



N° d'ordre:  
N° de série:



**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: Genie Electrique**

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

**En: Télécommunication**

**Spécialité: Systèmes de télécommunication**

**Par: Lechaari Med Amine, Cherrad Zakaria, Messaoudi Boubaker**  
**Et Becer Oussama**

**Thème**

**Simulation defect de température sur les**  
**performance d'une cellule solaire basé aux pérovskite**  
**MAPbCl<sub>3</sub>**

**Devant le jury composé de:**

**Mr. Madjouri Abdelkader**

**Président**

**Mr. Laib Ismail**

**Examineur**

**Mr. Hima Abdelkader**

**Encadreur**

**2021-2022**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

١٤٣٨



# *Dédicace*

*Nous faisons maintenant nos derniers pas dans*

*la vie universitaire*

*Avant de continuer, nous consacrons cet*

*humble travail à:*

*Nos parents et nos chères mères*

*Nos familles et nos parents*

*À nos camarades et à tous ceux qui nous ont aidés*

*À ceux qui nous ont ouvert la voie pour apprendre, à  
tous nos éminents professeurs.*

*Merci beaucoup...*



*Med Amine - Zakaria - Boubaker - Oussama*

# *Remerciements*

*Nous remercions Dieu tout puissant  
Pour nous accorder la volonté et le  
courage réaliser ce mémoire.*

*Nous tenons à exprimer mon encadreur*

*Dr. Hima Abdelskader*

*Patience et précieux conseils.*

*Nos remerciements à nos parents*

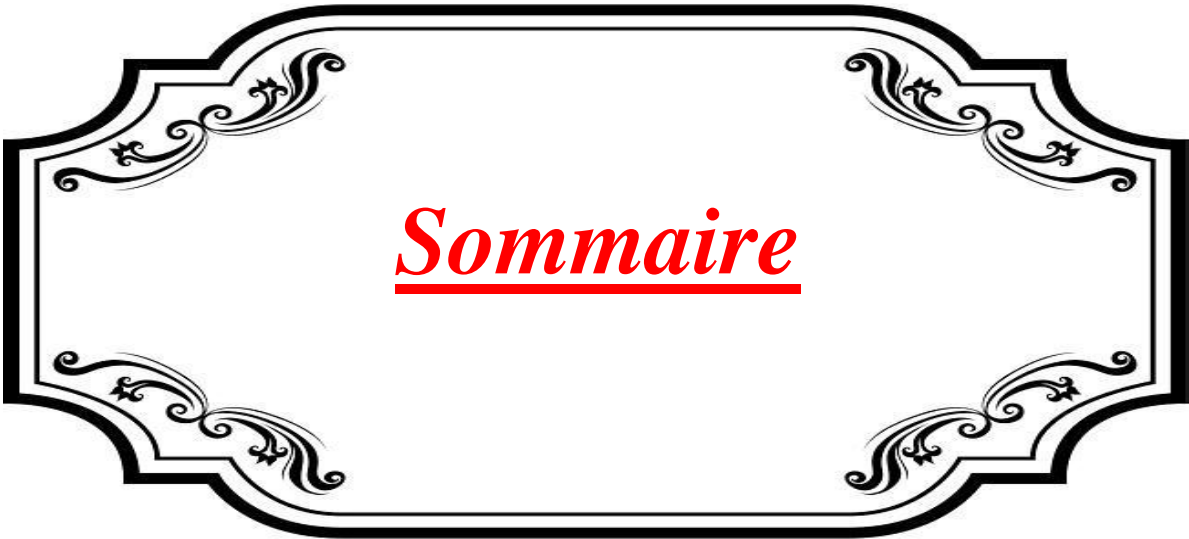
*pour leur soutien.*

*Nous tenons aussi à remercier tous*

*mes amis qui m'ont aidé de loin ou de près*

*dans la réalisation de ce travail*





## Sommaire

	<b>page</b>
Dédicace	-
Remerciements	-
Sommaire	<b>i</b>
Listes des symboles et abréviations	<b>vi</b>
Introduction générale	<b>01</b>
<b>Chapitre I : Notions générales sur les cellules photovoltaïques</b>	
I.1. Introduction	<b>03</b>
I.2. La définition de l'énergie solaire	<b>03</b>
I.2.1. Le soleil	<b>03</b>
I.2.2. Le spectre solaire	<b>05</b>
I.3. Cellule photovoltaïques	<b>06</b>
I.3.1. Historique sur le photovoltaïque	<b>07</b>
I.3.2. Principe de fonctionnement	<b>08</b>
I.4. Paramètres d'une cellule photovoltaïque	<b>09</b>
I.4.1. Courant de court-circuit, $I_{cc}$	<b>10</b>
I.4.2. Tension de circuit ouvert, $V_{co}$	<b>10</b>
I.4.3. Facteur de forme, FF	<b>10</b>
I.4.4. Rendement de conversion	<b>10</b>
I.4.5. Réponse spectrale (RS) d'une cellule photovoltaïque:	<b>11</b>
I.5. Caractéristiques électriques d'une cellule solaire	<b>11</b>
I.6. schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	<b>13</b>
I.7. Cellule photovoltaïques a pérovskites	<b>13</b>
I.7.1 Pérovskite	<b>13</b>
I.7.2. Historique cellules solaires à pérovskites	<b>14</b>
I.8. Les modules photovoltaïques	<b>15</b>
I.8.1. Association en série	<b>15</b>
I.8.2. Association en parallèle	<b>16</b>
I.8.3. Association en série parallèle– champ photovoltaïque	<b>17</b>
I.9. Les différents types de cellules solaires	<b>17</b>
I.9.1. Les cellules solaires au silicium	<b>17</b>
I.9.2. Les cellules solaires à couche mince	<b>18</b>
I.9.3. Les cellules solaires organiques	<b>19</b>
I.10. Conclusion	<b>19</b>
<b>Chapitre II : Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires</b>	
II.1. Introduction	<b>21</b>
II.2. Effet de la température sur la caractéristique I (V) d'une cellule solaire éclairée	<b>21</b>
II.3. Méthode d'extraction des paramètres	<b>23</b>

II.3.1. Description de la méthode	23
II.3.2. Application de la méthode	23
II.4. Description de l'évolution des paramètres caractéristiques en fonction de la température:	24
II.4.1. Le courant de court circuit ( $I_{cc}$ )	24
II.4.2. La tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ )	24
II.4.3. Le facteur de forme (FF)	25
II.5. Conclusion	26
<b>Chapitre III : Généralités sur les logiciels de simulation</b>	
II.1. Introduction	28
II.2. Notions de base	29
II.3. La signification des blocs	30
II.3.1. Lancer SCAPS	30
II.3.2. Définir le problème	30
II.3.3. Définir le point de fonctionnement	31
II.3.5. Lancer le calcul	32
II.3.6. Afficher les courbes simulées	32
II.3.7. Les courbes I-V	33
II.4. Définition d'une cellule solaire	34
II.4.1. Edition de la structure d'une cellule solaire:	35
II.4.2. Contacts	35
II.4.3. Définition des couches	37
II.5. Conclusion	39
<b>Chapitre IV : Simulation de MAPbCl<sub>3</sub> solar cell, résultat et discussions</b>	
IV.1. Introduction	41
IV.2. Structure et paramètres de la cellule étudiée	41
IV.2.1. Présentation de la cellule étudiée	41
IV.2.2. Les paramètres du dispositif étudié	42
IV.3. Simulation par SCAPS:	44
IV.3.1. Effet de Température sur les paramètres PV de la cellule solaire:	44
IV.3.2. Courbe des paramètres photovoltaïques	44
IV.3.3. Courbe courant-tension	48
IV.4. Alignement des bandes énergétiques	49
IV.5. Conclusion:	50
<b>Conclusion générale</b>	<b>52</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>55</b>
<b>Résumé</b>	<b>-</b>

## Liste de figure

	Page
<b>Chapitre I : Notions générales sur les cellules photovoltaïques</b>	
Figure I. 1: Coupe schématique du soleil	<b>04</b>
Figure I. 2: spectre solaire. AM0 : spectre solaire hors atmosphère, AM 1.5 : spectre solaire traversé de l'atmosphère, le soleil faisant un angle de 48° environ par rapport à sa position au zénith.	<b>06</b>
Figure I. 3: Schéma simplifié illustratif d'une cellule solaire	<b>07</b>
Figure I.4: Schéma de principe de la conversion photovoltaïque	<b>09</b>
Figure I. 5 : Caractéristiques I(V) à l'obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque.	<b>12</b>
Figure I. 6 : Schéma électrique équivalent d'une pile solaire sous faible injection.	<b>13</b>
Figure I. 7: structure hybride de la pérovskite	<b>14</b>
Figure I. 8: Module photovoltaïque	<b>15</b>
Figure I. 9: Groupement de cellules en série	<b>16</b>
Figure I. 10: Groupement de cellules en parallèle	<b>17</b>
<b>Chapitre II: Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires</b>	
Figure II.1: Influence de la température sur la caractéristique (I -V) d'une cellule solaire au silicium poly-cristallin sous un éclairement de 1000 W/m <sup>2</sup>	<b>21</b>
Figure II.2: Influence de la température sur la puissance de sortie pour une cellule solaire au silicium poly cristallin sous un éclairement de 1000 W/m <sup>2</sup> .	<b>22</b>
<b>Chapitre III : Généralités sur les logiciels de simulation</b>	
Figure III. 1: Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal	<b>29</b>
Figure III. 2: Définir le problème	<b>31</b>
Figure III. 3: Le point de fonctionnement	<b>31</b>
Figure III. 4: Panneau des bandes d'énergie	<b>33</b>
Figure III. 5: Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclairement	<b>34</b>
Figure III. 6: Définition de la structure d'une cellule solaire.	<b>35</b>
Figure III. 7: Panneau des propriétés des contacts	<b>36</b>
Figure III. 8: Propriétés de la couche ajoutée	<b>37</b>
Figure III. 9: Propriétés des dopages définis	<b>38</b>
Figure III. 10: Modèle de l'absorption	<b>38</b>
Figure III. 11: Définition des types de recombinaison présents	<b>39</b>
<b>Chapitre IV : Simulation de MAPbCl3 solar cell, résultat et discussions</b>	
Figure IV. 1: schéma simplifié de la cellule solaire utilisée	<b>42</b>
Figure IV.2: L'évolution du courant de court circuit ( $I_{cc} \approx I_{ph}$ ) en fonction de température	<b>45</b>

Figure IV.3 : La tension en circuit ouvert $V_{co}$ d'une cellule solaire au silicium poly cristallin en fonction de la température	<b>46</b>
Figure IV. 4: Variation de FF avec la température dans la gamme 270-370 K pour la cellule solaire	<b>47</b>
Figure IV. 5: La dépendance avec la température du rendement de la conversion PV $\eta$ d'une cellule solaire	<b>48</b>
Figure IV.6: Courbe I-V simulée.	<b>49</b>

### Liste de tableau

	<b>page</b>
<b>Chapitre I : Notions générales sur les cellules photovoltaïques</b>	
Tableau I. 1: Caractéristiques principales du soleil	<b>04</b>
<b>Chapitre II: Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires</b>	
Tableau II. 1: Evolution avec la température de ( $V_{co}$ ), ( $I_{cc}$ ), ( $P_m$ ), (FF) et ( $\eta$ )	<b>22</b>
Tableau II.2: Paramètres extraits par la méthode pour différentes températures	<b>24</b>
<b>Chapitre IV : Simulation de MAPbCl<sub>3</sub> solar cell, résultat et discussions</b>	
Tableau IV. 1: Propriétés des différentes couches (PEDOT: PSS/CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbCl <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> ).	<b>43</b>
Tableau IV. 2: Different calculated parameters for studied perovskite solar cell	<b>44</b>

## Listes des symboles et abréviations

<b>I<sub>ph</sub></b>	Le photo-courant
<b>R<sub>s</sub></b>	La résistance série
<b>R<sub>p</sub></b>	La résistance parallèle
<b>I<sub>s</sub></b>	Courant de saturation
<b>n</b>	Le facteur d'idéalité
<b>I (V)</b>	La caractéristique courant- tension de la photopile
<b>I</b>	Le courant électrique
<b>V</b>	La tension électrique
<b>h</b>	est la constante de Planck.
<b>U</b>	la fréquence.
<b>C</b>	la vitesse de la lumière.
<b>λ</b>	la longueur d'onde.
<b>T</b>	La température absolue
<b>I<sub>cc</sub></b>	Courant de court circuit
<b>V<sub>co</sub></b>	Tension de circuit ouvert
<b>P<sub>m</sub></b>	Puissance maximale
<b>I<sub>m</sub></b>	Curant du point du fonctionnement
<b>V<sub>m</sub></b>	Tension du point du fonctionnement
<b>FF</b>	Le facteur de forme
<b>n</b>	Le rendement



*Introduction générale*

## **Introduction générale**

L'énergie est la complexité fondamentale de l'homme dans le monde du présent, ses sources, est la question que l'avenir posera à l'Homme.

Le solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées. Il consiste en la conversion directe du rayonnement électromagnétique (solaire ou autre) en électricité. Pour ce faire, on utilise des transformateurs, des cellules photovoltaïques ou encore des cellules solaires qui représentent l'élément de base de la conversion photoélectrique.

L'utilisation de cellules solaires comme convertisseurs d'énergie solaire a révélé la nécessité d'étudier ces systèmes afin de les améliorer et ainsi développer l'exploitation de cette nouvelle source d'énergie renouvelable propre qui n'émet pas de gaz à effet de serre, pour ces raisons la branche du solaire photovoltaïque mérite vraiment d'être utilisée.

L'expérience montre que le fonctionnement des cellules solaires dépend fortement de plusieurs paramètres; interne (lié à l'appareil lui-même; la technologie utilisée pour produire l'appareil photovoltaïque) et externe (lié à l'environnement de fonctionnement: éclairage, température, etc.). L'effet de ces différents paramètres sur le fonctionnement des cellules solaires peut être étudié en connaissant l'effet de chaque paramètre sur l'I - . caractéristique de la cellule.

L'éclairage et la température sont des paramètres très importants dans le comportement des cellules solaires. Cela affecte grandement la propriété de la cellule solaire. D'où l'importance d'étudier l'effet de l'éclairage et de la température pour améliorer les performances des systèmes photovoltaïques depuis leur exposition au rayonnement solaire.

La température est un paramètre très important et ne peut être négligé dans le comportement des cellules solaires. Sachant que sur l'énergie totale perdue, une

très petite partie est réfléchi à la surface du capteur et une petite partie est extraite sous forme d'énergie électrique, de sorte que la majeure partie de l'énergie perdue est celle qui doit être dissipée sous forme de chaleur.

En particulier, les performances électriques de la cellule solaire en silicium sont très sensibles à la température. Dans les travaux actuels, nous étudions pour les cellules solaires en silicium polycristallin, le comportement en fonction de la température des principaux paramètres; courant de court-circuit., tension de circuit ouvert., facteur de forme. et l'efficacité de conversion pv1 (.). Ce travail est organisé comme suit:

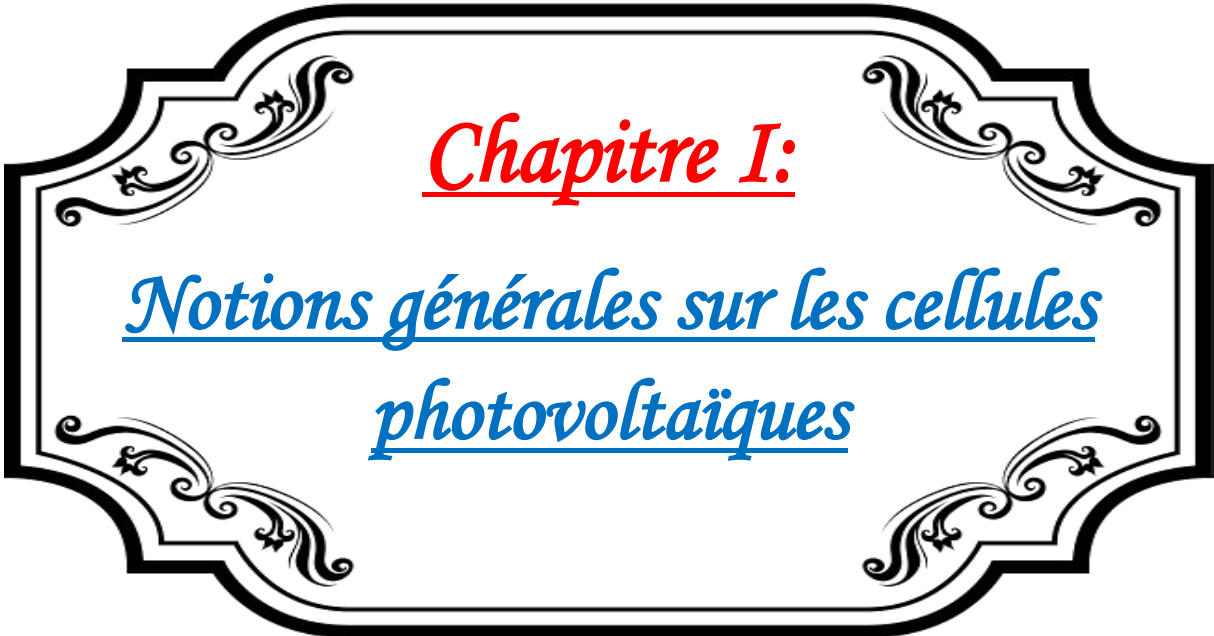
Dans le premier chapitre que nous avons consacré à une étude bibliographique des cellules solaires à base d'un matériau émergent, la pérovskite nous rappelons quelques généralités sur la source primaire d'énergie photovoltaïque ; Il nous a été utile de présenter d'abord la définition de l'énergie solaire, son origine dans la cellule et ses importantes propriétés électriques.

Le deuxième chapitre traite des effets de la température sur les propriétés caractéristiques des cellules solaires. Nous commençons par clarifier l'effet de la température sur la caractéristique de la cellule étudiée, puis définir les différents paramètres caractéristiques à différentes températures puis donner une description de l'évolution des variables caractéristiques en fonction de la température.

Le troisième chapitre nous présenterons le logiciel de simulation SCAPS.

Dans le dernier chapitre nous présenterons et discuterons les résultats obtenus.

Au final, une conclusion générale culmine cette thèse pour résumer nos analyses, constats et commentaires.



*Chapitre I:*  
*Notions générales sur les cellules*  
*photovoltaïques*

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

La lumière se compose de photons et de porteurs d'énergie qui peuvent extraire des charges électriques de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium. Ainsi, contrairement aux capteurs thermiques qui produisent de la chaleur (chauffe-eau, capteurs plans, capteurs tubulaires...), l'énergie photovoltaïque produite par les panneaux solaires lorsqu'ils sont exposés à la lumière fait partie des énergies renouvelables très prometteuses pour un monde propre et non pollué, caractérisé par la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique et l'exploitation de tous les spectres lumineux.

Ce chapitre est entièrement consacré à une étude bibliographique des cellules solaires à base d'un matériau émergent, la pérovskite. Il nous a été utile d'introduire dans un premier temps la définition de l'énergie solaire, son principe de fonctionnement pour la cellule ainsi que ses propriétés électriques.

## **I.2. La définition de l'énergie solaire:**

L'énergie solaire provient de la conversion directe d'une partie de la lumière en électricité. Cette conversion se fait à travers une cellule dite photoélectrique (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photoélectrique, cette énergie est pratiquement inépuisable à l'échelle des temps humains, c'est pourquoi elle est classée dans les énergies renouvelables (même si le soleil disparaît un jour) [1].

### **I.2.1. Le soleil:**

Sur le plan cosmogonique le soleil est une étoile quelconque dont ni les propriétés physiques ni la position ne la distinguent des milliards d'autres étoiles formant la Galaxie. Sur le plan humain cette étoile a une importance primordiale puisque sans elle la vie n'existerait pas sur terre. Le tableau suivant montre quelques caractéristiques principales du soleil :

Caractéristique Valeur	Caractéristique Valeur
Masse $1,989 \times 10^{30}$ Kg	Masse $1,989 \times 10^{30}$ Kg
Diamètre $1,392 \times 10^9$ m	Diamètre $1,392 \times 10^9$ m
Masse volumique moyenne $1410 \text{ Kg m}^{-3}$	Masse volumique moyenne $1410 \text{ Kg m}^{-3}$
Puissance rayonnée $3,83 \times 10^{26}$ W	Puissance rayonnée $3,83 \times 10^{26}$ W
Température superficielle $5770 \text{ K}$	Température superficielle $5770 \text{ K}$

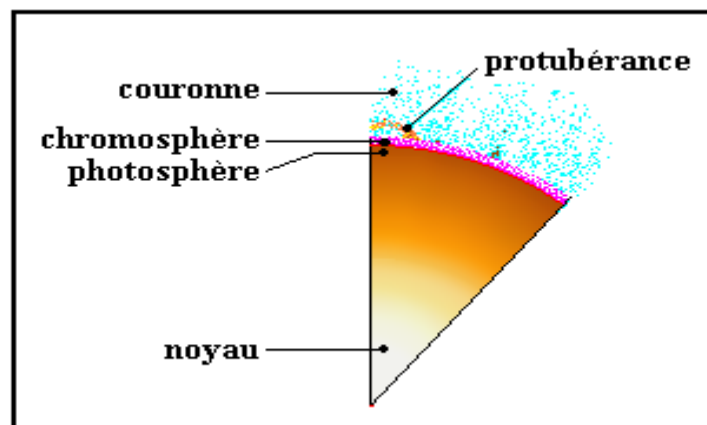
*Tableau I. 1: Caractéristiques principales du soleil [2]*

La structure du soleil est schématisée sur la figure (I.1). On distingue quatre zones particulières; le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne[2]:

- Le noyau : c'est le coeur du soleil, sa température est très élevée ( $15 \times 10^6$  K) ainsi que sa pression ( $2 \times 10^{11}$  bars) et sa densité ( $\sim 10^5 \text{ Kg m}^{-3}$ ), on note que cette dernière diminue avec l'éloignement au centre.

L'énergie produite au sein du noyau se propage par diffusion radiative puis par convection turbulente jusqu'à la photosphère d'où elle s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique vers l'espace.

- La photosphère : est une couche d'environ 300 Km d'épaisseur avec une température de 5770 K. Elle donne l'image visible du soleil.
- La chromosphère : est l'atmosphère du soleil. Elle a une épaisseur d'environ 8 000 Km et une température de 20 000 K environ.



*Figure I. 1: Coupe schématique du soleil [2]*

- La couronne : est le prolongement de la photosphère. Sans limite précise, elle est formée de gaz peu denses et ionisés. Invisible depuis la terre, car son éclat (brillance) se confond avec celui du ciel bleu. Elle ne peut être observée que pendant une éclipse solaire. Sa température est très élevée puisqu'elle dépasse le million de degrés.

Le soleil est composé chimiquement de 70 % d'hydrogène et d'environ 28 % d'hélium et le 2 % restant étant mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connues. La distance terre-soleil est égale en moyenne et approximativement à  $150 \times 10^6$  Km; cette distance est si grande que sa lumière nous parvient 8 minutes après avoir été émise. [3]

### I.2.2. Le spectre solaire:

Le spectre solaire se compose déjà de tous les types de rayonnement d'énergies et de couleurs différentes, qui se distinguent par leur gamme de longueurs d'onde. Les photons, les grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, sont considérés comme des porteurs d'énergie associés à leur longueur d'onde par la relation suivante:

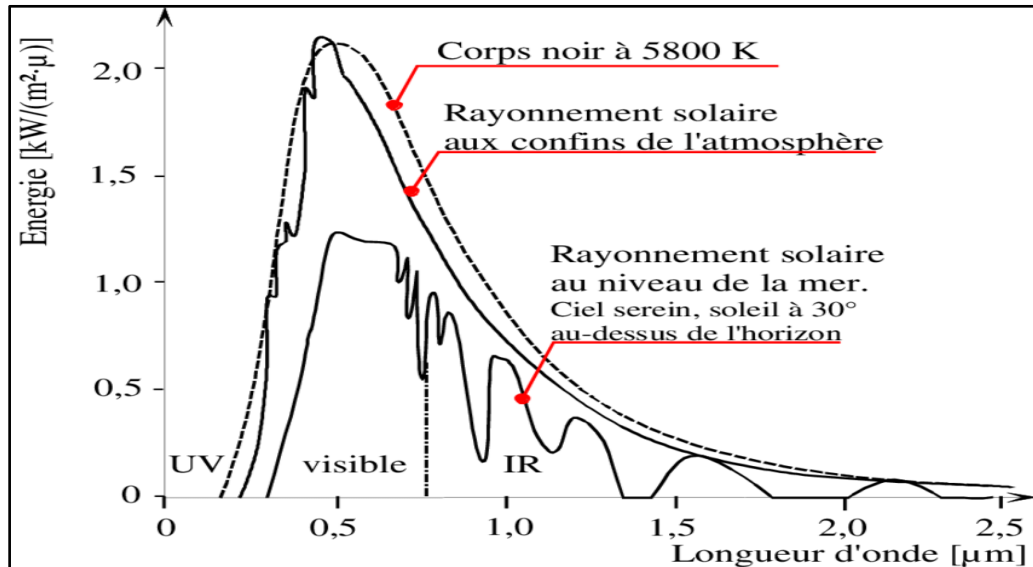
$$E = h \times \nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

**Avec :**

- ✎ h : est la constante de Planck.
- ✎ U: la fréquence.
- ✎ C : la vitesse de la lumière.
- ✎  $\lambda$  : la longueur d'onde.

La distribution du rayonnement solaire extraterrestre, compilée à partir des données collectées par les satellites, est appelée distribution de longueur d'onde AMO.

La figure (I.2) montre que l'atténuation observée après passage par l'épaisseur de l'atmosphère correspond à une masse d'air de 1,5, équivalente à la hauteur du soleil  $(41,8)^\circ$  degrés au niveau de la mer. Ce ciel dégagé le spectre, appelé AM 1,5, devient une référence pour diverses mesures liées aux cellules photovoltaïques. [4]



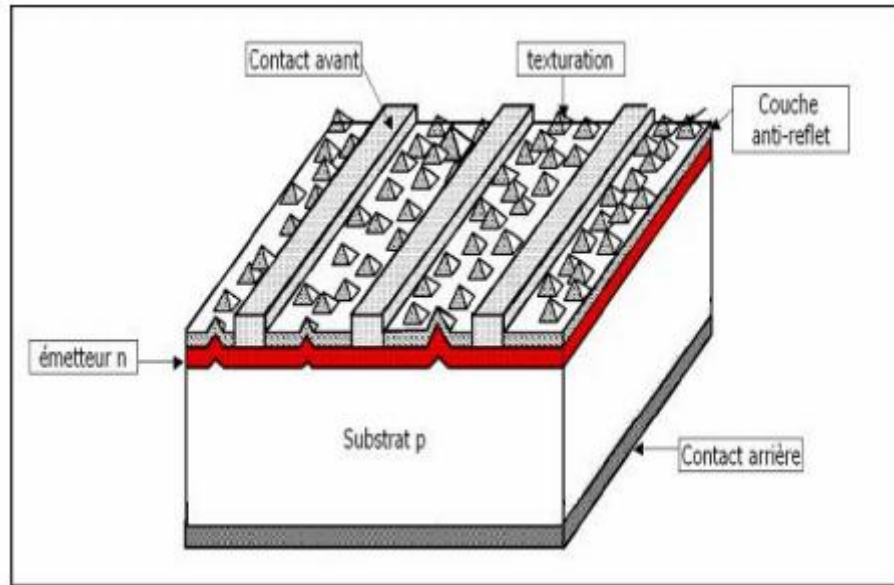
**Figure I. 2:** spectre solaire. AM0 : spectre solaire hors atmosphère, AM 1.5 : spectre solaire traversé de l'atmosphère, le soleil faisant un angle de  $48^\circ$  environ par rapport à sa position au zénith. [4]

### I.3. Cellule photovoltaïques:

Une cellule solaire est un dispositif photoélectronique capable de capturer et de convertir l'énergie des rayons lumineux directement en électricité. Cette conversion est appelée conversion photoélectrique. Sa structure est illustrée à la figure (I.3) ci-dessous. Il montre un schéma simplifié d'une cellule solaire typique car l'architecture des dispositifs photovoltaïques modernes est particulièrement complexe.

Ainsi, la cellule photoélectrique sera une puce en matériau semi-conducteur; où la jonction PN représente le cœur de la cellule photoélectrique; représente le générateur réel dans le dispositif Les points de contact métalliques sur les faces avant et arrière forment une structure de direction qui permet la récupération des supports d'images créés, pour cela; deux électrodes sont produites sur une puce

semi-conductrice, l'une qui recouvre la totalité de la face arrière pour assurer le contact avec la zone p, et l'autre en forme de grille sur la face avant, la géométrie de cette grille étant un compromis entre une faible occultation du rayonnement et un bon contact électrique avec la zone n [5].



*Figure I. 3: Schéma simplifié illustratif d'une cellule solaire[5].*

### I.3.1. Historique sur le photovoltaïque:

Les cellules photovoltaïques sont divisées en deux mots:

- ✎ Mot grec «**photos**» qui signifie la lumière
- ✎ Et du mot «**voltaïque**» relatif au nom du physicien italien qui, en 1800, découvrit la pile électrique.
- ✎ L'abréviation commune pour le photovoltaïque est: « PV » [6].
- ✎ La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable.
- ✎ L'effet photovoltaïque qui consiste à transformer directement la lumière en électricité fût découverte en 1838.

En résumé l'historique du photovoltaïque par étapes comme suit [7]:

- ✎ **1838:** Le physicien français EDMOND BEQUEREL découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant

électrique dans un matériau solide: c'est l'effet photovoltaïque.

- ✎ **1875:** WERNER VON SIEMENS expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.
- ✎ **1954:** Trois chercheurs américains mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale cherche des solutions pour alimenter ses satellites.
- ✎ **1958:** une cellule avec un rendement de 9% est mise au point, les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- ✎ **1973:** la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques.
- ✎ **1985:** la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque en Australie.
- ✎ **1995:** Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

La conversion photoélectrique comprend trois phénomènes physiques, étroitement liés et simultanément, est résumé comme suit:

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

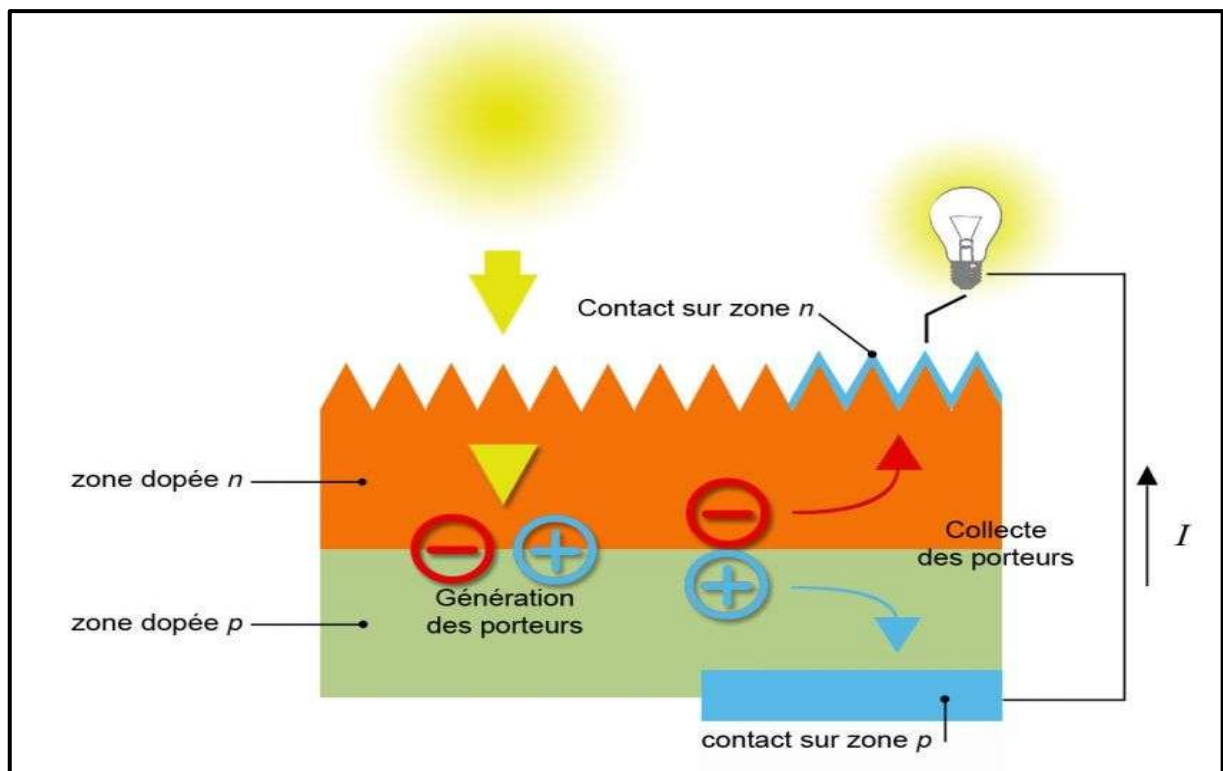
### **I.3.2. Principe de fonctionnement:**

Dans les semi-conducteurs exposés à la lumière, un photon d'énergie suffisante déchire l'électron de la matrice et crée ainsi un "trou". En l'absence de dispositif supplémentaire, l'électron trouve rapidement un trou à recombinaison et l'énergie fournie par le photon se forme.

Et ainsi il s'est dissipé. Le principe de la cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se déplacer vers la face opposée du matériau au lieu de se réunir à l'intérieur de celui-ci: une tension et donc une différence de

tension apparaîtront entre les deux côtés, comme dans un empilement. Une solution pour atteindre cet objectif, couramment utilisée, consiste à générer un champ électrique au moyen d'une jonction PN, c'est-à-dire entre deux couches dopées respectivement P et N.

D'un point de vue électrique, une cellule photovoltaïque est l'équivalent d'un générateur de courant auquel on a adjoint une diode. Il faut ajouter des contacts électriques (qui laissent passer la lumière en face éclairée : en pratique, on utilise souvent un contact par une grille), une couche antireflet pour assurer une bonne transmission des photons vers l'absorbeur. [8]



**Figure I.4:** Schéma de principe de la conversion photovoltaïque [9].

#### I.4. Paramètres d'une cellule photovoltaïque :

La puissance électrique délivrée par une cellule photovoltaïque est le produit de la tension par le courant qu'elle génère. Ces deux grandeurs, courant et tension, dépendent à la fois des propriétés électriques de la cellule mais aussi de la charge électrique à ses bornes.

Donc les grandeurs caractéristiques principales des cellules solaires sont [10]:

- ✗ 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  $\eta$
- ✗ La réponse spectrale  $RS$ .

#### I.4.1. Courant de court-circuit, $I_{cc}$ :

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

#### I.4.2. Tension de circuit ouvert, $V_{co}$ :

La tension en circuit ouvert, exprimée en millivolts, est mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans la cellule. Cela dépend de la différence de travail des électrodes de sortie et de la résistance shunt. Il diminue avec la température et varie avec l'intensité lumineuse.

#### I.4.3. Facteur de forme, $FF$ :

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge. Cette puissance est maximale (notée  $P_m$ ) pour un point de fonctionnement  $P_m (I_m, V_m)$  de la courbe courant-tension.

#### I.4.4. Rendement de conversion $\eta$ :

Le rendement de conversion (**efficacité**) est défini comme le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule et l'énergie lumineuse incidente  $P_{inc}$ , Il est exprimé en pourcentage, désignant le rendement de conversion en énergie.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{FF I_{cc} V_{oc}}{P_{inc}} \quad (I.2)$$

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

#### I.4.5. Réponse spectrale (RS) d'une cellule photovoltaïque:

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

✎ **La réponse spectrale RS** est donnée par la relation suivante [10]:

$$RS(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} (A/W) \quad (\text{I.3})$$

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

$$EQE(\lambda) = SR(\lambda) \frac{hc}{\lambda q} \quad (\text{I.4})$$

✎ **Le rendement quantique interne IQE**: de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons pénétrant dans le matériau, il est I.

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1-R(\lambda)} \quad (\text{I.5})$$

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

### I.5. Caractéristiques électriques d'une cellule solaire:

Une cellule solaire reliée à une résistance électrique et soumise à l'éclairement solaire débite un courant qui va se répartir entre la résistance et sa structure interne de diode.

Sa caractéristique I(V) correspond à la soustraction du photocourant et du courant de la diode à l'obscurité par [11 ,12]:

$$I(v) = I_{obs}(V) - I_{ph} = I_s \exp(qV / KT - 1) - I_{ph} \quad (\text{I.6})$$

**Avec:**

$I_{ph}$ : la densité de courant photogénéré.

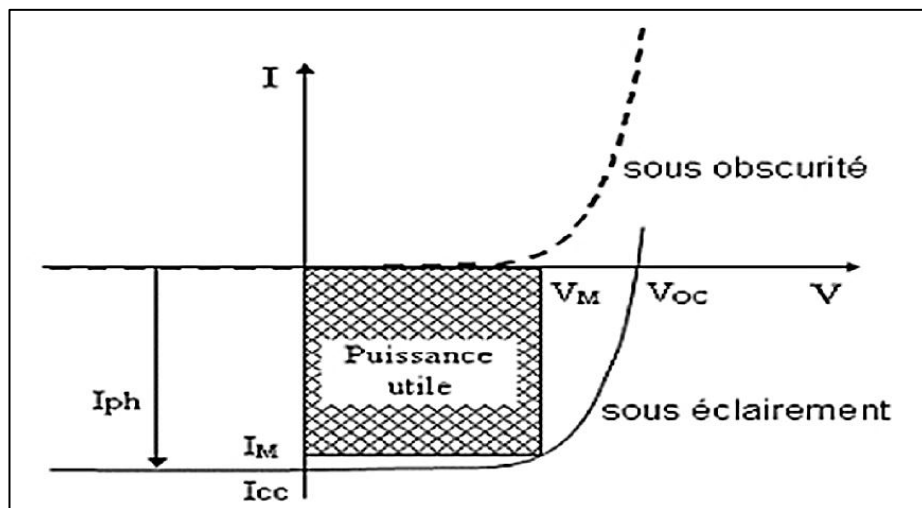
$I_{obs}$ : la densité de courant d'obscurité.

$I_s$ : le courant de saturation de la diode.

$q$ : la charge élémentaire.

$K$ : la constante de Boltzmann et  $T$ : la température.

La caractéristique de la cellule dans l'obscurité est la même que celle de la diode. Nous avons montré sur la figure I.5 deux caractéristiques de la tension de courant d'une cellule solaire dans l'obscurité dans les lignes pointillées, et sous l'éclairage dans les lignes pleines.



**Figure I. 5 :** Caractéristiques  $I(V)$  à l'obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque. [12].

Notez que la courbe sous éclairage est simplement décalée de la première par la valeur de  $I_{sc}$ , qui reflète la génération continue de courant par la lumière. Cette valeur est appelée courant de court-circuit, car c'est le courant que la cellule génère sous la lumière à tension nulle. Au contraire, la valeur du  $V_{oc}$  est la tension en circuit ouvert. Il représente en fait l'égalité entre le courant généré par la lumière et le courant dans l'obscurité [13].

## I.6. schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

La figure (I.6) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairage, Elle est constituée d'un générateur de courant IPH monté en parallèle avec une diode. Deux types de résistance parasitaire ont été présentés dans ce modèle.

Cette résistance affecte la propriété  $I = f(V)$  de la cellule:

La résistance série ( $R_s$ ) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles d'assemblage et de la résistance de ces grilles ; la résistance de conversion ( $R_{sh}$ ) est due à un courant de fuite à la jonction ; cela dépend de son fonctionnement .

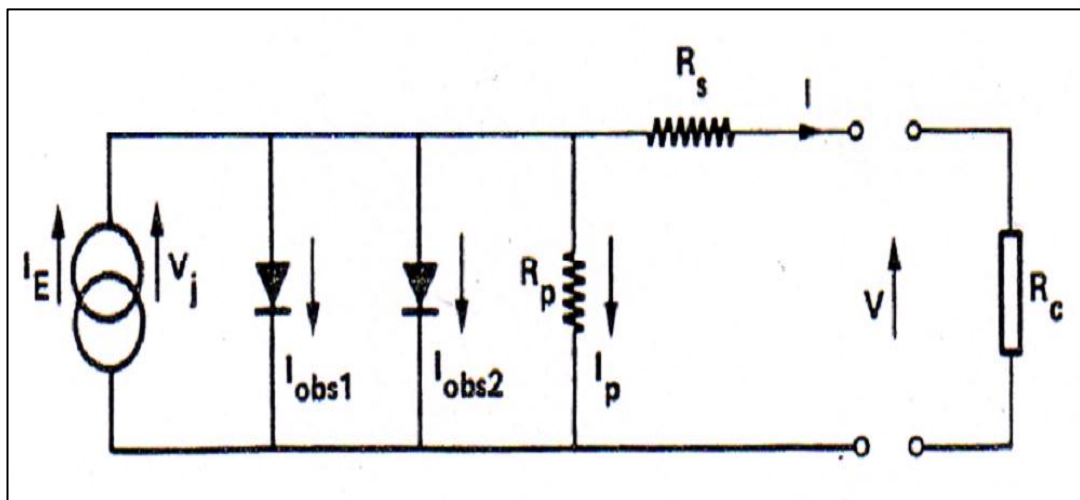


Figure I. 6 : Schéma électrique équivalent d'une pile solaire sous faible injection. [15].

## I.7. Cellule photovoltaïques a pérovskites :

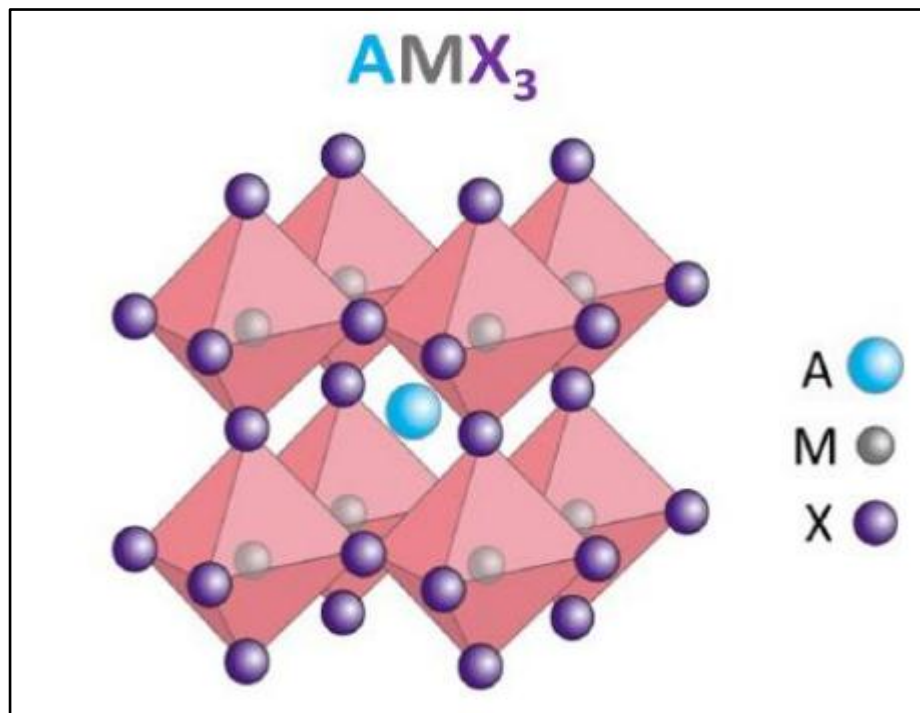
### I.7.1 Pérovskite:

La pérovskite est un composé minéral composé de calcium et de titane. Sa formule chimique est  $\text{CaTiO}_3$ , découverte par le minéralogiste russe Lev Alekseevich perovsky (1792-1856).

La structure la plus simple de la pérovskite est la structure cubique simple de

formule  $ABX_3$  (figure I-7) avec un ion A dans les coins, un ion B au centre et un ion négatif occupant la position centrale de la face. La pérovskite a des propriétés physiques remarquables, une absorption de la lumière élevée et une grande longueur de diffusion des charges.

En effet, la pérovskite hybride  $CH_3NH_3PbI_3$  (MAPbI<sub>3</sub>) a un grand coefficient d'absorption  $1.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$  à 550 nm, elle se caractérise par une grande longueur de diffusion des électrons et des trous (plus de 1  $\mu\text{m}$  et potentiellement 100  $\mu\text{m}$ ) et finalement d'une grande mobilité des porteurs de charges [14].



*Figure I. 7: structure hybride de la pérovskite[14].*

### **I.7.2. Historique cellules solaires à pérovskites:**

La dernière décennie a été témoin d'un développement rapide d'une nouvelle classe de cellules solaires à base des matériaux pérovskites organique-inorganique halogénures (pérovskites hybrides).

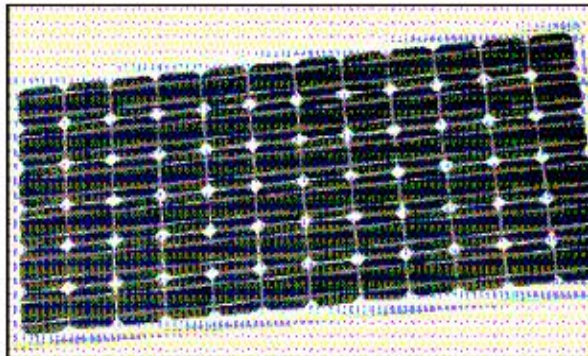
En 2009, date de première introduction d'une pérovskite hybride dans une cellule photovoltaïque, Gratzel et al. ont publié les premières études sur des pérovskites trihalogénures organométalliques utilisés en tant que sensibilisateurs

au colorant à base d'électrolyte liquide (dyesensitized solar cells (DSSCs)). Ces cellules solaires (DSSC) ont atteint un photo-voltage élevé proche de 1 V et une efficacité de conversion de puissance (PCE)  $\approx 3\%$ .

### **I.8. Les modules photovoltaïques:**

Le module photovoltaïque [15] est par définition un ensemble de photopiles (cellules solaires) assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition au rayonnement utile (solaire ou autre). En effet, une photopile élémentaire ne produit qu'une très faible puissance électrique moins de 3 W avec une tension de l'ordre d'un volt (1 V) :

entre 0,5 et 1,5 V selon les technologies. Afin de produire plus de puissance, les cellules sont assemblées en série et en parallèle pour former un module photovoltaïque (figure I.8).



*Figure I. 8: Module photovoltaïque [9].*

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique [16].

#### **I.8.1. Association en série:**

La caractéristique courant-tension d'un groupement quelconque de cellules [17] sera homothétique de la courbe I (V) d'une cellule de base. Il sera de même pour tout le réseau de caractéristiques. En conséquence, tout ce qui a été dit pour

une cellule individuelle restera valable – généralisable – pour un groupement de cellules.

Dans un groupement de  $N_s$  cellules ou de modules identiques en série (figure. I.9.a), [17] le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série. La figure (I.9.b) présente la courbe de puissance du groupement ainsi réalisé.

La caractéristique du groupement (G) [17] est obtenue en multipliant point par point et pour un même courant la tension individuelle par  $N_s$ . En particulier, l'impédance optimale du groupement sera  $N_s$  fois plus grande que celle de la cellule (module) de base. Les résistances série s'ajoutent et les résistances parallèles s'ajoutent également aussi.

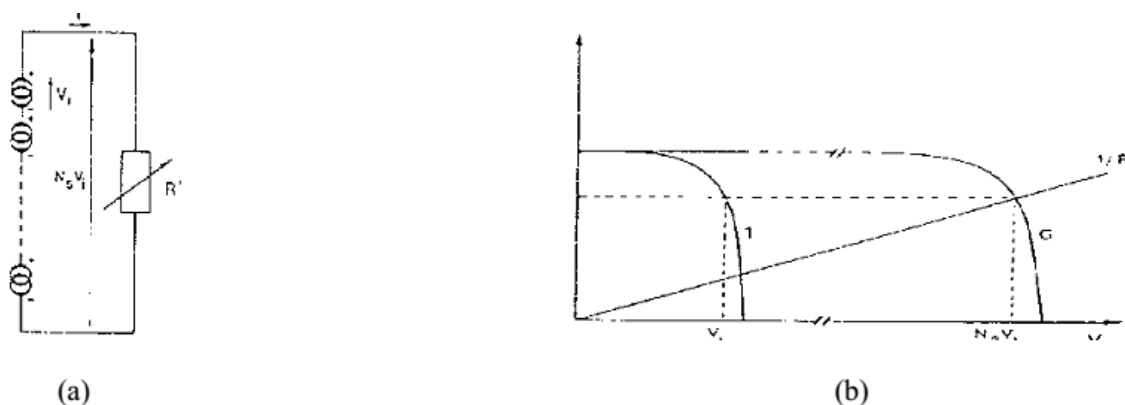


Figure I. 9: Groupement de cellules en série [10].

### I.8.2. Association en parallèle:

La figure (I.10) présente la courbe de puissance de  $N_p$  cellules (ou de modules) en parallèles. Cette fois-ci, [17] c'est la tension de chacun des éléments qui doit être identique, les courants s'ajoutant, la nouvelle courbe est obtenue en multipliant point par point et pour chaque valeur de tension, le courant de la cellule élémentaire par  $N_p$ .

L'impédance optimale du groupement [17] sera  $N_p$  fois plus faible que celle de l'élément de base. Ce sont les inverses des résistances série qui s'ajoutent, ainsi que les conductances shunts.

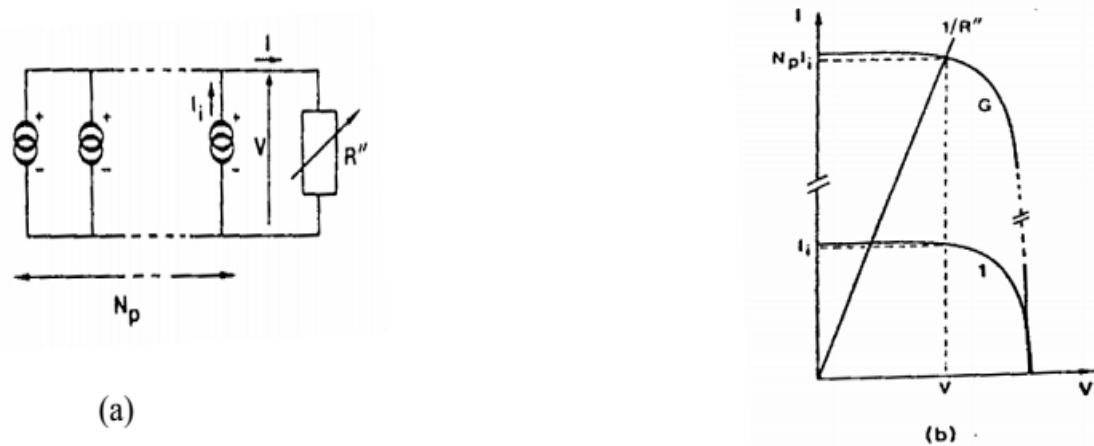


Figure I. 10: Groupement de cellules en parallèle [10].

### I.8.3. Association en série parallèle– champ photovoltaïque:

La connexion en série de plusieurs cellules forme une branche de cellules où on a une augmentation de tension pour même courant, un assemblage de plusieurs branches de cellules en parallèle forme un module où on a un accroissement du courant et une conservation de tension. Et une association de plusieurs modules dans un même plan s'appelle un panneau et le montage de plusieurs panneaux en rangées de panneaux série et parallèle forme un champ photovoltaïque ou ce que l'on appelle parfois [17] une sous-station photovoltaïque.

D'où, le champ photovoltaïque est l'ensemble des panneaux photovoltaïques montés en série et en parallèle pour atteindre une tension et un courant plus grands. Une association série-parallèle de panneaux photovoltaïques [17] aura une caractéristique  $I(V)$  théorique en tout point homothétique à celle des modules de base et obtenue en modifiant les échelles sur les deux axes.

### I.9. Les différents types de cellules solaires

Sur le plan technologique; plusieurs types de cellules solaires sont distingués :

#### I.9.1. Les cellules solaires au silicium

Le silicium est le matériau de base des photopiles. C'est le deuxième élément en terme d'abondance sur notre planète (après l'oxygène), mais il n'existe pas à l'état pur dans la nature (le sable et le quartz en contiennent). Il existe trois

catégories principales de photopiles au silicium :

✎ **Les cellules monocristallines**

Elles sont considérées comme la première génération de photopile, elles ont un taux de rendement excellent [15] (12 – 16% et jusqu'à 24 % en laboratoire) mais leur méthode de production est laborieuse et délicate, et donc, très chère; il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.

✎ **Les cellules poly-cristallines**

Elles ont un coût de production moins élevé et un rendement qui varie entre 11 – 13 % (autour de 18 % en laboratoire) [15].

✎ **Les cellules amorphes**

Leur coût de production bien plus bas, mais malheureusement aussi, ont un rendement plus bas qui varie [15] entre 8 –10 % (autour de 13 % en laboratoire pour une cellule non dégradée).

Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium de 0.3 à 1.0 nanomètre seulement (500 nanomètres pour les deux autres types). On peut donc appliquer de très fines couches de silicium amorphe sur des vitres, du métal, voir du plastique souple par un procédé de vaporisation sous vide.

C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation comme les calculatrices, les montres,... [15].

### **I.9.2. Les cellules solaires à couche mince**

On distingue plusieurs technologies parmi lesquelles :

➤ Cuivre-indium-diséléniure (CIS) ou cuivre-indium-gallium-séléniure (CIGS) : leur rendement est égal à 11 % (17 .1 % au laboratoire). 99 % d'absorption, dégradation minime, mais fabrication très délicate .

➤ Cadmium-tellure (CdTe) : rendement 10.5 % (15.8 % en laboratoire). Haute absorption, mais n'oublions pas que le cadmium est très toxique [17].

➤ Gallium Arsenic (GaAs): leur rendement dépasse les 25 % en laboratoire [18]. Ces cellules, dont le prix est très élevé, sont très appréciées dans l'aérospatiale. Leurs principaux avantages sont :

✓ une absorption très élevée. Ces cellules ne pas épaisses, ce qui traduit un

gain en volume et en masse pour les sondes sur lesquelles le moindre gramme superflu est traqué.

✓ leur puissance est, par rapport aux cellules simples au silicium, peu affectée par les augmentations de température que les sondes peuvent rencontrer

### **I.9.3. Les cellules solaires organiques**

Le solaire organique est considéré comme une nouvelle technologie basée sur les colorants et leurs propriétés physiques et en particulier optiques [17].

### **I.10. Conclusion:**

Dans ce chapitre, nous avons mené une brève étude bibliographique sur le spectre solaire, le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque en général, et avons également identifié les différents secteurs photovoltaïques et terminé ce chapitre par une revue générale sur les cellules solaires pérovskites.

## *Chapitre II:*

*Effets de la température sur les  
paramètres caractéristiques des  
cellules solaires*

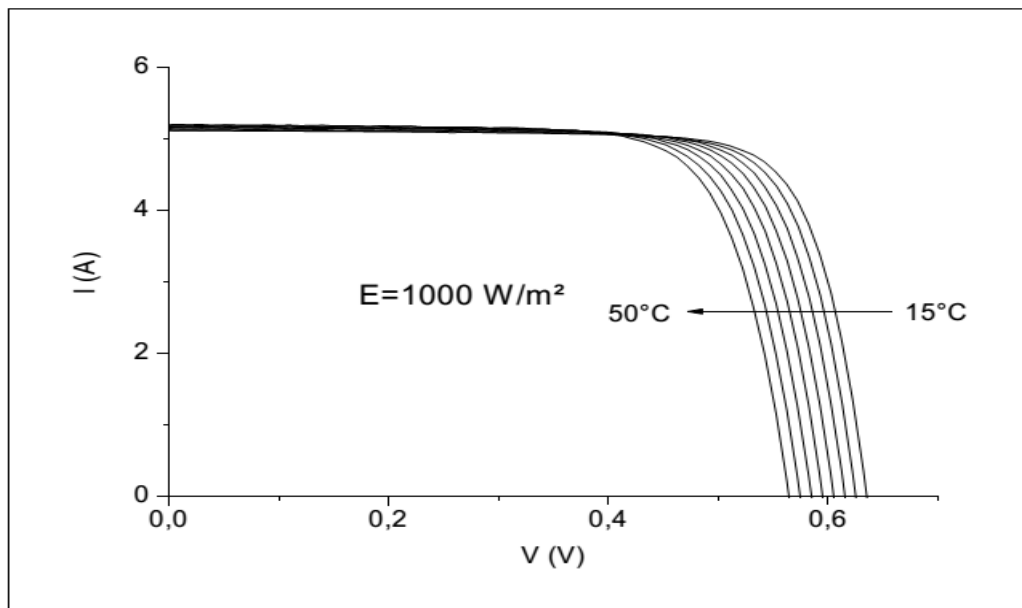
### I.1. Introduction

La conversion photovoltaïque est une application énergétique fortement dépendante de la température. Dans les applications terrestres, les cellules solaires sont généralement exposées aux températures du fonctionnement variant de 10 à 50 °C.

Les paramètres caractéristiques des cellules solaires, à savoir le courant de court circuit ( $I_{cc}$ ), la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion PV ( $\eta$ ) sont influencés par la température. La dépendance de ces paramètres avec la température est étudiée pour une cellule solaire au silicium polycristallin dans la gamme (15-50°C) sous un éclairement constant (1000 W/m<sup>2</sup>).

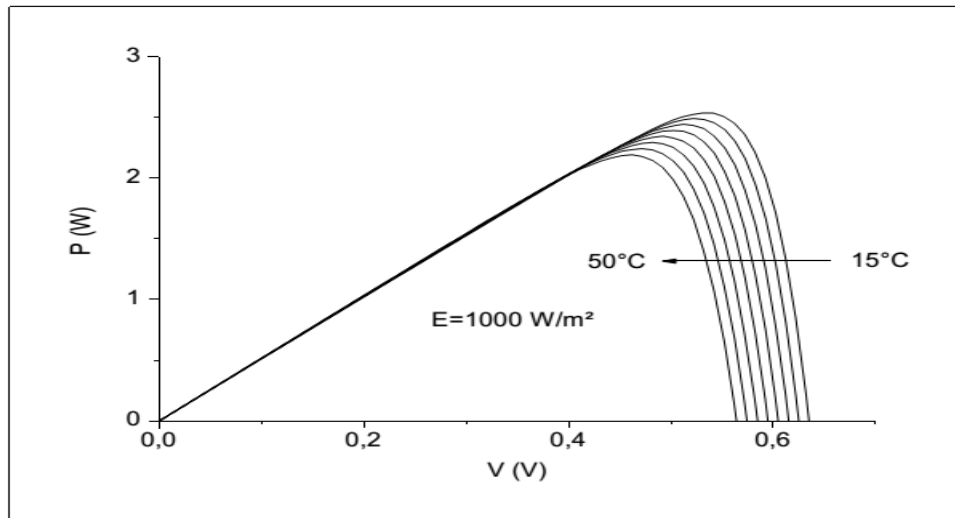
### II.2. Effet de la température sur la caractéristique I (V) d'une cellule solaire éclairée

La figure (II.1) montre des caractéristiques (I-V) mesurées à différentes températures sous un éclairement constant (1000 W/m<sup>2</sup>) pour une cellule solaire au silicium poly-cristallin de (12,5×12,5) cm<sup>2</sup> de surface; faites au département de physique «université de Constance» en Allemagne



**Figure II.1:** Influence de la température sur la caractéristique (I -V) d'une cellule solaire au silicium poly-cristallin sous un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>[18].

La figure (II.2) montre des courbes (P-V) du même dispositif, sous les mêmes conditions.



**Figure II.2:** Influence de la température sur la puissance de sortie pour une cellule solaire au silicium poly cristallin sous un éclairage de 1000 W/m².[18].

Le tableau (II. 1) montre l'évolution avec la température de la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ), le courant de court circuit ( $I_{cc}$ ), la puissance maximale extraite de la cellule ( $P_m$ ), le facteur de forme ( $FF$ ) et le rendement de la conversion photovoltaïque ( $\eta$ ).

<b>T (°C)</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	<b>50</b>
<b>V<sub>co</sub>(V)</b>	0.638	0.627	0.606	0.596	0.596	0.585	0.575	0.565
<b>I<sub>cc</sub> (A)</b>	5.126	5.136	5.147	5.158	5.168	5.179	5.189	5.199
<b>P<sub>m</sub> (W)</b>	2.536	2.492	2.490	2.445	2.393	2.348	2.295	2.194
<b>FF</b>	0.778	0.775	0.771	0.765	0.762	0.757	0.752	0.747
<b>η (%)</b>	16.25	15.95	15.65	15.32	15.03	14.69	14.36	14.04

**Tableau II. 1:** Evolution avec la température de ( $V_{co}$ ), ( $I_{cc}$ ), ( $P_m$ ), ( $FF$ ) et ( $\eta$ ).

On remarque une diminution de la puissance maximale avec l'augmentation de la température avec une variation relative de (-0.39 % / K).

## **II.3. Méthode d'extraction des paramètres**

### **II.3.1. Description de la méthode**

Il existe plusieurs méthodes d'extraction des paramètres caractéristiques des cellules solaires; sous éclairement et à l'obscurité. En se basant sur la caractéristique  $I(V)$  mesurée, différentes méthodes ont été proposées par plusieurs auteurs [19-20] pour déterminer les paramètres qui décrivent le modèle électrique non linéaire des cellules solaires. Ces paramètres sont en générale la résistance shunt ou parallèle, la résistance série, le photocourant, le courant de saturation et le facteur d'idéalité.

Certaines de ces méthodes utilisent la caractéristique  $I(V)$  mesurée sous éclairement et à l'obscurité, certains utilisent des mesures dynamiques ou des procédures d'intégrations [21] basées sur le calcul de l'aire limitée par la courbe  $I(V)$ .

Dans ce travail nous avons appliqué la méthode extractive « Bouzidi et al » [22] pour évaluer les paramètres caractéristiques du dispositif photovoltaïque pour différentes températures. On donne ci-dessous une description fonctionnelle de cette méthode extractive.

C'est une méthode basée [16] sur la caractéristique courant-tension sous éclairement d'une cellule solaire pour l'évaluation des paramètres caractéristiques en considérant le modèle électrique avec une seule diode.

Cette méthode inclut la présentation  $I=f(V)$  de la fonction standard (I.10) sous forme  $V=f(I)$  et la détermination des facteurs  $C_0$ ,  $C_1$  et  $C_2$  de cette fonction à partir desquels les paramètres de la cellule solaire éclairée sont évalués.

### **II.3.2. Application de la méthode**

L'application de la méthode sur les caractéristiques expérimentales à différentes températures nous donne les résultats suivants :

T (°C)	15	20	25	30	35	40	45	50
Rsh( $\Omega$ )	15.82	15.06	14.49	13.88	13.08	12.72	12.16	11.70
Rs( $\Omega$ )	0.0011	0.0012	0.0013	0.0014	0.0016	0.0018	0.0019	0.0021
n	1.52	1.516	1.505	1.503	1.478	1.453	1.450	1.445
Is ( $\mu$ A)	0.345	0.37	0.573	0.946	1.233	1.585	2.103	2.597

**Tableau II.2:** Paramètres extraits par la méthode [45] pour différentes températures .

#### II.4. Description de l'évolution des paramètres caractéristiques en fonction de la température:

L'effet principale de la température sur les cellules solaires résulte de la variation de trois principaux paramètres, qui sont habituellement employés pour caractériser les performances de la cellule solaire ceux-ci sont : le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) qu'est en principe caractérisée par le courant de saturation ( $I_s$ ) et le facteur d'idéalité ( $n$ ) de la diode, et le facteur de forme ( $FF$ ); qui est une fonction de ( $V_{co}$ ).

##### II.4.1. Le courant de court circuit( $I_{cc}$ )

D'après l'équation (II.1) on trouve  $I_{cc}$ ; en prenant ( $V=0$ )

$$I_{cc} = \frac{I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{qR_s I_{cc}}{nKT}\right) - 1 \right]}{1 + G_{sh} R_s} \quad (\text{II.1})$$

La résolution de cette équation n'est pas possible analytiquement, néanmoins du point de vue pratique on accepte une dépendance linéaire du courant de court circuit ( $I_{cc}$ ) en fonction de la température [23].

##### II.4.2. La tension en circuit ouvert( $V_{co}$ )

Elle est obtenue d'après l'équation (I.10) on prend ( $I=0$ ) d'où

$$V_{co} = \frac{nkT}{q} \log\left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s} - \frac{G_{sh} V_{co}}{I_s}\right) \quad (\text{II.2})$$

Si ( $I_{ph} \gg G_{sh} V_{co}$ ) et ( $I_{ph} \gg I_s$ ) [23] la tension  $V_{co}$  devient

$$V_{co} = \frac{nkT}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right)$$

(II.3)

### II.4.3. Le facteur de forme (FF )

Le facteur de forme FF dépend d'un ensemble de paramètres de la cellule, y compris le courant et la tension au point de fonctionnement maximum, le facteur d'idéalité et les résistances parasites séries et shunt. D'où, il est difficile de trouver une formule pour décrire la sensibilité de ce paramètre avec la température. Le FF montre habituellement une dépendance inverse avec la température [23].

Nous avons vu que  $I_{cc}$  et  $V_{co}$  montrent habituellement le comportement presque linéaire en fonction de la température. Pour  $R_s$  et  $R_{sh}$  nous discuterons ci-dessous leur comportement en fonction de la température :

Il y a seulement trois types de dépendance thermique des résistances électriques [24] :

type conducteur, type à coefficient de température négatif et le type à coefficient de température positif. Nous discuterons ci-dessous les trois types de sensibilités thermiques pour les résistances électriques :

#### a. Type conducteur

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T) \quad (\text{II.4})$$

Où  $\alpha$  est le coefficient de température du conducteur ( $\alpha > 0$ ) et  $R_0$  est la résistance de référence. Nous obtenons

$$\frac{dR}{dT} = \alpha R_0 > 0 \quad (\text{II.5})$$

#### b. Type à coefficient de température négatif

$$R(T) = R_0 \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (\text{II.6})$$

Où  $B$  est un coefficient spécifique au matériau du semi-conducteur ( $B > 0$ ) et

$R_0$  est une résistance référentielle. Nous obtenons

$$\frac{dR}{dT} = -\frac{BR}{T^2} < 0 \quad (\text{II.7})$$

### c. Type à coefficient de température positif

$$R(T) = R_0 \exp(BT) \quad (\text{II.8})$$

Où  $B$  est un coefficient spécifique au matériau du semi-conducteur ( $B > 0$ ) et  $R_0$  est une résistance référentielle. Nous obtenons

$$\frac{dR}{dT} = BR > 0 \quad (\text{II.9})$$

## II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'effet de la température sur la caractéristique  $I(V)$  expérimental d'une cellule solaire au silicium éclairée et de type poly-cristalline. En suite nous avons extrait les différents paramètres caractéristiques à différentes températures et analyser le comportement de ces paramètres avec la température.



**Chapitre III:**  
**Simulation numérique par**  
**SCAPS**

### III.1. Introduction:

**SCAPS** (à **Solar Cell Capacitance Simulator**): est un logiciel de simulation des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électronique et informatique (ELIS) de l'Université de Gent, Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué à son développement: Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Alex Niemegeers . [18-19].

Le logiciel est disponible gratuitement pour la communauté de la recherche de photovoltaïques (établissements et Instituts de recherche). Il fonctionne sur PC sous Windows 95, 98, NT, 2000 , XP , Vista , Windows 7 , et occupe environ 50 Mo d'espace disque , Le logiciel peut être téléchargé gratuitement. Il faut rapporter à la connaissance de à Marc Burgelman le téléchargé d'une version de SCAPS.

SCAPS a été développé à l'origine pour les structures cellulaires des familles *cuinse2* et *CdTe*. Cependant, plusieurs extensions ont amélioré leurs capacités pour devenir applicables aux cellules solaires cristallines (de la famille *SI* et *GaAs*), ainsi qu'aux cellules solaires amorphes (micro-morphes *a-Si* et *Si*). Dans l'aperçu suivant de ses principales caractéristiques:

- ✘ Jusqu'à 7 couches semi-conductrices.
- ✘ Mécanismes de recombinaison : bande-à-bande (directe), Auger, SRH.
- ✘ Les niveaux des défauts : en volume ou à l'interface, en considérant leurs états de charge et la recombinaison à leurs niveaux.
- ✘ Les niveaux des défauts, type de charge : pas de charge (neutre), monovalent (un seul donneur, accepteur), divalent (double donneur, double accepteur, amphotère), multivalent (défini par l'utilisateur).
- ✘ Les niveaux des défauts, distribution énergétique : niveau discret, uniforme, Gauss, sous forme de queue ou bien une combinaison.
- ✘ Les niveaux des défauts, propriété optique : Excitation directe par la lumière est possible (connu par effet de l'impureté photovoltaïque, IPV).
- ✘ Les niveaux des défauts, transitions métastables entre les niveaux.

- ✎ Contacts : Travail de sortie du métal ou régime de bande plate ; Propriété optique (Réflexion ou transmission) du filtre.
- ✎ Tunneling, inter-bandes (dans la bande de conduction ou dans la bande de valence), tunneling à/ou à partir des états de l'interface.
- ✎ Génération : à partir d'un calcul interne ou bien d'un fichier  $g(x)$  fourni par l'utilisateur.
- ✎ Illumination : plusieurs types de spectre sont disponibles (AM0, AM1.5D, AM1.5G, AM1.5G édition 2, Monochromatique, Blanc, etc.).
- ✎ Illumination: du côté p ou n. Et plusieurs d'autres caractéristiques, plus détaillées dans le manuel du logiciel [Ref].

### III.2. Notions de base :

SCAPS est un programme conçu pour fonctionner sous le système Windows, développé par LabWindows/CVI de la national Instruments. SCAPS s'ouvre avec l'icône 'Action Panel'.

La fenêtrer qui s'ouvre est présentée dans la figure suivant:

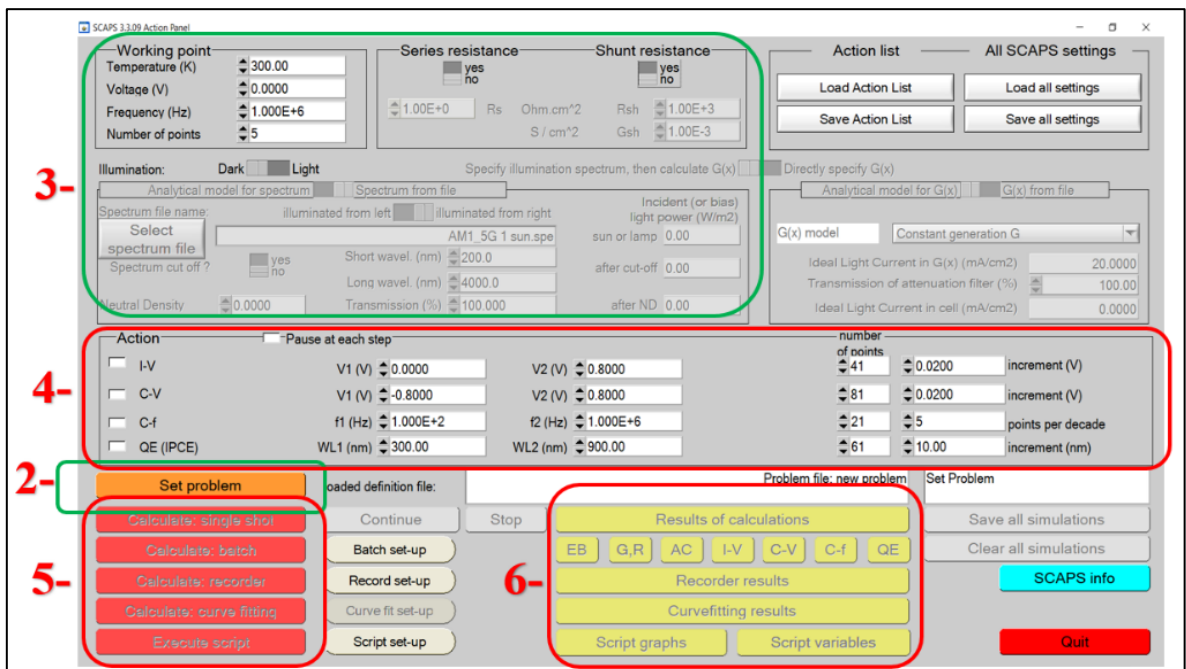


Figure III. 1: Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal

### III.3. La signification des blocs:

La signification des blocs numérotés de (1 à 6), Nous le mentionnons comme suit:

1. Lancer SCAPS.
  2. Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.
  3. Indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifier le point de fonctionnement).
  4. Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.
  5. Commencer le(s) calcul(s).
  6. Afficher les courbes de simulation (voir la section 6).
- Ces étapes sont plus détaillées dans ce qui suit.

On définir les blocs de ce logiciel, est expliquée dans le texte. Il y a des panneaux dédiés pour les actions de base:

#### III.3.1. Lancer SCAPS:

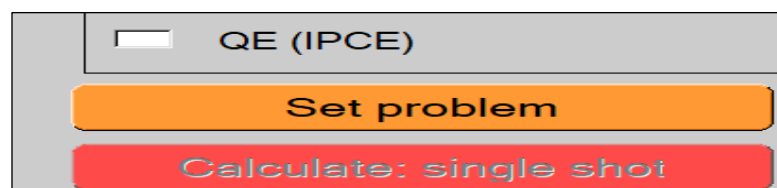
L'icône du programme apparaît sur le bureau comme suit:



Cliquez sur l'icône ci-dessus sur le bureau ou double-cliquez sur le fichier SCAPS3309.EXE dans le Gestionnaire de fichiers (ou toute autre version de SCAPS). SCAPS s'ouvre avec le bloc de travail.

#### III.3.2. Définir le problème:

Ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.



Nous appuyons sur le bouton (**Set problem**) dans le panneau actions, et nous

choisissons la charge (comme le montre dans la figure III.2 ) dans le coin inférieur droit du panneau qui s'ouvre ensuite. Sélectionnez et ouvrez (par exemple : NUMOS CIGS Baseline.def).

Ceci est un exemple de CIGS à cellules solaires.

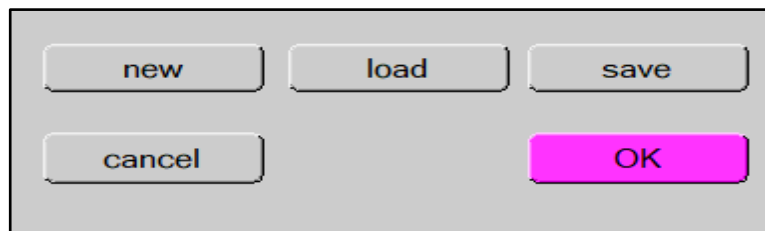


Figure III. 1: Définir le problème

### III.3.3. Définir le point de fonctionnement:

Est indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifier le point de fonctionnement).

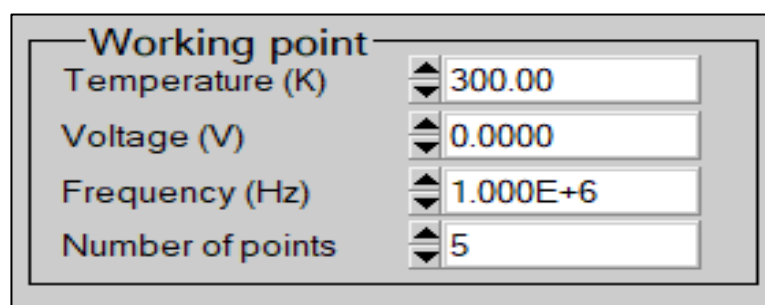


Figure III. 2: Le point de fonctionnement

Le point de fonctionnement détermine les paramètres inchangés dans les mesures de simulation qui se rapportent au processus de mesure. Cela signifie:

❖ **La température T:** Importante pour toutes les mesures.

**Note:** dans SCAPS, seulement  $N_c(T)$ ,  $N_v(T)$ , les vitesses thermiques, le voltage thermique  $k$  et tous leurs dérivés sont les seules variables qui ont une dépendance thermique explicite, on doit saisir manuellement, pour chaque valeur T, les paramètres du matériau correspondant.

❖ **Le voltage V:** il ne concerne pas les simulations I-V et C-V. C'est le voltage de la polarisation DC dans une simulation C-f et  $QE(\lambda)$ . SCAPS commence toujours à 0 V, et s'exécute au voltage du point de fonctionnement par un nombre d'étapes qu'on doit aussi spécifier.

❖ **La fréquence f:** elle ne concerne pas les simulations I-V, QE( $\lambda$ ) et C-f. C'est la fréquence dans laquelle la caractéristique C-V est simulée.

❖ **L'illumination:** elle est utilisée dans toutes les mesures. Pour QE( $\lambda$ ), elle détermine les conditions de polarisation de la lumière. Les paramètres de base sont: l'obscurité ou la lumière, le choix du côté illuminé, le choix du spectre. Le spectre d'illumination one sun= ( $1000 \text{ W/ m}^2$ ) avec la masse d'air 1.5 global est le spectre par défaut, mais il existe aussi une large gamme de lumières monochromatiques et de spectres pour plus de simulations personnalisées. S'il y a un simulateur optique, on peut immédiatement charger un profil de génération au lieu d'utiliser un spectre.

#### III.3.4. Sélection des caractéristiques à simuler:

Ce bloc spécialisé des caractéristiques à simuler, Dans la partie Action du panneau action, on peut choisir un ou plusieurs mesures à simuler: I-V, C-V, C-f et QE( $\lambda$ ), On peut ajuster également, les valeurs initiales et finales de l'argument, ainsi que le nombre des étapes.

#### III.3.5. Lancer le calcul:

C'est une commande pour lancer le calcul.



Calculate: single shot

#### III.3.6. Afficher les courbes simulées:

Après les calculs, SCAPS passe au panneau de bande d'énergie, présenté dans la figure III.4. Dans ce panneau, on peut voir les diagrammes de bandes, les densités des porteurs libres, la densité du courant ; au dernier point de polarisation. Si on veut afficher les résultats pour des tensions intermédiaires, on utilise le bouton pause dans le panneau d'action. On peut faire apparaître les résultats par les commandes PRINT, SAVE GRAPHS, SHOW, et les valeurs s'affichent par la suite à l'écran.

Il est possible de faire du Couper & Coller vers, par ex., Excel, ou sauvegarder les valeurs dans un fichier de données. Vous pouvez basculer vers un de vos panneaux personnalisés (si vous avez toutefois simulé au moins une

seule opération de mesure).

Après les calculs, le système SCAPS se déplace vers le panneau multiprise, illustré à la figure III.4. Dans ce panneau, nous pouvons voir des graphiques à barres, la densité de porteuse libre et la densité de courant; au dernier point de polarisation. Si vous souhaitez afficher les résultats des tensions moyennes, vous pouvez utiliser le bouton pause dans le panneau actions. Les résultats peuvent être affichés à l'aide des commandes **IMPRIMER**, **ENREGISTRER** des **GRAPHIQUES** et **AFFICHER** et les valeurs sont ensuite affichées à l'écran.

Il est possible de couper et coller par exemple Excel ou d'enregistrer des valeurs dans un fichier de données. Vous pouvez passer à l'un des panneaux personnalisés (si vous simulez au moins un processus de mesure).

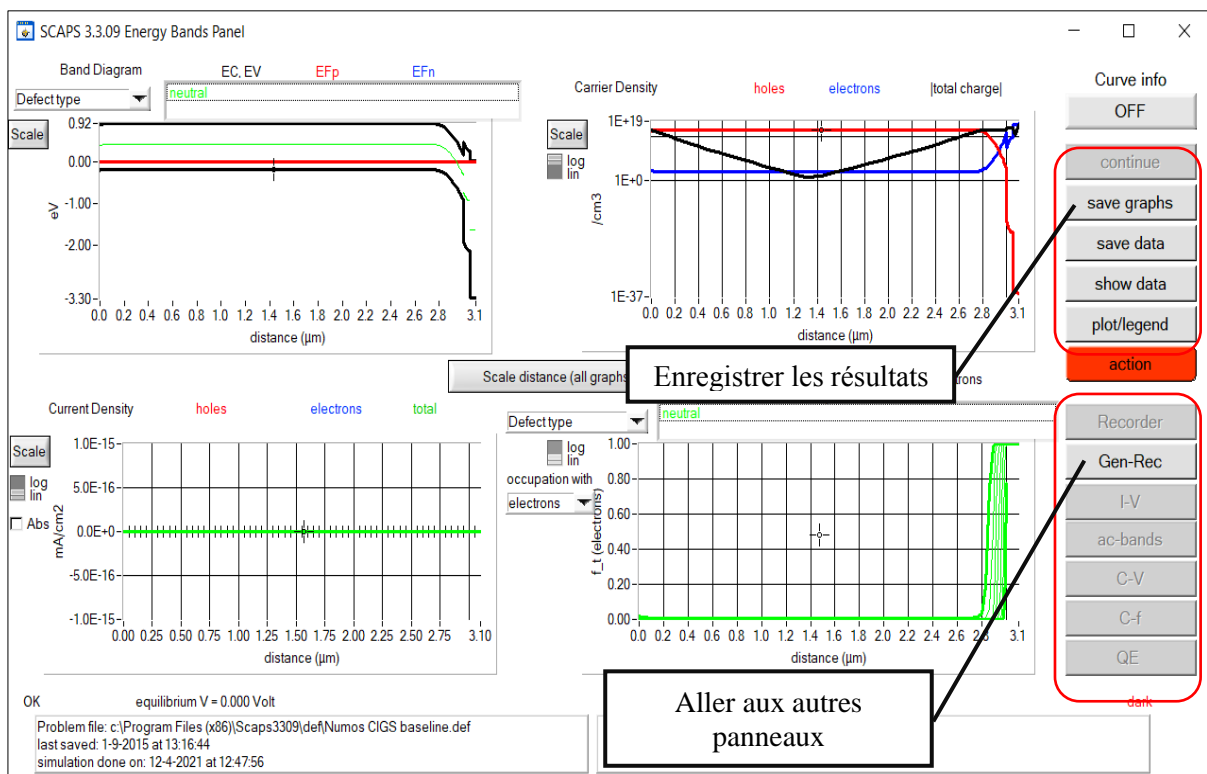


Figure III. 3: Panneau des bandes d'énergie

### III.3.7. Les courbes I-V:

La figure III.5 montre le panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et sous éclairage. La couleur de la dernière courbe calculée est indiquée (lorsque le graphe est trop encombré).

On clique **CLEAR ALL GRAPHS** dans le panneau d'action. Les courbes des taux de recombinaison sont affichées seulement pour la dernière simulation. La couleur de la légende correspond à la couleur de la courbe.

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

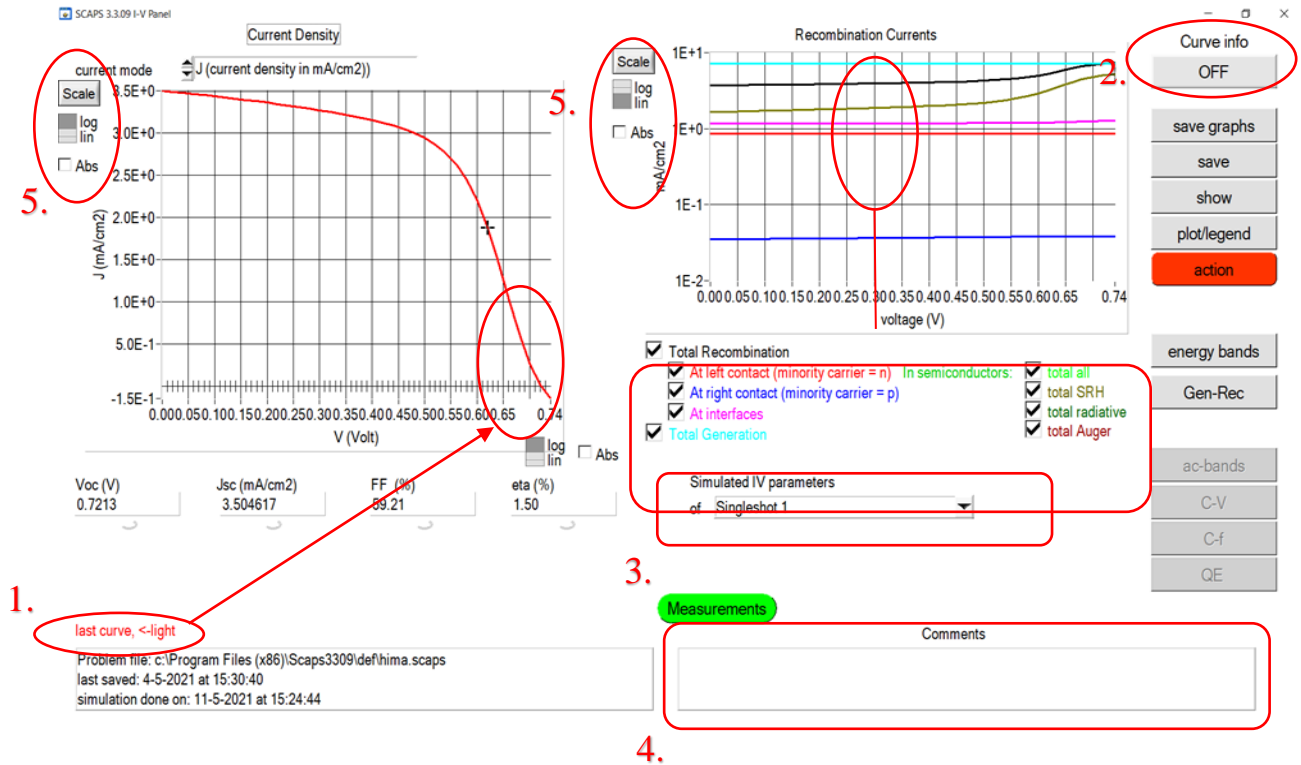


Figure III. 4: Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclaircissement.

Le bouton **SCALE** aide à changer la gamme et l'échelle des axes. Si on appuie sur le bouton **CTRL** et on sélectionne une aire rectangulaire dans un graphe, celui-ci fera un zoom intérieur (agrandissant) dans la zone sélectionnée. L'appui sur le bouton **CTRL** accompagné d'un clic droit donnera un zoom extérieur (Zoom out).

#### II.4. Définition d'une cellule solaire:

La méthode recommandée pour introduire une cellule solaire est d'utiliser l'interface graphique du programme. De cette façon on peut introduire interactivement tous les paramètres qui seront contrôlés par SCAPS de manière à ne pas obtenir des valeurs impossibles ou incohérentes.

### II.4.1 Edition de la structure d'une cellule solaire:

Quand on clique sur le bouton "**Set problem**" sur le panneau d'action, le panneau "**SOLAR CELL DEFINITION**" s'affichera. Ce dernier permettra de créer ou de modifier les structures des cellules solaires et de les enregistrer, ou bien de les charger à partir d'autres fichiers.

Ces fichiers de définition sont des fichiers standards ASCII (American Standard Code for Information Inter change) d'extension **.def** qui peuvent s'ouvrir avec Notepad.exe ou Wordbad.exe.

Il est déconseillé dès les modifier au risque des rendre inutilisables par la suite. Les propriétés des couches, contacts et de l'interfaces peuvent être modifiées en cliquant sur le bouton approprié comme le montre la figure III.6.

De la même manière, des couches peuvent être rajoutées en cliquant "**ADD LAYER**".

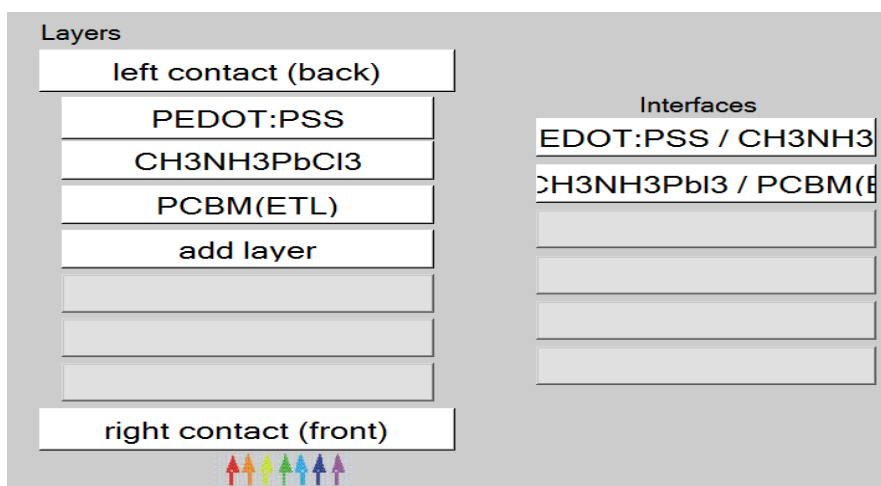
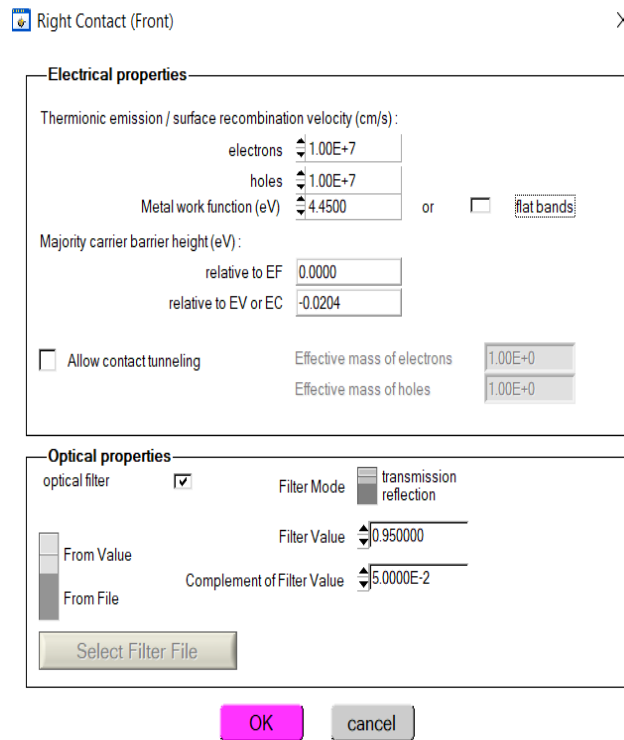


Figure III. 5: Définition de la structure d'une cellule solaire.

### II.4.2. Contacts:

Les propriétés du contact peuvent être saisies en cliquant sur le bouton de contact avant ou le bouton de contact arrière dans le panneau d'identification de la cellule. Un panneau des propriétés de contact 'CONTACT PROPERTIES PANEL' s'ouvre, comme le montre la figure III.7.



**Figure III. 6:** Panneau des propriétés des contacts

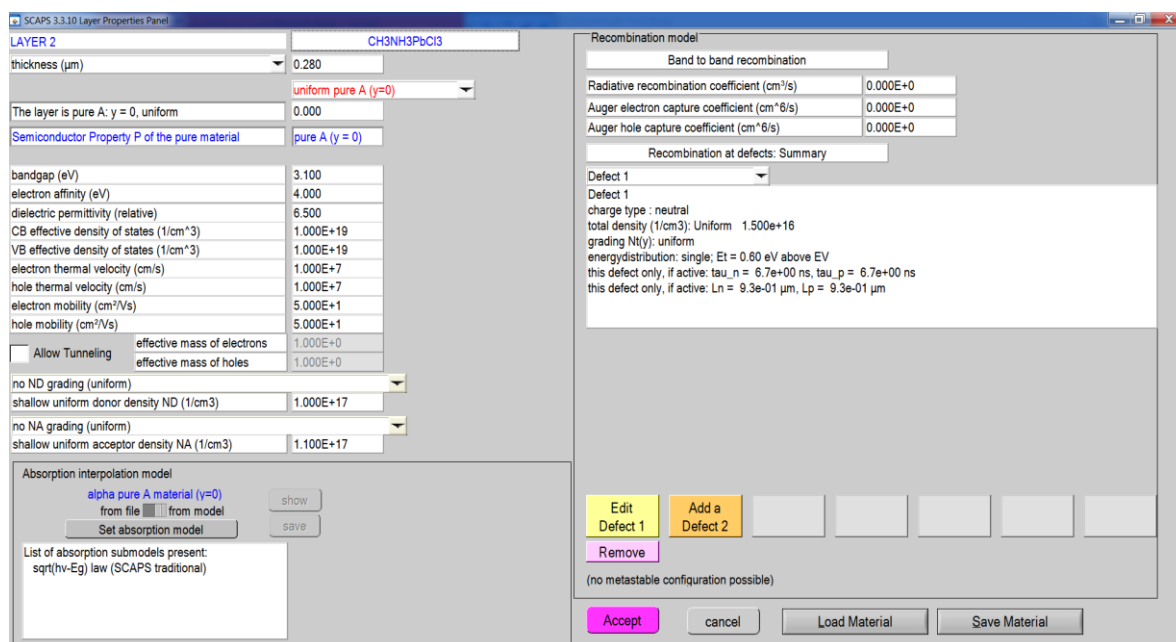
Les caractéristiques des contacts sont divisées en caractéristiques électriques et optiques. Dans les propriétés électriques, nous définissons comme suit:

- Les vitesses de recombinaison surfaciques des électrons et des trous libres.
- Si le contact a un travail de sortie, ou il est idéal (régime de bande plates).
- La barrière des porteurs majoritaires.
- L'effet tunnel (si on veut en tenir compte).

Pour les propriétés optiques, on peut définir la transmission ou la réflexion, par une valeur ou un fichier de données.

### III.4.3. Définition des couches:

En cliquant sur le bouton « **add layer** », une fenêtre (Figure III.8) s'ouvre qui contient les différents paramètres du matériau à introduire.



*Figure III. 7: Propriétés de la couche ajoutée.*

➤ Dans la première case, on introduit le nom de la couche (qui correspond au type du dopage).

➤ Dans la deuxième case, l'épaisseur de la couche est introduite.

➤ Le troisième block, concerne la pureté du matériau et son profile.

➤ Dans le quatrième block, on introduit: le gap d'énergie, l'affinité électronique, la permittivité diélectrique, les densités effectives des bandes de conduction et de valence, vitesse thermiques des électrons et des trous libres, les mobilités des électrons et des trous. Finalement, une case, qui permet d'ajouter les masses effectives des électrons et des trous si on tient compte du transport des porteurs par effet tunnel. [25].

➤ Dans le cinquième block, (figure III.9), on introduit le dopage, type et densité. Le dopage aussi peut être introduit comme étant uniforme, comme il peut avoir des variations graduelles (linéaire, paraboliques).

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)		3.200E+15

**Figure III. 8:** Propriétés des dopages définis.

➤ Dans le sixième block, on définit l'absorption de la couche, comme le montre dans la figure III.10. L'absorption peut être définie par le modèle analytique fourni par SCAPS, comme elle peut être introduite sous forme de données.

➤ SCAPS fournit un nombre de données de l'absorption pour plusieurs types de semi-conducteurs. On peut également utiliser d'autres données de l'absorption.

Absorption model		Show / Set alpha(composition; lambda)	
		alpha (y=0)	alpha (y=1)
		<input type="checkbox"/> from model	<input type="checkbox"/> from model
		<input type="checkbox"/> from file	<input type="checkbox"/> 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
<input type="button" value="show"/> <input type="button" value="save"/>			

**Figure III. 9:** Modèle de l'absorption.

Le type de recombinaison existe; directement ou à travers des pièges. La taille est indiquée sur le côté droit du panneau Propriétés du calque (Figure III.11).

The screenshot displays the 'Band to band recombination' and 'Defect 4 of layer 1' configuration panels. The recombination panel includes three rows of coefficients, each with two numerical values and a 'uniform' dropdown. The defect panel includes fields for defect type, capture cross sections, energetic distribution, reference energy level, energy level with respect to reference, characteristic energy, and a section for 'Nt grading dependent on position x: Nt (x)' with an 'exponential' dropdown and two rows of values for 'Left (x=0)' and 'Right (x=1)'.

Band to band recombination			
Radiative recombination coefficient (cm <sup>2</sup> /s)	1.000E-5	1.000E-5	uniform
Auger electron capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	1.000E-25	1.000E-25	uniform
Auger hole capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	1.000E-25	1.000E-25	uniform

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 (eV)	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 III. 10: Définition des types de recombinaison présents

Si nous introduisons des défauts (pièges); ils peuvent être uniformes ou non uniformes, discrets, avec des distributions gaussiennes, donneurs, accepteurs, neutres, monovalents ou bivalents.

On peut même définir des transitions de porteurs entre les différents niveaux d'énergie des pièges [26].

### III.5. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons fourni une description relativement détaillée du programme de simulation SCAPS, nous avons défini sa structure, ses outils et ses capacités pour calculer tous les paramètres internes et externes liés à la cellule solaire et générer ainsi ses caractéristiques électriques telles que la densité de courant caractéristique tension (I-V) et la réponse spectrale (QE). [20].

Il est donc nécessaire d'améliorer les structures des dispositifs photovoltaïques.

## *Chapitre IV:*

*Simulation de MAPbCl<sub>3</sub> solar  
cell, résultat et discussions*

## **IV.1. Introduction:**

MAPbCl<sub>3</sub> est un matériau sans plomb prometteur pour les applications de cellules solaires, ce troisième chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats obtenus en simulant une cellule solaire à partir du matériau ci-dessus, et sur les caractéristiques courant-tension mesurées du même dispositif photovoltaïque à différentes températures sous éclairage constant afin d'explorer les effets de la température sur les paramètres électriques du dispositif photovoltaïque étudié.

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

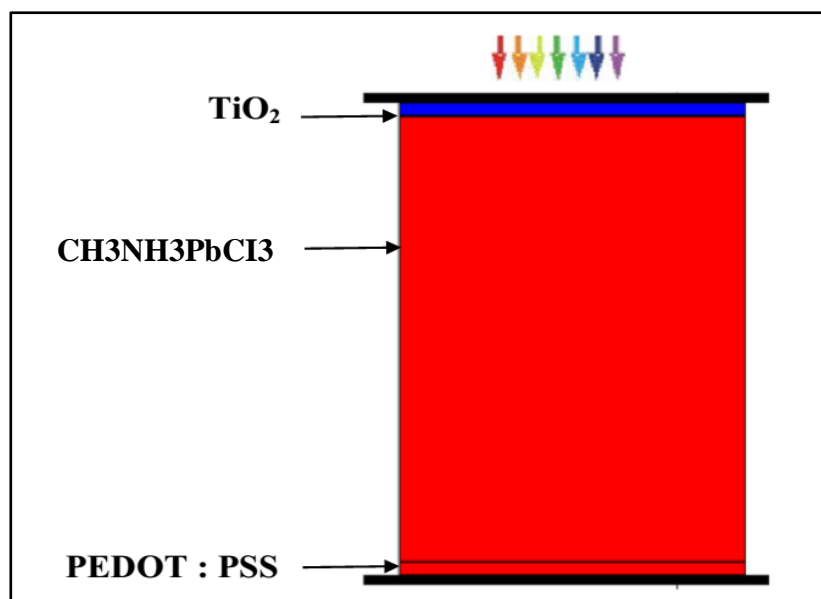
## **IV.2. Structure et paramètres de la cellule étudiée:**

### **IV.2.1. Présentation de la cellule étudiée:**

Notre travail consiste à simuler une cellule solaire à base de CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbCl<sub>3</sub> le matériau mentionné ci-dessus, Afin de connaître l'effet de la température sur les performances de la cellule solaire sur la base du matériau ci-dessus.

Dans notre étude, nous utilisons une cellule solaire composée des hétérojonctions suivantes:(PEDOT: PSS/ CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbCl<sub>3</sub>/ TiO<sub>2</sub>(ELT)).

Une structure typique de cellules solaires à base de CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbCl<sub>3</sub> consiste d'une couche absorbante et en haut de p-type (TiO<sub>2</sub>(ELT)) et n- type (PEDOT: PSS) disposé dans la partie inférieure. Comme le montre la Figure III.1.



*Figure IV. 1 : schéma simplifié de la cellule solaire utilisée*

#### **IV.2.2. Les paramètres du dispositif étudié:**

La tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) est définie comme la tension lorsqu'il n'y a pas de charge connectée entre les bornes, c'est-à-dire en condition de circuit ouvert. Par conséquent, les valeurs maximales de tension qu'une cellule solaire peut fournir. Le facteur de remplissage (FF) est défini comme le rapport de la puissance maximale générée à la sortie d'une cellule solaire au produit de la densité de courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ) et de la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ).

L'efficacité de conversion de puissance (PCE) d'une cellule solaire est définie en termes de sa capacité à générer la puissance de sortie maximale à partir de la puissance incidente. La densité de courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ) est définie comme le courant dans des conditions de court-circuit. En termes plus larges, le courant photo-généré maximal qu'une cellule solaire peut transmettre lorsque ses bornes sont raccourcies, c'est-à-dire qu'elles sont en contact les unes avec les autres [27-28].

Pour la simulation électrique, les propriétés moléculaires et le paramètre structurel sont nécessaires dans la couche active de la cellule solaire pérovskite et une autre couche du dispositif étudié. L'amélioration de l'efficacité des cellules solaires dépend de divers facteurs tels que la quantité d'énergie

électromagnétique qui arrive sur la couche absorbante et génère de l'électricité. Le deuxième facteur est un type différent de matériaux ayant un coefficient d'absorption et une bande interdite différents, Le troisième facteur est le semi-conducteur utilisé pour fabriquer les différentes couches de la cellule solaire [29-30].

Le FF, Voc, Jsc et l'efficacité du modèle simulé ont été calculés et comparés avec différents matériaux de pérovskite présentés dans le tableau III.1.

➤ **Propriétés des différentes couches:**

Propriété \ Couche	PEDOT: PSS	CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PBCl <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
Épaisseur (µm)	0.030	0.28	0.030
Bande interdite (eV)	1.600	3.1	3.200
Affinité électronique (eV)	3.400	4	4.000
Permittivité diélectrique	3.000	6.2	3.900
CB densité effective d'états (cm <sup>-3</sup> )	1.000E+22	1.000E+19	2.500E+21
VB densité d'états effective (cm <sup>-3</sup> )	1.000E+22	1.000E+19	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 (cm <sup>2</sup> / V.S.)	4.500E-4	5.000E+1	2.000E-1
Trou de la mobilité (cm <sup>2</sup> / V.S.)	9.900E-5	5.000E+1	2.000E-1
densité de donneur uniforme peu profonde ND (cm <sup>-3</sup> )	0.000E+0	1.000E+17	2.930E+17
densité d'accepteur uniforme peu profonde NA (cm <sup>-3</sup> )	1.000E+22	3.200E+15	0.000E+0
Défect Nt (cm <sup>-3</sup> )	1.000E+15		1.000E+0

**Tableau IV. 1:** Propriétés des différentes couches (PEDOT: PSS/ CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PBCl<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>).

### ❖ Cellule de base:

Nous observons l'effet de la température sur les paramètres des cellules solaires photovoltaïques à différentes températures et enregistrons le gain de la cellule solaire.

### IV.3. Simulation par SCAPS:

Lorsque la température passe de (270 à 370 K), on observe son effet sur les paramètres PV de la cellule solaire. Nous prenons 10 valeur.

#### IV.3.1 Effet de Température sur les paramètres PV de la cellule solaire:

Pour améliorer l'efficacité, la structure cellulaire de la pérovskite (CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbCl<sub>3</sub>) a été modifiée et divers paramètres de performance calculés tels que J<sub>sc</sub>, FF, Voc et eta . La simulation a lieu dans des conditions d'éclairage sombres et claires. Dans le cas d'un éclairage sombre, la tension du point de fonctionnement est nulle. Dans le cas d'un éclairage lumineux, la simulation est effectuée à une tension de point de fonctionnement de 0,5 V pour tous les matériaux de cellules solaires en pérovskite. Différentes cellules solaires à pérovskite et leurs différents paramètres ont été calculés et rapportés dans le tableau IV.2.

MATERIAL	PARAMETER			
	Voc(V)	Jsc(mAcm <sup>-2</sup> )	FF	eta (%)
CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbCl <sub>3</sub>	0.6739	1.3679	40.51	0.37

*Tableau IV. 2: Different calculated parameters for studied perovskite solar cell*

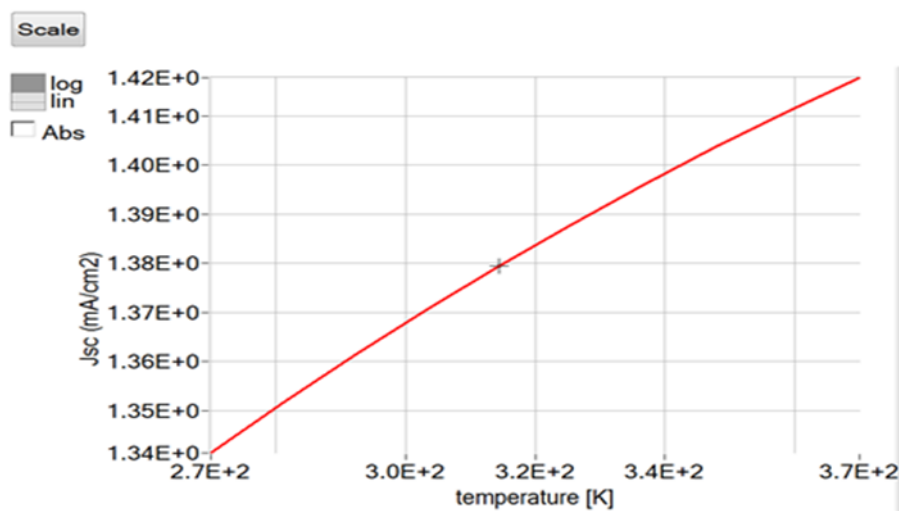
#### IV.3.2 Courbe du paramètres photovoltaïques

Après cela, nous avons tracer la courbe de variation du paramètres photovoltaïques (Voc, J<sub>sc</sub>, FF et eta (%)) des couches CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbCl<sub>3</sub>.

### IV.3.2.1 Le courant de court circuit ( $I_{cc}$ )

Sur la Fig. IV.2, des courbes I-V mesurées à différentes températures sous un éclairage de 100 mW/cm<sup>2</sup> pour une cellule au silicium pc ont été présentées.

on peut voir que l'augmentation de la température mène à une augmentation du courant de court circuit. Le comportement thermique de ce dernier est montré dans la Fig. Nous avons également observé une augmentation linéaire de  $I_{cc}$  avec la température dans la gamme 270-370 K. Nous indiquons que le coefficient de température du courant de courtcircuit calculé ( $\mu I_{cc} = 0.002$  1 A/K) est en bon accord avec celui obtenu par De Soto et al [49] (0.00238 A/K) pour la même technologie sous les mêmes conditions de fonctionnement.



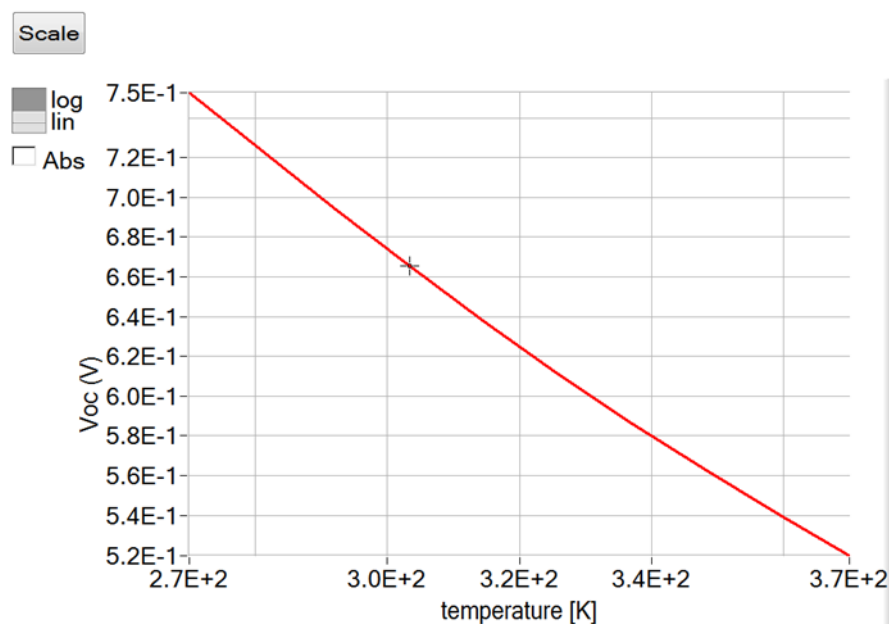
**Figure IV.2:** L'évolution du courant de court circuit ( $I_{cc} \approx I_{ph}$ ) en fonction de température

Le photocourant ( $I_{ph}$ ) d'une cellule solaire augmente généralement légèrement avec l'augmentation de la température. Cette augmentation est due à la décroissance de la largeur de la bande interdite ( $E_g$ ) du matériau semi-conducteur; ce qui permet d'utiliser un peu plus de photons de basse énergie. En conséquence, le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) de la cellule augmente [31].

Sous un éclairage constant la variation de ( $I_{cc}$ ) en fonction de la température dans une gamme thermique étroite pour les cellules solaires au silicium poly cristallin est très petite et peut être insignifiante.

### IV.3.2.2 La tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ )

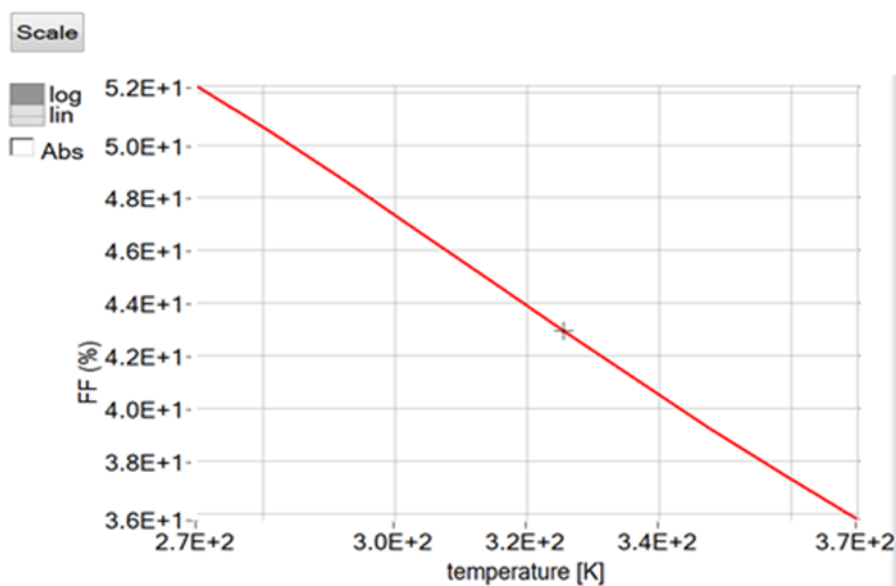
Dans le même diagramme représenté sur la Fig. II.1, on peut voir que l'augmentation de la température mène à une diminution de  $V_{co}$ . Le comportement thermique de  $V_{co}$  sous un éclairage constant est montré dans la Fig. III.2. Sous une irradiance de 100 mW/cm<sup>2</sup> la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  diminue avec la croissance de la température par un ordre de grandeur de 2.1 mV/K; ce qui est en bon accord avec l'évaluation de Singh et al [32]; pour les cellules solaires au silicium où  $dV_{co}/dT$  est dans l'intervalle [-2.17, -2.07] mV/K.



*Figure IV.3 : La tension en circuit ouvert  $V_{co}$  d'une cellule solaire au silicium polycristallin en fonction de la température*

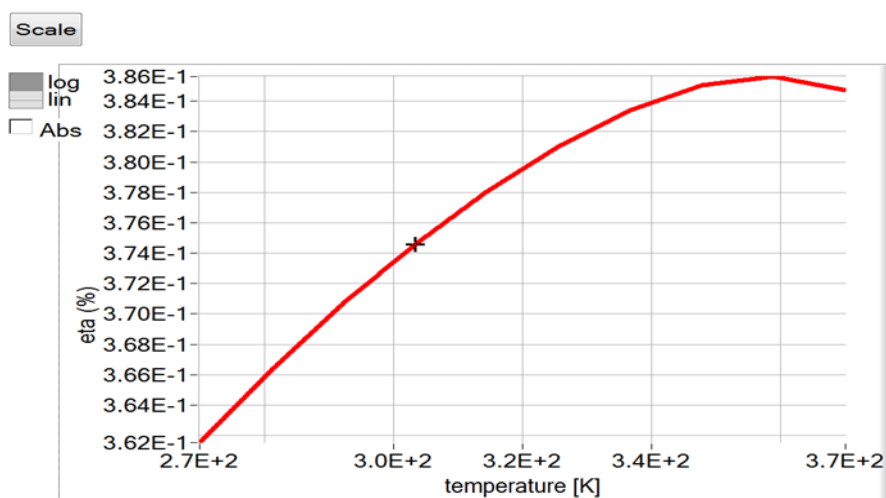
### IV.3.2.3 Le facteur de forme (FF)

La variation de FF avec la température dans la gamme 288-323 K pour les cellules solaires au silicium polycristallin est illustrée dans la Fig. III. 5; avec un éclairage de 100 mW/cm<sup>2</sup>, le FF diminue avec l'augmentation de la température. Ceci est vrai pour l'ensemble des cellules solaires [33]



**Figure IV. 4:** Variation de FF avec la température dans la gamme 270-370 K pour la cellule solaire

La Fig. III. 6 illustre l'allure du rendement de la conversion PV  $\eta$  en fonction de la température, nous constatons que la valeur maximum de  $\eta$  est au-dessous de la température ambiante. Dans notre gamme de température 270-370 K; la diminution du rendement de la conversion PV est presque linéaire avec la température, la pente correspondante ( $d\eta/dT = -0.063\% / K$ ) est en accord avec l'évaluation de Singh et al [34]; pour les cellules solaires au silicium ( $d\eta/dT = -0.042\% / K$ ).



**Figure IV. 5:** La dépendance avec la température du rendement de la conversion PV  $\eta$  d'une cellule solaire

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

Ainsi, la température est affectée négativement que paramètres photovoltaïques.

### IV.3.3. Courbe courant-tension:

La courbe I-V finale peut être obtenue en maintenant tous les paramètres améliorés du modèle de concepteur.

La Figure IV.5 représente la courbe caractéristique I-V finale du modèle simulé avec tous les paramètres optimisés précédents.

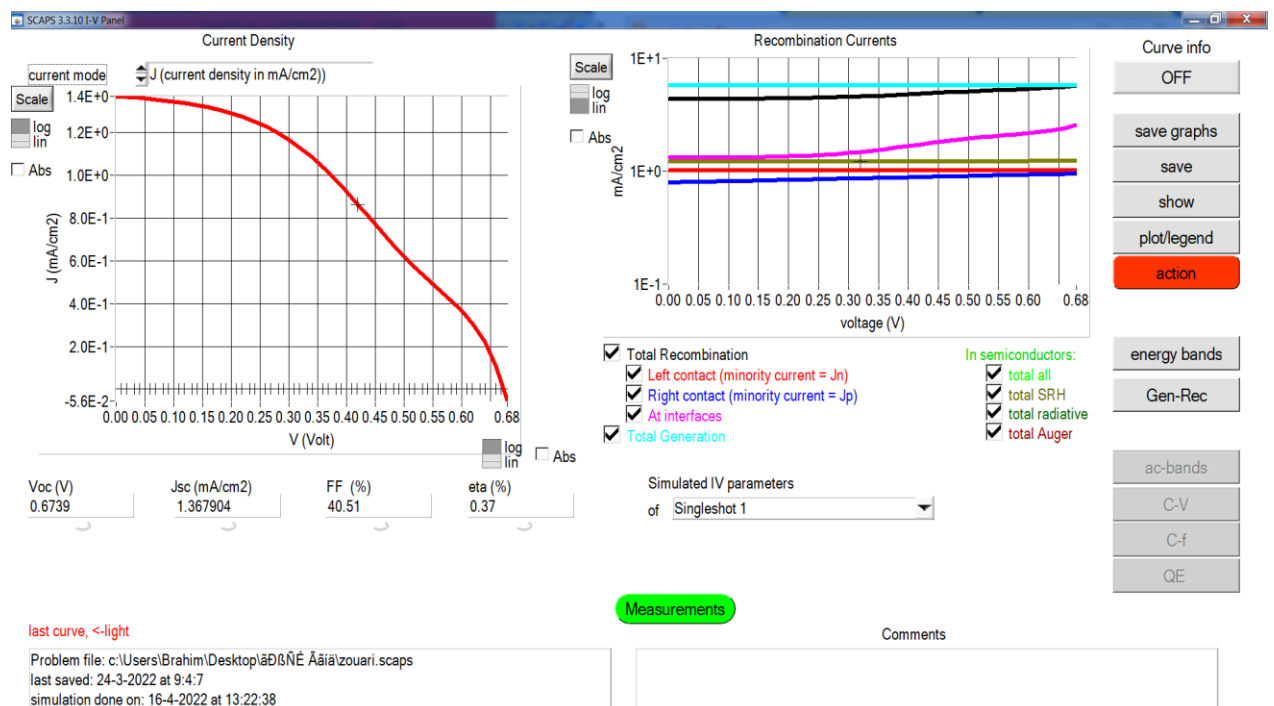
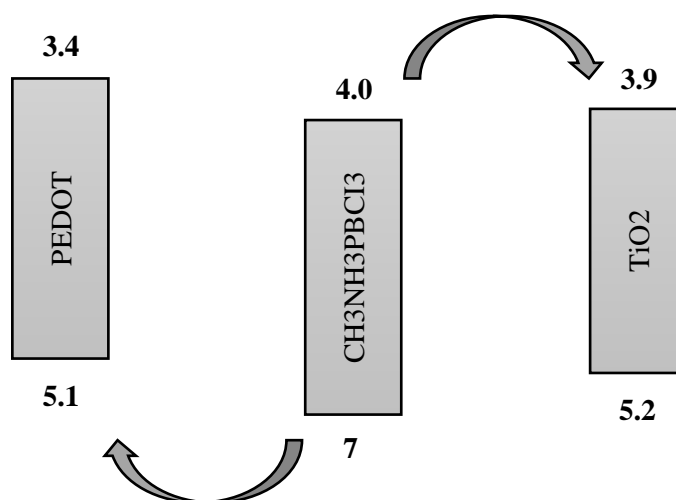


Figure IV.6: Courbe I-V simulée

#### IV.4. Alignement des bandes energetiques



Pour tout solide des gammes d'énergie. Les échelles de temps utilisées dans la longueur sont largement réglementées. Il est montré par la figure des sécheurs de matériaux magnétiques présents dans les matériaux magnétiques que trois types de matériaux sont connus, les métaux et les semi-conducteurs [35]. Les métaux ont un plein potentiel quelle que soit la température et ont une conductivité.

Bande de masse avec électrons Bande complète avec électrons bande cosmétique "bande de valence" (bande de valence) Les électrons occupant cette bande sont appelés "électrons de transport" (bande de valence) Quant à l'empreinte, la plupart d'entre eux sont majoritairement occupés comme "bande de conduction" car la électrons Il y est présent seulement alors ces substances transmettent le courant électrique. L'écart d'énergie entre la bande de valence et la bande de transport est plus grand dans les matériaux qui se réfèrent à des vecteurs, La conductivité des semi-conducteurs dépend fortement de la température du matériau.

#### IV. 5. Conclusion:

La cellule solaire pérovskite ayant l'architecture Verre (PEDOT: PSS/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbCl<sub>3</sub>/ TiO<sub>2</sub>), est conçue et analysée à l'aide d'un simulateur de capacité de cellules solaires.

Dans ce travail étudié, nous avons calculé les paramètres électriques tels que FF, Voc, Jsc et PCE de la pérovskite. Les résultats simulés montrent que CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbCl<sub>3</sub> a des paramètres calculés ( FF = 40,51, eta = 0,37 % , Voc = 0,6739 V et Jsc = 1,3679 mAcm<sup>-2</sup>)

Le matériau inorganique CuI est utilisé et agit comme couche de transport de trous (HTL) dans la structure simulée de la cellule solaire pérovskite qui est plus efficace pour la cellule.

Est en fin notez que lorsque la température augmente entre (270 à 370 K), le rendement des paramètres photovoltaïques diminue.



**Conclusion générale**

## Conclusion générale

La protection de l'environnement est devenue une préoccupation majeure ces dernières années. De nombreux axes de recherche ont donc été orientés vers l'utilisation des énergies renouvelables, dont le solaire. Le solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable car il utilise une source d'énergie naturelle, le soleil.

C'est donc une véritable alternative efficace aux énergies fossiles à bien des égards: elle est inépuisable, elle peut être produite localement et selon les besoins locaux, elle préserve l'environnement car elle n'émet pas de gaz à effet de serre, elle ne produit pas de déchets. Cela n'implique aucun risque ou inconvénient significatif.

Cette énergie est produite par un appareil (cellule solaire photovoltaïque ou cellule solaire) qui convertit l'énergie électromagnétique du rayonnement solaire en énergie électrique.

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires car les performances électriques d'une cellule solaire y sont très sensibles.

**L'objectif de ce travail:** est d'étudier l'effet de la température sur les propriétés caractéristiques des cellules solaires.

**Méthode / analyse:** l'analyse de la structure des cellules solaires est réalisée à l'aide du simulateur de capacité des cellules solaires (**SCAPS**), un outil logiciel informatique et bien adapté à l'analyse des connexions homogènes et hétérogènes, des connexions multiples et des dispositifs photoélectriques à barrière Schottky. Cet outil logiciel fonctionne et simule sur la base de l'équation de Poisson et de la continuité des électrons et des trous. Pour ce modèle, différentes températures sont utilisées pour montrer à quel point elles affectent les performances de la cellule solaire.

Résultat: Pour améliorer l'efficacité, la structure cellulaire de la pérovskite ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$ ) a été modifiée et divers paramètres de performance calculés tels que  $J_{sc}$ , FF,  $V_{oc}$  et  $\eta$ . La simulation a lieu dans des conditions d'éclairage sombres et claires. Dans le cas d'un éclairage sombre, la tension du point de fonctionnement est nulle. Dans le cas d'un éclairage lumineux, la simulation est effectuée à une tension de point de fonctionnement de 0,5 V pour tous les matériaux de cellules solaires en pérovskite. Différentes cellules solaires à pérovskite et leurs différents paramètres.

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

Ainsi, la température est affectée négativement que paramètres photovoltaïques.



***Bibliographie***

## Bibliographie

- [1]. B. MHENNA et G. FERHAT, « Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque », mémoire de master académique. Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU, 2018.
- [2]. J. Bernard, Energie solaire calcul et optimisation , 1 ère édition, ELLIPES, Paris, 2004.
- [3]. B. Brousse, Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique, Thèse de doctorat, faculté de sciences et technique, spécialité : électronique des hautes fréquences et optoélectronique, université de Limoges (France), 2004.
- [4]. B.HICHAM, « Etude des différents montages et différents branchements des panneaux solaires », Mémoire de Master en physique Université L'ARBI BEN MHIDI (OUM EL BOUAGHI) ,2014.
- [5]. B.SALAHEDDINE, « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires », mémoire magister .Université FERHAT ABBAS – SETIF, 2011.
- [6]. A. Labouret et al: "Cellules solaires: "les bases de l'énergie photovoltaïque", collection ETSF, Dunod, 4e édition, 2005.
- [7].[http://www.grenoble-isere.com/etudes-etterritoires/pdf\\_filieres/](http://www.grenoble-isere.com/etudes-etterritoires/pdf_filieres/) photovoltaïque Etude2010 V14- Fr.pdf .
- [8]. M. ABDELKADER et CH. AYMENE, « Etude et simulation d'un système de production d'énergie photovoltaïque en site isolé », mémoire de master. Université BADJI MOKHTAR ANNABA, 2018.
- [9]. L'effet photovoltaïque, <https://www.futura-sciences.com/>, consulté le 18/01/2022

- [10]. 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.
- [11]. S.M.SZE, "Physics of Semiconductor Devices", John Wiley & Sons, 1981.
- [12]. 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.
- [13]. B. OUIZA, « Etude et Simulation des paramètres électriques d'une cellule solaire photovoltaïque à base de Silicium » Mémoire master. Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU ,2017.
- [14]. K. Tan, et al. Controllable design of solid-state perovskite solar cells by SCAPS device simulation, Solid State Electron,2016
- [15]. A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 3 ème édition, DUNOD, Paris, 2006.
- [16]. A. Ricaud, Photopiles solaires , 1 ère édition, presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1997.
- [17]. K. Bouzidi, Etude comparatives des méthodes d'extraction des paramètres des cellules solaires , Mémoire de magister, département de physique, faculté des sciences, université de Sétif (Algérie), 2007.
- [18]. H. Matieu, Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques , 1 ère édition, DUNOD, Paris, 2001.
- [19]. M. Wolf, H. Rauschenbach, Advanced Energy Conversion, 1963; 3: 455.
- [20]. T. Easwarakhanthan, J. Bottin, I. Bouhouch, C. Boutrit, Int. J. Sol. En., 1986; 4:1 -12

- [21]. G. L. Araujo, E. Sanchez, 1982, IEEE Transactions on Electron Devices Vol ED-29, 1511-1513
- [22]. K. Bouzidi, M. Chegaar, A. Bouhemadou, Solar Energy Materials and Solar Cells, 91 (2007) 1647–1651.
- [23]. J. Krustok, R. Josepson, M. Danilson, D Meissner, Solar Energy (2009), doi:10.1016/j.solener.2009.09.011 .
- [24]. J. Ding, X. Cheng, T. Fu, Vacuum 77 (2005) 163–167
- [25]. Graduate Theses and Dissertations, Mulder, Watson Paul, “Study of electronic characteristics of hetero junction with intrinsic thin-layer devices and defect density profile of nano crystalline silicon germanium devices,” 14597, 2015.
- [26]. <https://scaps.elis.ugent.be/> consulté le 07/02/2022
- [27]. rasanth kumar and Giri babu, 2016. “Recent advances in perovskitebased solar cells”. Curr. Sci., 111 1173–81
- [28]. K. masuko, M. shigematsu, T. hashiguchi, D. fujishima, M. kai, N. yoshimura, T. yamaguchi, Y. ychihashi, T. Yamanishi, T. Takahama, M. Taguchi, E. Maruyama, S. Okamoto, T. Mishima, N. Matsubara, T. Yamanishi, T. Takahama, M. Taguchi, E. Maruyama, and S. Okamoto, “Achievement of More Than 25% Conversion Efficiency with Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cell,” IEEE Journal of Photovoltaic Vol.4, Issue6, pp. 1433–1435, 2016.
- [29]. C. Wehrenfennig, G.E. Eperon, M.B. Johnston, H.J. Snaith, L.M. Herz, 2014. “High Charge Carrier Mobilities and Lifetimes in Organolead Tri halide Perovskite”. Journal of Advanced Materials, Vol. 26 , pp. 1584- 1589
- [30]. Bottaro and Moscowitz, “Current photovoltaic technology: current progress and future prospects,” 1997, MIT-EL77-041W.
- [31]. J. Krustok, R. Josepson, M. Danilson, D Meissner, Solar Energy (2009), doi:10.1016/j.solener.2009.09.011 .

- [32]. P. Singh, S.N.Singh, M. Lal, M.Husain, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 92 (2008) 1611–1616.
- [33]. U. Malm, J. Malmstrfm, C. Platzer-Bjfrkman, L. Stolt. *Thin Solid Films* 480–481 (2005) 208–212.
- [34]. M.M. El-Nahass, K.F. Abd-El-Rahman, A.A.M. Farag, A.A.A. Darwish, *Organic Electronics* 6 (2005) 129–136.
- [35]. M. Chegaar, G. Azzouzi, P. Mialhe, *Solid-State Electronics* 50 (2006) 1234–1237.

## Résumé

Dans cette note, l'effet de la chaleur sur les propriétés caractéristiques d'une cellule solaire a été étudié, et pour connaître l'efficacité des paramètres photovoltaïques, la structure de la cellule pérovskite ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$ ) a été modifiée et divers paramètres de performance tels que  $J_{sc}$ , FF,  $V_{oc}$  et  $\eta$  ont été calculés. La simulation a lieu dans des conditions d'éclairage sombres et lumineuses.

Les résultats obtenus grâce à l'étude montrent que lorsque la température augmente, l'efficacité des paramètres photovoltaïques diminue et donc la température affecte négativement les paramètres photovoltaïques uniquement.

**Mots-clés:** cellule solaire, température, caractéristiques.

## Summary

In this note, the effect of heat on the characteristic properties of a solar cell was studied, and to find out the efficiency of the photovoltaic parameters, the structure of the perovskite cell ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$ ) was modified and various performance parameters such as  $J_{sc}$ , FF,  $V_{oc}$  and  $\eta$  were calculated. The simulation takes place in both dark and bright lighting conditions.

The results obtained through the study show that when the temperature increases, the efficiency of the photovoltaic parameters decreases and therefore the temperature negatively affects the photovoltaic parameters only.

**Keywords:** solar cell, temperature, characteristics.

## ملخص:

في هذه المذكرة، تمت دراسة تأثير الحرارة على الخصائص المميزة لخلية شمسية، وللتعرف على كفاءة المعلمات الكهروضوئية، تم تعديل بنية خلية البيروفسكايت ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$ ) وتم حساب معلمات الأداء المختلفة مثل  $J_{sc}$  و FF و  $V_{oc}$  و  $\eta$  تجري المحاكاة في ظروف الإضاءة المظلمة والمشرقة.

النتائج المتحصل عليها من خلال الدراسة تبين أنه عندما تزداد درجة الحرارة، تنخفض كفاءة المعلمات الكهروضوئية وبالتالي فإن درجة الحرارة تؤثر سلباً على المعلمات الضوئية فقط.

**الكلمات المفتاحية:** الخلية الشمسية، درجة الحرارة، الخصائص المميزة.