l'absorption d'énergie solaire met en route une pompe à électrons mue par l'énergie lumineuse absorbée, dont le principe est illustré dans la figure ci-dessous.

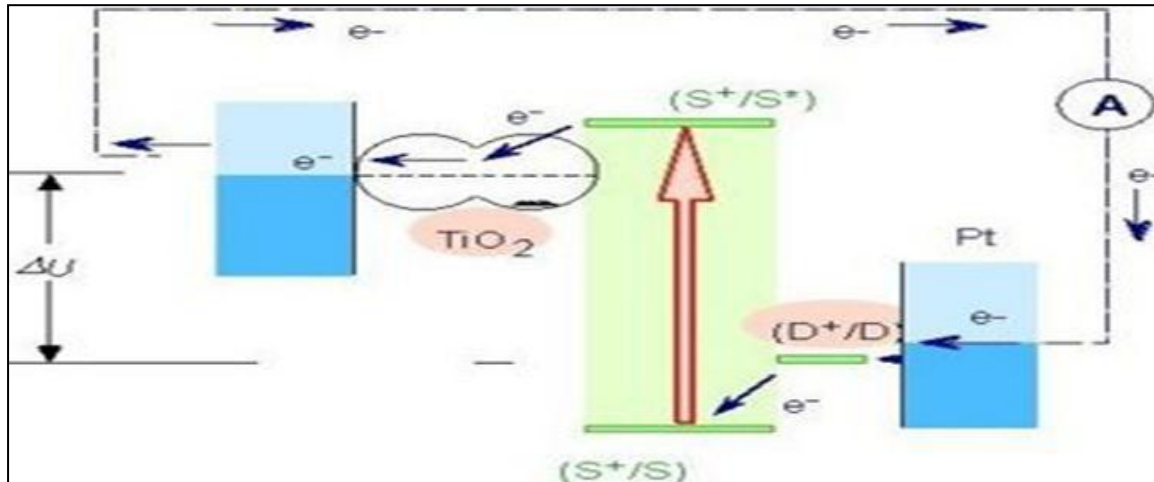


Figure I- 15 : Schéma du principe de fonctionnement d'une CSSC [11].

Le sensibilisateur (S) est greffé à la surface d'un oxyde semi-conducteur sous la forme d'une couche mono moléculaire. Il absorbe les rayons solaires incidents qui le promeuvent dans un état électroniquement excité S^* , d'où il est à même d'injecter un électron dans la bande de conduction du dioxyde de titane (TiO_2). Les électrons ainsi injectés traversent la couche et sont ensuite recueillis par un collecteur de courant qui permet de les diriger vers un circuit externe où leur passage produit de l'énergie électrique. Le retour de l'électron dans la bande de conduction sur le colorant oxydé S^+ est beaucoup plus lent que la réduction de S^+ par le médiateur (D) en solution. De ce fait la séparation de charge est efficace. Le médiateur oxydé (D^+) est réduit à la contre-électrode. La tension maximale débitée correspond à la différence entre le potentiel d'oxydoréduction du médiateur et le niveau de Fermi du semi - conducteur.

La charge positive est transférée du colorant (S+) à un médiateur (iodure) dans la solution qui baigne dans la cellule. Ce médiateur, alors oxydé en triiodure, diffuse à travers la solution. Ainsi, le cycle des réactions redox est bouclé par transformation de l'énergie solaire absorbée en un courant électrique, sans changement de la composition de quelque partie du système que ce soit [11].

I.9 Les couches minces :

I.9.1 Définition d'une couche mince :

Par principe, une couche mince est une fine couche d'un matériau déposé sur un autre matériau, appelé "substrat" dont l'une des dimensions qu'on appelle l'épaisseur a été fortement réduite de telle sorte qu'elle varie de quelques "nm" à quelques "µm" (typiquement ce sont des couches de 10 ... 100 nanomètres d'épaisseur). Cette faible distance entre les deux surfaces limites entraîne une perturbation de la majorité des propriétés physiques, très souvent un tel petit nombre de couches atomiques possède des propriétés très différentes [14].

Par exemple la réflexion optique ou l'absorption peuvent être maîtrisées de manière très précise, de même pour la conductivité électrique. La différence essentielle entre le matériau à l'état massif et celui en couches minces est liée au fait que dans l'état massif on néglige, généralement avec raison le rôle des limites dans les propriétés, tandis que dans une couche mince ce sont, au contraire, les effets liés aux surfaces limites qui sont prépondérants.

I.9.2 Caractéristiques :

L'extrême finesse (quelques m d'épaisseur) des dispositifs en couches minces implique l'utilisation d'un élément leur conférant une tenue mécanique : le substrat.

On peut noter la présence d'un oxyde transparent conducteur (TCO) pour récolter plus efficacement les charges du contact avant tout en laissant passer la lumière. La nature du substrat peut fortement influencer sur les performances de la cellule[15].

L'un des avantages majeurs des cellules en couches minces est qu'elles permettent l'utilisation de substrats légers, flexibles ou encore conformables. Cela ouvre de nouvelles applications, notamment en termes de mobilité. Par exemple, il est possible d'emporter une plus grande surface active avec un module photovoltaïque qui peut

être roulé. De plus, les substrats flexibles permettent d'utiliser des procédés de fabrication de type roll-to-roll, qui ont pour intérêt de réduire les coûts de fabrication. Ces applications sont illustrées dans la (figure I- 16).

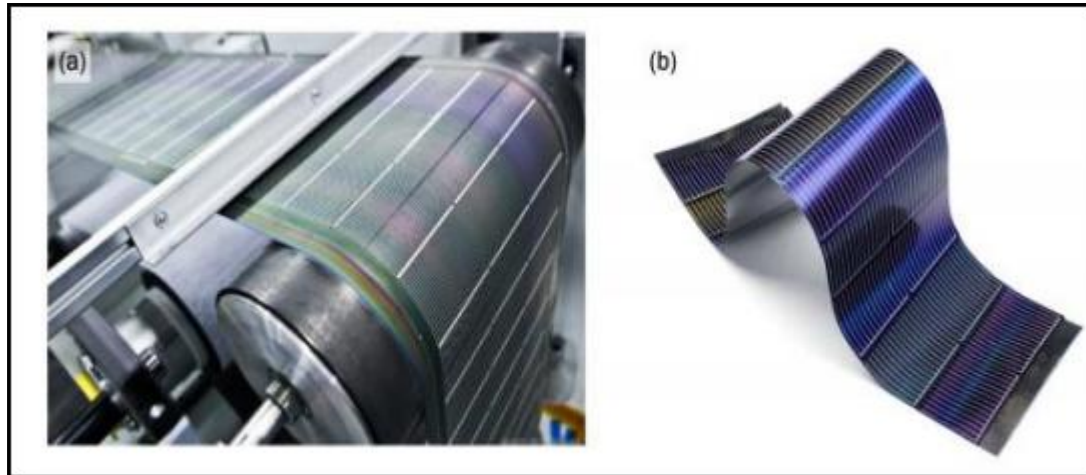


Figure I- 16 : a) Fabrication de cellules en couches minces par procédé roll-to-roll.

b) Cellule flexible à base de CIGS (Global Solar).

I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

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

I.10.1 Les avantages :

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

- une haute fiabilité (elle ne comporte pas de pièces mobiles) qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. D'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt.

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

Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [16,17].

I.10.2 les inconvénients :

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

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

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

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis [16,17]

Conclusion

La fonctionnement photovoltaïque permet la production d'un courant électrique grâce à l'absorption des photons de lumière et, même s'il est quelque peu compliqué, il est tout à fait propre: malgré son apparence simpliste, montre bel et bien que le photovoltaïque ne rejette pas de CO₂ (ni autre pollution comme la pollution sonore ou visuelle). Même si cette énergie ne fait pas la majorité pour le moment, elle devrait dans les prochaines années se développer de plus en plus et viendra alors le problème des déchets que provoqueront les panneaux photovoltaïques obsolètes. Cependant il nous reste l'étude d'un possible recyclage de ces panneaux et ce problème posé n'en sera certainement plus un.

Chapitre II:

***Le simulateur Atlas TCAD
Silvaco***

II.1 Introduction :

Le choix des modèles physiques est important pour aboutir à des résultats de simulation numérique précis. Pour cela, le logiciel SILVACO met à notre disposition une grande variété de modèles physiques. La première difficulté à l'utilisateur est de choisir certains modèles par rapport à d'autres qui pourtant décrivent les mêmes phénomènes physiques. L'autre difficulté sera de choisir les modèles adéquats avec les mécanismes physiques mise en jeu pour les conditions d'utilisation du dispositif.

II.2 SILVACO :

SILVACO est une entreprise qui se spécialise dans le développement de logiciels de simulation visant presque tous les aspects de la conception électronique moderne.

Dans leur suite d'outils TCAD, l'entreprise fournit des capacités de modélisation et de simulation pour de simples circuits de type Spice tout le long du parcours de fabrication VLSI détaillée . Des environnements conviviaux et un grand nombre d'options de modélisation différentes sont utilisés pour faciliter la conception . Les outils prévoient la création de modèles complexes et d'images structurales 3D. Les phénomènes modélisés vont de la conductivité électrique simple à des trucs tels que l'analyse thermique, le rayonnement et les effets du laser.

Une grande variété des processus détaillés de la croissance des couches et les propriétés des matériaux (les mobilités, les paramètres de recombinaison, les coefficients d'ionisation, les paramètres optiques) de plus la précision de la simulation. Cependant, il n'y pas à ce jour de documents disponibles des efforts déployés par les chercheurs ou les fabricants de cellules solaires pour utiliser cet outil puissant pour la modélisation des cellules solaires avancées [18].

Sous SILVACO l'ensemble des outils de simulation et des outils interactifs permettant la conception et l'analyse de la plupart des dispositifs semi-conducteurs s'appel VWF (Virtual Wafer Fab) [19]. Les composants de base de VWF sont[19] :

- Les outils de simulation (VWF core tools). Ces outils simulent soit leurs processus de fabrication soit leurs comportements électriques.
- Les outils de simulation sont Athena, Atlas et SSuprem3.
- Les outils interactifs (VWF interactive tools). Ces outils sont désignés pour être utilisés en mode interactif dans la construction d'un seul fichier d'entrée.

En étant basé sur une interface utilisateur qui est graphique (Graphical User Interface, GUI), le travail de construction du fichier d'entrée devient plus efficient.

Les outils interactifs peuvent être utilisés soit en relation avec un ensemble de fichiers, ou comme des composants intégrés dans l’environnant « VWF automation tools ».

Les outils d’automatisation (VWF automation tools). Ces outils permettent à l’utilisateur d’exécuter sur une grande échelle des études expérimentales pour créer des résultats pour l’analyse statistique suivante. Ces outils automatiques se servent de la technologie de base de données répartie et des méthodes de logiciels de transmissions d’interprocessus.

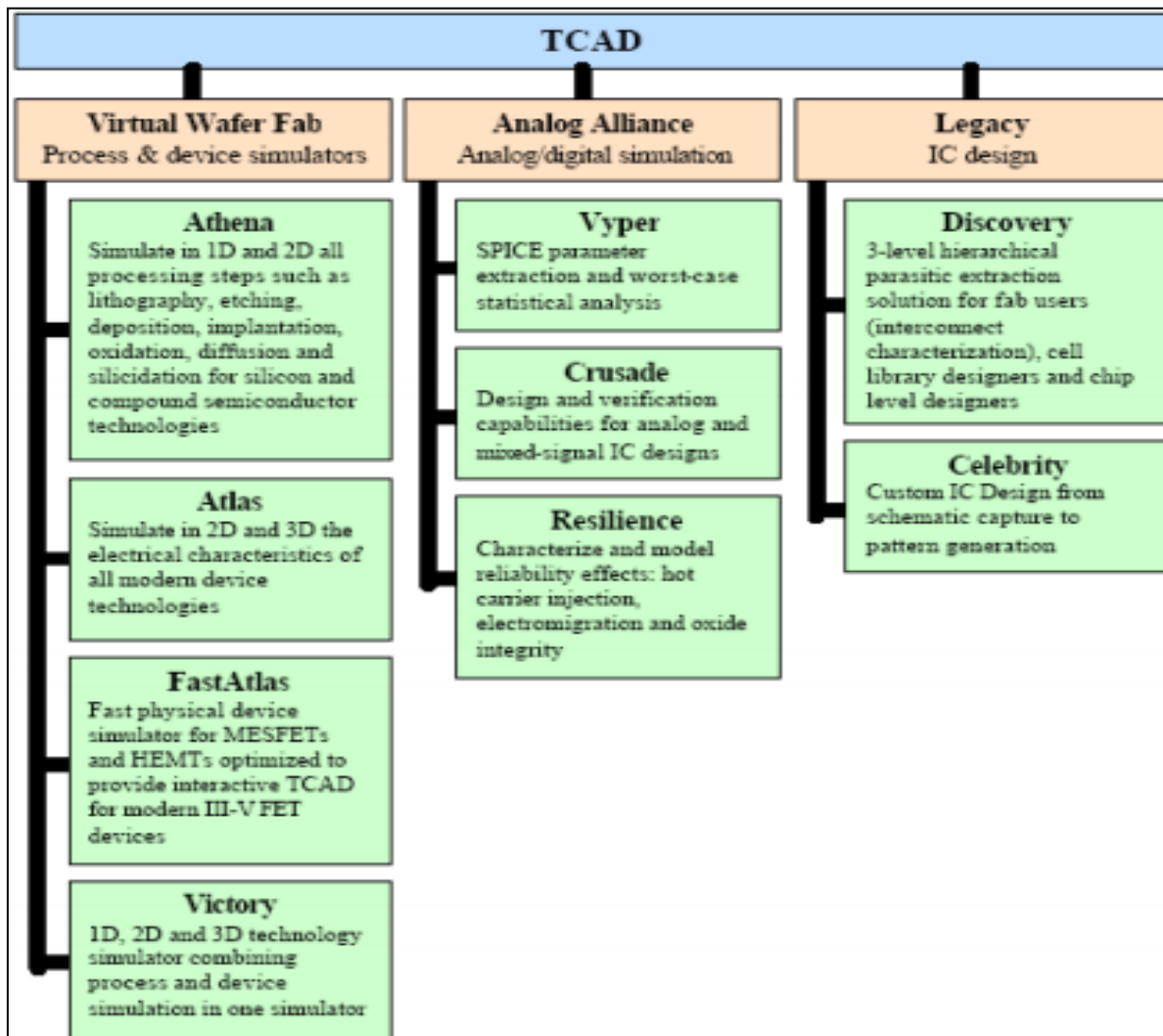


Figure II-1 : La suite d'outils TCAD de SILVACO [20].

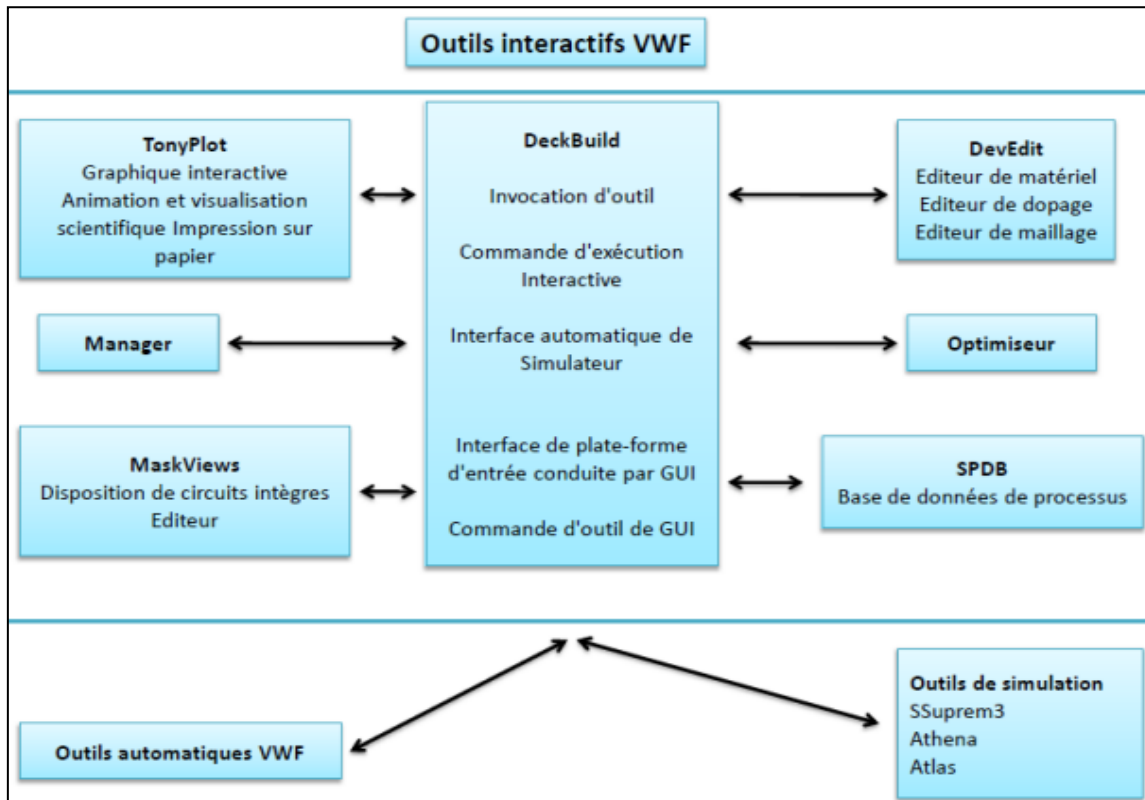


Figure II- 2 : Organigramme de la structure VWF [21].

II.3 ATLAS :

ATLAS est un simulateur de dispositifs semi-conducteurs basé sur les principes physiques à deux et à trois dimensions. Il prédit le comportement électrique associé à la structure physique dans des conditions spécifiées. ATLAS parvient à ceci par le partitionnement du dispositif spécifié par un maillage de grille de deux ou trois dimensions.

ATLAS applique ensuite à l'ensemble des équations différentielles, fondées sur les lois de Maxwell, un maillage pour simuler le transport des porteurs de charge à travers la structure. C'est une bonne combinaison de l'analyse sophistiquée en profondeur de dispositifs en 2D ou en 3D. Comme le reste des applications TCAD, elle est basée sur nombreuses publications, dont la précision et l'exactitude sont vérifiées par de nombreux chercheurs. Cette variété offre les fonctionnalités suivantes et d'autres :

- Les petits signaux AC et DC, et la dépendance complète en temps.
- Les modèles de transport Drift-Diffusion.
- Les modèles de transport hydrodynamique et par équilibre d'énergie.
- Echauffement du réseau et dissipation de la chaleur.
- Hétérojonctions graduées et abruptes.
- Interactions optoélectroniques avec traçage général des rayons lumineux.
- Matériaux amorphes et polycristallins.
- Environnements de circuits Généraux.
- Emission Stimulée et radiation.
- Statistique Fermi-Dirac et Boltzmann.
- Modèles de mobilité avancés.
- Effets des forts dopages.
- La dynamique complète des pièges donneurs et accepteurs.
- Contacts Ohmic, Schottky et isolants.
- Recombinaison SRH, radiative et superficielle.
- Impact d'ionisation (local et non-local).
- Grilles Flottantes.
- Injection de porteurs Chauds.
- Modèle de transport quantique.
- Courants d'émission thermo-ionique. [22]

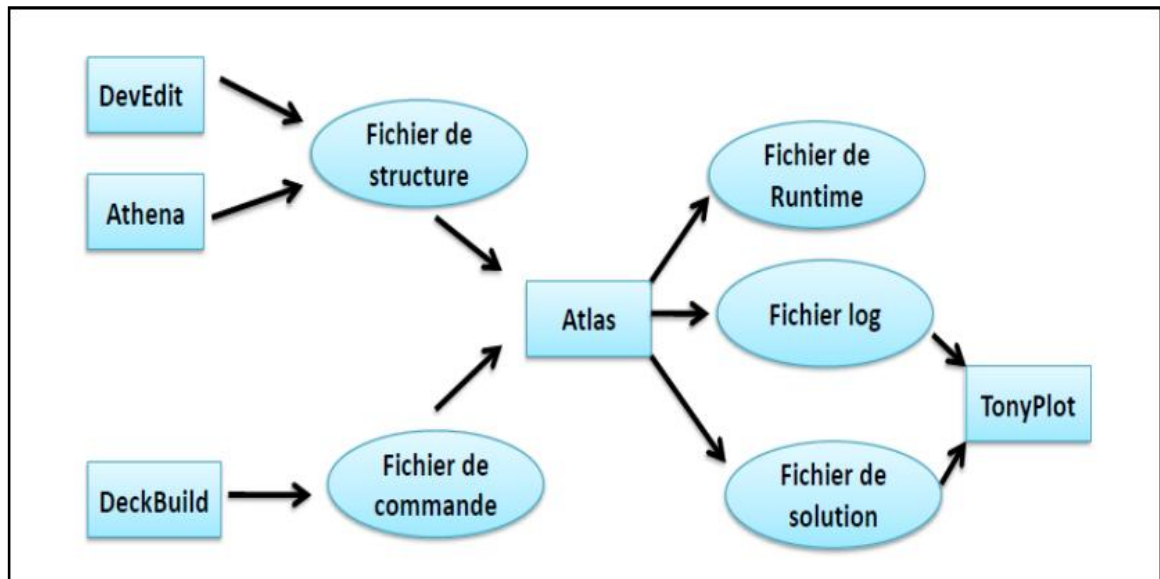


Figure II- 3: Entrées et sorties d'ATLAS [23]

II.4 Ordres de commandes d'Atlas

Après la présentation de l'outil de simulation « d'Atlas » de SILVACO TCAD, sa composition interne et son fonctionnement nous allons maintenant présenter l'ordre des commandes propres à la logique de programmation « d'Atlas ».

Ainsi il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés correctement (Figure II- 4). 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 idoine, le simulateur ne les prend pas en compte.

Groupe		Commandes
1. Spécification de la structure	————	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Spécification des modèles des matériaux	————	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Sélection de la méthode	————	METHOD
4. Spécification des solutions	————	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Analyse des résultats	————	EXTRACT TONY PLOT

Figure II- 4 : Ordre des groupes des commandes d'Atlas (Les commandes fondamentales afférentes) [23].

II.5 Etapes de simulation dans SILVACO :

II.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>

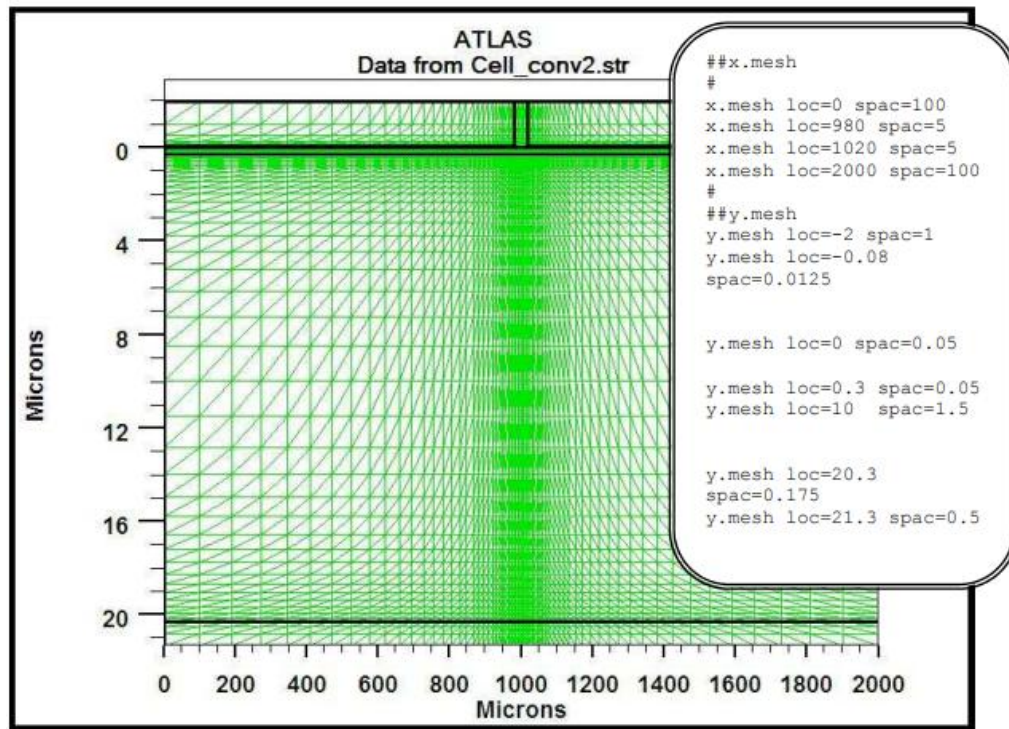


Figure II- 5: Exemple de maillage d’une cellule solaire simple.

□ Région :

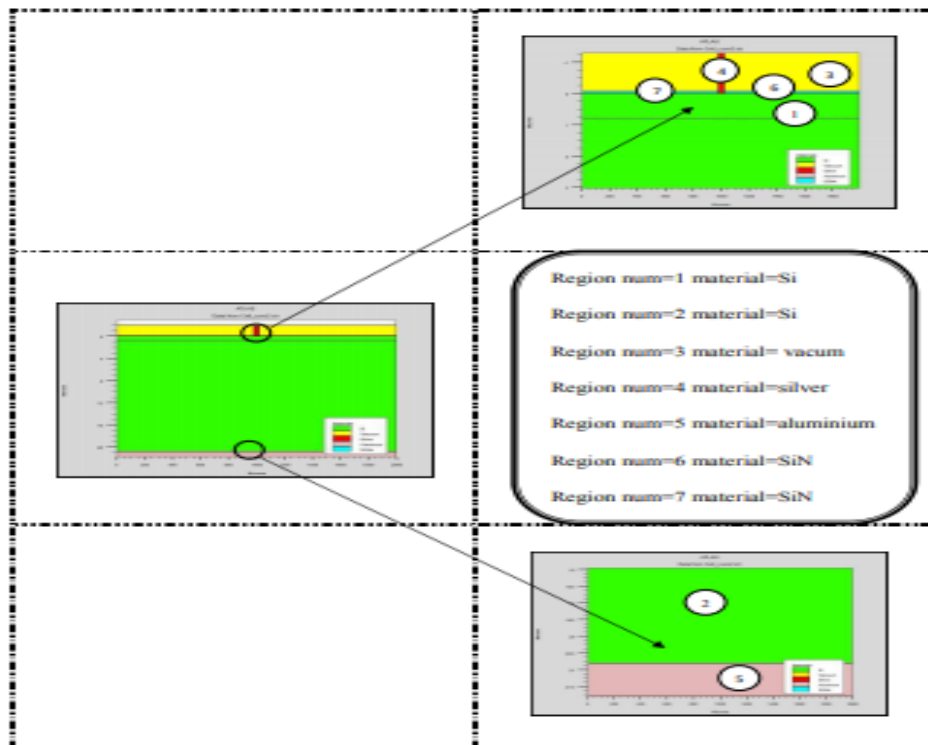


Figure II- 6 : Régions avec les matériaux définis.

La figure II- 6 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 >

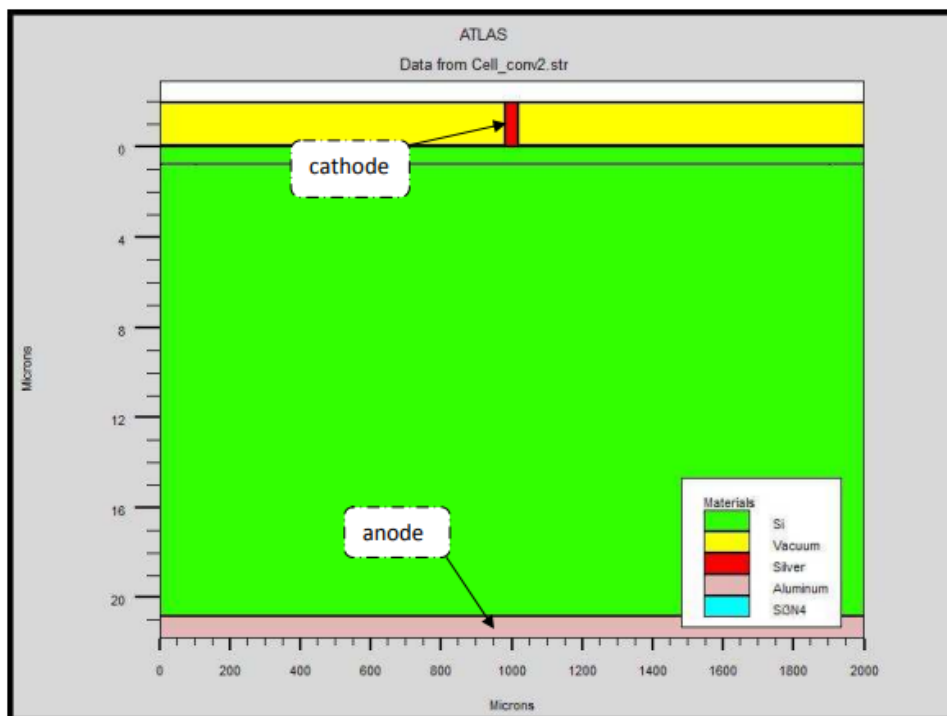


Figure II- 7 : Les électrodes dans une cellule solaire à base de silicium cristallin.

□ **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 >

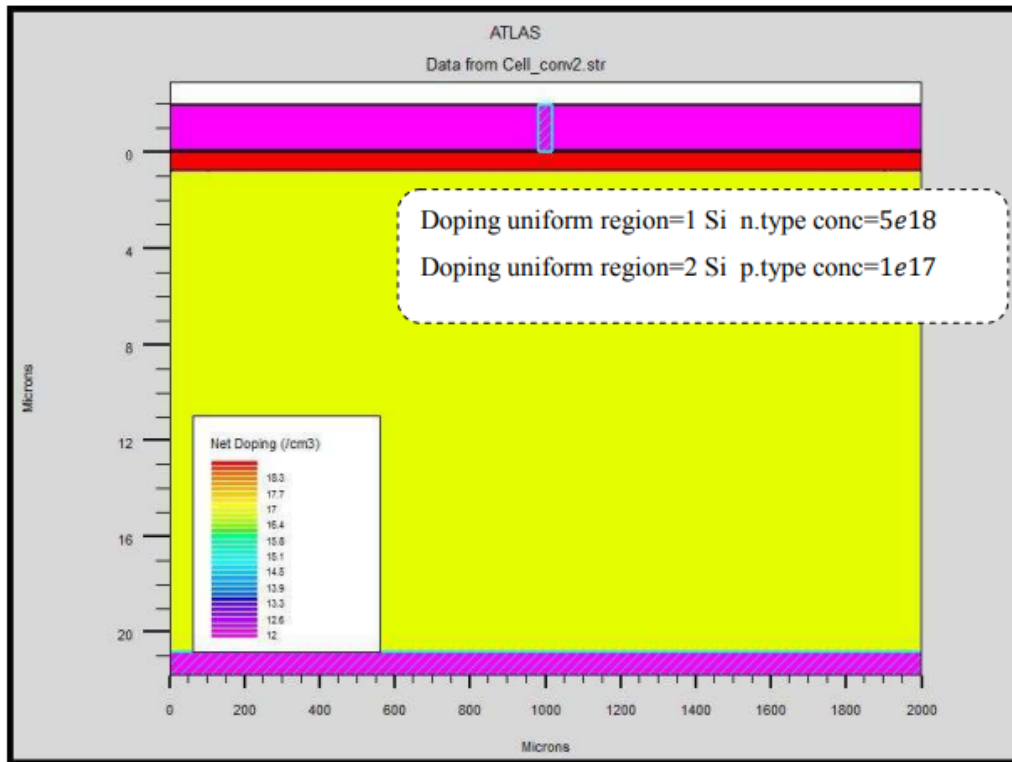


Figure II- 8 : Atlas dopage, exemple cellule solaire à base de silicium cristallin.

II.5.2 Spécification des modèles des matériaux :

□ **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.

□ Contact :

Le contact détermine les attributions des électrodes. La syntaxe du contact est la suivante : Contact NAME = < name >

□ 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 [24].

II.5.3 Sélection de la méthode

□ **Méthod :**

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.

II.5.4 Spécification de Solution

□ **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.

□ **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

II.5.5 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 II- 9) :

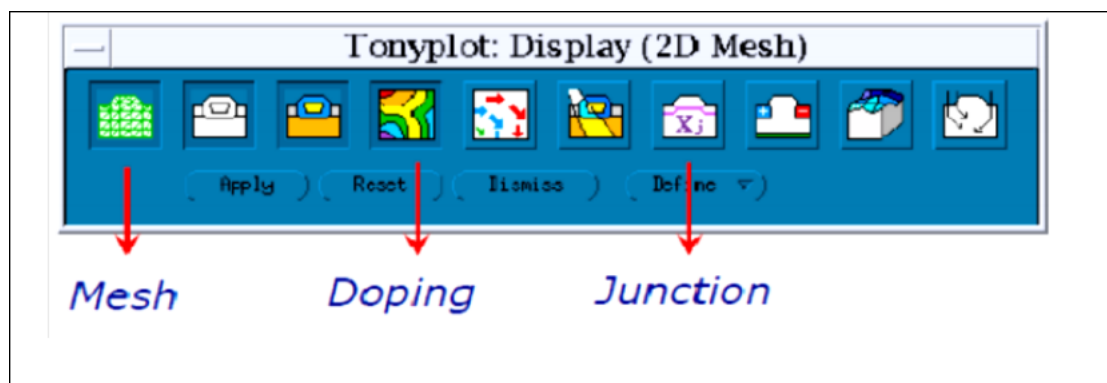


Figure II- 9: Environnement TONYPLOT.

Conclusion

Ce chapitre a présenté quelques informations de base en programmation par Silvaco-Atlas, alors plusieurs aspects spécifiques à la méthodologie de programmation ont été présentés comprenant structure de programme, Spécification des paramètres des matériaux et modèles physiques et Sélection de la méthode numérique.

Chapitre III:

Simulation de la cellule solaire tandem

III.1 Introduction

Le logiciel de simulation Silvaco-Atlas est un simulateur de modélisation des caractéristiques électriques des composants à semiconducteurs.

Dans ce chapitre, nous allons exploiter ce simulateur pour l'étude et la présentation des résultats de simulation numérique des cellules solaires simple jonction Silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) et tandem en Silicium amorphe hydrogéné / Silicium microcristallin hydrogéné (a-Si:H/ μ c-Si:H). Nous commençons ce chapitre par l'étude de la structure de la cellule solaire simple jonction a-Si:H et de présenter les résultats. Ensuite, nous allons étudier les performances de la cellule solaire tandem a-Si:H/ μ c-Si:H avec une cellule supérieure a-Si:H et une cellule inférieure μ c-Si:H. les deux cellules simple jonction et tandem vont être comparées afin d'améliorer le rendement de conversion pour les applications des technologies récentes.

III.2 Etude de la cellule solaire simple jonction :

III.2.1 Structure de la cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné a-Si : H :

La structure de base de la cellule en a-Si:H est représenté sur la figure III- 1 dans laquelle sont illustrées ses différentes couches. Cette cellule à une large bande interdite ($E_g=1.7$ eV) qui peut absorber une gamme de longueur de photons incidents de l'ordre de 100nm. Cette conception se compose d'une première couche en haut d'oxide SiO_2 avec une épaisseur de $0.5 \mu m$, suivie d'une deuxième couche en ITO (l'Oxide d'Indium-étain), conducteur transparent, 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 $0.5 \mu m$. 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 avec une concentration de dopage de $1 \times 10^{20} cm^{-3}$ et d'épaisseur de $0.015 \mu m$, la région en a-Si: H intrinsèque est d'épaisseur $0.2 \mu m$, et la région en a-Si: H de type n avec une concentration de dopage de $1 \times 10^{20} cm^{-3}$ et d'épaisseur de $2.2 \mu m$. Les trois couches en bas en ITO, Argent et Aluminium (qui représente la cathode de la cellule) ont des épaisseurs de $0.1 \mu m$, $0.1 \mu m$ et $0.2 \mu m$, respectivement.

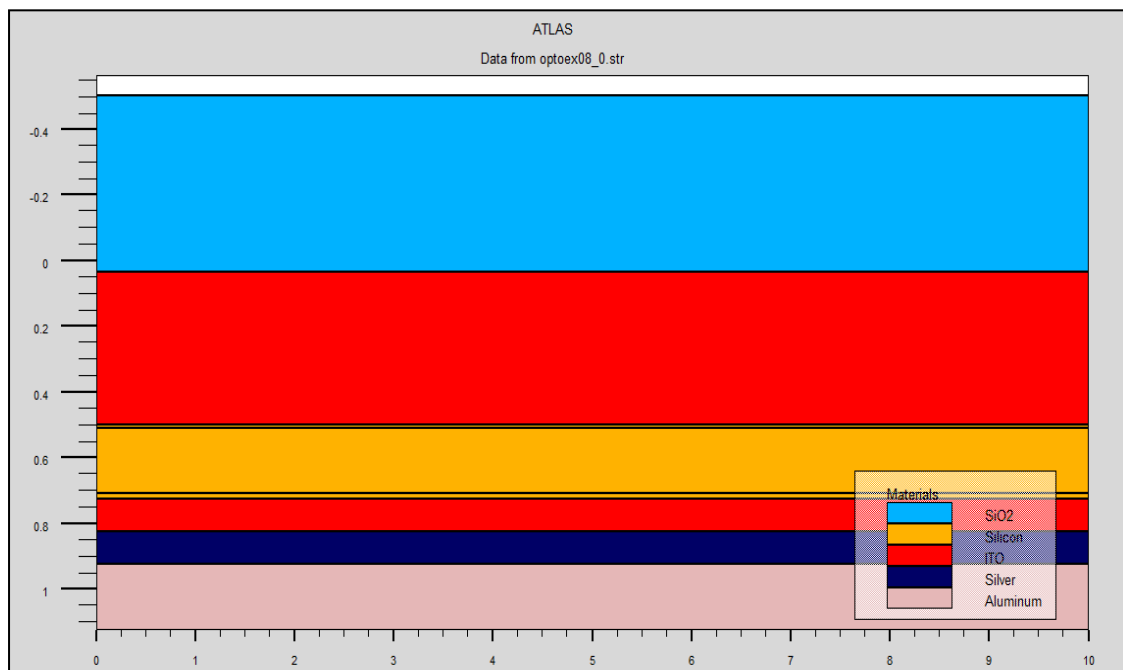


Figure III.1: Structure de cellule simple jonction

III.2.2 Paramètres de simulation de la cellule solaire en a-si : H

Pour faire une simulation d'un dispositif, il faut définir les paramètres des matériaux employés dans la fabrication de ce dispositif tels que l'énergie du gap E_g (eV), les densités des états de la bande de conduction N_c (cm^{-3}) et de la bande de valence N_v (cm^{-3}). En plus de ceci, la durée de vie des électrons et des trous τ_{n0} et τ_{p0} (ns), la vitesse de recombinaison en surface S_n et S_p (cm/s) et l'affinité électronique en (eV). Ces paramètres sont définis et groupés dans le tableau III-1.

Paramètres	Matériau a-si : H
Bande gab E_g (eV)	1.7
Affinité électronique (eV)	4.17
Densité d'états des électrons N_c (cm^{-3})	$3 \cdot 10^{20}$
Densité d'états des trous N_v (cm^{-3})	$3 \cdot 10^{20}$
Durée de vie des électrons et des trous τ_{n0} et τ_{p0} (ns)	$\tau_{n0}=10^{-6}$ $\tau_{p0}=10^{-6}$
Vitesse de recombinaison en surface S_n et S_p (cm/s)	$S_n=10^5$ $S_p=10^5$

Tableau III- 1: Paramètres de simulation de la cellule solaire a-Si : H.

III.2.3 Maillage :

Le maillage joue un rôle important pour l'obtention de bonnes simulations. Celui-ci doit être fait avec la plus grande attention pour garantir la fiabilité des résultats. Les éléments qui définissent la maille élémentaire utilisée par le simulateur sont des prismes. Pour obtenir des résultats fiables et précis, la finesse du maillage doit être définie en fonction des variations des grandeurs physiques. Le maillage doit être dense dans les couches de a-Si:H. Il est également très bon dessus et dessous. La maillage conçu pour notre structure est montrée sur la figure ci-dessous.

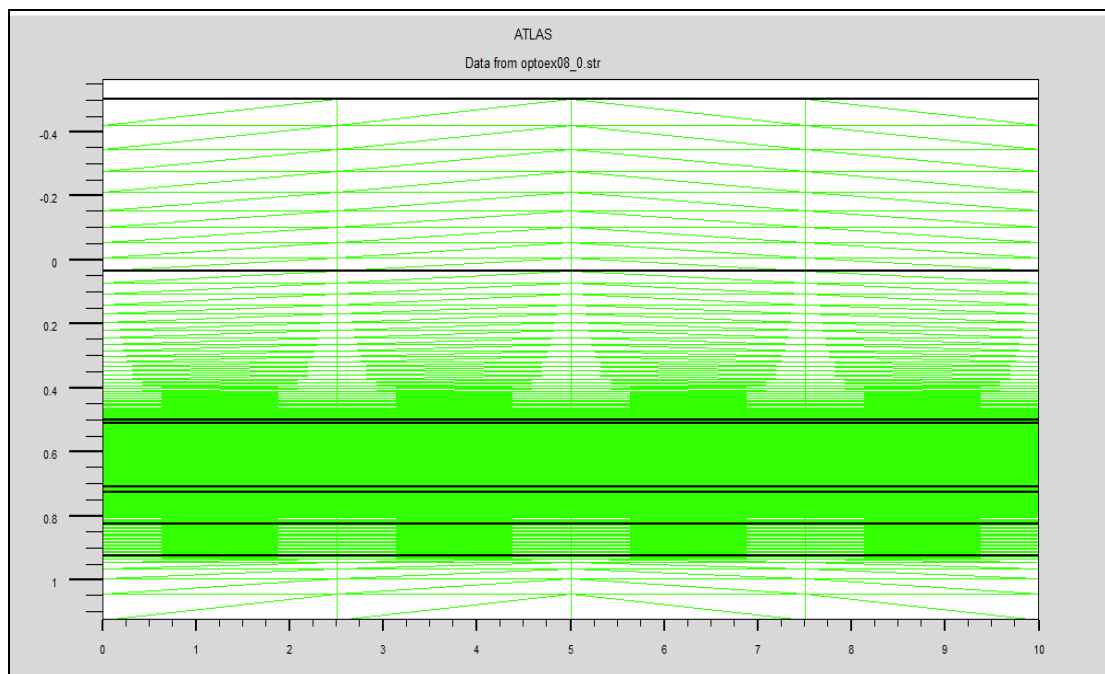


Figure III- 2 : Maillage de la cellule simple

III.3 Caractéristiques électriques de la cellule solaire en a-Si:H :

En implémentant les paramètres de simulation mentionnés au tableau III-1, la caractéristique $J(V)$ de la structure analysée peut être donnée par la figure III- 3. La cellule présente un courant de court circuit de 0.4425 mA/cm^2 , une tension de circuit ouvert de 1.0769 V , un facteur de forme de 86.5133% et un rendement de conversion de 4.1268% .

Les paramètres de la cellule a-Si:H tirées d'après la caractéristique ($J-V$) sont récapitulées dans le tableau III- 2.

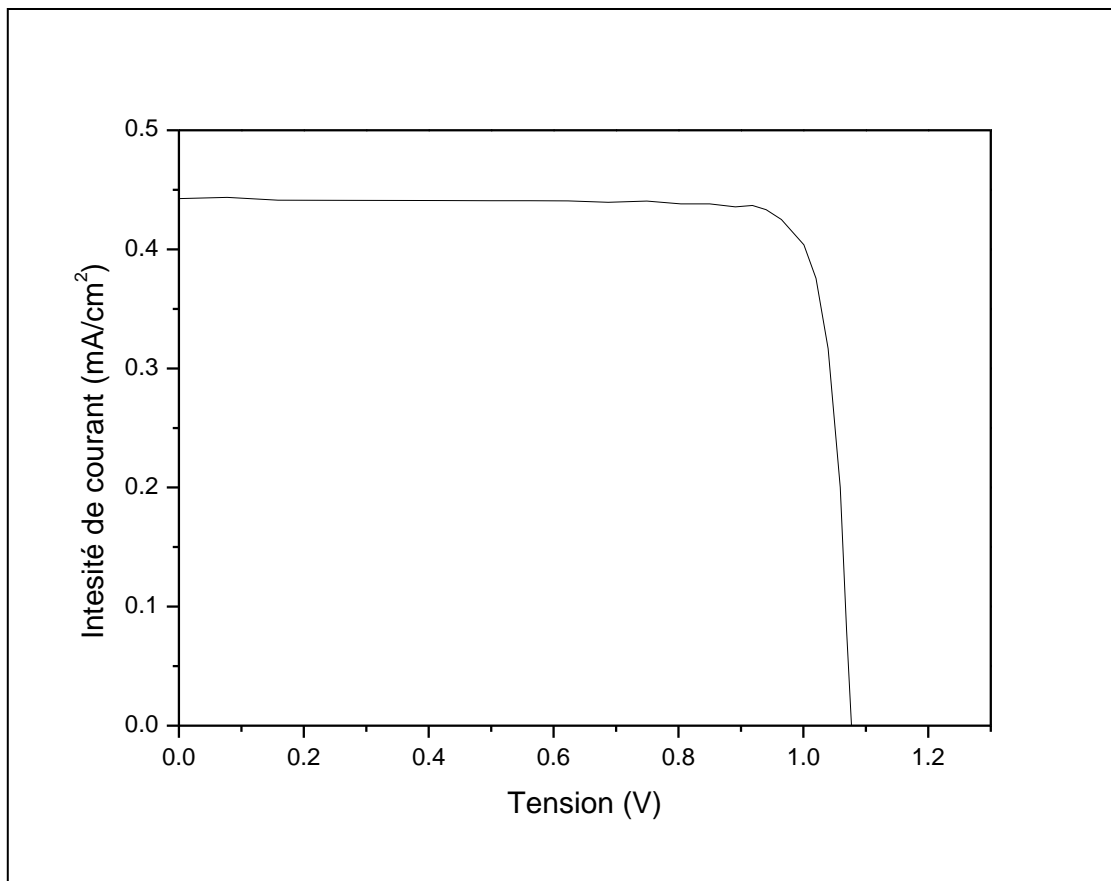


Figure III- 3 : Caractéristique $J(V)$ de la cellule solaire en a-Si:H

Paramètres électriques	I _{cc} (mA/cm ²)	V _{oc} (V)	FF (%)	η (%)
Valeurs	0.4425	1.0769	86.5133	4.1268

Tableau III- 2: Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en a-Si:H

III.4 Simulation de la cellule solaire tandem en a-Si:H/ μ c-Si:H :

III.4.1 Structure de la cellule tandem :

La structure de base de la cellule solaire à double jonctions en a-Si:H/ μ c-Si:H est représenté sur la figure 4. Cette conception consiste de deux cellules solaires: une cellule solaire supérieure a-Si:H à large bande interdite ($E_g=1.7\text{eV}$) et une cellule inférieure μ c-Si:H à faible bande interdite ($E_g=1.16\text{eV}$) dont le but d'absorber une large gamme du spectre. Les deux cellules sont similaire dans leur structure PIN (régions de type P, intrinsèque et de type N, respectivement du matériau utilisé). Elles sont connectées optiquement et électriquement par la couche intermédiaire d'ITO qui représente une électrode commune. La cellule est soumise à un éclairnement par le spectre solaire AM1.5 de densité de puissance $100\text{mW}/\text{cm}^2$.

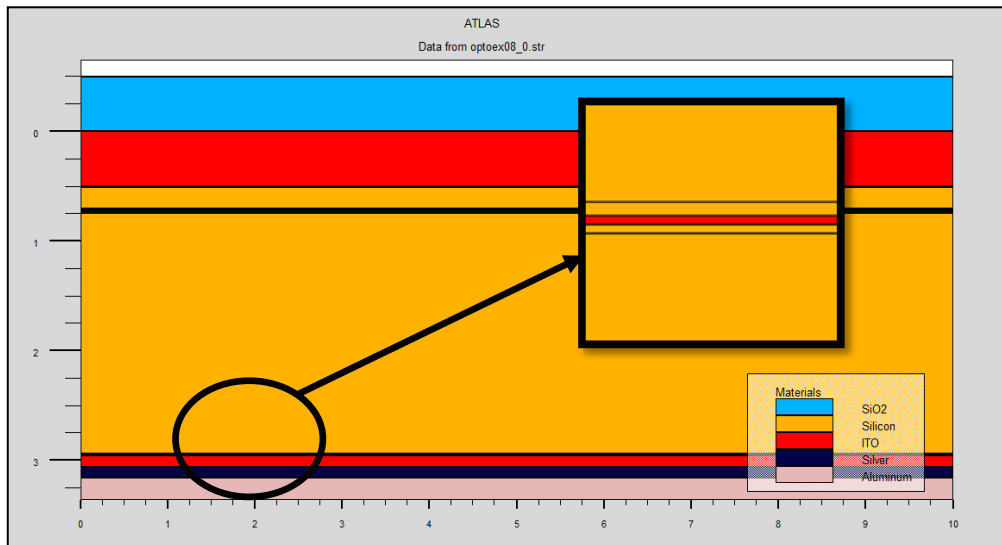


Figure III- 4:Structure de cellule solaire tandem

III.4.2 Paramètres de simulation de la cellule tandem a-Si:H/ μ c-Si:H :

Les paramètres de simulation de notre cellule à double jonctions a-Si:H/ μ c-Si:H sont groupés dans le tableau III-3.

Paramètres	Matériaux	
	a-si : H	μc- si
Bande gabEg (eV)	1.7	1.16
Affinité électronique (eV)	4.17	4.17
Densité d'états des électrons N c (cm ⁻³)	3*10 ²⁰	3.5*10 ²⁰
Densité d'états des trous N v (cm ⁻³)	3*10 ²⁰	5.5*10 ²⁰
Durée de vie des électrons et des trous τ _{n0} et τ _{p0} (ns)	τ _{n0} =10 ⁻⁶ τ _{p0} =10 ⁻⁶	τ _{n0} =10 ⁻⁶ τ _{p0} =10 ⁻⁶
Vitesse de recombinaison en surface S _n et S _p (cm/s)	S _n =10 ⁵ S _p =10 ⁵	

Tableau III- 3: Paramètres utilisés dans la simulation

III.4.3 Maillage :

La figure ci-dessous donne la maillage de la cellule tandem où il est intense dans les régions importante.

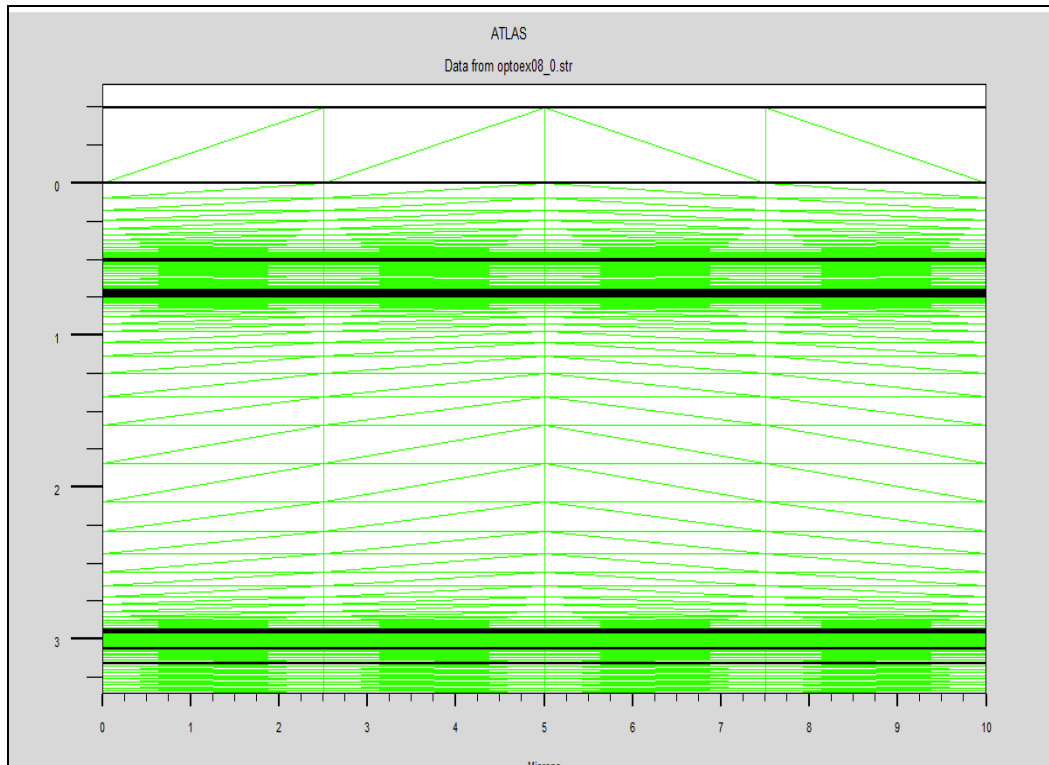


Figure III- 5: maillage de la cellule tandem

III.5 Caractéristiques électriques de la cellule solaire a-Si:H/ μ c-Si:H :

La figure III-6 représente la variation de la densité de courant en fonction de la tension pour la cellule solaire simple jonction a-Si:H et celle à double jonctions a-Si:H/ μ c-Si:H. Il est clair de voir que le courant de court circuit dans le cas de la cellule tandem croit par rapport à la cellule simple de 0.6274 mA/cm^2 à 0.4425 mA/cm^2 , la tension de circuit ouvert est de 1.5499V pour la cellule tandem est supérieur à celui de la cellule simple. De plus, le rendement de conversion pour la cellule tandem augment à 8.3991% . Cette amélioration des performances dans le cas de la cellule tandem est expliquée par l'utilisation des différents matériaux de diverses bandes interdites ce qui maximiser l'absorption de la lumière. Ceci provoque la libération de grande quantité des électrons où la mobilité de ces derniers augmente et par conséquent le rendement de conversion croit.

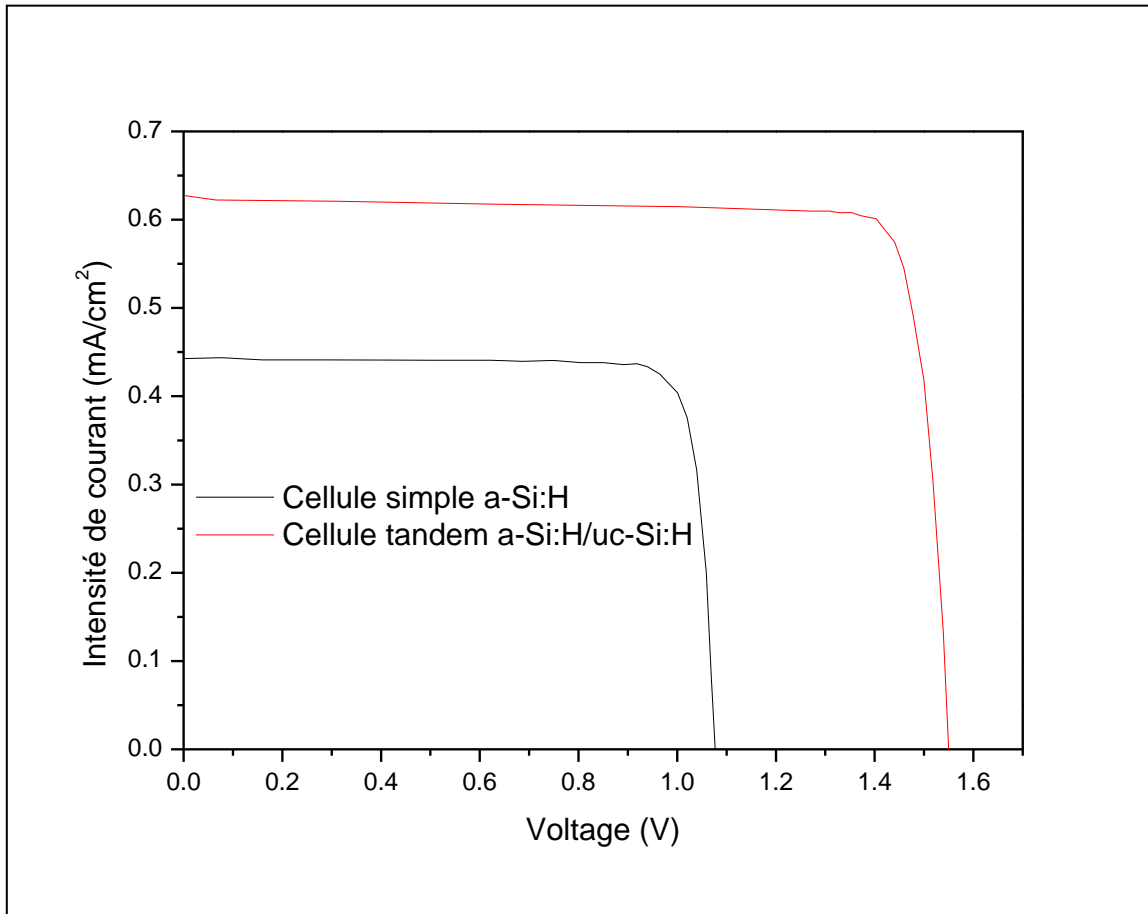


Figure III- 6 : Caractéristique J(V) des deux cellules solaires simple et à double jonctions.

Les paramètres photovoltaïques des cellules simple et tandem sont résumées dans le tableau III-4. il est à noter que les performances de la cellule peut être améliorée en utilisant la conception tandem.

ParamètresElectriques	Icc (mA/cm ²)	Voc (V)	FF (%)	η (%)
cellule solaire simple	0.4425	1.0769	86.5133	4.1268
cellule solaire tandem	0.6274	1.5499	86.4878	8.3991

Tableau III-4 : Paramètres photovoltaïques des différentes cellules solaires.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons employé l'outil Atlas du logiciel Silvaco pour l'étude du comportement électrique de deux cellules solaires simple jonction en a-Si:H et tandem en a-Si:H/ μ c-Si:H Afin de d'améliorer les paramètres électriques de la cellule simple. Les résultats obtenus montrent que les différents paramètres électriques ont été améliorés d'une façon considérable dans le cas d'une cellule tandem par rapport à celle simple jonction.

Conclusion général

Conclusion générale

La protection de l'environnement est devenue une préoccupation majeure ces dernières années. De nombreuses voies de recherches se sont donc orientées vers l'utilisation des énergies renouvelables, dont l'énergie solaire.

Diverses structures des cellules solaires ont été employées afin d'avoir un meilleur rapport du rendement de conversion et le prix. Ces cellules ont une structure à homojonction ou à hétérojonction.

Les cellules solaires à hétérojonction (a-Si:H / μ c-Si) combine le haut rendement stable du silicium cristallin avec le faible prix de la technologie de dépôt du silicium amorphe hydrogéné. Plusieurs équipes de recherche sur ces nouveaux types de cellules photovoltaïques novatrices se développent dans le monde, et se sont lancées dans des programmes pour l'utilisation d'hétérojonction à base de silicium.

Dans ce mémoire, nous avons exploité le simulateur numérique TCAD-Silvaco pour l'étude du comportement de la cellule solaire tandem, en particulier cellule en a-Si:H/ μ c-Si:H. La cellule tandem a été comparée avec celle à jonction simple afin d'améliorer l'efficacité de conversion pour les applications à rendement élevé. Dans un premier pas, nous avons examiné la cellule simple en a-Si:H qui donne un rendement de 4.1268%. Ensuite, les simulations numériques ont été faites pour l'étude de la cellule solaire tandem a-Si:H/ μ c-Si:H. Cette dernière a été comparée avec celle simple en a-Si:H où les paramètres électriques ont été améliorés et le rendement de conversion fourni par la cellule tandem est de 8.3991%. Evidemment, les résultats de simulation obtenus ont montrés que l'utilisation des cellules multijonction améliore les performances électriques de la cellule pour les applications terrestre et spatiale.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] MAGISTER en : Génie Electrique. Etude par simulation numérique des propriétés électriques d'une cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H). SERDOUK Mohammed Ridha Soutenu publiquement le :13/06/2015
- [2] Ali Sayigh, «Comprehensive Renewable Energy», Elsevier Ltd, UK, 2012.
- [3] Nichapour OleKsiy (simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque à contacte arrières interdigités) Thèse de doctorat. L'institut national des sciences appliquées de Lyon 2005.
- [4] 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.
- [4] J.Royer, T.Djiako, E.Schiller, B.Sada Sy, " Le pompage photovoltaïque: Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens", IEPF/université d'OTTAWA/EIER/CREPA,1998, www.iepf.org.
- [5] S. Djeroud, " Caractérisation morphologique et optoélectronique des cellules solaires (a-Si:H)", Mémoire de magistère, Université Oran, 2010.
- [6] H.Mathieu, "Physique des semiconducteurs et des composants électroniques", 2ème édition, Masson 1990.
- [7] N. BANDADLA, optimisation des émetteurs sélectifs et passivables des cellules solaires coventionnelles à base de mc_si, mémoire de magister, université de Tlemcen,2012.
- [8] K. AMARA, Contribution à l'étude d'une conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension, thèse de magister, université de Tizi- Ouzzou, 2015.
- [9] M. C. ABDELLI, Etude des cellules photovoltaïques organiques, mémoire de master, université de Tlemcen, 2013.

[10] S. PETIBON, Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, thèse de doctorat, université de Toulouse, 2009.

[11] M. BELARBI, Modélisation des paramètres électriques d'une cellule solaire sensibilisée par colorant, mémoire de master, université de Tlemcen, 2013.

[12] CLEFS CEA - N° 50/51 - HIVER 2004-2005.

[13] F. NEMMAR BELHOCINE, Etude et réalisation de cellules solaires photovoltaïques à base de matériaux organiques, thèse de doctorat, université de Tizi-Ouzou.

[14] Sana HARIECH, « Elaboration et caractérisation des couches minces de Sulfure de Cadmium (CdS) préparées par bain chimique (CBD) ».

Mémoire de Magistère de l'université Mentouri– Constantine, 2009.

[15] Université Abou Baker Belkaid Tlemcen .Faculté des Sciences .Département de Physique .LE DIPLOME DE MASTER .En Physique Energétique .Etude des performances d'une cellule solaire de type .Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) .Beghdadi souaad.

[16] Daniel Lincot, „La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire,,“, découverte n° 344 - 345 janvier - février (2007).

[17] Loucas Tsakalakos, „Nanotechnology for photovoltaics,,“, (Livre), Taylor and Francis Group, LLC, (2010).

[18] N. Oleksiy, “Simulation, Fabrication et Analyse de Cellules Photovoltaïques a contacts arrières interdigités ”, Thèse Doctorat, Lyon : INSA de Lyon, 2005.

[19] F.Rahal, “étude comparative des couches minces de TiO₂ prédestinées a la conception des cellules photovoltaïques obtenues par différentes méthodes”, mémoire Magister, Université M'SILA, 2009.

[20] P. Michalopoulos, “ A novel approach for the development and optimization of state-of-the-art photovoltaic devices using silvaco”, These doctorat, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2002.

[21] R.Negru, “ Conception et modelisation de pixels de photodetection

Photodiodes PIN en silicium amorphe en vue de leurs utilisations comme detecteurs de particules”, These doctorat, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2008.

[22] B. Garcia, Jr, “indium gallium nitride multijunction solar cell simulation using silvaco atlas”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2007.

[23] Atlas user's manual, Silvaco international, 2004.

[24] Mansour Hayatte; ‘Simulation numérique d’une cellule solaire à hétérojonction HIT en silicium par le logiciel T-cad SILVACO (2013).

Résumé

Durant ces dernières années, le marché du photovoltaïque s'est considérablement développé avec l'amélioration du rendement de conversion et les performances des cellules solaire due à la fabrication des cellules solaire tandem. Dans ce travail, nous étudions le fonctionnement de la cellule tandem à couche mince, en particulier cellule en a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$, par la simulation numérique en utilisant le logiciel Silvaco/Atlas. Cette dernière a été comparée avec celle simple à couche mince afin d'améliorer l'efficacité de conversion pour les applications à rendement élevé. Evidemment, les résultats de simulation obtenus ont été montrés que l'utilisation des cellules tandem (multijonction) améliore les performances électriques de la cellule pour les applications terrestre et spatiale.

Mots clés : a-Si:H, $\mu\text{c-Si:H}$, cellule solaire tandem, rendement de conversion.

Abstract

In recent years, the photovoltaic market has grown considerably with the improvement in conversion efficiency and solar cell performance due to the manufacture of tandem solar cells. In this work, we have study the operation of the tandem thin-film cell, in particular a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ cell, by numerical simulation using the Silvaco / Atlas software. This latter has been compared with that of single junction to improve the electrical performances for high-efficiency applications. Evident, the obtained results have been shown that the use of tandem (multijunction) cells improves the electrical performance of the cell for terrestrial and spatial applications.

Keywords: a-Si:H, $\mu\text{c-Si:H}$, tandem solar cells, conversion efficiency

ملخص

في السنوات الأخيرة ، نما سوق الضوئية بشكل كبير مع تحسن كفاءة التحويل وأداء الخلايا الشمسية بسبب تصنيع الخلايا الشمسية جنباً إلى جنب. في هذا العمل ، ندرس تشغيل خلية الأغشية الرقيقة الترادفية ، وخاصة خلية $\text{Si:H} / \mu\text{c-Si:H}$ ، عن طريق المحاكاة العددية باستخدام برنامج Silvaco / Atlas. تمت مقارنة هذا الأخير بأغشية رقيقة بسيطة لتحسين كفاءة التحويل للتطبيقات عالية الكفاءة. من الواضح أن نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها قد أظهرت أن استخدام الخلايا الترادفية (متعددة الوصلات) يحسن الأداء الكهربائي للخلية للتطبيقات الأرضية والمكانية.

الكلمات المفتاحية: a-Si:H ، $\mu\text{c-Si:H}$ ، الخلايا الشمسية جنباً إلى جنب ، كفاءة التحويل.