



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la**  
**Recherche Scientifique**



**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued**  
**Faculté de Sciences et de La Technologies**  
**Filière : Génie Electrique**

## **Mémoire de fin d'étude**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

# **MASTER ACADEMIQUE**

**En : Télécommunication**

**Spécialité : Systèmes de télécommunication**

**Par : Guebouri Wissal et Hamlaoui Hadjer**

## **Thème**

**Simulation de cellule solaire  $\text{MASnBr}_3$  à  
base de programme SCAPS**

**Devant le jury composé de :**

<b>Mr. Majouri Abdelkader</b>	<b>M C A</b>	<b>Président</b>
<b>Mr. Ajgou riadh</b>	<b>M A A</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr. Hima Abdelkader</b>	<b>M C B</b>	<b>Encadreur</b>

**2020-2021**

# *Dédicace*

*Avant tout, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré les difficultés rencontrés.*

*Je dédie ce travail ,*

*A mes chers parents ma mère « Hamida » et mon père « Labcher » pour leur patience, leur amour, leur soutien et leur encouragements.*

*A ma sœur « Amina », son mari « Nabil » et ses deux enfants « Oussama » et « Mohamed Islam », a ma sœur « Selma » et son mari, a mes frères « Soufyane et Dhiya el-ddine » et ma petite sœur « Marwa ».*

*A mes amies et mes camarades.*

*Sans oublier tout les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.*

**GUEBOURI WISSAL**



# *Dédicace*

*A celui dont je sollicite continuellement son consentement!*

*A ma fierté et mon orgueil*

*A celui dont je souhaite du bon Dieu, qu'il lui accorde longue vie et le protège  
mon papa Boubakeur.*

*A celle dont la Volonté Divine m'en a conseillée du bien d'elle*

*A celle dont le paradis d'Allah est sous ses pieds  
ma maman Ouidad.*

*A mes soutiens, mon refuge, et ma richesse*

*A ceux et celles dont je me targue de leur fraternité : Yahia, Zineb, Hamza, Amina, et  
Mouhamed.*

*A celui qu'était mon soutien et ma force dans ma continuité  
mon fiancé Farid.*

*A ma seconde mère, « mamati Atidal » l'adorable de mon cœur.*

*À toute ma famille, ainsi qu'à ceux et celles dont les noms ne sont cités à travers ces  
lignes, mais présents dans mon cœur*

*A tous-tes dont mes souvenirs étaient avec eux/elles, à vous mes amies.*

*HADJER HAMLAOUI*





## *Remerciement*

*Nous remercions Dieu de nous avoir  
donné la volonté et le*

*Courage de réaliser ce mémoire.*

*Nous voudrions exprimer nos  
sincères remerciements à notre*

*Encadreur Hima A. pour sa patience et  
ses précieux conseils.*

*Nous souhaitons également  
remercier tous les amis qui nous*

*Ont aidés de loin ou de près à  
accomplir ce modeste travail.*

# *Sommaire*

Dédicace.....	I
Remerciements .....	III
Sommaire .....	IV
Liste de figures .....	VI
Liste de Tableaux .....	VIII
Listes des symboles et abréviations .....	IX
Introduction générale .....	2
Chapitre I : Généralité Sur les cellules solaires.	
I.1 Introduction.....	5
I.2. La cellule solaire .....	5
I.2. 1. Historique.....	5
I.2.2. principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	5
I.3. Semi-conducteurs.....	6
I.3.1. Les différents types de semi-conducteurs.....	7
I.3.1.1 Semi-conducteurs intrinsèques (purs).....	7
I.3.1.2. Semi-conducteurs extrinsèques – le dopage.....	8
I.4. Deux types de dopage sont possibles.....	8
I.4.1. Le dopage de type n (négatif).....	8
I.4.2. Le dopage de type p (positif).....	8
I.5. La Jonction p-n.....	9
I.6. Caractéristique courant-tension.....	9
I.6.1 Tension en circuit ouvert $V_{co}$ .....	9
I.6.2 Courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	10
I.6.3 Point du fonctionnement $P_m$ ( $V_m$ ).....	10
I.6.4 Facteur de forme FF.....	10
I.6.5 Rendement $\eta$ .....	10

I.7. les différentes filières photovoltaïques.....	11
I.7.1. Les cellules solaires de la première génération.....	12
I.7.1.1. Silicium multi cristallin (mc-Si).....	12
I.7.1.2. Silicium monocristallin (sc – Si).....	13
I.7.2. Les cellules solaires de la deuxième génération (cellules à couche mince).....	13
I.7.3. Les cellules solaires de la troisième génération.....	13
I.8. Avantages et inconvénients.....	13
I.8.1. Avantages.....	13
I.8.2. Inconvénients.....	14
III .conclusion.....	14
Chapitre 02 : Présentation de programme de simulation SCAPS.	
II.1. Introduction.....	16
II.2. Significations de base.....	16
II.2.1. Lancer SCAPS.....	17
II.2.2. Définir le problème.....	17
II.2.3. Définir le point de fonctionnement.....	18
II.2.4. Sélection des caractéristiques à simuler.....	19
II.2.5. Lancer le calcul.....	19
II.2.6. énoncer les courbes simulées.....	19
II.2.7. Les courbes I-V.....	20
II.3.3. Définition d'une cellule solaire .....	22
II.3.3.1 diffusion de la construction d'une cellule solaire.....	22

II.3.2.Contacts.....	23
II.3.3 diffusion des couches.....	24
II.4.Conclusion.....	27
Chapitre03 : Résultats et discussion	
III.1.Introduction .....	29
III.2.Structure et paramètres de la cellule étudiée .....	29
III.2.1. Présentation de la cellule étudiée .....	29
III.2.2. Les paramètres du dispositif étudié.....	30
III.3. Résultats et discussion.....	31
III.3.1. Effet de l'épaisseur sur les caractéristiques électriques de la cellule .....	31
III.3.1.1.Effet de l'épaisseur sur la couche CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> SnBr <sub>3</sub> les caractéristiques électriques de la cellule.....	31
III.3.1.2.Effet de l'épaisseur de la couche PEDOT/PSS sur les caractéristiques électriques de la cellule.....	34
III.3.1.3 Effet de l'épaisseur de la couche PCBM sur les caractéristiques de la cellule .....	37
III.3.2.Effet de densités d'accepteur (Na) de couche CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> SnBr <sub>3</sub> sur les paramètres PV de la cellule solaire.....	40
III.3.3.Effet de Température sur les paramètres PV de la cellule solaire.....	42
III.3.4. Courbe courant-tension.....	43
III.4.Conclusion.....	43
Références.....	45

## Liste des figures :

<b>Figure I.1</b> Configuration photovoltaïque (connaissance des énergies, selon CEA).....	6
<b>Figure I.2</b> : schéma Représente les couches d'électrons de valence et d'électrons de conduction .....	7
<b>Figure I.3</b> : Diagramme schématique montrant les liaisons électroniques dans un semi-conducteur intrinsèque.....	8
<b>Figure I.4</b> : Diagramme de bande à l'équilibre .....	9
<b>Figure I. 5</b> : Les différentes technologies de cellules solaires.....	11
<b>Figure I.6</b> : Répartition de la filière des cellules photovoltaïques en 2011 [Hespul, d'après photon international 2012].....	12
<b>Figure II.1.</b> Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action.....	17
<b>Figure II.2</b> : Définir le problème.....	18
<b>Figure II.3:</b> Le point de fonctionnement .....	19
<b>Figure II.4</b> : Panneau des bandes d'énergie.....	20
<b>Figure II.5</b> : Panneau d'affichage des courbes I-V en éclaircissement et l'obscurité.....	21
<b>Figure II.6</b> Définition de la structure d'une cellule solaire.....	22
<b>Figure II.7</b> : Panneau des propriétés des contacts.....	23
<b>Figure II.8</b> : Propriétés de la couche ajoutée.....	24
<b>Figure II.9</b> : Propriétés des dopages définis.....	25
<b>Figure II.10</b> : Modèle de l'absorption.....	26
<b>Figure II.11</b> : Définition des types de recombinaison présents.....	26
<b>Figure III. 1:</b> schéma simplifié de la cellule solaire utilisée.....	30
<b>Figure III.2</b> : Variation du tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) avec l'épaisseur.....	32

<b>Figure III.3 :</b> Variation de la densité de courant de court –circuit <b>Jsc</b> avec l'épaisseur.....	33
<b>Figure III.4.</b> Variation du Facteur de forme <b>FF</b> avec l'épaisseur.....	33
<b>Figure III.5.</b> Variation du rendement de conversion photovoltaïque ( <b>η</b> ) avec l'épaisseur.....	34
<b>Figure. III.6.</b> Variation de la tension de circuit ouvert ( <b>VCO</b> ) avec l'épaisseur.....	35
<b>Figure III.7 :</b> Variation de la densité de courant de court –circuit <b>Jsc</b> avec l'épaisseur.....	36
<b>Figure III.8 :</b> Variation du Facteur de forme <b>FF</b> avec l'épaisseur.....	36
<b>Figure III.9.</b> Variation du rendement de conversion photovoltaïque ( <b>η</b> ) avec l'épaisseur.....	37
<b>Figure III.10.</b> Variation de la tension de circuit ouvert ( <b>VCO</b> ) avec l'épaisseur.....	38
<b>Figure. III.11.</b> Variation de la densité de courant de court- circuit <b>Jsc</b> avec l'épaisseur.....	38
<b>Figure III.12.</b> Variation du Facteur de forme <b>FF</b> avec l'épaisseur.....	39
<b>Figure III.13.</b> Variation du rendement de conversion photovoltaïque ( <b>η</b> ) avec l'épaisseur.....	39
<b>Figure III. 14:</b> Variation des paramètres photovoltaïques ( <b>Voc, Jsc, FF etη</b> ) avec Na des couchesCH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> SnBr <sub>3</sub> .....	41
<b>Figure III. 15 :</b> Variation du paramètre photovoltaïque (Voc, Jsc, FF et <b>η</b> ) avec les changements de température.....	42
<b>Figure III.15:</b> Courbe I-V simulée.....	43

**Liste des tableaux :**

**Tableau III.1 :** Propriétés des différentes couches (PEDOT: PSS/ CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub> SnBr<sub>3</sub>/ PCBM).....30

**TableauIII.2:** L'épaisseur de chaque couche de la cellule de base étudiée.....31

**TableauIII.3:**Propriété de couche(CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>SnBr<sub>3</sub>).....32

**TableauIII.4:**Propriété de la couche (PEDOT:PSS).....35

**TableauIII.5:**Propriété de la couche(PCBM).....37

## Listes des symboles et abréviations

<b>P</b>	phosphore
<b>Si</b>	silicium
<b>B</b>	bore
<b>V<sub>co</sub></b>	Tension en circuit ouverte
<b>I<sub>cc</sub></b>	Courant de court-circuit
<b>P<sub>m</sub></b>	point du fonctionnement
<b>FF</b>	facteur de forme
<b>η</b>	Rendement
<b>CIS</b>	cuiivre indium sélénium
<b>CdTe</b>	Cadmium Telluride
<b>mc-Si</b>	silicium multi cristallin
<b>sc-si</b>	silicium monocristallin
<b>CZ</b>	czochralski
<b>PECVD</b>	plasma enhanced chemical vapor deposition
<b>CIGS</b>	cuiivre indium galium sélénium
<b>PV</b>	photovoltaïque
<b>T</b>	température
<b>N<sub>c</sub></b>	Densité de donneur superficiel
<b>N<sub>v</sub></b>	Densité d'accepteur superficiel
<b>I<sub>v</sub></b>	tensions courant.
<b>N<sub>d</sub>, N<sub>a</sub></b>	Concentration des atomes accepteurs et des atomes donneurs respectivement.

# **Introduction générale**

## Introduction générale

L'énergie est une complication fondamentale pour les humains aujourd'hui. La question que l'avenir posera à l'homme est de savoir comment exploiter toutes les sources d'énergie alors que l'histoire réserve bien des surprises. On note lorsque le stock mondial d'hydrocarbures à base d'énergies fossiles diminue (pétrole, gaz et charbon), la demande d'énergie est en constante augmentation, la propagation de la pollution augmente, et le retour des énergies renouvelables (solaire, marine, éolien, etc.) est au premier plan des nouvelles. Leur exploitation est très bénéfique pour l'environnement.

Le solaire PV est l'une des énergies renouvelables les plus courantes. Il est produit par conversion directe du rayonnement électromagnétique (solaire ou autre) en électricité. Ceci est fait en utilisant des convertisseurs solaires photovoltaïques, qui sont le composant principal de la conversion photoélectrique. L'utilisation de cellules solaires sous forme d'onduleurs solaires concerne la nécessité d'étudier ces systèmes afin de les améliorer, et dont l'exploitation de cette nouvelle source d'énergie renouvelable n'est pas polluée et dont aucun gaz n'émane. C'est pour ces dernières raisons de l'énergie solaire, que la branche photovoltaïque vaut vraiment la peine d'être utilisée.

Par expérience, nous avons observé que le fonctionnement des cellules solaires dépend d'un ensemble de paramètres; Intérieur et extérieur (éclairage, mise au point, température, etc.). En connaissant l'effet de chaque paramètre sur la caractéristique I-V de la cellule, l'effet de ces différents paramètres sur le fonctionnement de la cellule solaire peut être étudié.

Le travail présenté dans ce mémoire est l'étude du principe de fonctionnement de la cellule solaire photovoltaïque et les mesures de ses propriétés. Pour ce faire, dans cette note, nous avons présenté trois chapitres:

- Dans le chapitre 1: nous faisons appel aux notions générales sur les cellules photovoltaïques.

- Dans le chapitre 2:nous présenterons le logiciel de simulation SCAPS.
- Enfin, dans le dernier chapitre nous présenterons et discuterons les résultats obtenus.

**Chapitre 01**  
**Généralités sur les**  
**cellules solaires**

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

Dans ce chapitre on présente les généralités indispensables dans le domaine de cellules photovoltaïque, nous aborderons ainsi en premier lieu quelques notions sur la cellule photovoltaïque. Nous décrivons ensuite les semi-conducteurs, la jonction P-N et les cellules solaires avec leur caractéristiques photovoltaïques et une brève description des différentes filières technologiques existantes. Et on termine par les avantages et inconvénients de cellule solaire.

## **I.2. La cellule solaire:**

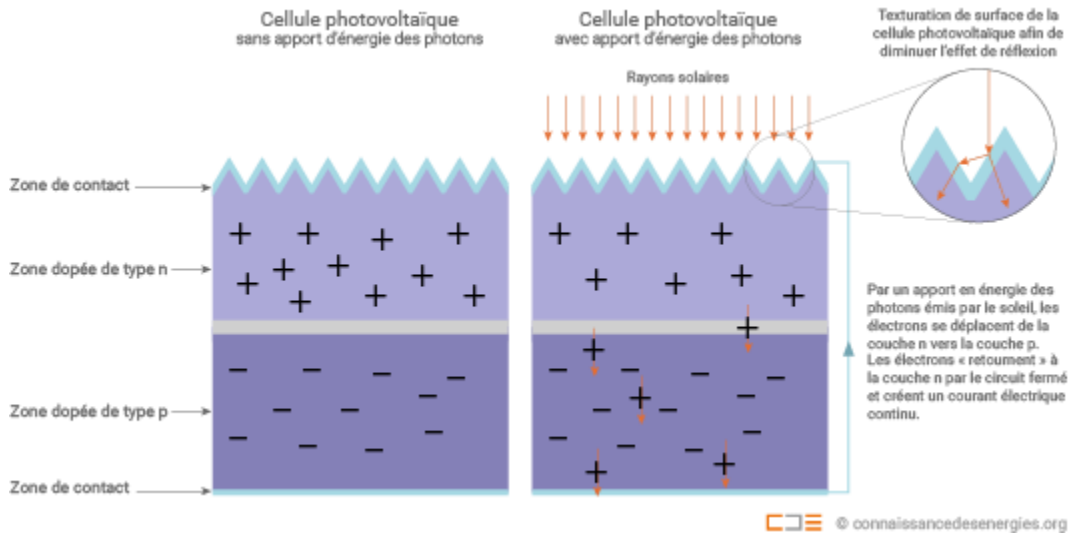
### **I.2.1. Historique [1] :**

L'effet photoélectrique a été découvert par le Français Antoine Becquerel en 1839, qui est la conversion de la lumière en électricité, ce phénomène n'a été exploité que près d'un siècle plus tard, cette découverte a été développée dans le dernier demi-siècle d'équipement des vaisseaux spatiaux, comme c'était le cas [2].

Pour utiliser l'énergie photovoltaïque dans des applications terrestres, de nombreux efforts ont été faits pour réduire les coûts dans les années 70 et 80. Depuis, l'industrie photovoltaïque a connu une croissance fulgurante [2].

### **I.2.2. principe de fonctionnement d'une cellule solaire [1] :**

L'un des composants semi-conducteurs qui convertissent la lumière en énergie électrique est la cellule solaire. Le phénomène précité, l'effet optique, provient de la différence de potentiel résultant de la génération de porteurs de charge par excitation lumineuse à proximité de la jonction. Une cellule solaire est une jonction p-n dont le fonctionnement dépend de l'absorption du flux lumineux solaire. Quant à l'effet photoélectrique utilisé dans les cellules solaires, il peut convertir l'énergie directement de la lumière du soleil en électricité en générant et en transmettant dans un matériau semi-conducteur des charges électriques positives et négatives sous l'influence de la lumière [2].



*Figure I.1 : Configuration photovoltaïque (connaissance des énergies, selon CEA).*

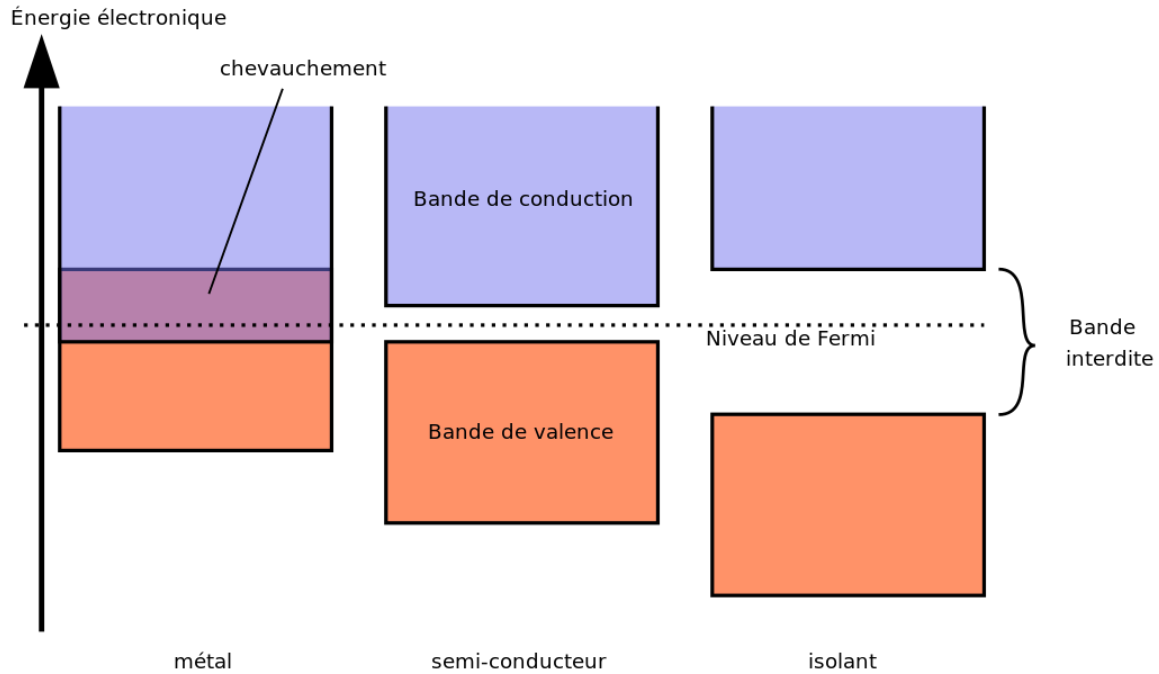
### I.3. Semi-conducteurs :

Les semi-conducteurs ne sont ni complètement conducteurs ni diélectriques, mais ils peuvent occuper deux rôles selon des conditions différentes. La source de la propriété conductrice ou isolante est due à la structure de leurs propres atomes: chaque élément du tableau périodique contient un certain nombre d'électrons disposés autour d'un noyau. Cette disposition se présente sous la forme de couches d'électrons, ce qui la différencie d'un élément à l'autre, et les éléments chargés de conduire l'électricité sont différents.

Les électrons des atomes ont de nombreuses entrailles à l'intérieur de la structure atomique, notamment:

- Electrons basiques: ils se trouvent près du noyau et n'interagissent pas réellement avec d'autres atomes.
- Electrons de Valence: ils sont situés sur les couches externes de l'atome où se forment des liaisons entre les atomes et la formation des molécules.
- Electrons de conduction: ils sont responsables de la rotation du courant électrique [3].

Tout peut être aménagé le schéma suivant montre les couches d'électrons de valence et la conduction électronique:

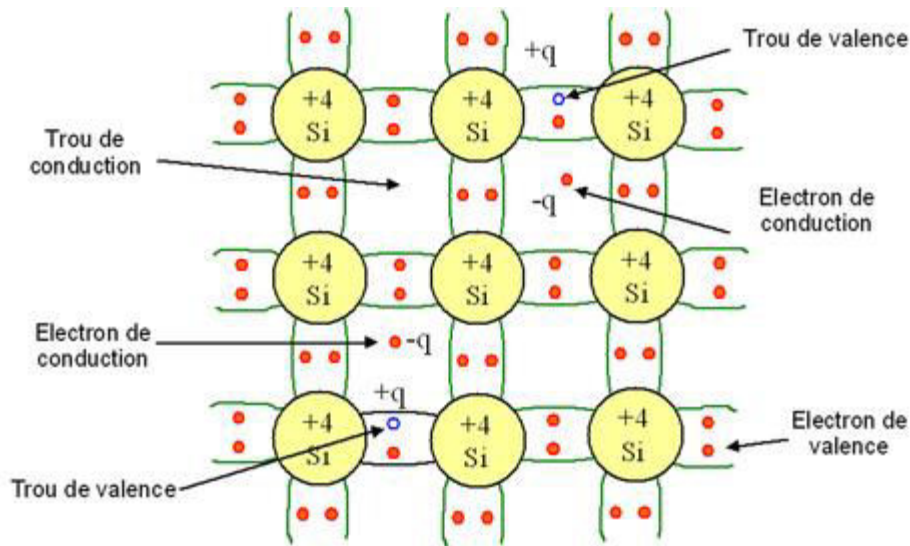


*Figure I.2 : schéma Représente les couches d'électrons de valence et d'électrons de conduction [3].*

### I.3.1. Les différents types de semi-conducteurs :

#### I.3.1.1. Semi-conducteurs intrinsèques (purs):

La quatrième colonne du tableau périodique des éléments contient des semi-conducteurs, où des liaisons covalentes peuvent se former à partir des électrons de la couche la plus éloignée du noyau de l'induction thermique en tant que porteur de charge. Le diagramme d'énergie se compose de deux bandes (conduction et valence) séparées par une bande interdite et pour obtenir de l'énergie un électron doit traverser cette bande, mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur est très faible. Ici, le nombre de trous et d'électrons est égal.



**Figure I.3 :** Diagramme schématisant les liaisons électroniques dans un semi-conducteur intrinsèque.

### I.3.1.2. Semi-conducteurs extrinsèques – le dopage:

Lorsque les atomes semi-conducteurs du réseau sont substitués par des atomes étrangers, dits Le dopage d'un cristal intrinsèque.

## I.4. Deux types de dopage sont possibles :

### I.4.1. Le dopage de type n (négatif) :

Il consiste à introduire des atomes étrangers dans la structure cristalline d'un semi-conducteur qui ont des électrons en excès (chargés négativement) et ont une liberté de mouvement dans le cristal. C'est le cas du phosphore (P) dans le silicium (Si) dans un matériau de type n, le profil de concentration des électrons libres.

### I.4.2. Le dopage de type p (positif) :

Les atomes qui s'insèrent dans le réseau cristallin créent un trou sont les atomes utilisés. Le bore (b) est le dopant p le plus utilisé du silicium. Lorsque deux activateurs différents (type n et type p) sont effectués des deux côtés de la cellule et après recombinaison de charges libres (électrons et trous), le résultat est, un champ électrique statique produit par la présence d'un positif et d'un négatif constant.

Dans le courant de la cellule photovoltaïque, ces charges électriques résultant de l'absorption du rayonnement peuvent contribuer.

### I.5. La Jonction p-n:

La différenciation du dopage entraîne brusquement une jonction p-n et l'émergence d'une zone de cristal, passant du dopage p au dopage n. Lorsque la région dopée p entre en contact avec la région n, les trous et les électrons sont involontairement distribués aux deux extrémités de la jonction, résultant en un espace de pénétration dans lequel la concentration de porteurs libres est pratiquement inexistante. Par contre, on voit qu'il y a un conducteur, qui est un semi-conducteur dopé donc la jonction rend difficile la pénétration du courant à l'extérieur.

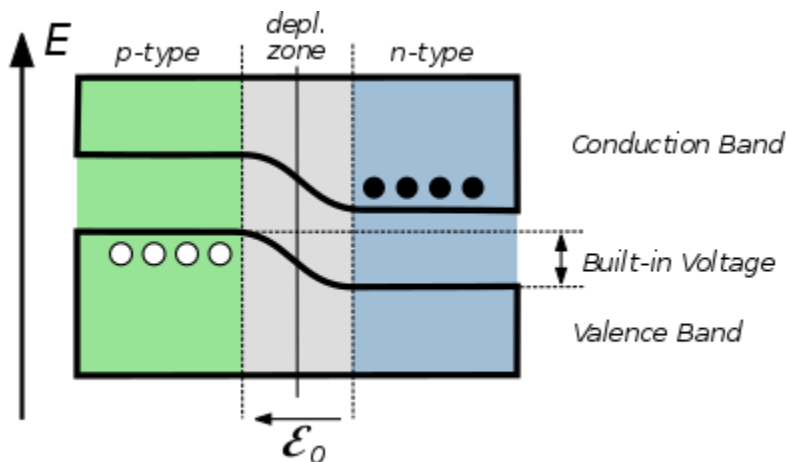


Figure I.4 : Diagramme de bande à l'équilibre [4].

### I.6. Caractéristique courant-tension:

Grâce aux paramètres déduits de la caractéristique de tension du courant, on peut connaître les caractéristiques de la cellule solaire photovoltaïque [5]:

#### I.6.1. Tension en circuit ouvert $V_{CO}$ :

$$V_{CO} = n V_{th} \log (1 + I_{ph}/I_S) \quad (I.1)$$

#### I.6.2. Courant de court-circuit JSC :

En court-circuit  $V=0$  :

$$D'où \quad J_{sc} = I_{ph} \quad (I.2)$$

### I.6.3. Point du fonctionnement $P_m (V_m, I_m)$ :

Le principal facteur qui évalue les performances du point de fonctionnement est la puissance maximale de la cellule photoélectrique, où sa relation est donnée:

$$P_m = V_m \times I_m \quad (I.3)$$

Il se situe à la jonction de la caractéristique IV sur laquelle  $P_m (V_m, I_m)$  est translaté et guide vers le point de force maximale appelé la valeur maximale à la fois de la tension  $V_m$  et du courant  $I_m$  [5].

### I.6.4. Facteur de forme FF :

En utilisant la fonction tension d'une cellule sous lumière et obscurité, on peut estimer le comportement de la cellule photovoltaïque et l'électricité, obtenant ainsi le facteur de forme (FF) qui représente le rapport entre la puissance maximale et le produit dont la relation est :

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

Ce dernier paramètre est égal à 1, si le facteur de forme est en forme de carrée. Ce paramètre est noté en pourcentage entre 0 et 1, et en générale sa valeur est comprise entre 0.6 et 0.85. Il permet la qualification de forme allongé de la fonction I-V de la cellule [5].

### I.6.5. Rendement $\eta$ :

Il est défini comme le rapport entre la puissance du rayonnement solaire et la force énergétique maximale produite par la cellule qui atteint la cellule.

Le rendement énergétique s'écrit [6] :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{inc} S} \quad (I.5)$$

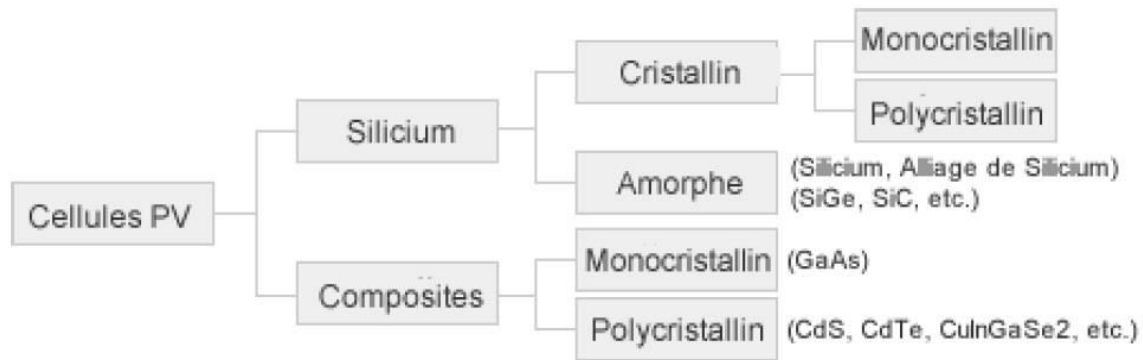
$P_{inc}$  : Puissance incident ;  $S$  : surface de la cellule photovoltaïque

Ou d'après :  $P_m = FF \times I_{cc} \times V_{co}$

$$\eta = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{P_{inc} S} \quad (I.6)$$

### I.7. les différentes filières photovoltaïques :

On utilise plusieurs technologies dans la conception d'une cellule photovoltaïque afin de mettre en œuvre l'effet photovoltaïque, beaucoup d'entre elles sont encore en phase d'expérimentation et de développement.



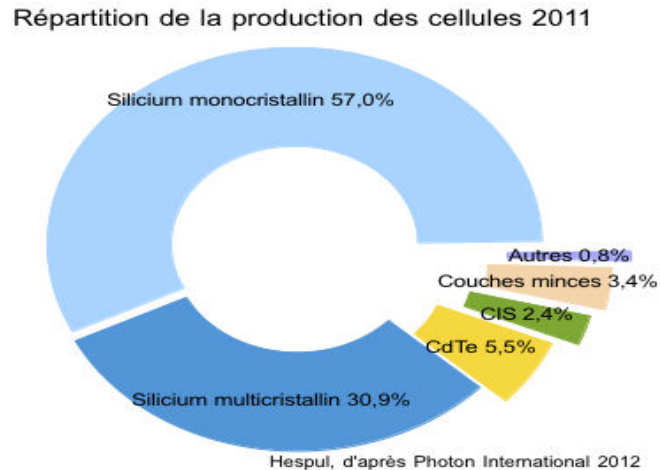
**Figure I. 5 :** Les différentes technologies de cellules solaires.

Pour mettre en œuvre l'effet photoélectrique, plusieurs techniques sont utilisées dans la conception de la cellule photovoltaïque, dont certaines sont en phase d'expérimentation et de développement.

L'utilisation du silicium cristallin est l'une des principales technologies les plus utilisées et représente 85% de l'utilisation mondiale de couches minces à base de Si amorphe, CIS,  $CdTe$  [7].

#### I.7.1. Les cellules solaires de la première génération :

La première cellule solaire a été produite en 1954 par Bell Laboratoires et a donné un rendement de 6% qui a ensuite été amélioré à 10% [8], car ce type de cellule est caractérisé par une seule jonction p-n étant à base de silicium sous une forme cristalline comme il se compose d'un substrat de silicium solide. Il est produit à partir d'une technologie d'impression et de découpe à base de silicium, et est très coûteux lorsqu'une augmentation de silicium de haute pureté est requise. 90% de la production unitaire mondiale représente la proportion de silicium. Comme le montre la figure(I.6). La majeure partie est réalisée via des modèles poly cristallins et monocristallins. Le silicium est le deuxième élément de la croûte terrestre et il est considéré comme l'un des éléments non toxiques et le plus abondant sur terre par rapport aux autres éléments.



**Figure I.6 :** Répartition de la filière des cellules photovoltaïques en 2011 [Hespul, d'après photon international 2012].

#### I.7.1.1. Silicium multi cristallin (mc-Si) :

Le silicium poly cristallin est produit par des techniques de croissance qui ont une structure colonnaire avec de gros cristaux, occupant 57% du marché mondial, et à son tour offrant un très bon avantage (11 à 15%) pour des coûts de construction modérés. Cependant, le matériau poly cristallin est piégé et déconnecté d'une part, et contaminé par des impuretés résiduelles de la matière première du silicium d'autre part, et ceci parce qu'il est constitué de déchets de l'industrie électronique [8, 9].

**I.7.1.2. Silicium monocristallin (sc – Si) :**

Le silicium monocristallin est obtenu par deux méthodes, le tirage CZ (Czochralski) et par Float Zone qui permet la production de silicium monocristallin de haute qualité.

Il apprend d'une implantation importante dans l'industrie de la microélectronique avec ces excellentes qualités électroniques, environ 30% du marché, et son utilité est supérieure au silicium poly cristallin (13 à 19%), mais sa fabrication est plus sensible, car elle nécessite une grande dépense d'énergie, ce qui entraîne un coût élevé [9].

**I.7.2. Les cellules solaires de la deuxième génération (cellules à couche mince) [10] :**

C'est un processus de dépôt de matériaux semi-conducteurs en couches minces. Ces matériaux sont préparés par des procédés, notamment le PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) sur un substrat, où l'épaisseur de la couche est comprise entre nanomètres et dizaines de micromètres. Le faible poids par watt de pointe a mis un terme à ces applications spatiales coûteuses et à ces technologies de concentration. L'augmentation du volume de production a conduit à une diminution du coût de ces technologies, afin de concurrencer les technologies cristallines de première génération. SNO/ CIS / CIGS.

**I.7.3. Les cellules solaires de la troisième génération :**

La troisième génération de cellules solaires est jusqu'à maintenant à l'étude.

Les applications spatiales mènent le développement de la troisième génération de cellules solaires, car elle vise à atteindre le plus haut niveau d'efficacité, en plus de réduire les obstacles et tout ce qui entrave les générations précédentes, comme le coût de fabrication. Substances ou leur toxicité. Ce type de cellule aux perspectives potentielles lui permet de répondre à de telles compétitions dans le futur [11].

**I.8. Avantages et inconvénients :****I.8.1. Avantages :**

- ❖ Il contient des pièces fixes, ce qui le rend adapté aux régions éloignées. C'est pour cette raison qu'il est utilisé dans les engins spatiaux.
- ❖ La raison du manque d'entretien entraîne un faible pourcentage des coûts d'exploitation et ne nécessite pas de main-d'œuvre spécialisée, de transport ou de carburant.
- ❖ Les produits finaux de la technologie PV sont non polluants et silencieux, mais ils occupent un grand espace pour les installations, et cela parce que la technologie PV a des propriétés environnementales et inoffensives.
- ❖ La nature modulaire des panneaux photovoltaïques permet un assemblage et une adaptation faciles aux différents besoins énergétiques.

### **I.8.2. Inconvénients :**

Le système photovoltaïque présente des inconvénients, par exemple:

- ❖ Pour augmenter le coût d'un générateur photovoltaïque, l'énergie électrique doit être fournie sous forme de batterie.
- ❖ Les générateurs diesel sont en concurrence avec les générateurs photovoltaïques afin de répondre aux faibles besoins en énergie des zones urbaines éloignées.
- ❖ La fabrication de modules PV nécessite une technologie de pointe et des investissements coûteux.

## **III .conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons parlé des dernières technologies photovoltaïques. Tout d'abord, nous avons commencé par les concepts des cellules solaires et le rôle de ces ressources renouvelables, puis nous avons étudié la cellule solaire, et pour comprendre cette technologie nous avons croisé tous les axes nécessaires, par exemple sa définition, sa structure et son fonctionnement. . . Outre ces équations physiques qui présentent ces paramètres, nous avons également parlé de l'effet photoélectrique . Enfin, nous montrons tous les secteurs et technologies présents dans le domaine du photovoltaïque en expliquant les classes et les trois générations de cellules pour définir le domaine d'étude.

**Chapitre 02**  
**Présentation de**  
**programme de simulation**  
**SCAPS**

## **II.1. Introduction :**

SCAPS est un programme de simulation de cellules solaires unidimensionnel à haute performance destiné à décrire le comportement électrique d'appareils utilisant des matériaux semi-conducteurs à cristaux. Il a été spécialement créé pour simuler des dispositifs photovoltaïques. Il a été développé par de nombreux chercheurs par le Département des systèmes électroniques et informatiques de l'Université de Gand. Il est à la disposition des institutions et instituts de recherche photovoltaïque, en tenant compte de tous les facteurs qui peuvent limiter les performances photoélectriques dans les cellules solaires par exemple: réflexions externes, installation, et couverture de surface. Indépendamment des facteurs primaires, à savoir: épaissement et activation des zones avant et de base. Ce programme fonctionne sur les ordinateurs sous Windows 95, 98, NT, 2000, XP, Vista et Windows 7 et occupe 50 Mo d'espace disque.

Dans ce chapitre, nous allons présenter des généralités sur le programme SCAPS, comment le faire fonctionner et l'utiliser, et ceci en mentionnant les étapes les plus importantes, et nous aborderons également la définition des classes qu'il contient. Nous présenterons aussi une simulation d'une cellule solaire utilisant ce programme.

## **II.2. Significations de base :**

SCAPS s'ouvre avec l'icône 'Action Panel'. La fenêtre qui s'ouvre est présentée dans la figure suivante:

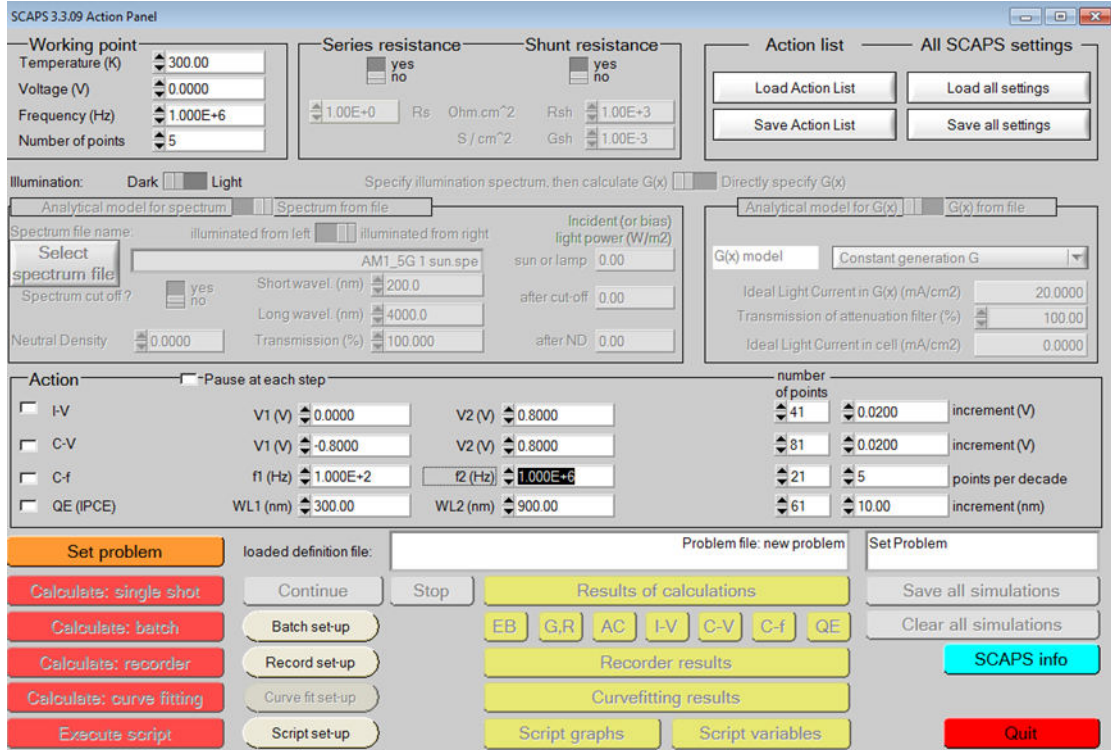


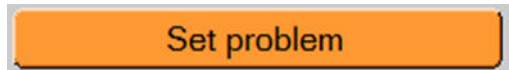
Figure II.1. Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action.

### II.2.1. Lancer SCAPS :

Vous cliquez sur l'icône sur le bureau qui représente le programme, ou dans toute autre version de SCAPS, vous obtenez une fenêtre du panneau d'action.

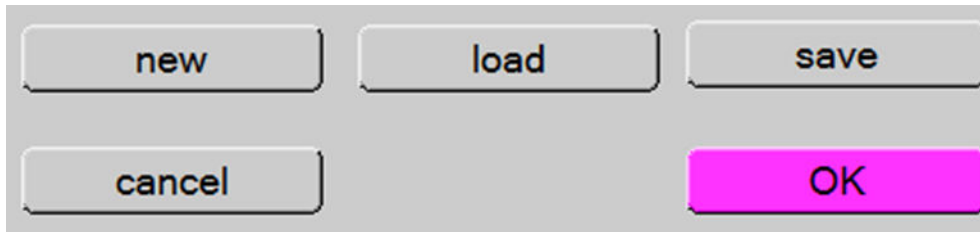


### II.2.2. Définir le problème:



Pour définir un problème, de la géométrie, des matériaux et de toutes les caractéristiques de la cellule solaire étudiée. Il faut faire des étapes, ce sont:

On clique sur le bouton SET PROBLEM dans le panneau d'action, après nous avons choisi le bouton LOAD qui se trouve dans le coin droit en bas de panneau. Puis, on a sélectionné et ouvert le fichier d'une cellule solaire qui nous examiner. La suite, il est probable de modifier les caractéristiques de la cellule en appuyant sur SET PROBLEM dans le panneau.

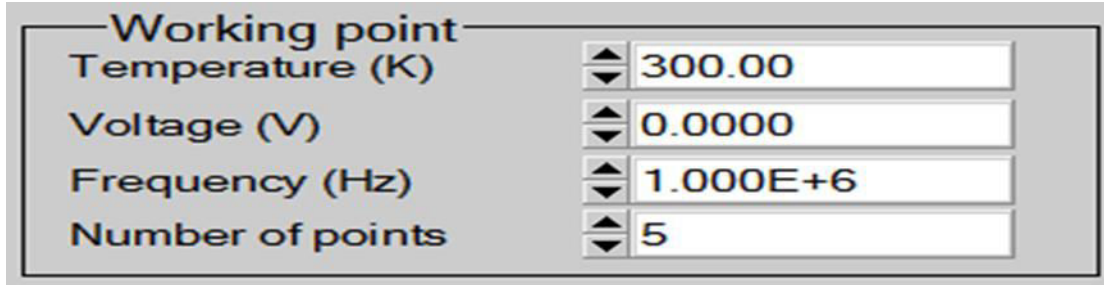


*Figure II.2 : Définir le problème.*

### **II.2.3.Définir le point de fonctionnement :**

Le point de fonctionnement spécifie les paramètres inchangés dans les mesures de simulation qui sont liés au processus de mesure. Ça signifie :

- Température T: importante pour toutes les mesures. Remarque: dans SCAPS: densité de donneur de superficiel  $N_c(T)$  et densité d'accepteur superficiel  $N_v(T)$ , les vitesses thermiques, le potentiel thermique  $kT$  et toutes leurs dérivées sont les seules variables qui ont une dépendance thermique claire; Les paramètres de matériau correspondants doivent être saisis manuellement pour Chaque valeur T, les paramètres du matériau correspondant.
- la fréquence dans laquelle la caractéristique C-V est simulée.
- L'illumination: Il est utilisé dans toutes les mesures pour QE ( $\lambda$ ), il détermine les termes de la ponctuation de la lumière. Les paramètres de base sont les suivants: sombre ou léger, choisissez le côté lumineux, choisissez Spectre. Le spectre supplémentaire sur le soleil (=  $w / m$ ) avec un bloc d'air global est le spectre par défaut, mais il existe également une large gamme de lumières mono et spectrales pour plus de simulations personnalisées s'il existe une simulation visuelle, on peut télécharger la génération immédiatement pour le profil au lieu d'utiliser un spectre.



Working point	
Temperature (K)	300.00
Voltage (V)	0.0000
Frequency (Hz)	1.000E+6
Number of points	5

*Figure II.3: Le point de fonctionnement.*

#### **II.2.4.Sélection des caractéristiques à simuler :**

Dans la partie procédure du panneau de procédure, une ou plusieurs mesures peuvent être choisies pour simuler: I-V, C-V, C-F et QE ( $\lambda$ ). Les valeurs initiale et finale de l'argument, ainsi que le nombre d'étapes, peuvent également être modifiés.

#### **II.2.5.Lancer le calcul :**

Pour Commencer et calculer on a clique sur:



#### **II.2.6.énoncer les courbes simulées :**

Après avoir fait les calculs, SCAPS passe au panneau de bande d'énergie, dans elle, on peut voir les diagrammes de bandes, les densités du courant, la densité des porteurs libres, au dernier point de polarisation. Si on veut afficher les résultats pour des tensions moyennes, vous pouvez cliquer sur le bouton PAUSE dans le panneau d'action. On peut faire apparaître les résultats par cliquer dans ces commandes (PRINT, SAVE GRAPHS, SHOW), et les valeurs présentent Après un certain temps à l'écran, c'est possible faire du Couper et Coller, et aussi enregistrer les valeurs dans un fichier de données. Si vous avez simulé au moins une seule opération de mesure, vous pouvez basculer vers un de vos panneaux personnalisés.

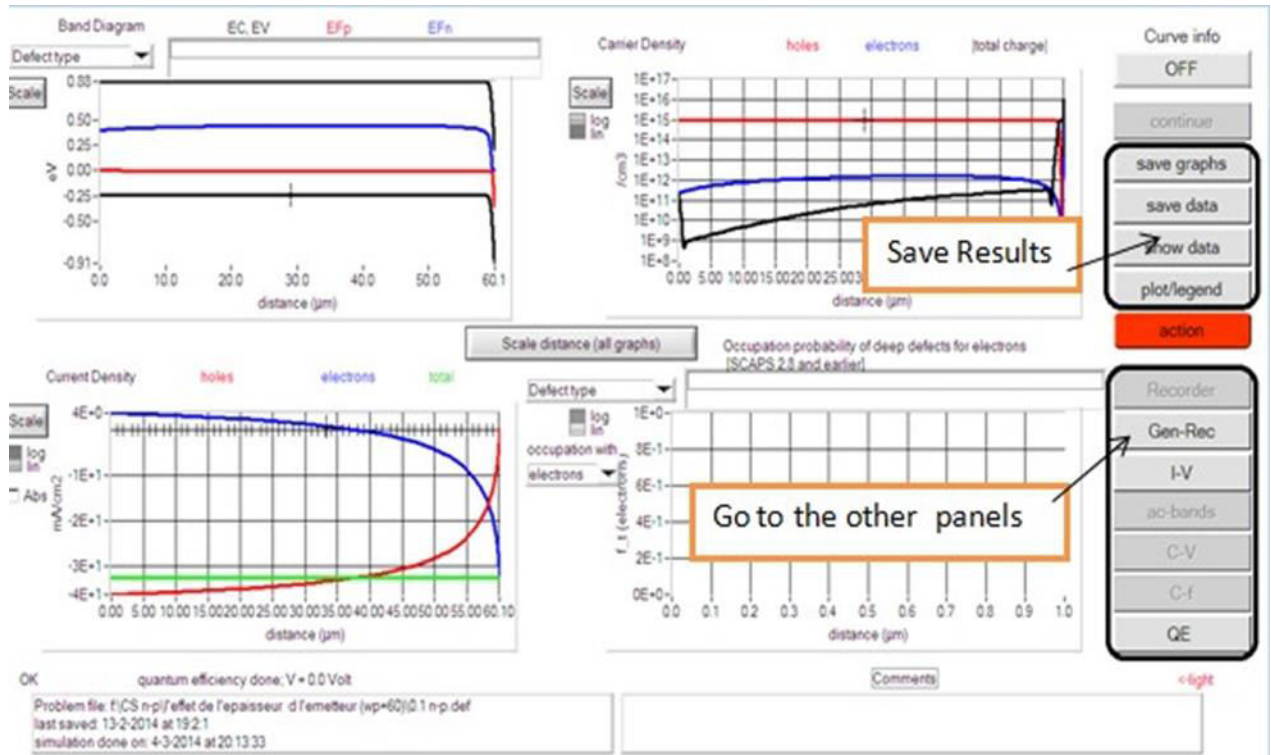
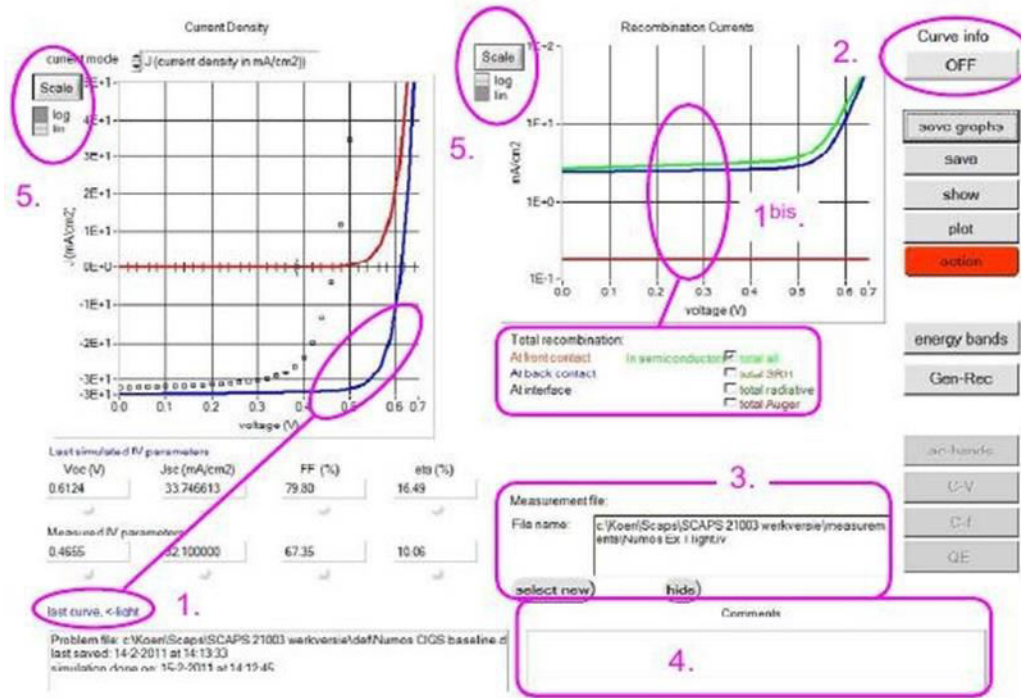


Figure II.4 : Panneau des bandes d'énergie.

## II.2.7. Les courbes I-V :



**Figure II.5 :** Panneau d’affichage des courbes I-V en éclaircissement et l’obscurité.

La figure ci-dessous présente le panneau d’affichage des courbes I-V à l’obscurité et sous éclaircissement. Pendant que, le graphe est trop encombré, on clique sur CLEAR ALL GRAPHS dans le panneau d’action (La couleur de la dernière courbe calculée est élucidée). La couleur de la légende accord à la couleur de la courbe. Les courbes des taux de recombinaison sont affichées uniquement pour la dernière simulation.

Un panneau pop-up apparaîtra, si CURVE INFO est sur ON et si on clique sur une courbe du graphe, avec des informations concernant le graphe et la courbe et aussi le point cliqué.

Si on clique sur le bouton CTRL et ont choisi une aire rectangulaire dans un graphe, celui-ci fera un zoom intérieur dans la zone sélectionnée, Le bouton SCALE va assistance à changer la gamme et l’échelle des axes. L’appui sur le bouton CTRL accompagné d’une clique droite donnera un zoom extérieur.

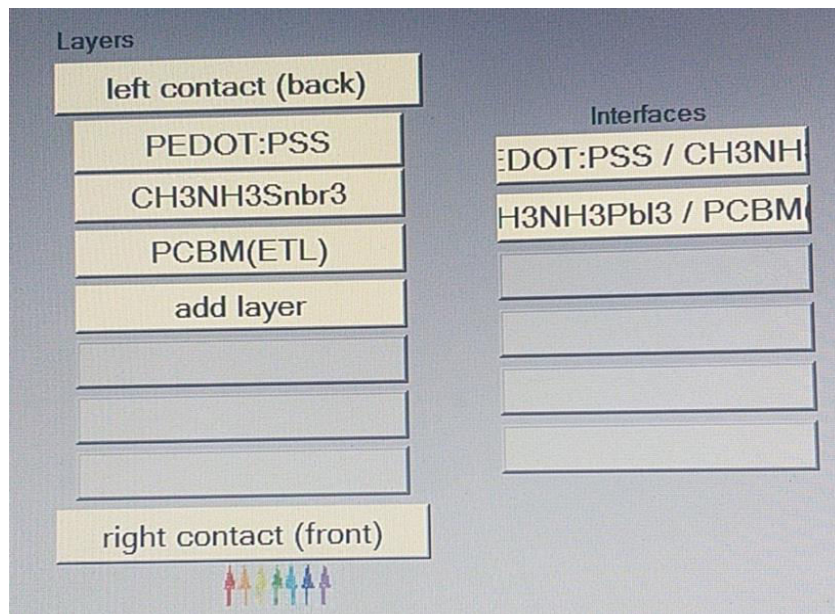
### II.3.3.Définition d'une cellule solaire :

Pour introduire une cellule solaire il faut utiliser l'interface graphique du logiciel. À cause de cette méthode, il est possible de faire insérer interactivement tous les paramètres qui seront contrôlés par SCAPS de façon à n'acquiescer pas des valeurs des composantes ou bien impraticables.

#### II.3.3.1 diffusion de la construction d'une cellule solaire:

Le panneau 'SOLAR CELL DEFINITION' s'affichera, quand on appuiera sur SET PROBLEM sur le panneau d'action. il permettra de modifier ou créer les structures des cellules solaires et de les charger à partir d'autres fichiers, ou bien de les enregistrer. Ces fichiers de définition sont des fichiers standards ASCII (American Standard Code for Information Inter change) d'extension. Def s'ouvrir par Wordpad.exe ou Notepad.exe. Il est alerté des modifier au risque dès les rendre usés par la suite.

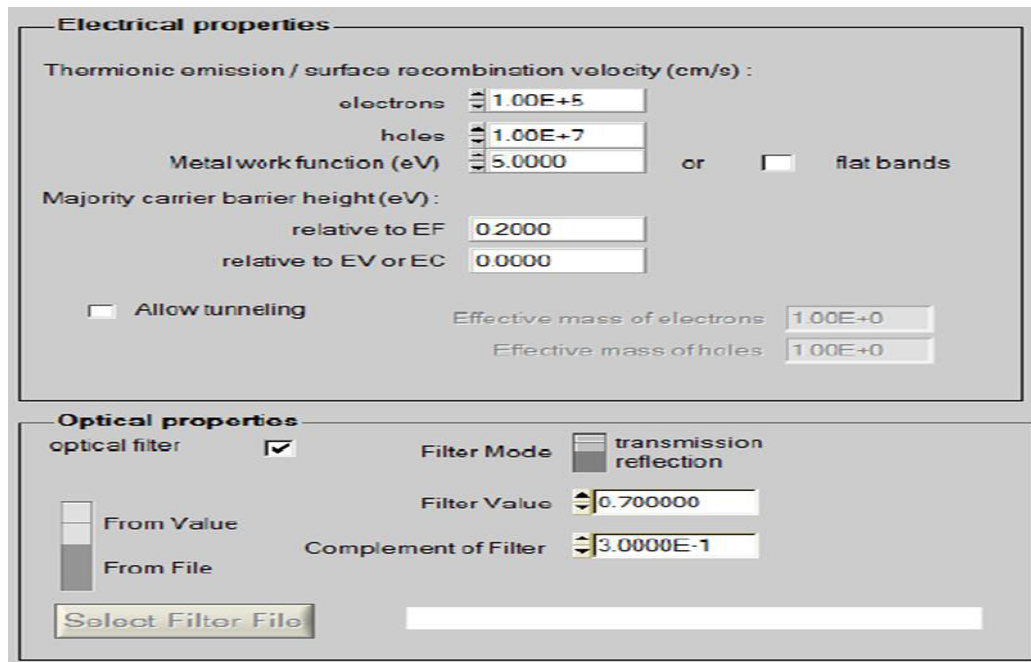
Quand en cliquant sur le bouton approprié comme le montre (la figure II 6), des couches peuvent être rajoutées en cliquant 'ADD LAYER'.et aussi, Les caractéristiques des contacts, des couches et d'interfaces elles possible modifiée.



**Figure II.6** Définition de la structure d'une cellule solaire.

### II.3.2.Contacts :

Les propriétés des contacts peuvent être entrées soit en appuyant sur le bouton du contact arrière ou bien sur du contact avant sur le panneau de définition de la cellule. La figure suivante présente, un panneau des propriétés de contact ‘CONTACT PROPERTIES PANEL’.



*Figure II.7 : Panneau des propriétés des contacts.*

Les caractéristiques des contacts, se divisent en caractéristiques optiques et électrique, et sont:

- les caractéristiques optiques: on peut désignation la réflexion ou la transmission, par un fichier de données ou bien une valeur.
- les caractéristiques électriques, sont :
  - ✓ Les vitesses de recombinaison surfaciques des électrons et des trous libres.
  - ✓ Si le contact est optimal (régime de bande plates), ou il a un travail de sortie.

- ✓ L'influence tunnel.
- ✓ L'obstacle des transporteurs majoritaires.

### II.3.3 diffusion des couches:

Pour s'ouvrir une fenêtre (figure II.8) qui contient les différents paramètres du matériau à introduire, nous appuyant sur le bouton ADD LAYER. Dépendance à la physique des matériaux, Ces paramètres peuvent avoir des distributions uniformes ou non uniformes.

The screenshot shows the 'SCAPS 3.3.09 Layer Properties Panel' for 'LAYER 1'. The material is set to 'CH3NH3SnBr3'. The thickness is 200.00 nm. The layer is pure A (y=0) with a uniform profile. The semiconductor property is pure A (y=0). The bandgap is 1.900 eV, electron affinity is 3.390 eV, and relative dielectric permittivity is 8.200. The effective density of states for the conduction band (CB) and valence band (VB) are both 1.000E+18 1/cm³. The electron and hole thermal velocities are 1.000E+7 cm/s, and the electron and hole mobilities are 1.600E+0 cm²/Vs. The effective masses of electrons and holes are both 1.000E+0. There is no ND grading (uniform) and no NA grading (uniform). The shallow uniform donor density ND is 0.000E+0 1/cm³, and the shallow uniform acceptor density NA is 1.000E+18 1/cm³.

Parameter	Value
thickness (nm)	200.00
The layer is pure A: y = 0, uniform	uniform pure A (y=0)
Semiconductor Property P of the pure material	pure A (y = 0)
bandgap (eV)	1.900
electron affinity (eV)	3.390
dielectric permittivity (relative)	8.200
CB effective density of states (1/cm³)	1.000E+18
VB effective density of states (1/cm³)	1.000E+18
electron thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
hole thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
electron mobility (cm²/Vs)	1.600E+0
hole mobility (cm²/Vs)	1.600E+0
effective mass of electrons	1.000E+0
effective mass of holes	1.000E+0
shallow uniform donor density ND (1/cm³)	0.000E+0
shallow uniform acceptor density NA (1/cm³)	1.000E+18

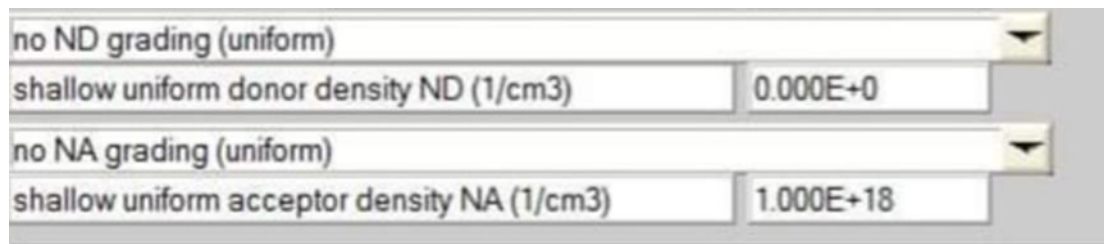
**Figure II.8 :** Propriétés de la couche ajoutée.

- Le premier block, on introduit le nom de la couche (qui correspond au type du dopage).
- Le deuxième block, on introduit l'épaisseur de la couche.
- Le troisième block, concerne la clarté du matériau et son profile.
- le quatrième block, on définit : les densités effectives des bandes de conduction et de valence, l'affinité électrique, l'écart d'énergie, la permittivité diélectrique, vitesse thermiques des électrons et des trous

libres, les mobilités des électrons et des trous. En fin, une case, qui permet ajouter les trous et des masses effectives des électrons, si on tient compte du transport des porteurs par effet tunnel.

On peut introduire des variations graduelles des précédents paramètres, si les matériaux sont composés d'éléments avec des concentrations non uniformes.

- le cinquième block, on introduit la densité, le type et le dopage. Ce dernier, peut avoir des variations graduelles comme linéaire, paraboliques, etc. aussi il peut être introduit comme étant uniforme.



no ND grading (uniform)	
shallow uniform donor density ND (1/cm3)	0.000E+0
no NA grading (uniform)	
shallow uniform acceptor density NA (1/cm3)	1.000E+18

*Figure II.9 : Propriétés des dopages définis.*

- Le sixième block: dans ce block, on définit l'absorption de la couche, s'avoir ça dans la (figure II.10).le SCAPS monté un nombre de données de l'absorption pour plusieurs étalons de semi-conducteurs. Pour définir L'absorption on utilise le modèle analytique fourni par SCAPS, comme elle peut introduite sous forme de données. Aussi, pour des semi-conducteurs non disponibles dans logiciel SCAPS On peut également utiliser d'autres données de l'absorption, à condition que le fichier ait la même extension des fichiers de l'absorption fournis par SCAPS.

Absorption model Show / Set alpha(composition; lambda)

alpha (y=0) from model from file alpha (y=1) from model from file

absorption constant A (1/cm eV<sup>1/2</sup>) 1.000E+5 1.000E+4

absorption constant B (eV<sup>1/2</sup>/cm) 0.000E+0 0.000E+0

sorption\CuInSe2.abs

absorption file for y = 0 absorption file for y = 1

show save

*Figure II.10 : Modèle de l'absorption.*

Tous les modèles des recombinaisons sont présents, à Travers les rets ou directs. Le type des recombinaisons en volume présente est indiqué dans l'aspect droit du panneau des propriétés de la couche, on s'avoir dans la fenêtre (Figure II.11).

Defect 4 of layer 1

defect type Single Donor (0/+)

capture cross section electrons (cm<sup>2</sup>) 1.000E-15

capture cross section holes (cm<sup>2</sup>) 1.000E-15

energetic distribution Gauß

reference for defect energy level Et Above EV (SCAPS < 2.7)

energy level with respect to Reference (e) 0.600

characteristic energy (eV) 0.200

Nt grading dependent on position x: Nt (x) exponential

Nt total (1/cm<sup>3</sup>) Left (x=0) 1.000E+15 Right (x=1) 1.000E+14

Nt peak (1/eV/cm<sup>3</sup>) Left (x=0) 2.821E+15 Right (x=1) 2.821E+14

*Figure II.11 : Définition des types de recombinaison présents.*

Si on faire entrer les pièges, ils peuvent être monovalents ou divalents, donneurs, neutres, uniformes ou non uniformes, monovalents ou divalents, discrets, avec des distributions gaussiennes, accepteurs. On peut même définir des transitions de porteurs entre les différents niveaux d'énergie des pièges.

**II.4.Conclusion:**

Nous avons présenté dans ce chapitre, une description détaillée sur le logiciel de Simulation SCAPS. Nous avons défini comment le faire l'utiliser , les étapes, ses outils, ses capacités et ses classes qu'il contient permettant de calculer tous les paramètres internes et externes liés à la cellule solaire et générer ainsi ses caractéristiques électriques comme la caractéristique densité de courant – tension (I-V) ,Ainsi il est nécessaire pour l'optimisation des structures des dispositifs photovoltaïques.

**Chapitre : 03**  
**Résultats et Discussion**

### III.1.Introduction:

Dans le but d'optimiser une conception spécifique d'une structure d'hétérojonction NIO/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>SnBr<sub>3</sub>/PCBM, nous devons analyser et interpréter les résultats pour déterminer l'influence des paramètres physiques et technologiques sur les performances du dispositif tels que l'épaisseur, la Densité d'accepteur uniforme superficiel NA et la densité de donneur uniforme superficiel ND.

Dans le travail qui suit nous allons simuler une cellule solaires basée sur le matériau CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>SnBr<sub>3</sub> dans le but d'améliorer l'efficacité en utilisant des matériaux NIO et PCBM, Où nous étudierons l'effet de l'épaisseur des sur la densité de courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ), le facteur de forme (FF), et le rendement en puissance ( $\eta$ ).

Les résultats obtenus dans cette opération sont présentés dans la section qui suite.

### III.2 Structure et paramètres de la cellule étudiée :

#### III.2.1 Présentation de la cellule étudiée :

Ce travail comprend une simulation d'une cellule solaire basée sur **CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>SnBr<sub>3</sub>** en raison de ses caractéristiques telles qu'une bande interdite idéale, un large spectre d'absorption, un bon mécanisme de transmission, une facilité de fabrication sur un substrat flexible, l'ajustement de l'espacement et de la longueur de propagation et la simulation de ces, des paramètres optiques et d'ingénierie afin de concevoir une cellule avec une efficacité électrique optimale.

Dans notre étude, nous utilisons une cellule solaire composée de

Les congénères suivants: (PEDOT/PSS (HTL) / CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>SnBr<sub>3</sub> / PCBM (ELT)) Une structure typique de cellules solaires à base de CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>SnBr<sub>3</sub> constituée d'une couche absorbante et supérieure de type p (PCBM (ELT)) et de type n ( PEDOT/PSS). Comme le montre la figure suivante III.1.

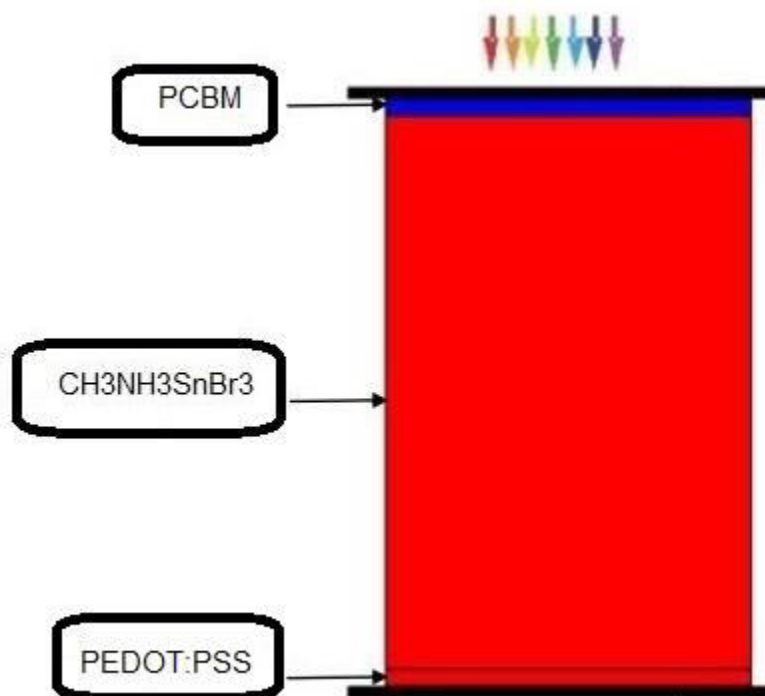


Figure III. 1: schéma simplifié de la cellule solaire utilisée.

### III.2.2. Les paramètres du dispositif étudié :

➤ Propriétés des différentes couches:

Propriétés \ Couches	PEODT:PSS	CH3NH3SnBr3	PCBM
Épaisseur( $\mu\text{m}$ )	0.030	1.000	0.030
Bande interdite (eV)	1.600	1.900	2.000
Affinité électronique (eV)	3.400	3.390	3.900
Permittivité diélectrique	3.000	8.200	3.900
CB densité effective d'états ( $\text{cm}^{-3}$ )	1.000E+22	1.000E+18	2.500E+21
VB densité d'états effective ( $\text{cm}^{-3}$ )	1.000E+22	1.000E+18	2.500E+21
Vitesse thermique des électrons (cm/s)	1.000E+7	1.000E+7	1.000E+7
Trou vitesse thermique (cm/s)	1.000E+7	1.000E+7	1.000E+7
Mobilité( $\text{cm}^2/\text{V.S}$ )	4.500E-4	1.600E+0	2.000E-1
Trou de la mobilité( $\text{cm}^2/\text{V.S}$ )	9.900E-5	1.600E+0	2.000E-1
Densité de donneur uniforme peu profonde	0.000E+0	0.000E+0	2.930E+17

<b>ND(cm<sup>-3</sup>)</b>			
<b>Densité d'accepteur uniforme peu profonde NA(cm<sup>-3</sup>)</b>	1.000E+22	1.000E+18	0.000E+0
<b>Defect Nt(cm<sup>-3</sup>)</b>	1.000E+15	1.500E+16	1.000E+15

*Tableau III.1: Propriétés des différentes couches (PEDOT:PSS/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>SnBr<sub>3</sub>/PCBM/).*

### III.3. Résultats et discussion :

#### III.3.1 Effet de l'épaisseur sur les caractéristiques électriques de la cellule :

Les épaisseurs et les paramètres utilisées des différentes couches de la cellule de base étudiée sont regroupées dans les tableaux III (1 et 2) :

	<b>Les couches</b>	<b>Epaisseur (μm)</b>
<b>1</b>	PEDOT : PSS	0.030
<b>2</b>	CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> SnBr <sub>3</sub>	1.000
<b>3</b>	PCBM	0.030

*Tableau III. 2: L'épaisseur de chaque couche de la cellule de base étudiée.*

#### III .3.1.1.Effet de l'épaisseur sur la couche CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>SnBr<sub>3</sub> les caractéristiques électriques de la cellule :

Les paramètres de la structure tirés des différentes caractéristiques représentées précédemment, sont récapitulés dans les cas suivants :

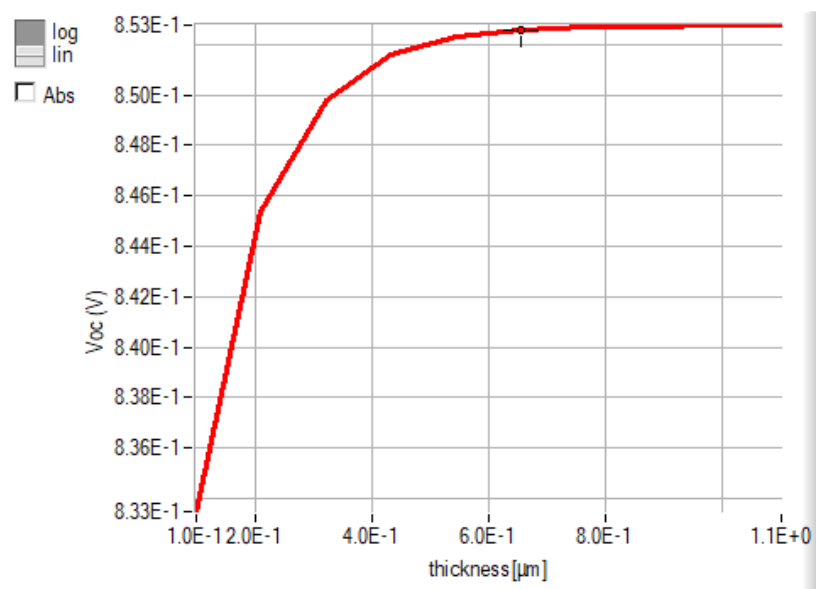
Nous changons , l'épaisseur du matériau (CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>SnBr<sub>3</sub>) de(0.1 à 1.1 μm), nous choisissons les meilleures propriétés et installer leur propre épaisseur, une fois l'épaisseur de la substance (PEDOT/PSS) et(PCBM) ajoutée aux propriétés énumérées dans le tableau III.2 :

Valeur	Épaisseur ( $\mu\text{m}$ )	eta (%)	Voc (V)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)
1	0,10	2,90	0.83	4,58	76.09
2	0,21	4,33	0.85	6,56	78.16
3	0,32	5,06	0.85	7,56	78.73
4	0,43	5,37	0.85	8.00	78.91
5	0,54	5,50	0.85	8,18	79.00
6	0,66	5,55	0.85	8,25	79.01
7	0,77	5,57	0.85	8,27	79.01
8	0,88	5,58	0.85	8,28	79.01
9	0,99	5,58	0.85	8,29	79.01
10	1.1	5,59	0.85	8,29	79.01

**Tableau III. 3:** Propriété de couche( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$ ).

Nous choisissons quelques valeurs de l'épaisseur de la couche ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$ ) pour tracer :

- La caractéristique tension de circuit ouvert  $V_{CO}$ .
- La caractéristique densité de courant de court -circuit  $J_{sc}$ .
- La caractéristique Facteur de forme FF.
- Le rendement de conversion la cellule solaire étudiée ( $\eta$ ).



**Figure III.2 :** Variation du tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) avec l'épaisseur.

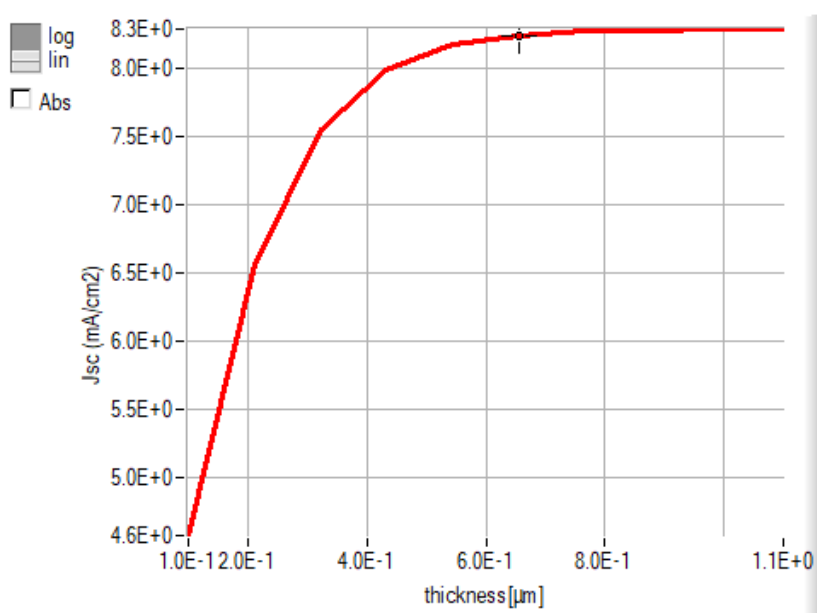


Figure III.3 : Variation de la densité de courant de court –circuit  $J_{sc}$  avec l'épaisseur.

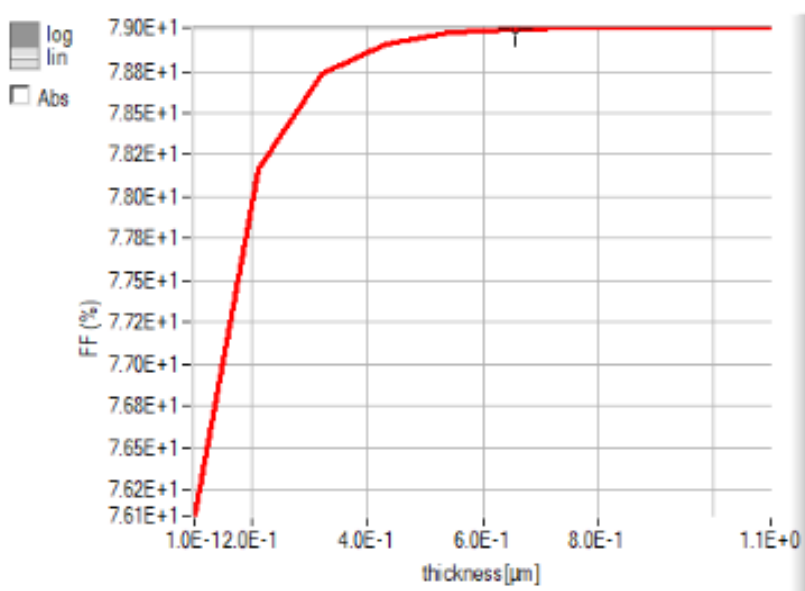
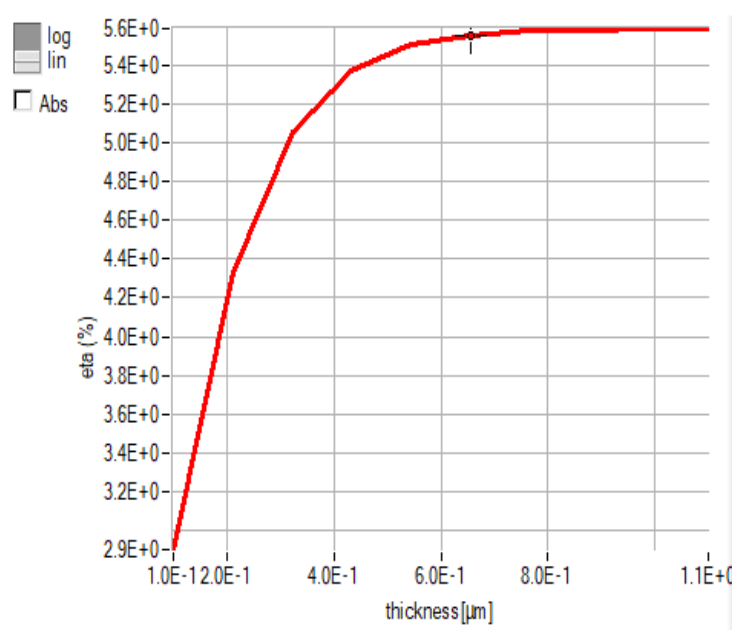


Figure III.4. Variation du Facteur de forme  $FF$  avec l'épaisseur.



**Figure III.5.** Variation du rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) avec l'épaisseur.

Nous remarquons sur (la figure III.2). que plus on augmente l'épaisseur de la couche  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$  au  $1\ \mu\text{m}$ , les différents paramètres et caractéristiques s'améliorent : la tension en circuit ouvert VCO augmente avec l'épaisseur (III.2), le courant de court-circuit JSC augmente de la même manière (figure III.3) d'où une augmentation remarquable du rendement électrique ( $\eta$ ). un facteur de forme (FF) de 80.55% (tableau III.4) est obtenu.

(La figure III.5) montre qu'il y a une augmentation du rendement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$ . Nous avons pu obtenir un rendement maximal de 5.58% avec une épaisseur de  $1\ \mu\text{m}$ .

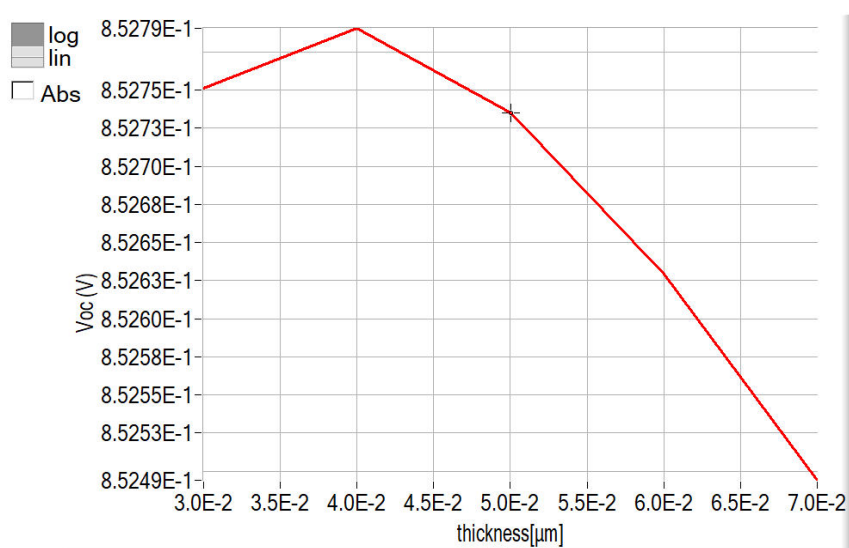
Alors on va choisir  $1\ \mu\text{m}$  comme valeur optimale.

### III.3.1.2. Effet de l'épaisseur de la couche PEDOT/PSS sur les caractéristiques électriques de la cellule :

Lorsque l'épaisseur du matériau (PEDOT/PSS) est modifiée de ( $0.03$  à  $0.07\ \mu\text{m}$ ), nous choisissons les meilleures propriétés et installer leur propre épaisseur, une fois que l'épaisseur de la substance (PEDOT/PSS) est ajoutée aux propriétés énumérées dans les tableaux III (1 et 2) :

valeur	Épaisseur				
	( $\mu\text{m}$ )	eta (%)	Voc (V)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)
1	0,03	5.59	0.85	8.29	79.01
2	0,04	5.59	0.85	8.40	78.03
3	0,05	5,58	0.85	8.41	77.76
4	0,06	5.56	0.85	8.38	77.79
5	0,07	5.53	0.85	8.32	77.91

**Tableau III. 4:** Propriété de la couche (PEDOT:PSS).



**Figure. III.6.** Variation de la tension de circuit ouvert (**VCO**) avec l'épaisseur.

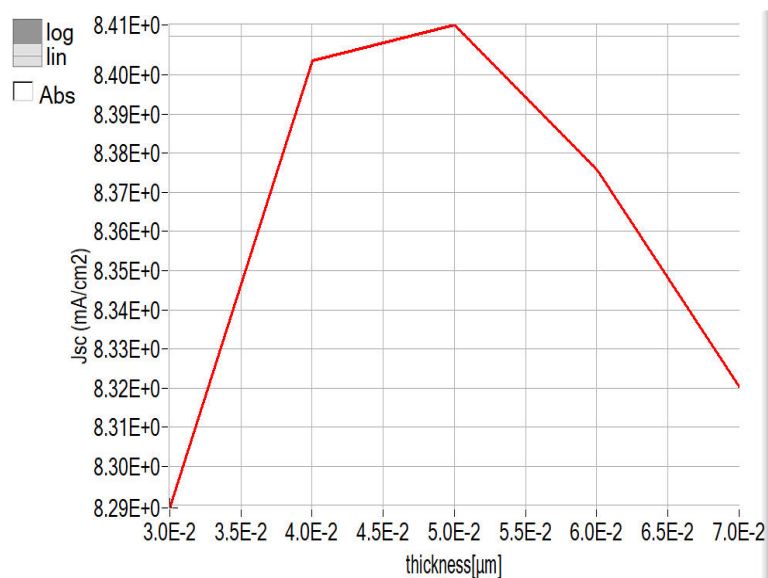


Figure III.7 : Variation de la densité de courant de court –circuit **Jsc** avec l'épaisseur.

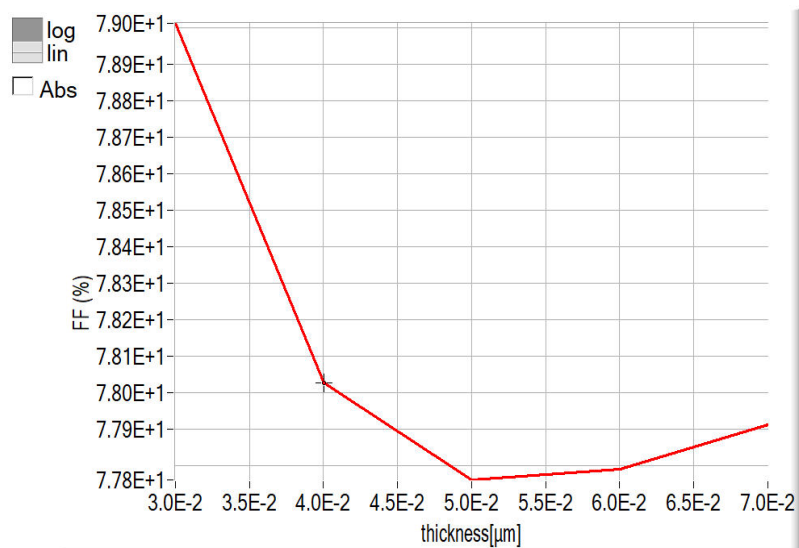
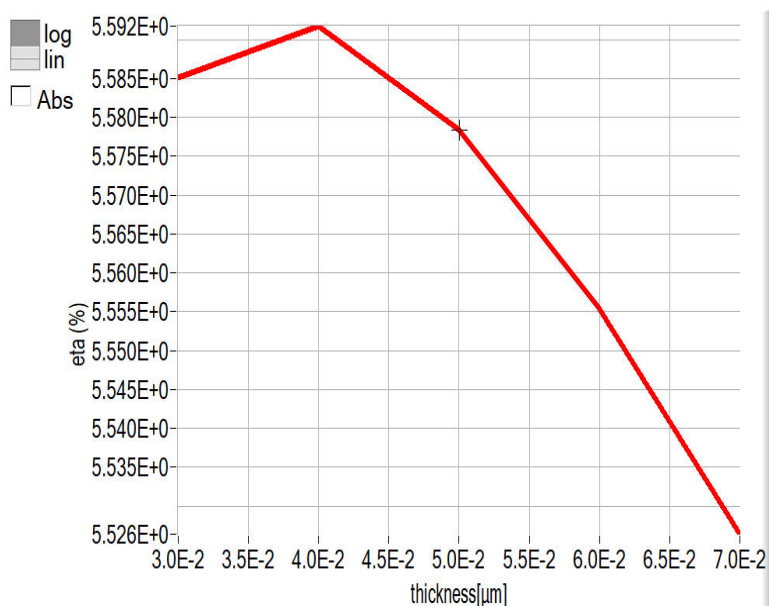


Figure III.8 : Variation du Facteur de forme **FF** avec l'épaisseur.



**Figure III.9.** Variation du rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) avec l'épaisseur.

Nous avons observé à la Tableau III.3, Lorsque on a changé dans la couche PEDOT / PSS, nous constatons que les propriétés photoélectriques sont les mêmes dans toutes les valeurs et qu'il n'y a donc pas de valeur optimale, donc le changement d'épaisseur du PEDOT / PSS n'affecte pas les propriétés photoélectriques.

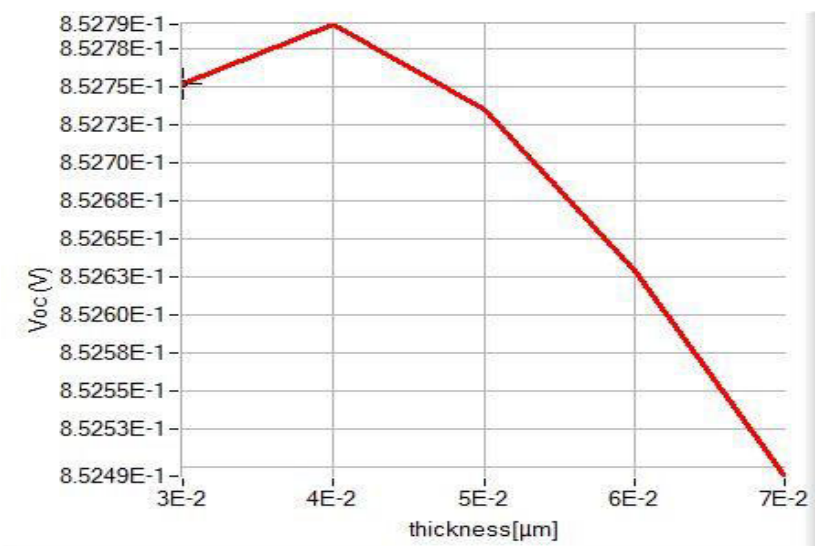
Alors nous choisissons toutes les valeurs comme une valeur optimale.

### III.3.1.3 Effet de l'épaisseur de la couche PCBM sur les caractéristiques de la cellule :

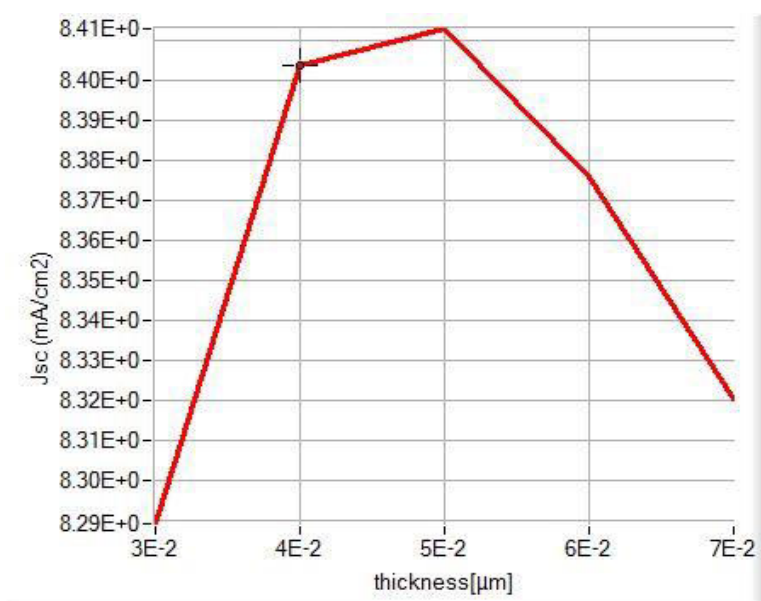
Et on fin, Nous changeons l'épaisseur du matériau (PCBM) de (0.03 à 0.07 $\mu\text{m}$ ), et choisissons les meilleures propriétés et installer leur propre épaisseur.

Valeur	Épaisseur ( $\mu\text{m}$ )	eta (%)	Voc (V)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)
1	0,03	5.59	8,52	8.29	79.01
2	0,04	5,59	8,52	8.29	79.01
3	0,05	5.59	8,52	8.29	79.01
4	0,06	5.59	8,52	8.29	79.01
5	0,07	5.59	8,52	8.29	79.01

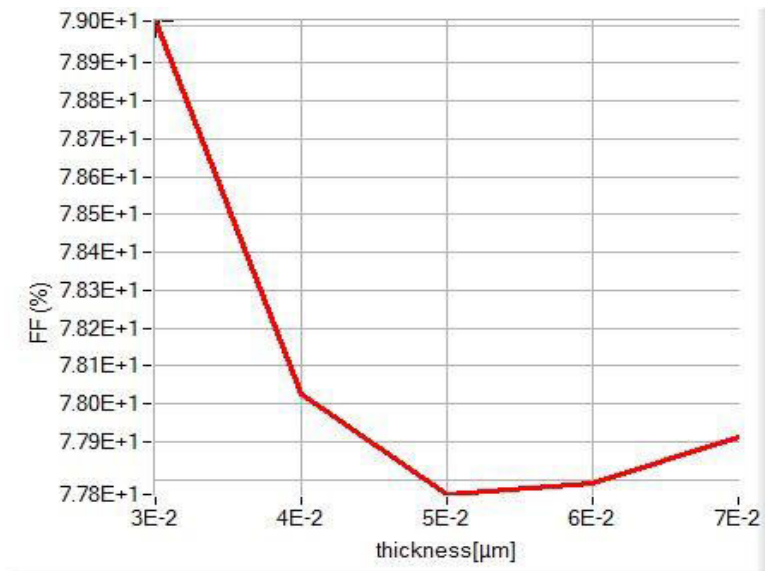
**Tableau III. 5:** Propriété de couche(PCBM).



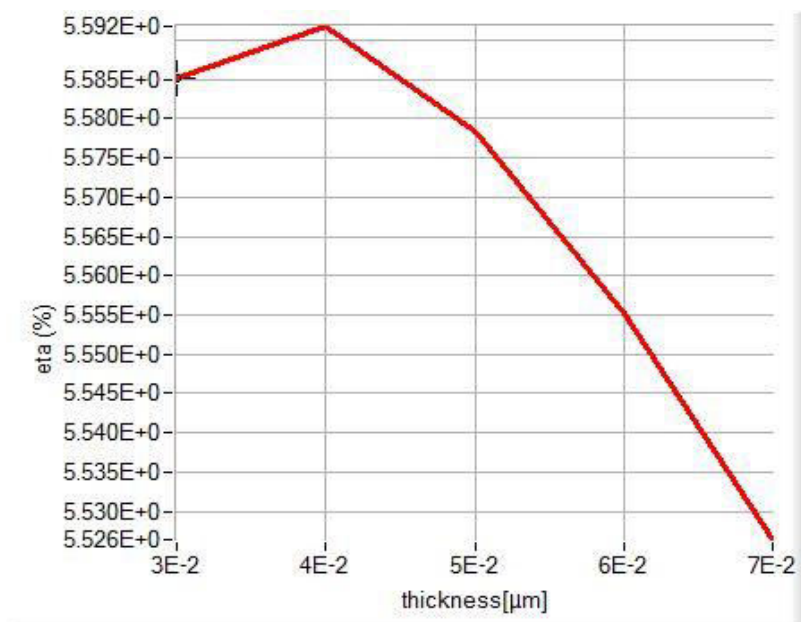
**Figure III.10.** Variation de la tension de circuit ouvert ( $V_{CO}$ ) avec l'épaisseur.



**Figure.III.11.** Variation de la densité de courant de court-circuit  $J_{sc}$  avec l'épaisseur.



**Figure III.12.** Variation du Facteur de forme  $FF$  avec l'épaisseur.



**Figure III.13.** Variation du rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) avec l'épaisseur.

Nous avons également remarqué que la meilleure épaisseur la couche de PCBM est de  $0,03\mu\text{m}$ , et que les paramètres photovoltaïques diminuent avec l'épaisseur accrue. La raison en est que plus l'épaisseur de la couche est élevée (PCBM), La distance entre les deux couches augmente, ce qui rend difficile le déplacement des électrons entre les deux couches. Ensuite, nous choisirons  $0,03\mu\text{m}$  comme valeur idéale.

Et en fin: nous obtenons les propriétés suivantes:

$$V_{oc} = 0.88 \text{ V}, j_{sc} = 8.12 \text{ mA/cm}^2, FF = 80.55\%, \eta = 5.82\%$$

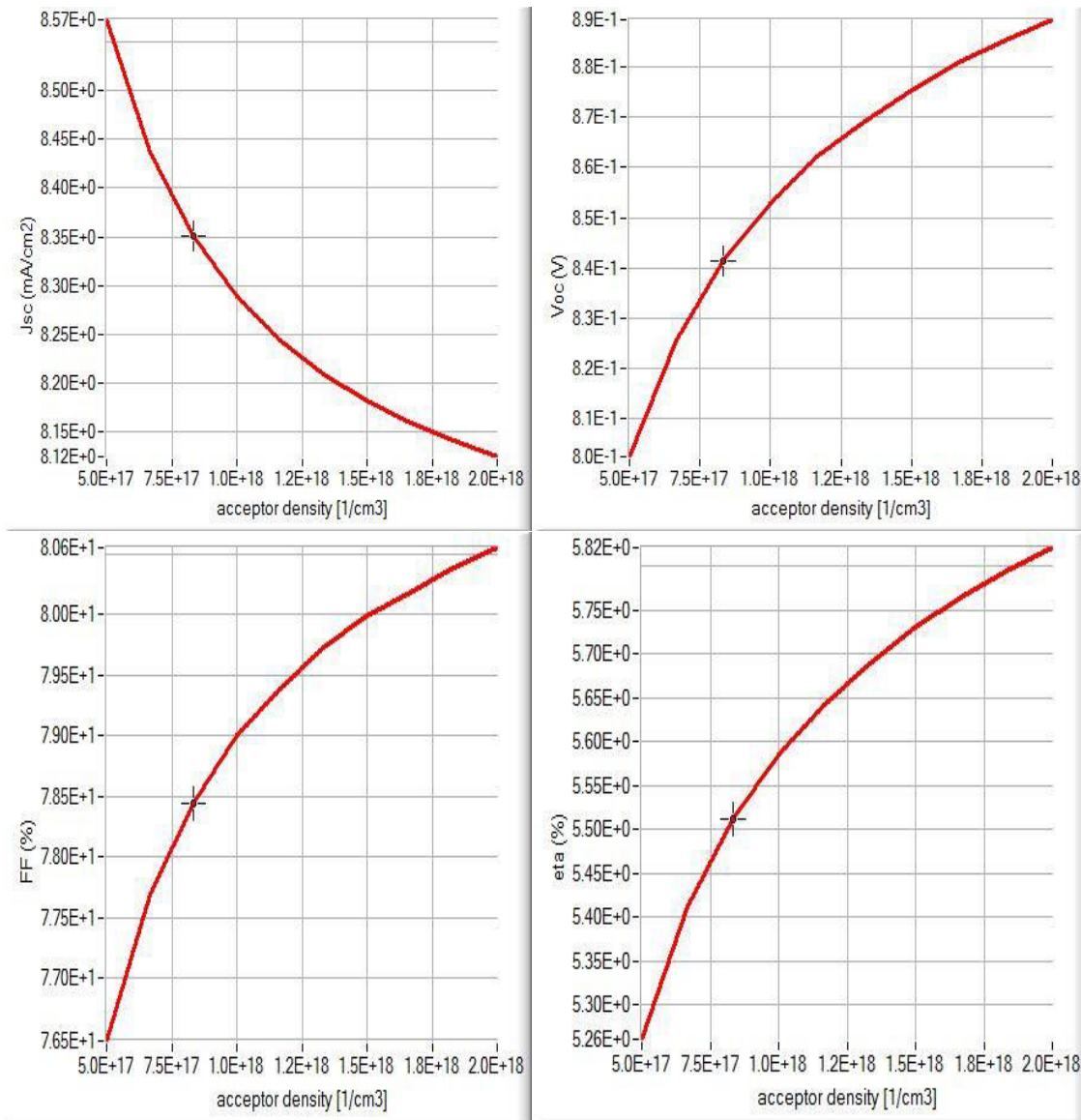
### III.3.2. Effet de densités d'accepteur ( $N_a$ ) de couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$ sur les paramètres PV de la cellule solaire :

Lorsque densités d'accepteur ( $N_a$ ), de la couche ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$ ) est modifiée de ( $5.000\text{E}+17$  à  $2.000\text{E}+18$ ), nous choisissons les meilleures les paramètres PV, et installer le Valeurs densités d'accepteur ( $N_a$ ).

#### ❖ Effet de densité de donneur $N_a$ :

Nous sélectionnons quelques valeurs de ( $N_a$ )  $\text{cm}^{-3}$  pour la couche d'absorption ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$ ) pour tracer :

- La caractéristique tension de circuit ouvert  $V_{oc}$ .
- La caractéristique densité de courant de court-circuit  $I_{sc}$ .
- La caractéristique Facteur de forme  $FF$ .
- Le rendement de conversion la cellule solaire étudiée ( $\eta$ ).



**Figure III. 14:** Variation des paramètres photovoltaïques ( $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ ,  $FF$  et  $\eta$ ) avec  $N_a$  des couches  $CH_3NH_3SnBr_3$ .

Nous avons observé à la figure III.14. La meilleure  $N_a$  de la couche  $CH_3NH_3SnBr_3$  est de  $2.000E+18 \text{ cm}^{-3}$ . Nous notons également que la tension des circuits ouverts augmente à mesure que le courant électrique diminue, le facteur a été obtenu à 80.55%. Montre qu'il y a une augmentation du rendement avec l'augmentation de valeur  $N_a$  de la couche  $CH_3NH_3SnBr_3$ .

Nous avons obtenu un rendement maximal de 5.82% avec une valeur  $N_a$  de  $2E+18 \text{ cm}^{-3}$ , monte en figure IV.3 .la variation de la limite d'élasticité lorsque la valeur  $N_a$  est comprise entre

0.500E+18 et 2.000E+18 cm<sup>-3</sup> n'a pas d'importance. Ensuite, nous choisirons 2 E+18 cm<sup>-3</sup> comme valeur idéale.

### III.3.3 Effet de Température sur les paramètres PV de la cellule solaire :

Lorsque la température passe de (300 à 400 K), on observe son effet sur les paramètres PV de la cellule solaire. Nous prenons 8 valeur.

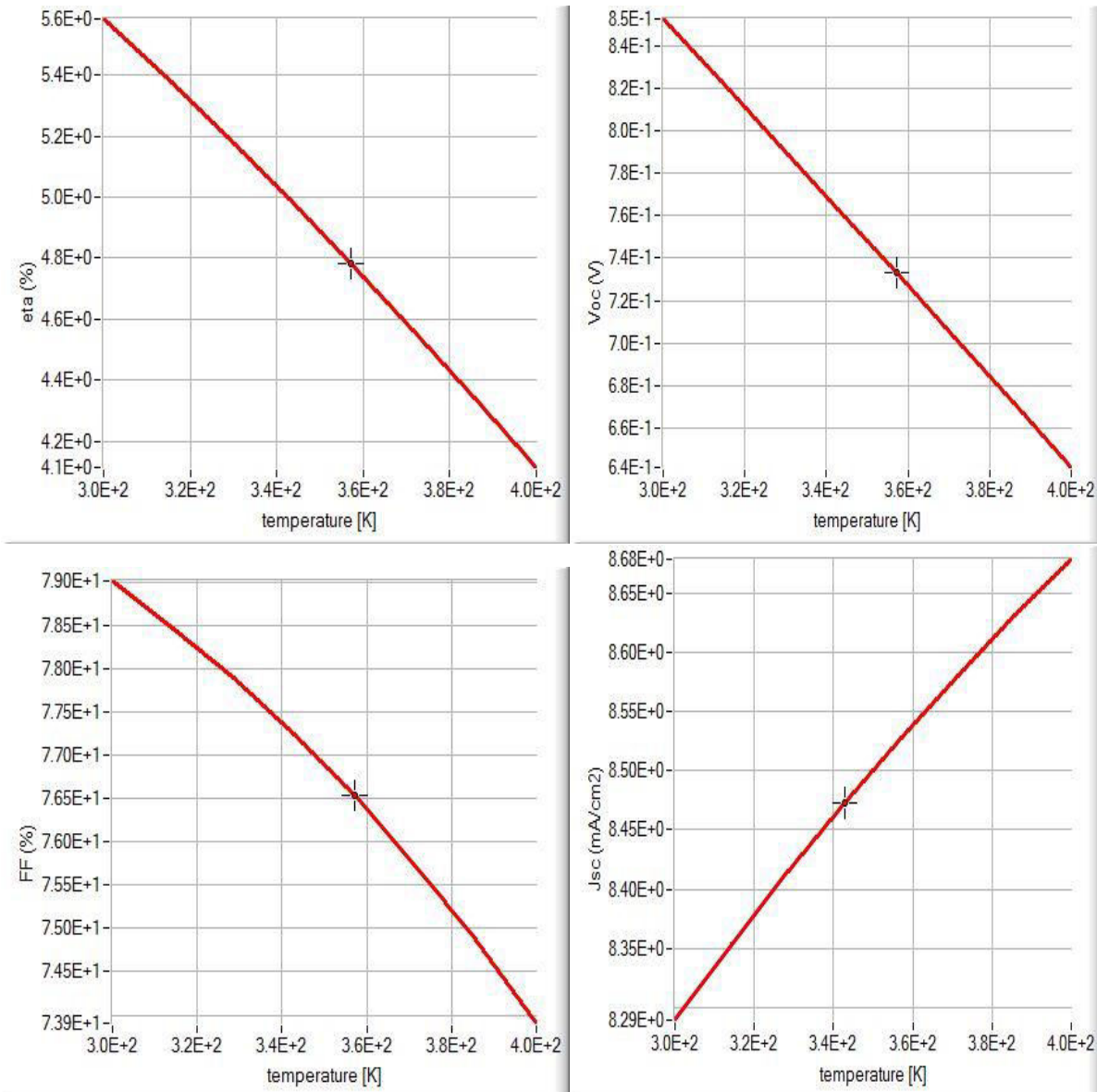


Figure III. 15 : Variation des paramètres photovoltaïques ( $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ ,  $FF$  et  $\eta$ ) avec les changements de température.

Notez que lorsque la température augmente, le rendement des paramètres photovoltaïques diminue.

Ainsi, la température est affectée négativement que paramètres photovoltaïques.

### III.3.4 Courbe courant-tension :

La courbe I-V finale peut être obtenue en maintenant tous les paramètres améliorés du modèle de concepteur. La forme finale contient une l'épaisseur des couches PEDOT/Pss= 0.03  $\mu\text{m}$ ,  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3=1.0\mu\text{m}$  et  $\text{PCBM}=0.03\mu\text{m}$  et Dans ce foyer de dopage Na en ( $0.500\text{E}+18$  et  $2.000\text{E}+18$ ), l'efficacité maximale de la puissance convertie est obtenue :

$$V_{oc} = 0.88, J_{sc} = 8.12, FF = 80.55, \eta (\%) = 5.82$$

La Figure III-16 représente la courbe caractéristique I-V finale du modèle simulé avec tous les paramètres optimisés précédents.

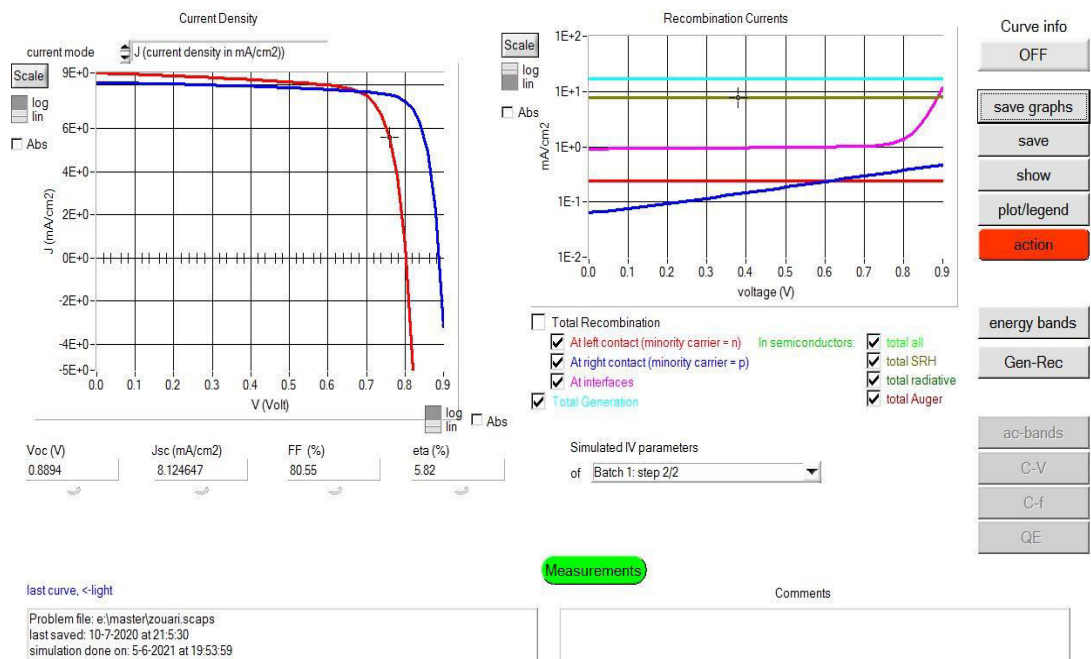


Figure III.15: Courbe I-V simulée.

### III.4. Conclusion :

Une cellule solaire pérovskite à architecture de (PEDOT : PSS/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$ /PCBM) a été conçue et analysée à l'aide du simulateur SCAPS. L'épaisseur de la couche absorbante et la

densité uniforme superficiel affectent les performances de la cellule solaire, la concentration de dopage en HTM et l'effet de l'ETM sur le photovoltaïque, les caractéristiques observées.

Une épaisseur modérée et un absorbeur à faible défaut présentent les meilleures performances. Les concentrations de dopage HTM, ETM, apportent une amélioration significative des paramètres PV.

Simulant la cellule étudiée à travers le programme scaps :

Après avoir optimisé tous les paramètres et sélectionné les meilleurs résultats obtenus :

Épaisseur d'absorption des couches (PEDOT : PSS= 0.03  $\mu\text{m}$ ) ; ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3=1.0$   $\mu\text{m}$ ) ; (PCBM=0.03  $\mu\text{m}$ ) nous avons atteint un rendement de conversion d'énergie de 5.85 % et une bonne valeur  $J_{sc}$  (8.12 mA /  $\text{cm}^2$ ), en plus des valeurs de FF (80.55%) et  $V_{oc}$  (0.88V), en note que La raison du faible rendement est due à band gap de couche  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$ .

Nous avons observé à la figure III.14. La meilleure  $N_a$  de la couche  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$  est de  $2.0\text{E}+18$   $\text{cm}^{-3}$ . Nous notons également que la tension des circuits ouverts augmente à mesure que le courant électrique diminue, le facteur a été obtenu à 80.55%. Montre qu'il y a une augmentation du rendement avec l'augmentation de valeur  $N_a$  de la couche  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$ . Est en fin notez que lorsque la température augmente entre (188 à 230 K), le rendement des paramètres photovoltaïques diminue.

# **Conclusion générale**

## *Conclusion générale*

Ce travail était un travail approfondi dans le domaine de la recherche sur les cellules solaires à base de pérovskite. Où nous avons essayé de réaliser une modélisation logicielle et une optimisation de différentes cellules solaires basées sur un type de pérovskite : le tri-iodure de plomb méthyl ammonium. Le choix de ce matériau est dû à ses bonnes propriétés optiques et électriques. Les résultats obtenus indiquent que la pérovskite au plomb est bien meilleure en termes d'efficacité de conversion énergétique que la pérovskite contenant de l'étain ou du germanium. Pendant ce temps,  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$ , PEDOT:PSS et PCBM sont des matériaux respectueux de l'environnement, ce qui est un avantage important pour la production commerciale. En conséquence, des simulations et des optimisations de la cellule solaire Sn-pérovskite ont été réalisées sur la base de résultats expérimentaux soigneusement sélectionnés (épaisseur de la couche de sorption (PEDOT : PSS = 0,03 m) ; ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3 = 1,0$  m); (PCBM = 0,03 m) conversion d'énergie 5,85% et une bonne valeur  $J_{sc}$  (8,12 mA/cm<sup>2</sup>), ainsi que des valeurs FF (80,55%) et  $V_{oc}$  (0,88V) pour une meilleure détection de l'épaisseur de couche pour ces appareils permettant une efficacité de conversion de puissance élevée. Les cellules solaires Sn-pérovskite utilisant le PCBM comme matériau ETL et le PEDOT:PSS comme matériau HTL se sont avérées avoir une efficacité de conversion de puissance élevée de 23,58 %. Les deux matériaux, PCBM et PEDOT:PSS, peuvent être considérés comme d'excellents candidats pour la fabrication de cellules solaires Sn-pérovskite avec un rendement élevé et une stabilité améliorée.

Notre modélisation numérique des cellules solaires à base de pérovskite fournit des conseils et peut être utilisée pour prédire d'autres dispositifs à base de cellules solaires pour des rendements faibles et élevés. Cependant, des travaux futurs pourraient être effectués sur des pièces théoriques et/ou expérimentales et sur l'évolution des matériaux HTL et ETL pour découvrir de nouvelles conceptions de cellules solaires offrant le meilleur rendement, ou en utilisant de la pérovskite mixte dans l'architecture des cellules solaires pour améliorer les performances de la pérovskite solaire sans plomb. Cellules, en particulier efficacité de conversion de puissance élevée et faible.

# Références

### *Références*

- [1] S. Mostefa Kara, « Etude et simulation de cellules photovoltaïques a couches minces a base de CIS et CIGS », Mémoire de Magister, Tlemcen, 2012.
- [2] « Photovoltaïque», M3P Solar , 2009.
- [3] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Semi-conducteur>.
- [4] [https://fr.wikibooks.org/wiki/électronique/Les\\_jonctions\\_PN](https://fr.wikibooks.org/wiki/électronique/Les_jonctions_PN).
- [5] Medjelled Yamina (Effet de la Résistance Série sur les Performances d'une Cellule Photovoltaïque à Multi jonction sous concentration solaire. Approximation de forte injection) Mémoire de Magister, 2012.
- [6] 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.
- [7] <http://tpep.free.fr/effetphotovoltaique/cellule/cellule.html>.
- [8] S. Mostefa Kara, "Etude et simulation de cellules photovoltaïques à Couches Mincees à Base De CIS et CIGS," 2012.
- [9] L. Bailly, "Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface," Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 2010.
- [10] H. Amar, « Propriétés électriques de cellule solaire à base de Séléniure de Cuivre Indium Galium  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  (CIGS) », mémoire de magister, Biskra, 2014.
- [11] M. Abdelhak, "Etude et identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque organique," Université El Hadj Lakhdar de Batna

## ***Résumé:***

Dans le contexte global de la diversification de l'utilisation des ressources naturelles, le recours aux énergies renouvelables et en particulier le solaire photovoltaïque se fait de plus en plus fort. A ce titre, le développement d'une nouvelle génération de cellules photovoltaïques à base de pérovskitiques semble prometteur. Le but est d'optimiser les paramètres physiques (dopage et épaisseur) afin d'aboutir au meilleur rendement de conversion photovoltaïque possible. Dans ce travail de modélisation et de simulation, nous utilisons le logiciel SCAPS, pour étudier les performances des cellules solaires à base de  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$ . Tout d'abord nous évaluons, le courant de court-circuit  $J_{sc}$ , la tension en circuit ouvert  $V_{CO}$ , le facteur de forme FF et le rendement électrique  $\eta$  pour une structure typique de PEDOT:PSS/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$ /PCBM. Ensuite, nous intéressons à l'effet de l'épaisseur des trois couches mentionnées précédemment d'une part. Et d'une autre l'effet de la valeur de dopage pour étudier l'influence de celles-ci sur le rendement électrique de la structure. Les résultats optimaux obtenus sont :  $J_{sc}$  (8.12 mA / cm<sup>2</sup>), FF (80.55%) et  $V_{co}$  (0.88V), pour avoir un rendement en énergie de 5.85%.

Le logiciel SCAPS est un outil très pratique et il est recommandé pour cette étude.

**Mots Clés:** Cellule solaire ; photovoltaïque ; simulation ; SCAPS.

## ***Abstract:***

In the global context of the diversification of the use of natural resources, recourse to renewable energies and in particular solar photovoltaic is increasing. As such, the development of a new generation of photovoltaic cells based on perovskitic seems promising. The goal is to optimize the physical parameters (doping and thickness) in order to achieve the best possible photovoltaic conversion efficiency. IN this modeling and simulation work, we use the SCAPS software, to study the performance of solar cells based on of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$ .first of all we evaluate, the short circuit current  $J_{sc}$ , the open circuit voltage  $V_{CO}$ , the form factor FF and the electrical efficiency  $\eta$  for a typical structure of PEDOT: PSS /  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$  / PCBM. Next, we are interested in the effect of the thickness of the three previously mentioned layers on the one hand. And on the other hand, the effect of the doping value to study the influence of these on the electrical efficiency of the structure. The optimal results obtained are:  $J_{sc}$  (8.12 mA / cm<sup>2</sup>), FF (80.55%) and  $V_{oc}$  (0.88V), to have an energy efficiency of 5.85%.

The SCAPS software is a very practical tool and it is recommended for this study.

**Keywords:** solar cell; photovoltaic; simulation; SCAPS.

## ملخص

في السياق العالمي لتنويع استخدام الموارد الطبيعية ، يتزايد اللجوء إلى الطاقات المتجددة وخاصة الطاقة الشمسية الكهروضوئية. على هذا النحو ، فإن تطوير جيل جديد من الخلايا الكهروضوئية على أساس البيروفسكايت يبدو واعدًا. الهدف هو تحسين المعلمات الفيزيائية (المنشطات والسلك) من أجل تحقيق أفضل كفاءة تحويل ضوئية ممكنة. في عمل النمذجة والمحاكاة هذا ، نستخدم برنامج SCAPS لدراسة أداء الخلايا الشمسية بناءً على  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$ . أولاً، نقوم بتقييم تيار الدائر القصيرة  $J_{sc}$  ، الجهد الكهربائي للتيار المتردد VCO ، عامل الشكل FF والكفاءة الكهربائية  $\eta$  لهيكل نموذجي لـ PEDOT: PSS /  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnBr}_3$  / PCBM. بعد ذلك ، نحن مهتمون بتأثير سماكة الطبقات الثلاث المذكورة سابقاً من ناحية. و من ناحية أخرى أثر قيمة المنشطات في دراسة تأثيرها على الكفاءة الكهربائية للهيكلي.

النتائج المثلى التي تم الحصول عليها هي: تيار الدائرة القصيرة  $J_{sc}$  (8.12 مللي أمبير / سم<sup>2</sup>) و عامل الشكل FF (80.55%) و الجهد الكهربائي للتيار المتردد (0.88 فولت) ، للحصول على كفاءة طاقة بنسبة 5.85 %.

يعد برنامج SCAPS أداة عملية للغاية ويوصى به لهذه الدراسة.

**الكلمات الرئيسية:** الخلايا الشمسية. الكهروضوئية ؛ المحاكاة ؛ SCAPS.