



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: Génie Mécanique**

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

**Spécialité: Electromécanique**

**Thème**

**Simulation de l'effet de la température et l'épaisseur  
sur les cellules à pérovskite : cas du MAGel3**

**Devant le jury composé de:**

**Dr. MILOUDI Khaled**      **Président**  
**Dr. LABIOD Chouaib**    **Examineur**  
**Dr. MOHREM Abdelkrim** **Examineur**  
**Dr. LARGOT Soulef**     **Encadreur**  
**Dr. HIMA Abdelkader**   **Co – encadrer**

**Par :**

- **HAMDI Bachir**  
- **MESSAI AOUN Fares**  
- **SOUFI Hicham**  
- **NEDJIMA Soufiane**

**2021-2022**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

۱۴۳۸



# *Dédicace*

*Miséricordieux et bienveillant Allah Tout-Puissant Louange au nom de Dieu.*

*Je dédie cet humble travail à :*

*Pour mes chers parents, ma chère mère, mon cher père, sans eux, je n'aurais pas atteint ce niveau de recherche..*

*tous mes frères.*

*toutes mes sœurs.*

*A mon encadreur MrsLargot . S et Hima.A et tous les enseignants UHL –*

*EL-OUED*

*Et à toutes personnes que j'ai connus et j'ai aimé.*

# *Remerciement*

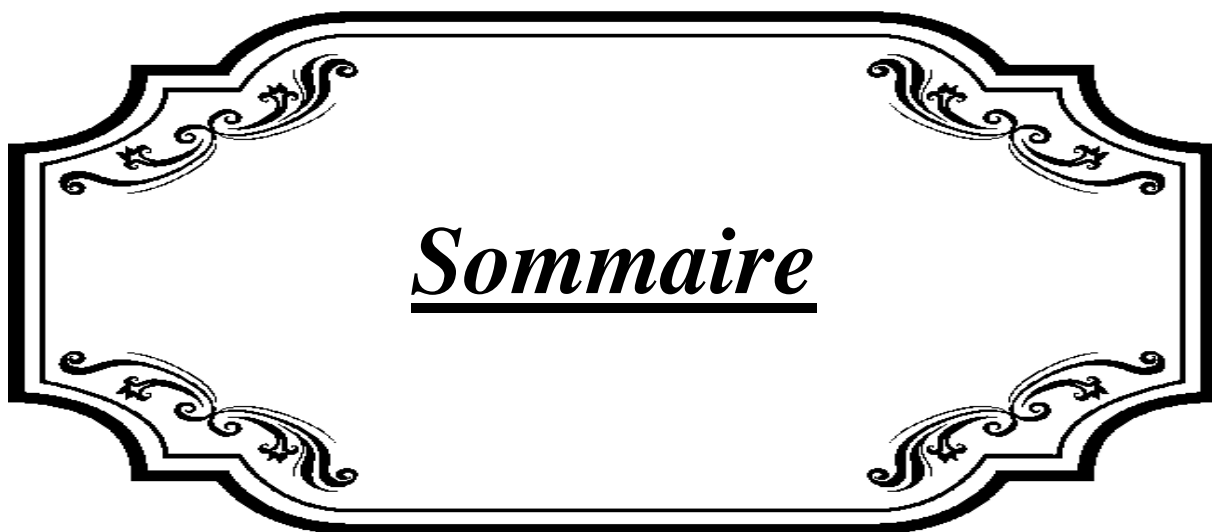
*Tout d'abord, nous tenons à remercier ALLAH Almighty pour nous avoir donné les moyens et la patience nécessaires pour mener à bien notre travail.*

*Remercie ma patronne, Mrs Largot. Mr Hima.A, nous le remercions pour la qualité de son encadrement extraordinaire, sa patience, sa rigueur et sa disponibilité dans la préparation de cet article..*

*Nous tenons également à remercier tous les juges pour l'intérêt qu'ils portent à notre travail.*

*Nous tenons également à remercier tout le personnel d'encadrement des enseignants de l'UHL et les enseignants en formation. Le personnel de la bibliothèque nous a beaucoup rassurés. Enfin, nos pensées à tous ceux qui nous ont aidés dans la réalisation de cet humble travail.*

*Merci beaucoup*

A decorative frame with ornate scrollwork at the corners, enclosing the title. The frame consists of a double-line border with intricate, symmetrical scrollwork designs in each of the four corners.

*Sommaire*

## Sommaire

	<b>page</b>
Dédicace	
Remerciements	
Sommaire	<b>V</b>
Listes des symboles et abréviations	<b>X</b>
Introduction générale	<b>01</b>
<b>Chapitre I: Les Semi-Conducteurs</b>	
I.1 Introduction	<b>3</b>
I.2 Définition de semi-conducteur	<b>3</b>
I.3 Classification des matériaux	<b>4</b>
I.3.1 Les isolants	<b>4</b>
I.3.2 Les semi-conducteurs	<b>5</b>
I.3.3 Les Conducteurs	<b>5</b>
I.4 Différent types de semi-conducteurs	<b>6</b>
I.4.1 Semi-conducteurs intrinsèque	<b>6</b>
I.4.2 Semi-conducteur extrinsèque (dopés N et P)	<b>6</b>
I.4.2.a Type N	<b>7</b>
I.4.2.b Type P	<b>7</b>
I.5 Les composés Semi-conducteurs	<b>8</b>
I.5.1 Les composés Semi-conducteurs III-V	<b>8</b>
I.5.2 Les composés Semi-conducteurs II-VI	<b>8</b>
I.5.3 Les composés Semi-conducteurs IV-VI	<b>9</b>
I.6 Les propriétés électrique des semi conducteurs	<b>10</b>
I.6.1 Conductivité électrique	<b>10</b>
I.7 Interaction rayonnement - semi conducteur	<b>12</b>
I.7.1 Absorption fondamentale	<b>12</b>
I.7.2 Emission spontanée	<b>12</b>
I.7.3 Emission stimulée	<b>13</b>
I.8 La jonction PN	<b>13</b>
I.8.1 Polarisation de la jonction en direct	<b>15</b>
I.8.2 Polarisation de la jonction en inverse	<b>16</b>
I.9 Conclusion	<b>17</b>
<b>Chapitre II: Les Cellules Solaires</b>	
II.1 Introduction	<b>19</b>
II.2 Energie solaire	<b>19</b>
II.2.1 Spectre solaire	<b>19</b>
II.2.2 Types des rayonnements solaires	<b>21</b>
II.3 Energie photovoltaïque	<b>21</b>
II.3.1 Histoire et motivation	<b>21</b>

II.3.2 Cellule photovoltaïque	23
II.3.3 Le Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	24
II.4 Les type des cellules	26
II.4.1 Cellule solaire à colorant	27
II.4.2 Cellule solaire organique	27
II.4.3 Cellule solaire pérovskite	28
II.4.4 Cellule solaire polymère	28
II.4.5 Cellule solaire à points quantiques	29
II.4.6 Cellule solaire à nano-fils	29
II.5 caractéristiques électriques et schéma équivalent de la cellule solaire	30
II.6 Les paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire	31
II.6.1 La densité du courant de court-circuit $J_{sc}$	32
II.6.2 La tension en circuit ouvert $V_{oc}$	32
II.6.3 Le facteur de forme FF	33
II.6.4 Le rendement de conversion $\eta$	34
II.6.5 Le rendement quantique QE	34
II.7 Les avantages et les inconvénients d'une cellule photovoltaïque	34
II.7.1 Avantages	34
II.7.2 Inconvénients	35
II.8 Conclusion	35
<b>Chapitre III: Les matériaux pérovskites</b>	
III.1 Introduction	37
III.2 Présentation des pérovskites	37
III.3 Présentation des oxydes des Pérovskites simples	38
III.3.1 La structure cristalline des matériaux pérovskites	38
III.3.2 Type de structure Perovskites	39
III.3.3 Critères de stabilité d'une structure perovskites	40
III.3.3.a Facteur de tolérance "Facteur de Goldschmidt"	40
III.3.3.b Ionicité des liaisons	41
III.4 Pérovskites hybrides	41
III.5 Applications des matériaux pérovskites	43
III.5.1 Ferroélectricité	43
III.5.2 Diode électroluminescente (LED)	44
III.5.3 Cellules solaires	45
III.5.3.a Pérovskites en cellules solaires	45
III.5.3.b Architectures des cellules à base des pérovskites	45
III.5.3.c Principe de fonctionnement de la cellule solaire à base de pérovskite	47
III.6 Conclusion	48
<b>Chapitre IV: Etude du logiciel de simulation SCAPS</b>	
IV.1 Introduction	51

IV.2 Presentation de simulateur scaps	51
IV.3 Notions de base	52
IV.3.1 Lancer SCAPS	54
IV.3.2 Définir le problème	54
IV.3.3 Définir le point de fonctionnement	54
IV.3.4 Sélection des caractéristiques à simuler	55
IV.3.5 Lancer le calcul	56
IV.3.6 Afficher les courbes simulées	56
IV.3.7 Les courbes I-V	57
IV.4 Définition d'une cellule solaire	58
IV.4.1 Edition de la structure d'une cellule solaire	58
IV.4.2 Contacts	59
IV.4.3 Définition des couches	60
IV.5 Conclusion	62
<b>Chapitre V: Simulations de MAgEi3 , Résultats et discussion</b>	
V.1 Introduction	64
V.2 Structure et paramètres de la cellule étudiée	64
V.2.1 Présentation de la cellule étudiée	64
V.2.2 Les paramètre du dispositif étudié	65
V.3. Alignement des bandes enegitiques	67
V.4. Simulation par SCAPS	67
V.4.1 Effet de l'épaisseur de couche PEDOT/PSS, CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> GeI <sub>3</sub> et PCBM sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire	67
V.4.2 Effet de température sur la couche CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> GeI <sub>3</sub> les caractéristiques électriques de la cellule	71
V.4.3 Courbe du paramètres photovoltaïques	71
V.4.3.a Le courant de court circuit	71
V.4.3.b La tension de circuit ouvert (V <sub>co</sub> )	72
V.4.3.c Le facteur de forme (FF )	73
V.4.3.e Le rendement $\eta$ (eta (%))	74
V.4.4. Courbe courant-tension	74
V.5 Conclusion	75
Conclusion générale	75
Références	80
Résumé	87

## Liste de figure

	<b>Page</b>
<b>Chapitre I: Les Semi-Conducteurs</b>	
Figure I-1 : Matériaux semiconducteurs (a) silicone [5] (b) GaAs tranche [6]	<b>4</b>
Figure I-2 : Diagramme des bandes d'énergie des conducteurs, des isolants et des semi-conducteurs	<b>6</b>
Figure I-3 : Schéma de principe de la substitution des atomes de phosphore par des atomes de silicium (exemple de dopage N) [9].	<b>7</b>
Figure I-4 : Schéma de principe de la substitution des atomes de bore par des atomes de silicium (exemple de dopage P) [9].	<b>8</b>
Figure I-5 : Le tableau périodique des éléments.	<b>9</b>
Figure I-6 : Conductivité électrique de quelques solides à température ambiante.	<b>10</b>
Figure I-7 : Conductivité du semi-conducteur (défauts) en fonction de la température et de la concentration en impuretés : (a) faibles impuretés, (b) normalement, (c) fortes impuretés. [10]	<b>11</b>
Figure I-8 : Interaction rayonnement - semi conducteur [11] [12]	<b>13</b>
Figure I-9 : Jonction PN	<b>14</b>
Figure I-10 : Représentation des transitions PN en équilibre thermodynamique [13]	<b>14</b>
Figure I-11 : Transition de polarisation directe. [14]	<b>16</b>
Figure I-12 : Jonction polarisée dans un sens inverse [15] [16]	<b>17</b>
<b>Chapitre II: Les Cellules Solaires</b>	
Figure II.1 : Répartition spectrale du rayonnement solaire [3]	<b>19</b>
Figure II-2 : Conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.	<b>23</b>
Figure II-3 : Jonction n/p éclairée, cellule photovoltaïque	<b>23</b>
Figure II-4 : Principes fonctionnels des cellules solaires [8]	<b>25</b>
Figure II-5 : Différentes générations des cellules solaires [12].	<b>26</b>
Figure II-6 : Identification et schéma de circuit équivalent des cellules solaires photovoltaïques	<b>30</b>
Figure II-7 : Caractéristiques densité de courant-tension des cellules dans l'obscurité et sous éclairage.	<b>31</b>
<b>Chapitre III: Les matériaux perovskites</b>	
Figure III-1 : Perovskite de titanate de calcium (CaTiO <sub>3</sub> ).	<b>37</b>
Figure III-2 : Structure cristalline de la pérovskite CaTiO <sub>3</sub> .	<b>38</b>
Figure III-3 : Cellule unitaire de la structure pérovskite de type ABO <sub>3</sub> .	<b>39</b>
Figure III-4 : (a) Structure cristalline de CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbX <sub>3</sub> (X : I, Br, Cl), le cation organique CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> <sup>+</sup> est entouré de PbX <sub>6</sub> octaèdre 2. (B) Image optique d'un monocristal millimétrique de CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub> [14].	<b>42</b>
Figure III-5 : (a) Structure de dispositif typique pour les LED à pérovskite p-i-n. (B) Injection et transport de porteurs de charge dans des LED à pérovskite p-i-n. HTL, couche de transport de trous ; EML, couche d'émetteur ; ETL, couche de transport d'électrons.	<b>44</b>
Figure III-6 : Les architectures les plus couramment utilisées pour les cellules solaires à base de pérovskite : (a) mésoporeuses, (b) couches de protection, (c) espaces plans et (d) mâchoires planes.	<b>46</b>
Figure III-7 : Schéma des processus de transfert et de recombinaison d'électrons dans une cellule solaire à base de pérovskite.	<b>48</b>
<b>Chapitre IV: Etude du logiciel de simulation SCAPS</b>	
Figure IV-1 : panneau de démarrage SCAPS, action ou panneau principal.	<b>53</b>

Figure IV-2 : Définition du problème.	<b>54</b>
Figure IV-3 : Points de travail	<b>55</b>
Figure IV-4 : Panneau de bande d'énergie.	<b>56</b>
Figure IV-5 : Panneau d'affichage de forme d'onde IV sombre et éclairé	<b>57</b>
Figure IV-6 Définition de la structure d'une cellule solaire.	<b>58</b>
Figure IV-7 : Panneau Propriétés du contact.	<b>59</b>
Figure IV-8 : Propriétés de la couche ajoutée	<b>61</b>
Figure IV-9 : Propriétés de dopage définies	<b>61</b>
Figure IV-10 : Modèle d'absorption	<b>61</b>
Figure IV-11 : Définition des types de recombinaison présents	<b>62</b>
<b>Chapitre V: Simulations de MAgE13 , Résultats et discussion</b>	
Figure V-1 : Vue simplifiée des cellules solaires utilisées	<b>65</b>
Figure V-2 : Alignement des bandes d'énergie de divers matériaux	<b>67</b>
Figure V-3 : Modifications des paramètres photovoltaïques ( $V_{oc}$ , $J_{sc}$ , FF, $\eta$ ) dues aux changements de température	<b>70</b>
Figure V-4 : Génération de courant de court-circuit ( $I_{cc} \approx I_{ph}$ ) en fonction de la température	<b>72</b>
Figure V-5 : Tension en circuit ouvert $V_{co}$ d'une cellule solaire en polysilicium en fonction de la température	<b>73</b>
Figure V-6 : Changement de FF lorsque la température de la cellule solaire est dans la plage de 250 350 K	<b>73</b>
Figure V-7 : Dépendance à la température de l'efficacité de conversion PV $\eta$ de la cellule solaire	<b>74</b>
Figure V-8 : Courbe I-V simulée.	<b>75</b>

## Liste de tableau

	<b>Page</b>
<b>Chapitre III: Les matériaux perovskites</b>	
Tableau III-1 : Évolution structure cristalline par valeur du facteur de tolérance t.	<b>41</b>
<b>Chapitre V: Simulations de MAgE13 , Résultats et discussion</b>	
Tableau V-1 : Propriétés des différentes couches (PEDOT: PSS/CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> SnGeI <sub>3</sub> /PCBM).	<b>65</b>
Tableau V-2 : épaisseur chaque couche de cellule base étudiée.	<b>66</b>
Tableau V-3 : Propriété de couche(PEDOT: PSS)	<b>68</b>
Tableau V-4 : Propriété de couche(CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> GeI <sub>3</sub> )	<b>68</b>
Tableau V-5 : Propriété de couche(PCBM)	<b>69</b>
Tableau V-6 : Different calculated parameters for studied perovskite solarcell	<b>71</b>

## Listes des symboles et abréviations

<b>Jsc</b>	Densité court-circuit actuelle
<b>Eg</b>	Energie gap
$\chi$	Affinité électronique
<b>Nc</b>	Densité des donneurs de surface
<b>Nv</b>	Densité d'accepteur de surface
$\epsilon_r$	Permittivité relative du matériau
$\mu_n$	Mobilité des électrons ou des trous
$\mu_h$	Mobilité trou
<b>NA,ND</b>	Concentration de l'atome accepteur ou de l'atome du cycle
<b>FF</b>	Facteur de forme
<b>PCE</b>	Power conversion efficiency
<b>ETL</b>	Matériau de transport d'électrons
<b>HTL</b>	Matériel de transport de trou
<b>MAGeI<sub>3</sub></b>	Méthylammonium Germanium
<b>PCBM</b>	Phenyl-C61-Butyric-Acid-Methyl-Ester
<b>PEDOT:PSS</b>	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate
<b>C</b>	la vitesse de la lumière.
$\lambda$	la longueur d'onde.
<b>T</b>	La température absolue
<b>Icc</b>	Courant de court-circuit
<b>Vco</b>	Tension de circuit ouvert
<b>Pm</b>	Puissance maximale
<b>Im</b>	Curant du point du fonctionnement
<b>Vm</b>	Tension du point du fonctionnement
<b>HTM</b>	Mémoire temporelle hiérarchique
<b>I (V)</b>	La caractéristique courant- tension de la photopile
<b>I</b>	Le courant électrique
<b>V</b>	La tension électrique



*Introduction générale*

## **Introduction générale**

L'énergie renouvelable est une ressource naturelle durable pour l'humanité. Les cellules solaires à Silicium atteignent leurs limite théorique de rendement (vers les 15%). Il y a une nécessité de trouver de nouveaux matériaux et techniques pour atteindre des rendements plus importants tout en gardant un prix de fabrication le plus bas que possible. A cet égard, en 2006 Kojima et al. On construit la première cellule solaire à pérovskite avec 2.2 % de rendement. Une décade après, le rendement des cellules solaires à base de pérovskite a dépassé les 20%.

Notre travail est axé sur l'étude des effets d'une action particulière de température sur l'un des cellules à pérovskites le  $\text{MAGeI}_3$ . Ce matériau pérovskite a la spécificité d'être amical à la nature, il n'est plus polluant et il donne des résultats encourageants.

Ce mémoire est organisé comme suit:

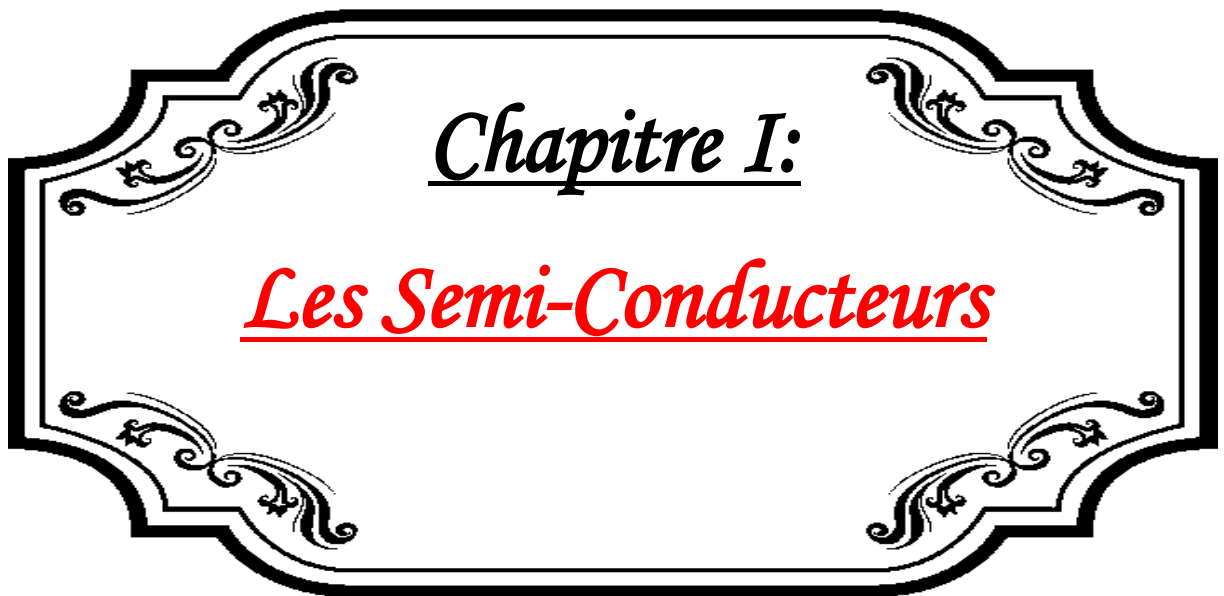
Le premier chapitre donne un aperçu des semi-conducteurs, de leurs matériaux et de leurs propriétés électriques.

Dans le deuxième chapitre, nous introduisons les cellules solaires, le principe de fonctionnement et leurs types, caractéristiques et schémas équivalents, et les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire, ainsi que les avantages et les inconvénients des cellules photovoltaïques.

Dans le troisième chapitre, Les matériaux pérovskites et leur types, et alors les applications des matériaux pérovskites.

Dans le quatrième chapitre, nous décrivons le logiciel que nous avons utilisé dans notre étude de simulation.

Dans le cinquième chapitre, des discussions et des interprétations des résultats obtenus.



Chapitre I:  
Les Semi-Conducteurs

## **I.1 Introduction:**

L'étude des matériaux semi-conducteurs a débuté au début du XIXe siècle. Au fil des ans, de nombreux types de semi-conducteurs ont été étudiés. Parmi les éléments les plus courants dans le monde, on retrouve le silicium et le germanium (Si,Ge) dans la colonne IV du tableau périodique. Ces deux semi-conducteurs sont constitués des mêmes atomes, mais d'autres types de semi-conducteurs, comme l'arséniure de gallium GaAs (III-V), sont constitués d'éléments différents: Ga (III) et As (V). La composition des semi-conducteurs peut donner accès à des propriétés électriques et optiques que les semi-conducteurs purs n'ont pas. Le germanium est le in addition to utilisé ; et découvert standard le academic allemand Clemens Winkler le 6 février 1886. Cependant, le germanium n'est pas un substrat approprié pour les applications à faible courant ou dans les environnements à haute température; il a servi de matériau semi-conducteur jusqu'à ce que le silicium le remplace vers les années 1970. En 1824, J. J. découvre le silicium. Berzelius à Stockholm, en Suède, il domine les semi-conducteurs, est moins coûteux, permet des applications à faible consommation, est largement utilisé depuis 1960. [1]

## **I.2 Définition de semi-conducteur**

La recherche de matériaux semi-conducteurs a commencé au début du 19ème siècle. De nombreuses parties de celui-ci ont été étudiées au fil des ans. Il existe deux types de connexion - connexion électronique et connexion par trou.[2]

Les matériaux peuvent être classés en trois catégories en fonction de leurs propriétés électriques : conducteurs, isolants et mixtes. Lorsque les matériaux ont des propriétés électriques différentes, ils sont classés dans ces catégories. Résistance – dans les semi-conducteurs varie entre  $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$  et  $10^{-4} \text{ cm}$ , cela distingue les matériaux les uns des autres, dans les diélectriques sa valeur est supérieure à  $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$  et dans les conducteurs il est inférieur de  $10^{-5} \text{ cm}$  Un

semi-conducteur est un cristal diélectrique s'il n'est constitué que d'éléments purs. Et au zéro absolu, dont la conductivité électrique est due à des fluctuations thermiques, des impuretés ou divers types de défauts.

Ce sont des corps dont la conductivité électrique se situe entre celle des métaux et celle des diélectriques. [3] La plage de variation pour une propriété donnée, telle que la couleur, peut être assez large en fonction de la température ou des conditions d'éclairage. Un autre facteur qui peut grandement affecter la conductivité d'un matériau est la présence d'impuretés [4]

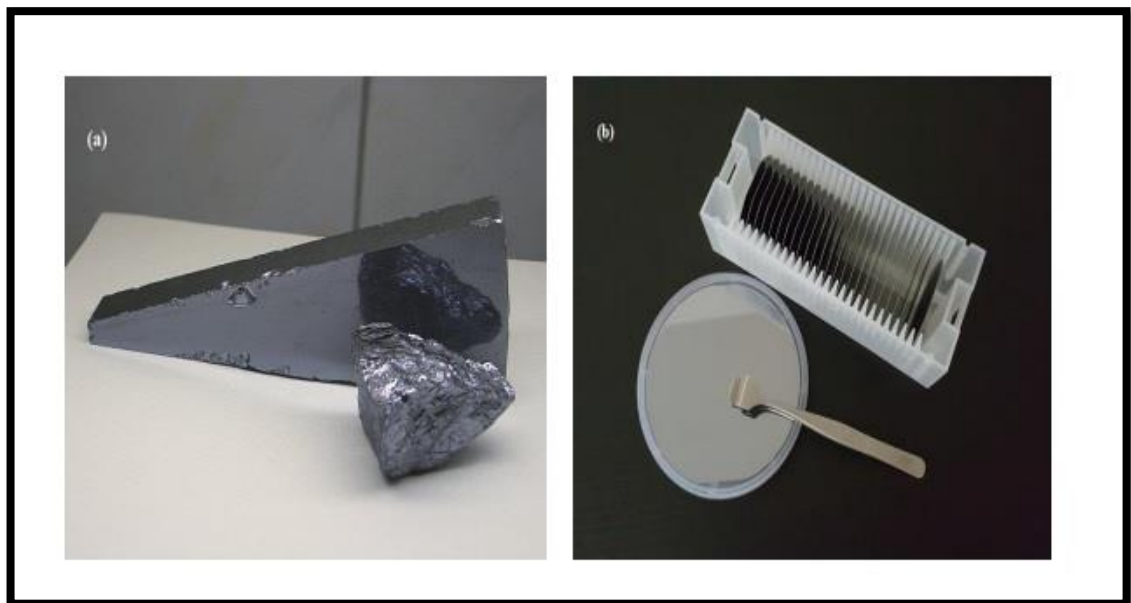


Figure I-1 : Matériaux semi-conducteurs (a) silicone [5]

(b) GaAs tranche [6]

### I.3 Classification des matériaux

Il existe trois grands types de matériaux : les isolants, les semi-conducteurs et les métaux.

#### I.3.1 Les isolants :

Ce sont des matériaux dont la bande de conduction supérieure est complètement remplie et la bande interdite est bien supérieure à l'énergie d'excitation thermique  $kT = 0,026 \text{ eV}$ . Puisqu'il n'y a pas d'état excité libre à

basse énergie, les électrons ne peuvent pas être accélérés par un champ électrique externe, Figure I-2b.

### **I.3.2 Les semi-conducteurs :**

Le rôle d'un entrepreneur en isolation est d'aider à relier la charpente métallique d'un bâtiment à l'isolant. A  $T = 0$  K À température ambiante, il agit comme un isolant, mais lorsque la température augmente, il commence à conduire l'électricité. Les métaux ont une conductivité plus élevée à des températures plus élevées qu'à des températures plus basses. La structure de bande du matériau est similaire à celle des isolants, avec une zone restreinte séparant la bande de valence de la bande de conduction ; mais la largeur de la bande est plus petite. (Par exemple 1.12 pour le silicium), figure I-2 2. A  $T = 0$  K, La plage de parité est la plage occupée la plus élevée autorisée. Cela signifie que le nombre de disques dans cette plage est égal. La plage la plus basse de robinets vides est la plage qui est vide À  $T = 0$ .. Avec l'augmentation de la température, l'énergie induite thermiquement excite de nombreux électrons de la bande de valence à la bande de conduction ; comme celle-ci n'est pas entièrement remplie, il y a conduction si un champ électrique est appliqué. Des trous s'ajoutent à cette conduction de puissance, qui sont des lacunes laissées par les électrons dans la gamme de valence. Pour les semi-conducteurs, la conductivité est plus grande car là où la température est plus élevée, il y a plus d'électrons dans la bande de conduction.

### **I.3.3 Les Conducteurs :**

Sont les corps qui n'ont pas de bande interdite, dont la bande supérieure est partiellement remplie. (Li ; Na ; K ; Rb ; Cs....). Les bandes de valence et de conduction sont continues. Par conséquent, à n'importe quelle température, il y a des électrons libres dans la bande de conduction. Le champ électrique peut alors déplacer les électrons, ce qui explique la conductivité élevée de ces électrons, Figure I- 2a. [1]

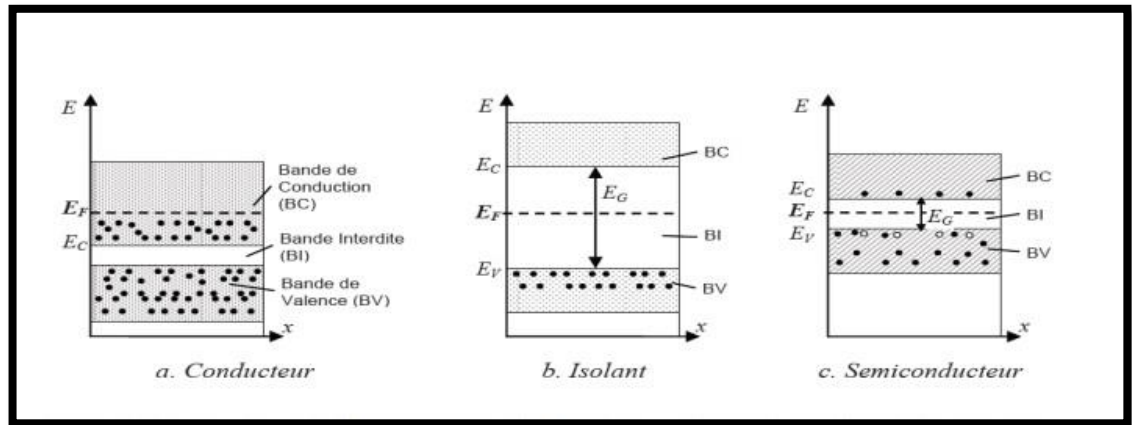


Figure I-2 : Diagramme des bandes d'énergie des conducteurs, des isolants et des semi-conducteurs

## I.4 Différent types de semi-conducteurs

Dans les matériaux Semi-conducteurs, deux types différents peuvent être distingués, le premier étant la désignation intrinsèque du semi-conducteur et le second étant le semi-conducteur extrinsèque (dopé N et P).

### I.4.1 Semi-conducteurs intrinsèque :

Il a l'avantage d'être un semi-conducteur très pur et bien cristallisé (donnant un réseau périodique parfait) et d'avoir une très faible teneur en impuretés (moins d'un atome pour 10<sup>13</sup> atomes d'un semi-conducteur élémentaire). Ils se comportent comme des isolants à très basse température et leur conductivité électrique augmentent avec l'augmentation de la température. [7].

Le semi-conducteur intrinsèque non dopé, dépourvu de toute impureté, n'est dit que les semi-conducteurs sont parfaits et que le nombre d'électrons est égal au nombre de trous dans  $T \neq 0$ .

### I.4.2 Semi-conducteur extrinsèque (dopés N et P) :

Les semi-conducteurs à impuretés sont des semi-conducteurs intrinsèques dopés avec certaines impuretés et maintiennent le niveau de pureté initial nettement supérieur au taux de dopage. [8]

### I.4.2.a Type N :

Par exemple, un élément avec quatre électrons de valence tels que Si et Ge est un semi-conducteur quadripolaire. Lorsqu'il se lie à un atome pentavalent comme le phosphore, le cinquième électron restera isolé dans ce cas il est classé de type n et ce dernier rend le semi-conducteur riche en électrons.

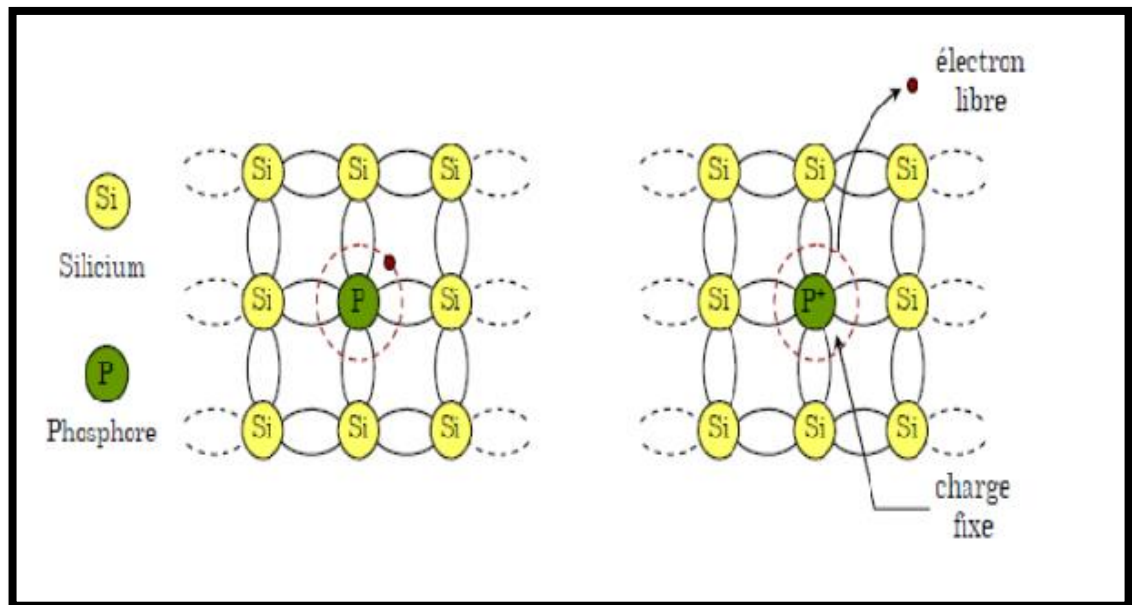


Figure I-3 : Schéma de principe de la substitution des atomes de phosphore par des atomes de silicium (exemple de dopage N) [9]

### I.4.2.b Type P :

Dans ce cas, les atomes trivalents à trois électrons ne peuvent créer que trois liaisons comme Al et B sont classés dans le type p, et ce type augmente la proportion de trous dans le semi-conducteur.

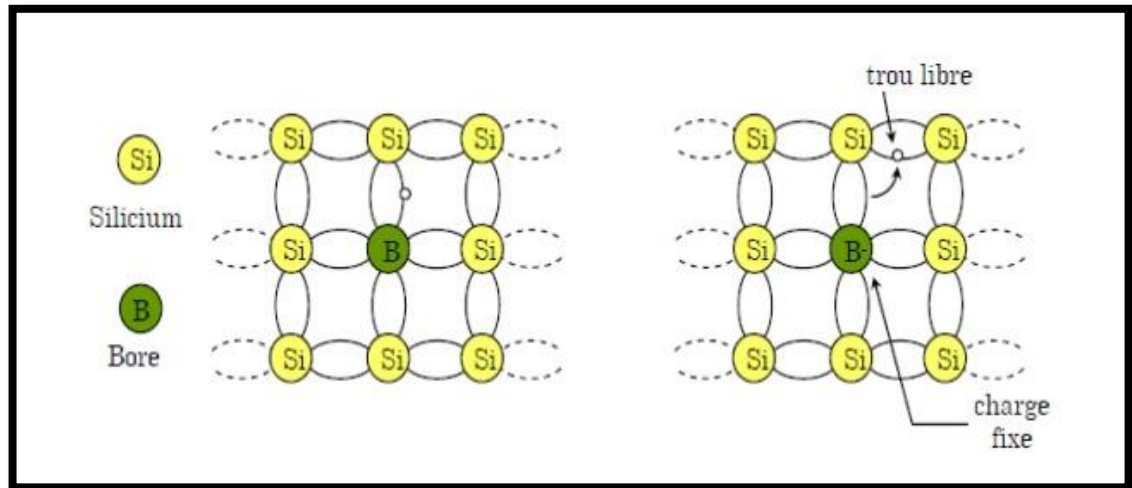


Figure I-4 : Schéma de principe de la substitution des atomes de bore par des atomes de silicium (exemple de dopage P) [9].

## I.5 Les composés Semi-conducteurs

Dans ce travail, nous avons étudié les semi-conducteurs du type III-V, Il existe d'autres types comme II-VI et IV-VI, Mais dans notre travail nous sommes intéressés à étudier le premier type, Ces matériaux sont constitués de Ce sont les deux éléments du tableau périodique des éléments.

### I.5.1 Les composés Semi-conducteurs III-V:

Le symbole III signifie la troisième colonne, qui représente les élément suivant : Bor (B), Aluminum (Al), Gallium (Ga), Indium (In), Thallium (Tl), Nihonium (Nh) dans le tableau périodique des éléments. Le symbole V signifie la cinquième colonne, qui représente les éléments suivant , Azot (N), Phosphore (P), Arsenic (As), Antimoine (Sb), Bismuth (Bi), Moscovium (Mc), la famille des semi-conducteurs III-V est AlP, AlAs, AlSb, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs et InSb.

### I.5.2 Les composés Semi-conducteurs II-VI :

Le symbole II signifie la seconde colonne, qui représente les éléments suivants : Zinc (Zn), Cadmium (Cd), Mercure (Hg), Copernicium (Cn), dans le

tableau périodique des éléments. Le symbole VI signifie la Sixième colonne, qui représente les éléments suivants : Oxygène (O), Soufre(S), sélénium (Se), Tellure (Te), Polonium (Po), Livermorium (Lv), la famille des semiconducteurs II-VI est CdS, CdSe, CdTe, HgS, HgTe, ZnO, ZnS, ZnSe et ZnTe.

### I.5.3 Les composés Semi-conducteurs IV-VI :

Le symbole IV signifie la Quatrième colonne, qui représente les éléments suivants: Carbone (C), Silicium (Si), Germanium (Ge), Étain (Sn), Plomb (Pb), Flérovium (Fl) dans le tableau périodique des éléments. Le symbole VI signifie la Sixième colonne, qui représente les éléments suivants : Azot (N), Phosphore (P), Arsenic (As), Antimoine (Sb), Bismuth (Bi), Moscovium (Mc), la famille des semiconducteurs IV-IV est PbSe, GaSe, PbS, PbTe, SnS, SnTe.

Le tableau périodique des éléments est présenté avec des colonnes colorées et un cadre noir autour des colonnes III, IV, V, VI, VII et VIII. Les colonnes sont étiquetées I à VIII. Les éléments sont classés par groupes et périodes. Les éléments dans le cadre noir sont : B, C, N, O, F, Ne (période 2); Al, Si, P, S, Cl, Ar (période 3); Ga, Ge, As, Se, Br, Kr (période 4); In, Sn, Sb, Te, I, Xe (période 5); Tl, Pb, Bi, Po, At, Rn (période 6). Les éléments des périodes 7 et 8 sont également visibles.

Figure I-5 : Le tableau périodique des éléments.

Figure I-6 montre positionnement matériaux Semi-conducteurs III-V et II-VI et IV-VI dans le tableau périodique des éléments, le cadre noir montre uniquement les éléments que nous allons étudier dans ce travail.

## I.6 Les propriétés électrique des semi conducteurs

### I.6.1 Conductivité électrique :

Nous avons mentionné précédemment que les semi-conducteurs sont matériau dont la conductivité se situe entre un isolant et un conducteur. Parmi eux, la conductivité est assurée par deux types de porteurs de charge, les électrons et les trous. La conductivité électrique d'un semi-conducteur augmente rapidement avec la température selon l'équation suivante:

Selon des formes courantes, la conductivité électrique dépend également de la température, du rayonnement électromagnétique, des champs magnétiques, et de toutes les formes d'irradiation et d'imperfections. Ce sont ces différences de conductivité électrique sous l'influence de diverses influences qui font des semi-conducteurs un matériau important pour l'électronique et ses applications.

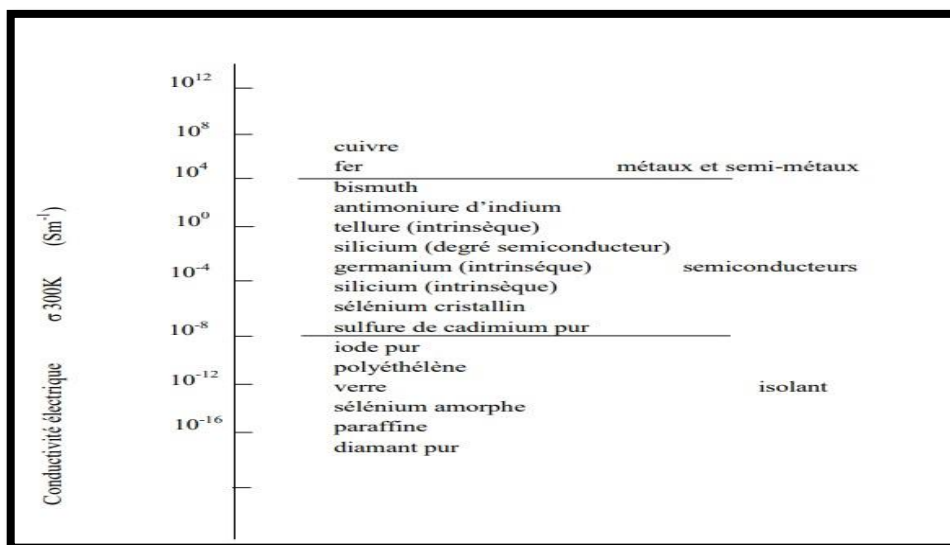


Figure I-6 : Conductivité électrique de quelques solides à température ambiante.

Les semi-conducteurs sont polaires dans le sens où ils sont diélectriques. Par conséquent, lorsqu'il est placé dans un champ électrique, l'échantillon semi-conducteur devient le lieu d'un champ électrique interne où la permittivité est la grandeur macroscopique dominante. Par conséquent, il est possible de définir un matériau semi-conducteur comme un solide polaire conducteur. La conductivité

électrique d'un matériau n'est pas suffisante pour définir précisément l'état d'un semi-conducteur. Certains semi-conducteurs sont de meilleurs conducteurs que certains métaux, tandis que d'autres sont de meilleurs isolants que certains non-métaux. D'autre part, dans tous les semi-conducteurs, une grandeur physique spécifique suit une loi caractéristique bien définie. Ces comportements typiques permettent d'établir une définition phénoménologique de la classe des matériaux semi-conducteurs.

**- Effet de la température sur la conduction électrique :**

L'évolution de la résistivité électrique en fonction de la température suit sans doute une loi inhérente aux semi-conducteurs. La conductivité des semi-conducteurs augmente avec l'augmentation de la température. Selon la gamme de température considérée et l'état de pureté du matériau, un électronvolt (eV) est encore augmenté selon les règles d'exposant qui précisent l'énergie d'activation pouvant être atteinte. Cela active thermiquement le processus de conduction. La différence typique de résistivité électrique en fonction de la température est représentée par une courbe B de la figure I-8

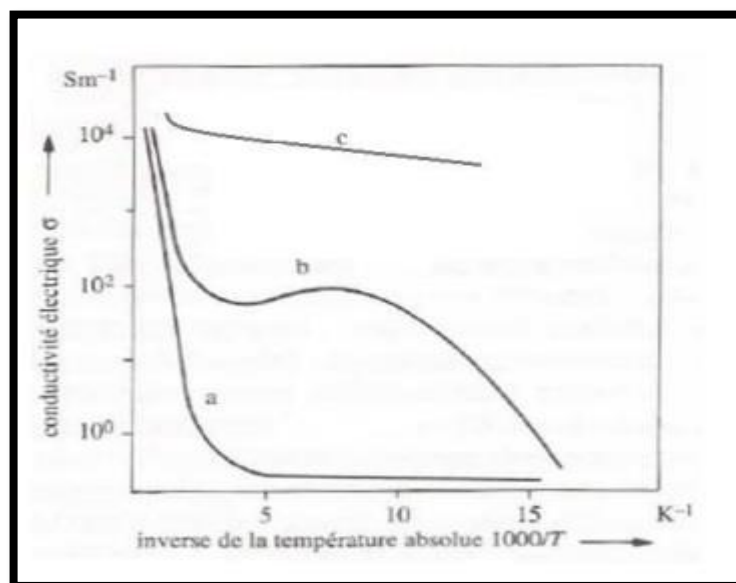


Figure I-7 : Conductivité du semi-conducteur (défauts) en fonction de la température et de la concentration en impuretés : (a) faibles impuretés, (b) normalement, (c) fortes impuretés. [10]

A basse température, une variation de la forme :

$$\sigma \sim \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (\text{I.1})$$

Il contient une énergie d'activation E de l'ordre de quelques dixièmes d'électronvolt. Dans cette équation, T est la température absolue et k est la constante de Boltzmann. A haute température, la même règle est suivie, mais l'énergie d'activation est plus élevée. A l'intervalle de température entre ces deux opérations typiques, on observe des zones saturées ou appauvries, avec des évolutions peu complexes de la conductivité en fonction de la température, pouvant atteindre des pics. La figure 18 décrit l'effet de la pureté d'un matériau semi-conducteur sur les changements de conductivité en fonction de la température. La courbe a correspond à un semi-conducteur très pur dit intrinsèque et maintient l'isolation à des températures relativement basses. La courbe c correspond à un semi-conducteur avec de nombreuses impuretés ou défauts. C'est un bon conducteur, communément appelé dégénéré, sans grande énergie d'activation.

## **I.7 Interaction rayonnement - semi conducteur**

L'interaction entre le rayonnement et les électrons dans un semi-conducteur est représentée par trois processus.

### **I.7.1 Absorption fondamentale :**

Lorsqu'un photon absorbé fait sauter un électron de l'état occupé de la bande de valence à l'état vide de la bande de conduction, on parle d'absorption.

### **I.7.2 Emission spontanée :**

L'émission spontanée se produit lorsque les électrons de la bande de conduction retombent spontanément à l'état vide de la bande de valence.

### I.7.3 Emission stimulée :

Les photons absorbés font passer les électrons de la bande de conduction à un état de bande de valence vide, émettant des photons et provoquant une recombinaison radiative des paires électron-trou. Le photon émis a la même phase et la même direction que le photon incident. Il faut stimuler la libération.

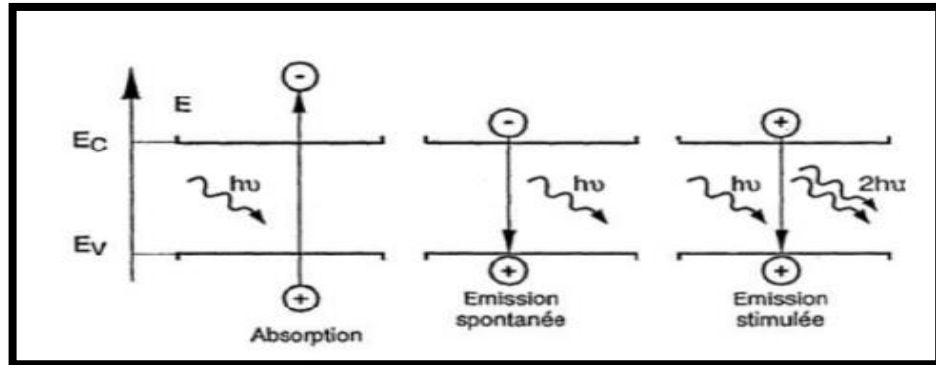


Figure I-8 : Interaction rayonnement - semi conducteur [11] [12]

### I.8 La jonction PN

La jonction PN est un élément fondamental de tous les appareils électroniques et constitue le module de base dont dépend le fonctionnement de nombreux dispositifs à semi-conducteurs. Les résultats obtenus seront utilisés dans des composants plus complexes. La jonction PN est constituée de deux zones dopées chacune en P et N, juxtaposées comme prévu pour être abruptes. En d'autres termes, le passage de la zone P à la zone N est rapide. Lorsque les deux régions sont assemblées, la différence de concentration entre les porteurs dans les régions P et N fait circuler le courant de diffusion qui tend à égaliser la concentration des porteurs d'une région à l'autre. Les trous dans la région P diffusent vers la région N, laissant des atomes ionisés qui forment une charge négative fixe. Il en va de même pour les électrons de la région N, qui diffusent dans la région P en laissant une charge positive. Des zones avec des charges fixes positives et négatives sont également affichées au niveau de la transition. Ces charges créent un champ électrique  $E$  qui annule la diffusion des porteurs de

charge, entraînant l'établissement d'un équilibre électrique.

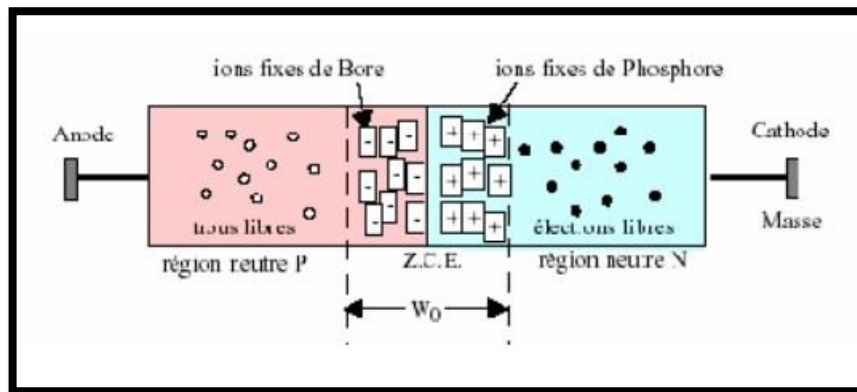


Figure I-9 : Jonction PN

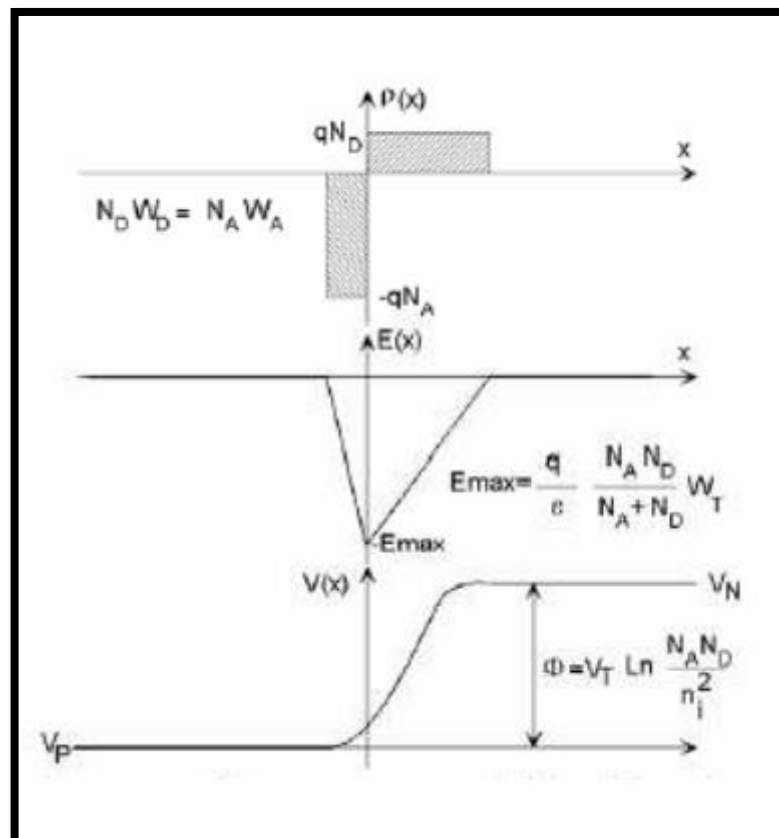


Figure I-10 : Représentation des transitions PN en équilibre thermodynamique [13]

Dans ces conditions, la distribution de la charge, du champ électrique et du potentiel est représentée. La zone dépeuplée par les opérateurs cellulaires est connue sous le nom de zone de charge d'espace (ZCE). L'épaisseur est d'environ  $0,5 \mu\text{m}$ . La forme générale de la densité de charge dépend essentiellement du

profil de dopage de la jonction. Dans le cas idéal représenté, la forme du champ électrique  $E(x)$  et le potentiel  $V(x)$  peuvent être facilement dérivés en appliquant l'équation électrostatique. En fait, le potentiel  $V(x)$  et le champ électrique  $E(x)$  en fonction de la densité de charge  $\rho(x)$  sont exprimés par la loi de Gauss et s'expriment par la relation suivante :

$$\frac{dE(x)}{dx} = \frac{1}{\epsilon} \rho(x) \quad (\text{I.2})$$

L'expression du champ électrique s'écrira :

$$E(x) = -\frac{dV(x)}{dx} \quad (\text{I.3})$$

De plus, la neutralité électrique globale du piquet impose la relation suivante :

D'après la relation  $N_a W_d = N_d W_n$  Boltzmann, on peut voir qu'il existe une barrière de potentiel qui représente le potentiel de diffusion de la jonction.

La largeur de la zone de transition est donnée par l'équation suivante :

$$W_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{si}}{q} \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) V_\phi} \quad (\text{I.4})$$

$$V_\phi = U_T \ln \left( \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad \text{Où } U_T = \frac{KT}{q} \quad (\text{I.5})$$

### I.8.1 Polarisation de la jonction en direct :

Lorsque le joint est polarisé en dessous de la tension  $V_{direct}$ , la hauteur de la barrière est réduite à  $(V_a - V_{direct})$  et l'épaisseur de Z.C.E est réduite (dans l'équation (W0),  $V_a$  est remplacé par  $V_a - V_{direct}$ ). Ensuite, de nombreux électrons de la région N et des trous de la région P franchissent cette barrière de potentiel et se retrouvent dans un "environnement hostile" (P pour les électrons, N pour les trous) et se recombinent (Fig. I12). Cette recombinaison est Z.C.E. Se

consomme à proximité. Trous dans la région P (électrons dans la région N). Pour rétablir l'équilibre, les trous de la région neutre P se déplacent vers la région où se produit la recombinaison (déficit de trous). Les électrons de la région neutre N provoquent le même phénomène. C'est ce phénomène de recombinaison locale qui explique la circulation du IA à la jonction.

Ce courant s'écrit:

$$I_0 \exp\left(-\frac{V_\phi - V_{direct}}{U_T}\right) \quad (I.6)$$

Le courant de saturation IS est Z.C.E. Je sais que cela correspond à un petit nombre de porteurs dans la zone N et la zone P à la fin de. Obtient le courant total traversant la jonction :

$$I_A = I_S \left[ \exp\left(\frac{V_{direct}}{U_T}\right) - 1 \right] \quad (I.7)$$

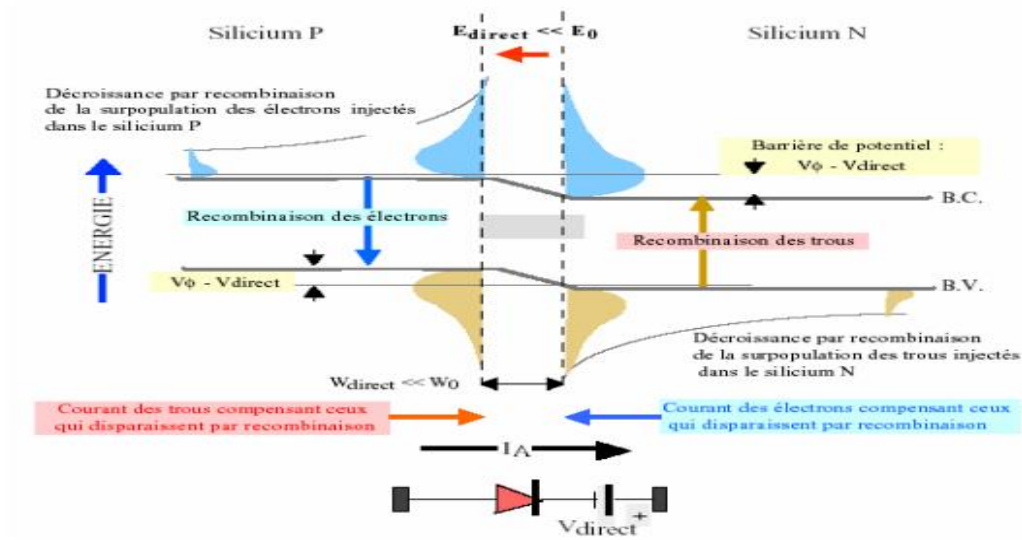


Figure I-11 : Transition de polarisation directe. [14]

### I.8.2 Polarisation de la jonction en inverse :

Lorsque la jonction est polarisée en inverse, la hauteur de la barrière de potentiel entre la région P et la région N est augmentée par la tension externe

appliquée à  $V\phi + V_{inv}$ , et le champ électrique dans la région de charge d'espace est augmenté. La majorité des porteurs dans les régions N et P n'ont pas l'énergie nécessaire pour lever cette barrière de potentiel. La transition coupe alors le très faible courant de saturation  $I_S$ . Ce courant dû au phénomène d'ionisation thermique du silicium ne dépend que de la température. La figure I-13 montre l'origine du courant inverse de saturation  $I_S$  pour cette transition.

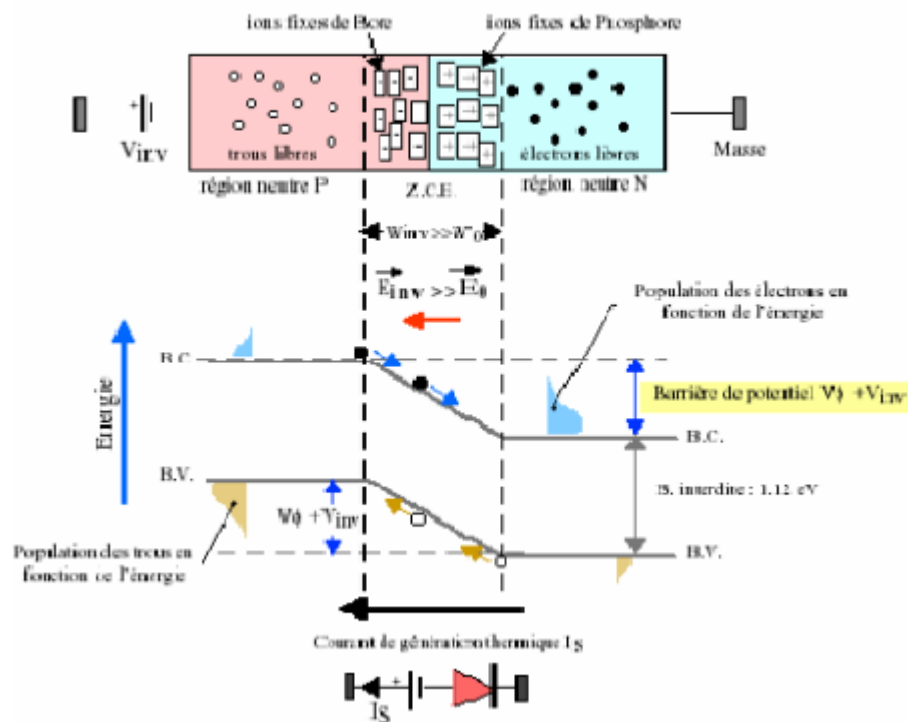


Figure I-12 : Jonction polarisée dans un sens inverse [15] [16]

## I.9 Conclusion

Les matériaux semi-conducteurs sont les plus couramment utilisés dans l'industrie électronique et à l'échelle nanométrique, car ils contrôlent l'économie du temps présentait cela en raison des propriétés qu'ils possèdent, de sorte que la recherche des meilleures propriétés, leur étude et leur développement sont devenues tout ce qui compte pour l'esprit. Les matériaux semi-conducteurs renferment de nombreuses propriétés telles que électroniques, optiques et diélectriques et le confinement quantique des électrons affecte.



Chapitre II:

Les Cellules Solaires

## II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons les notions de base des cellules solaires, leur principe de fonctionnement, généralités sur l'énergie photovoltaïque, le rayonnement solaire, les différents types des cellules solaires et les caractéristiques et les paramètres des cellules photovoltaïques.

## II.2 Energie solaire

### II.2.1 Spectre solaire :

Le soleil est l'étoile la plus proche de la terre ; 150 millions km, le soleil est principalement composé de gaz (composé de 70 % d'hydrogène et de 28 % d'hélium), et sa fusion continue de générer une quantité d'énergie étonnante. La fusion nucléaire des atomes d'hydrogène et d'hélium permet d'atteindre des températures d'environ 20 millions de Kelvin. [17] [18].

Cette énergie conduit à l'émission d'un rayonnement, qui se compose principalement de longueurs d'onde comprises entre  $0,2\mu m$  et  $3\mu m$ . Hors atmosphère, le rayonnement émis par le Soleil (AMO) est composé des éléments suivants : 9% UV ( $0.1 < \lambda < 0.4\mu m$ ). 43% visible ( $0.4 < \lambda < 0.75 \mu m$ ). 48% infrarouge ( $0.75 < \lambda < 5 \mu m$ ). Le rayonnement est représenté par un spectre qui donne l'intensité lumineuse en fonction des longueurs d'onde des spectres AM0 et AM1.5G. Figure II.1.

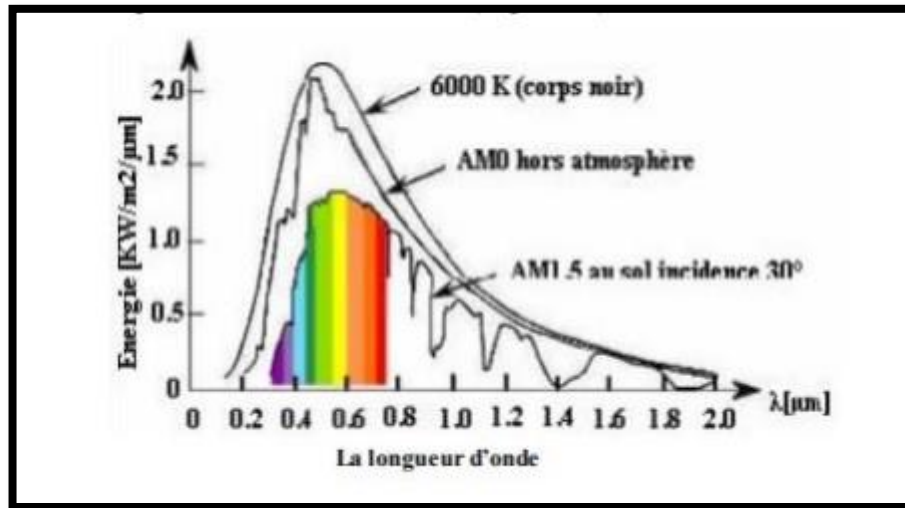


Figure II.1 : Répartition spectrale du rayonnement solaire [19].

Nous reconnaissons que l'absorption par l'atmosphère peut avoir un impact important sur le rayonnement émis par une surface. Les longueurs d'onde de rayonnement électromagnétique du spectre solaire comprennent des longueurs d'onde comprises entre 290 nm et 2770 nm, avec des rayons ultraviolets, de la lumière visible et des rayons infrarouges. L'atmosphère agit comme un filtre, absorbant une partie du rayonnement qui frappe la planète. La masse d'air est une mesure de la puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle du soleil par rapport au zénith. Le spectre solaire AM 0 est utilisé dans le cadre d'applications spatiales où  $P \approx 1,36 \text{ kW}$ . J'ai deux frères. Le spectre AM 1.5 représente le spectre du Soleil sur Terre au niveau de la mer (le Soleil au zénith un jour ensoleillé à un angle de  $48^\circ$ )  $P \approx 1 \text{ KW. m}^2$  [20].

Dans le spectre AM 1.5G : Le "1.5" le trajet de la lumière solaire dans l'atmosphère est 1,5 fois plus court que le trajet le plus court du soleil. Le « G » de rayonnement signifie « global ». Les radiations proviennent du monde entier et nous affectent tous. Les conditions de qualification standard pour les modules photovoltaïques sont qu'ils produisent un spectre AM1.5 sous un éclairage de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ .

## **II.2.2 Types des rayonnements solaires:**

On distingue plusieurs types de rayonnement dont nous allons voir quelques-uns.

### **Rayonnement diffus :**

Il s'intéresse au rayonnement qui ne suit pas une trajectoire géométriquement rectiligne entre le soleil et le point d'observation et qui est diffusé ou réfléchi par l'atmosphère ou le sol [21].

### **Rayonnement direct :**

Nous savons qu'il représente le rayonnement ultraviolet. Qui émane du soleil et atteint directement la terre. Il a un chemin linéaire et est utilisé dans les systèmes de mise au point et est désigné par la lettre "D" dans le spectre AM 1,5

### **dRayonnement réfléchi :**

Il représente des rayons réfléchis par la Terre.

### **Rayonnement Global :**

Il constitue un ensemble de rayons (direct, diffus et réfléchi) qui est employé pour faire fonctionner les panneaux solaires.

## **II.3 Energie photovoltaïque**

### **II.3.1 Histoire et motivation :**

L'énergie renouvelable peut être utilisée lorsqu'une ressource énergétique se régénère naturellement à un taux similaire à son taux d'utilisation. L'énergie renouvelable provient du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, des chutes d'eau et de la croissance des plantes. Le pétrole et l'énergie nucléaire ne sont généralement pas considérés comme des sources d'énergie renouvelables car le monde dispose d'un approvisionnement limité en pétrole et en uranium. En 1975, RIA a estimé que l'énergie du rayonnement solaire à la surface de la Terre était plus de 104 fois la demande énergétique mondiale. La figure RAR-2

illustre les différentes manières dont l'énergie solaire peut être convertie en énergie électrique. L'utilisation de cellules photovoltaïques pour produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire est une voie prometteuse pour exploiter cette source d'énergie durable. Le développement du photovoltaïque a commencé en 1839 lorsque des scientifiques ont montré l'apparition d'une tension entre deux électrodes dans une solution d'électrolyte lorsque celle-ci était exposée à la lumière naturelle..[22]. Albert Einstein a découvert plus tard que la lumière a une nature ondulatoire et que son énergie est transportée par des photons et des particules. L'énergie des photons est proportionnelle au carré de la fréquence de la lumière,

$$E = hc / \lambda \quad (\text{II.1})$$

La vitesse de la lumière est  $c$  et la longueur d'onde de la lumière est  $\lambda$ . La constante de Planck,  $h$ , est responsable de la détermination de la taille de l'énergie d'une particule. Plus la longueur d'onde d'un photon est courte, plus il a d'énergie. La découverte de la relativité générale a valu à Albert Einstein le prix Nobel en 1905. Dick Maurin est né en 1954. Quelle est la meilleure façon de gérer les conversations difficiles. Deux ingénieurs de Bell Telephone Laboratories annoncent le développement d'une cellule solaire au silicium d'une efficacité énergétique de 6%, marquant la naissance de l'électricité photovoltaïque. Étant donné que les cellules photovoltaïques ont fait l'objet de recherches et de développements approfondis au fil des ans, elles sont désormais monnaie courante sur de nombreux toits et dans de nombreuses maisons.. Deux raisons principales sont à l'origine des programmes spatiaux et du besoin de sources d'énergie performantes : le démarrage de grands programmes spatiaux et la nécessité de répondre à des exigences de performance spécifiques.

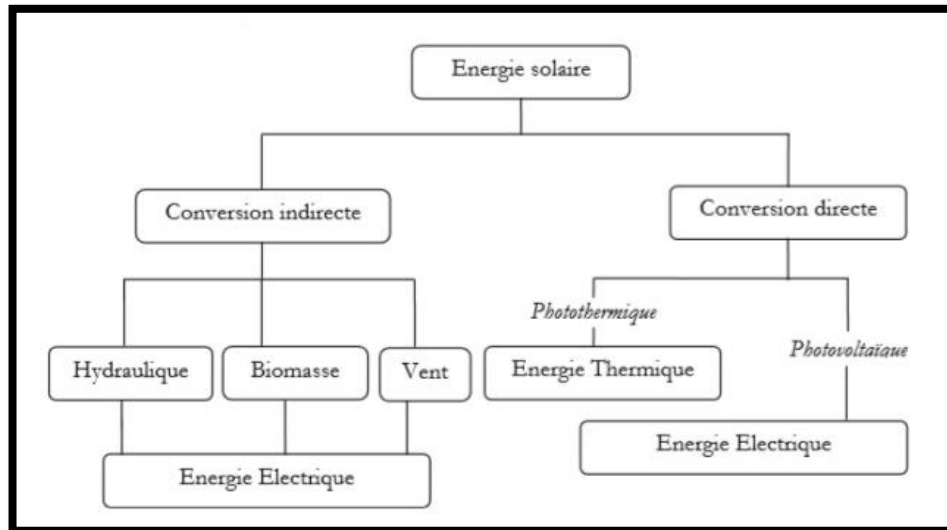


Figure II-2 : Conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

### II.3.2 Cellule photovoltaïque :

C'est un composant électronique qui convertit l'énergie solaire en énergie électrique c'est-à-dire il convertit le photon reçu en une tension électrique continue. Cela se fait à partir d'un processus nommé « effet photo-électrique ». Cette cellule est, généralement, faite de matériaux semi-conducteurs. Les cellules réunies forment le module ou le panneau photovoltaïque. Elle peut être conçue à base d'une homojonction ou d'une hétérojonction.

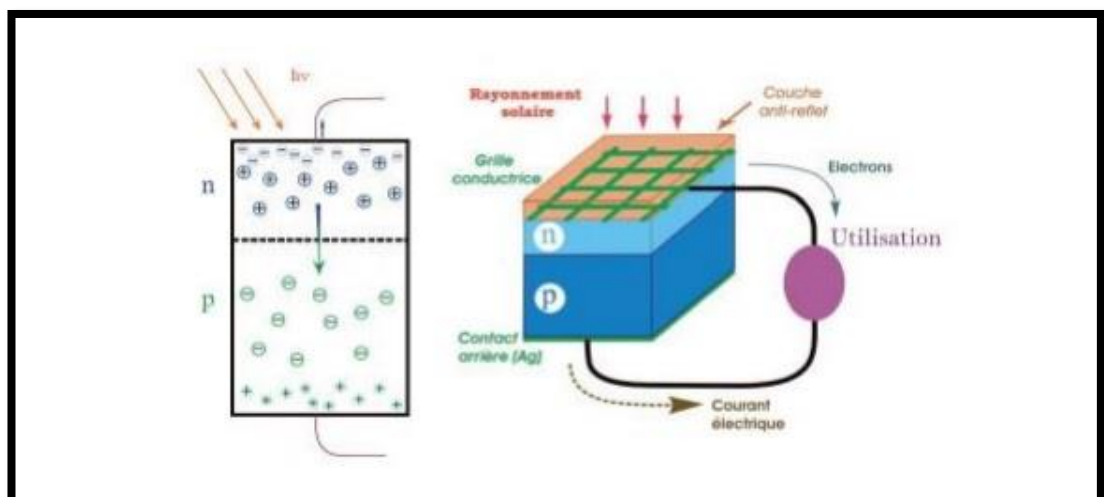


Figure II-3 : Jonction n/p éclairée, cellule photovoltaïque [23]

### II.3.3 Le Principe de fonctionnement d'une cellule solaire:

La cellule photovoltaïque utilise le matériau semi-conducteur pour absorber les photons de la lumière incidente. Le matériau semi-conducteur est constitué d'une bande de conduction et d'une bande de valence, qui forment ensemble la bande interdite (gap). L'absorption du photon crée des paires électron-trou. Si le photon n'a pas assez d'énergie, il ne sera pas absorbé et pénétrera dans le matériau sans transférer son énergie. Si les porteurs ne sont pas extraits assez rapidement de part et d'autre de la cellule, alors l'électron et le trou vont se recombiner. Pour ce faire, un champ électrique interne est appliqué à la cellule pour séparer les porteurs de charge et aligner les porteurs de charge chargés positivement et négativement dans des directions opposées. La génération du champ électrique interne repose sur l'utilisation d'une jonction P/N constituée de deux matériaux semi-conducteurs, chacun à dopage positif et négatif. Lorsque deux semi-conducteurs entrent en contact, trois régions sont créées : une région dopée N, une région dopée P et deux autres régions d'interface. Dans ce dernier, la diffusion de porteurs majoritairement libres et la recombinaison entre eux se produisent. Cette zone est appelée zone de déplétion (zone de charge d'espace ZCE). La charge de l'atome dopé, qui n'est plus présente à proximité du porteur libre de charge opposée, participe à la formation du champ électrique. Ce dernier est bien sûr à la base de la séparation des paires électron-trou photogénérées sous illumination, et de l'attraction des électrons dans les matériaux dopés n et des trous dans les matériaux dopés p, qui génèrent tous des photocourants. La conversion solaire des cellules solaires est basée sur:

- Absorption de la lumière et génération de paires électron-trou.
- Diffusion et séparation des paires d'électrons générés par les photons.
- La collecte des charges : les paires électro-trous se font retourner par voie d'un champ électrique .

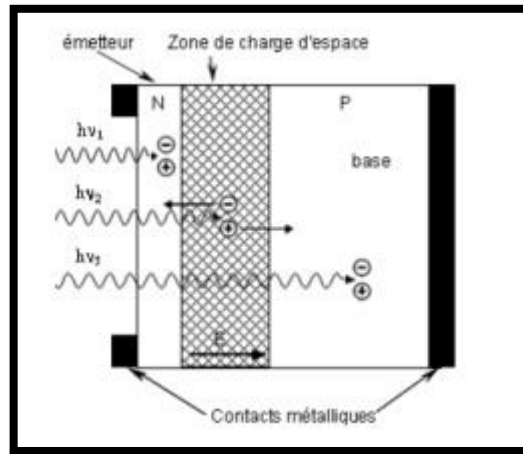


Figure II-4 : Principes fonctionnels des cellules solaires [24]

structure est donné par la formule suivante [25] :

$$I_{obs} = I_s [e^{qV/nKT} - 1] \quad (\text{II.2})$$

$I_{obs}$  : le courant sous obscurité.

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

$q$ : charge de l'électron (  $= 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$  );

$V$ : tension appliquée.

$K$ : constante de Boltzmann ( $K = 1.38 \times 10^{-23} \text{J.K}^{-1}$  ) ;

$T$ : température absolu en Kelvin.

Le coefficient « n » est le facteur d'idéalité de la diode, fonction de la qualité de la jonction [26].

Et sous éclairement le courant est donné par la formule :

$$I = I_{obs} - I_{ph} = I_s [e^{qV/nKT} - 1] - I_{ph} \quad (\text{II.3})$$

$I_{ph}$ : photocourant de la diode.

## II.4 Les type des cellules

La cellule solaire est un constituant semi-conducteur convertissant

Electricité par absorption du Flux lumineux solaire.[27]

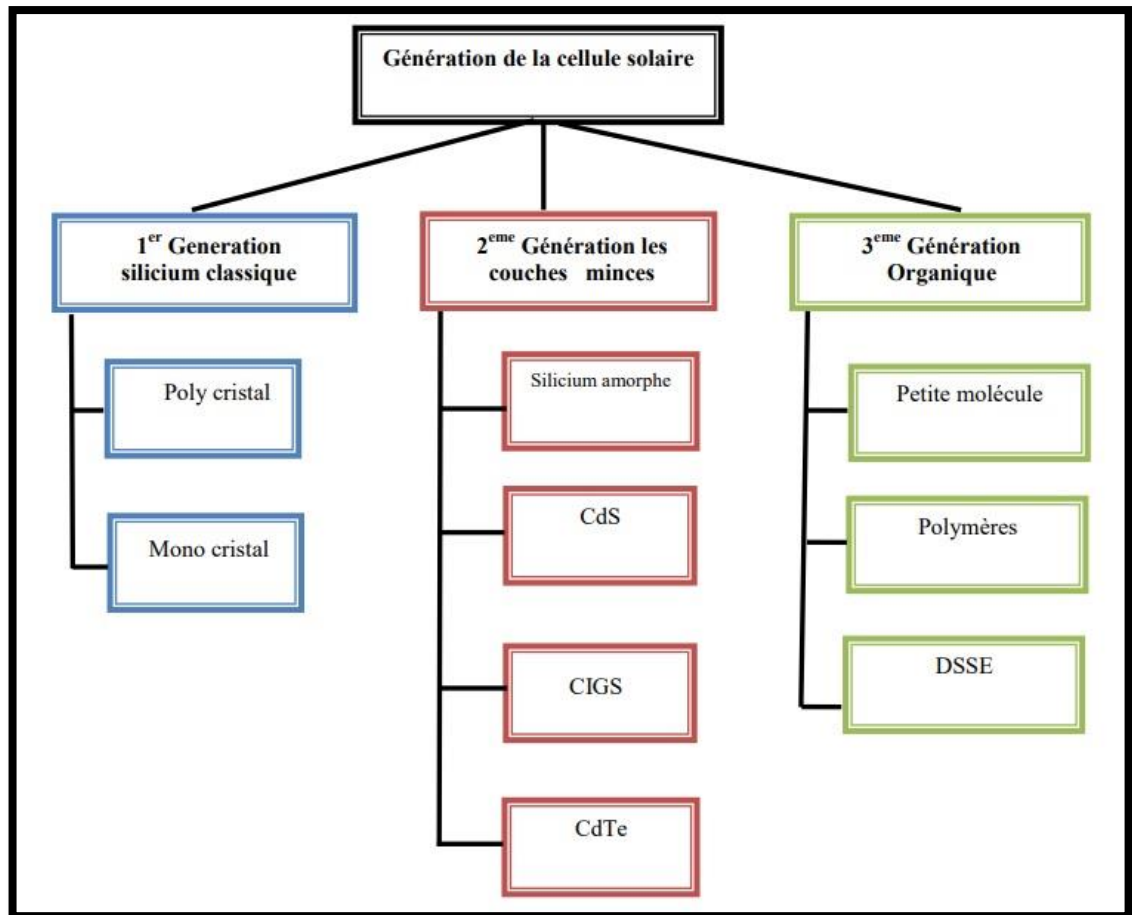


Figure II-5 : Différentes générations des cellules solaires [28].

En général, la 1<sup>ère</sup> génération de cellules solaire comporte les cellules solaires monocristallines et les cellules solaires poly-cristallines, autrement dit du type de technologie plus ancien et plus utilisé. Grâce à son efficacité élevée (15 à 20%). En fait, les cellules solaires de 1<sup>ère</sup> génération sont produites sur des plaquettes, chaque tranche peut doter une puissance de 2-3 watts. En outre les modules solaires servent à augmenter la puissance.

Les attributions de cette technologie de cellules solaires résident dans le fait d'avoir de bonnes performances ainsi que dans leur grande stabilité. Néanmoins, ils sont inflexibles, ils exigent beaucoup d'énergie pour la production [29].

Les cellules solaires de deuxième génération se concentrent sur les batteries à couche mince aSi, les cellules solaires mcSi, les cellules solaires CdTe, les cellules solaires CIS et CIGS. Les performances typiques sont de 10 à 15 %. Par conséquent, leurs rendements sont inférieurs à la première génération et le coût est inférieur à la première génération. Dans l'ensemble, les cellules solaires de deuxième génération sont appelées cellules solaires à couche mince et sont différentes des cellules solaires traditionnelles.

- Cellules solaires au sulfure de zinc (CZTS) et dérivés CZTSe et CZTSSe
- Cellules solaires à colorant, également appelées "cellules Gretzel".
- Cellules solaires organiques
- Cellules solaires en pérovskite
- Cellules solaires polymères
- Cellules solaires à points quantiques
- Cellules solaires à nanofils

#### **II.4.1 Cellule solaire à colorant :**

Les cellules solaires à colorant (DSSC, DSC ou DYSC) sont des cellules à faible coût qui appartiennent à la famille des cellules solaires à couche mince. Ce type est basé sur un système photoélectrochimique semi-conducteur formé entre une anode photosensible et un électrolyte. DSSC possède de nombreuses caractéristiques attrayantes qui peuvent être facilement réalisées avec des rouleaux traditionnels, une semi-flexibilité et des techniques d'impression translucides, offrant une variété d'applications non applicables aux systèmes à base de verre. La plupart des matériaux utilisés sont économiques [30].

#### **II.4.2 Cellule solaire organique :**

Les cellules solaires organiques ou les cellules solaires en plastique utilisent une branche d'équipement électronique qui manipule des polymères

organiques conducteurs ou de petites molécules organiques pour l'absorption de la lumière et le transport de charge afin de générer de l'électricité à partir de la lumière du soleil via le photovoltaïque. C'est un type de production d'énergie solaire. Les molécules utilisées dans les cellules solaires organiques peuvent être solubilisées à grande vitesse et sont peu coûteuses, de sorte que le coût de fabrication de la fabrication à grande échelle peut être maintenu bas. Combinées à la flexibilité des molécules organiques, les cellules solaires organiques peuvent être rentables pour les applications photovoltaïques. Les principaux inconvénients des cellules solaires organiques sont leur efficacité inférieure, leur stabilité inférieure et leur résistance inférieure à celles des cellules solaires inorganiques telles que les cellules solaires au silicium.[30]

#### **II.4.3 Cellule solaire pérovskite :**

Les cellules solaires à pérovskite sont un type de cellule solaire qui contient une structure de pérovskite structurée et se composent généralement d'un matériau hybride organique-inorganique à base d'halogénure de plomb ou d'étain comme couche active de collecte de lumière. Les matériaux pérovskites tels que l'halogénure de plomb méthylammonium sont peu coûteux et faciles à fabriquer[30].

#### **II.4.4 Cellule solaire polymère :**

Les cellules solaires polymères sont un type de cellule solaire flexible fabriquée à partir d'un polymère qui est un polymère avec des unités structurelles répétitives qui génèrent de l'électricité à partir de la lumière du soleil par l'effet photovoltaïque. Les cellules solaires polymères comprennent les cellules solaires organiques (également appelées "cellules solaires en plastique"). Il s'agit d'un type de cellule solaire à couche mince, et d'autres comprennent des cellules solaires en silicium amorphe plus stables[30].

#### **II.4.5 Cellule solaire à points quantiques :**

Les cellules solaires à points quantiques sont des conceptions de cellules solaires qui utilisent des points quantiques comme absorbeurs. Matériau photoélectrique. Tente de remplacer les matériaux en vrac tels que le silicium, le cuivre, l'indium, le gallium, le sélénium (CIGS) et le CdTe. Les points quantiques ont une bande interdite qui peut être ajustée sur une large gamme de niveaux d'énergie en redimensionnant les points. Pour les solides en vrac, la bande interdite est déterminée par le choix d'un ou plusieurs matériaux. Cette propriété rend les points quantiques attrayants pour les cellules solaires multi-jonctions qui utilisent une variété de matériaux pour améliorer l'efficacité en collectant plusieurs parties du spectre solaire[30].

#### **II.4.6 Cellule solaire à nano-fils :**

L'application de nanotechnologies , En comparant avec les cellules solaires traditionnelles, beaucoup moins les matériaux sont utilisés dans des dispositifs nanostructures et, par conséquent, des cellules solaires peu coûteuses sont fabriquées avec des films beaucoup plus minces. Une cellule solaire nanostructure peut avoir une couche absorbante (côté P du dispositif à semi-conducteur) d'une épaisseur aussi mince que 100 nm ou moins, voire plus fine que celle d'une épaisseur de plusieurs micromètres. La géométrie des nano-fils offre des avantages potentiels par rapport aux cellules solaires planes à base de wafers ou à couche mince à chaque étape du processus de photo conversion. Ces avantages incluent une réflexion réduite, une capture de lumière extrême, une relaxation des contraintes, un meilleur réglage de la bande interdite et une tolérance accrue aux défauts. Ces avantages ne devraient pas augmenter l'efficacité maximale au-delà de la limite standard; au lieu de cela, ils réduisent la quantité et permettant ainsi une réduction substantielle des coûts [30].

## II.5 caractéristiques électriques et schéma équivalent de la cellule solaire.

Il est difficile de donner à un module de cellule solaire des caractéristiques de source de courant ou de tension sur toute la plage de caractéristiques courant-tension. Par conséquent, le panneau PV est considéré comme une source d'énergie. Ensuite, vous pouvez voir qu'il existe un point  $P_m$  où vous pouvez voir que la puissance est maximale. Il est certainement intéressant de se déployer à ce stade afin d'obtenir le maximum d'énergie et de tirer le meilleur parti de la puissance de pointe installée. Par conséquent, certains contrôleurs solaires effectuent une adaptation d'impédance et sont toujours proches de ce point de puissance maximale, MPPT [31].

La figure II-6 montre les caractéristiques réelles et le schéma électrique équivalent de la cellule. La valeur de chacun des différents éléments du circuit équivalent détermine les performances de la cellule proprement dite..

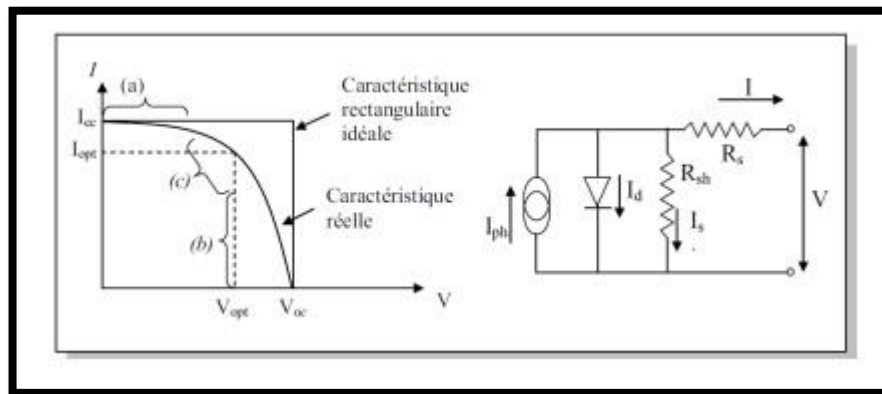


Figure II-6 : Identification et schéma de circuit équivalent des cellules solaires photovoltaïques

### La fonction est divisée en trois parties:

Zone (a), où la cellule agit comme un générateur de courant  $I_{sc}$  proportionnel à l'éclairement.

Zone (b) où la cellule fonctionne en générateur de tension  $V_{co}$ ,

Zone (c) où l'impédance interne du générateur change rapidement [32].

✓ **Isc :**

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en supposant que  $V = 0$  dans la figure équivalente). Il augmente linéairement avec l'éclairement de la cellule et dépend du plan d'irradiation, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charge et de la température.

✓ **Vco :**

La tension de circuit ouvert est obtenue lorsque le courant traversant la cellule est nul. Cela dépend des barrières énergétiques et de la résistance shunt. Elle diminue avec la température et ne change pratiquement pas avec l'intensité lumineuse[16].

$$v_{co} = K.Tq \ln(I_{sc}I_s + 1) \quad (II.4)$$

## II.6 Les paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire

La mesure du courant surfacique permet de caractériser une cellule photovoltaïque. On parle d'ailleurs couramment de caractéristique  $J(V)$ . Pour cela, deux mesures sont réalisées : l'une en absence d'excitation lumineuse, l'autre sous éclairement contrôlé. La Figure II-7 montre des caractéristiques  $J(V)$  classiques pour un dispositif photovoltaïque. La courbe  $J(V)$  obtenue dans l'obscurité est celle d'une diode sous illumination,  $J(V)$  permet de déterminer la puissance maximale produite  $P_{max}$ ,  $J_{max}$  et  $V_{max}$  respectivement [33].

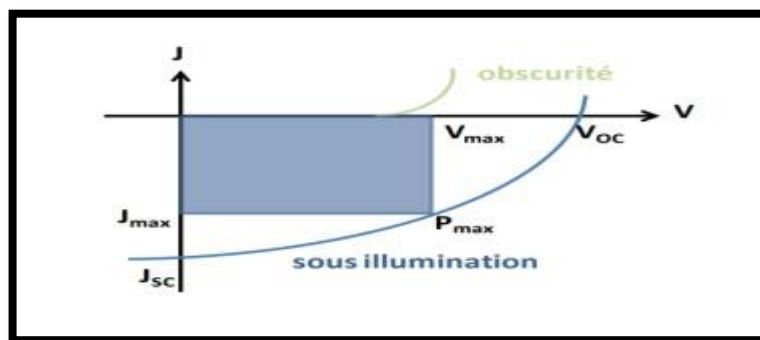


Figure II-7 : Caractéristiques densité de courant-tension des cellules dans l'obscurité et sous éclairage.

es deux courbes permettent d'obtenir trois caractéristiques:

- VOC : qui est obtenue pour  $J = 0 \text{ mA/cm}^2$
- JSC : qui est obtenue pour  $V = 0 \text{ V}$
- FF : le facteur de forme qui met en exergue les pertes dues à la diode, aux recombinaisons et aux résistances parasites

### II.6.1 La densité du courant de Jsc :

valeur de Isc correspond à l'intensité du courant:

$$I_{sc} = (V = 0) \text{ (II.5)}$$

Pour une cellule solaire idéale le courant de court-circuit est égal au courant photovoltaïque  $I_{ph}$  [18].

### II.6.2 La tension en circuit ouvert Voc :

La tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) est la suivante: la tension entre les bornes d'une cellule solaire n'est utilisée (résistance de charge infinie).  $V_{co}$  est la tension maximale disponible d'une cellule solaire lorsque la courant est traversé par la jonction est égal à zéro et peut être exprimé comme suit : [34].

$$V_{co} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \text{ (II.6)}$$

Pour une cellule solaire idéale la tension de circuit ouvert est donnée par ;

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} - 1\right) \approx V_{co} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right) \text{ (II.7)}$$

Courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ) : Courant lorsque les bornes sont connectées entre elles (pas de résistance de charge).  $J_{sc}$  est la densité de courant qui traverse la jonction sous un éclairage à polarisation nulle. Dans le cas idéal,  $J_{sc}$  est égal à la densité de courant photogénérée ( $J_L$ ). Par conséquent, le courant de court-circuit est le courant maximal pouvant être tiré de la cellule solaire. Le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert sont respectivement le courant maximum et la tension maximum de la cellule solaire. Or, à ces deux points de

fonctionnement, la puissance des cellules solaires est nulle. Les points de la courbe J-V qui indiquent la puissance maximale sont appelés les points de puissance maximale. Les densités de courant et les tensions correspondantes sont le courant maximal  $J_{mp}$  et la tension maximale  $V_{mp}$ . [34].

### II.6.3 Le facteur de forme FF :

Le facteur de courbe est un paramètre qui détermine la performance maximale d'une cellule solaire. FF est défini comme le rapport de la puissance maximale de la cellule solaire au produit de  $V_{oc}$  et  $I_{sc}$ . FF est une mesure de l'équerrage de la courbe J-V et est également l'aire du plus grand rectangle qui correspond à la courbe IV. [18], dans des conditions d'environnement de fonctionnement fixes. La puissance  $P$  (W) disponible aux bornes de la cellule solaire, telle que l'éclairage, la température et la vitesse de circulation de l'air ambiant, est égale au produit du courant continu fourni et de la tension continue  $V$ [34].

$$P_m = V_m I_m \quad (\text{II.8})$$

**P**: puissance maximum, mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque en Watt;

**V**: tension maximum, mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque en Volt;

**I**: intensité maximum, mesurée de courant aux bornes de la cellule photovoltaïque en Ampère.[34]

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (\text{II.9})$$

### II.6.4 Le rendement de conversion $\eta$ :

Le rendement  $\eta$  est alors défini comme le rapport entre la puissance maximale générée par la cellule et la puissance du flux magnétique incident reçu par la cellule incidente  $P$ .

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} = \frac{I_{cc} * V_{co} * FF}{P_{in}} \quad (\text{II.10})$$

Où : est la puissance incidente du rayonnement solaire au sol

### II.6.5 Le rendement quantique QE :

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre d'électrons externe et il y a deux grandeurs du rendement quantique interne IQE et externe, EQE [34],

la différence entre les deux :

- Dans IQE; les photons perdus en raison de la réflexion (dans la fenêtre de la cellule) et traversés (en raison d'une absorption incomplète) ne sont pas pris en compte.
- Dans EQE; le contraire se produit.

$$EQE = SR(\lambda) \frac{hc}{q \lambda}$$
$$IQE = \frac{EQE}{1 - R} \quad (\text{II.11})$$

Où  $Q$  : la charge de l'électron et  $\lambda$ : la longueur d'onde.

## II.7 Les avantages et les inconvénients d'une cellule photovoltaïque

### II.7.1 Avantages :

- ❖ Fiable et le module est garanti 25 ans par la plupart des constructeurs.

- ❖ Les panneaux solaires n'ont pas de pièces mobiles, ce qui les rend particulièrement adaptés aux zones reculées. C'est pourquoi il est utilisé sur les engins spatiaux
- ❖ En raison des exigences de maintenance réduites, les coûts de fonctionnement sont très faibles et ne nécessitent pas de carburant, de transport ou de professionnels avancés.
- ❖ La technologie photovoltaïque est également excellente du point de vue de la protection de l'environnement car le produit final est respectueux de l'environnement, génère moins de déchets et ne comporte pas de lignes électriques supplémentaires ni de pollution sonore.[35]

#### **II.7.2 Inconvénients :**

- ❖ La fabrication de modules PV est une technologie de pointe et nécessite des coûts d'investissement élevés.
- ❖ Allocation d'espace pour les grands systèmes.
- ❖ L'efficacité de conversion réelle du module est faible.[35]

#### **II.8 Conclusion**

En raison de l'importance de l'énergie dans notre vie quotidienne et ses sources importantes et notamment les sources renouvelables, de la quatrième colonne du tableau périodique et en particulier le silicium dans toutes ses formes: cristal, amorphe et couche minces des semi-conducteurs et spécifiquement les applications photovoltaïques par ses excellentes propriétés physiques.



Chapitre III:

Les matériaux perovskites

### III.1 Introduction

La famille des pérovskites est l'une des familles distinctives de solides cristallins inorganiques avec une variété de propriétés physiques. La pérovskite tire son nom du minéral naturel  $\text{CaTiO}_3$  (titanate de calcium), décrit pour la première fois par le géologue Gustav Rose en 1839, et en l'honneur du grand minéraliste russe "Lev Alekseevich von perevsky". Oxydes de formule générale  $\text{AB}_2\text{O}_6$  conducteurs, ferroélectriques, etc.. [36]

Ce chapitre traite des pérovskites simples et doubles les plus couramment utilisées en optélectronique, de leurs différentes structures cristallines et de leurs applications, en particulier les cellules solaires.



Figure III-1 : Perovskite de titanate de calcium ( $\text{CaTiO}_3$ ).

### III.2 Présentation des pérovskites

La famille des pérovskites est l'une des familles distinctives de solides cristallins inorganiques avec une variété de propriétés physiques. Le nom pérovskite est dérivé du minéral naturel  $\text{CaTiO}_3$  (titanate de calcium), décrit pour la première fois par le géologue Gustav Rose en 1839. [37].

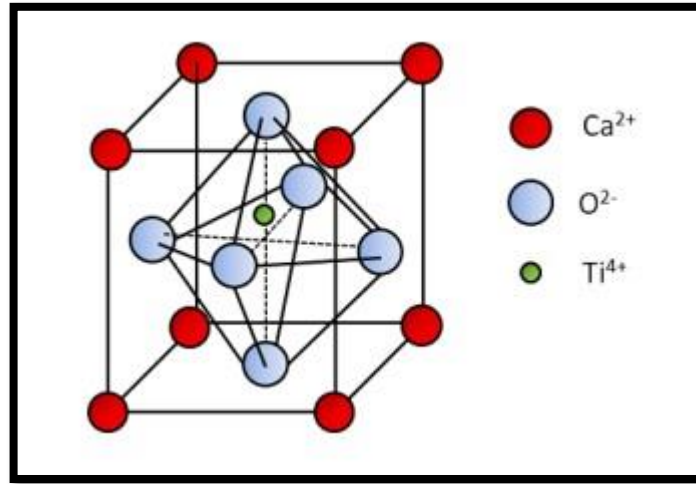


Figure III-2 : Structure cristalline de la pérovskite CaTiO<sub>3</sub>.

La formule générale des matériaux structuraux pérovskites est ABX<sub>3</sub> [38]. L'intérêt pour les oxydes à structure pérovskite ABO<sub>3</sub> depuis plus de 40 ans permet de modifier facilement les propriétés des cations A et B présents dans la structure. Les modifications de ces éléments entraînent des changements dans les propriétés inhérentes du matériau, et donc toutes sortes de propriétés physiques (isolants, semi-conducteurs, conducteurs ioniques, métaux et, selon les propriétés chimiques et électroniques de A et B. Ouvrir la porte au supraconducteur ). [39].

### III.3 Présentation des oxydes des Pérovskites simples

#### III.3.1 La structure cristalline des matériaux pérovskites :

Un nombre important d'oxydes mixtes présents sous la forme d'ABO<sub>3</sub> sont communément appelés pérovskite. La structure cellulaire unitaire de l'oxyde de pérovskite est à symétrie cubique. Dans ce type de structure cristalline, l'atome A occupe le sommet du cube et est entouré de 12 anions dans une coordination octaèdre cubique. L'atome B est au centre du cube et est entouré de six anions dans la coordination octaédrique, tandis que l'atome d'oxygène occupe le centre de la face du cube et est entouré de deux cations B et de quatre cations A. [40]. , La cellule unitaire pérovskite de cette structure contient 5 atomes (1 atome de

cation A, 1 atome de cation B et 3 atomes d'oxygène), elle est donc compacte, c'est-à-dire que l'atome occupe. C'est un arrangement compact qui est un rapport d'espace. La grille de cette structure occupe 74% (un cube avec une face au centre). La figure III3 montre la structure cellulaire unitaire de l'oxyde de pérovskite ABO<sub>3</sub>. Les positions des atomes A, B et X sont A (0.0.0), B (0.5, 0.5, 0.5) et X1 (0.5, 0.5, 0). X2 (0, 5, 0, 0.5) et X3 (0, 0.5, 0.5), le groupe spatial de cette structure est N0221.

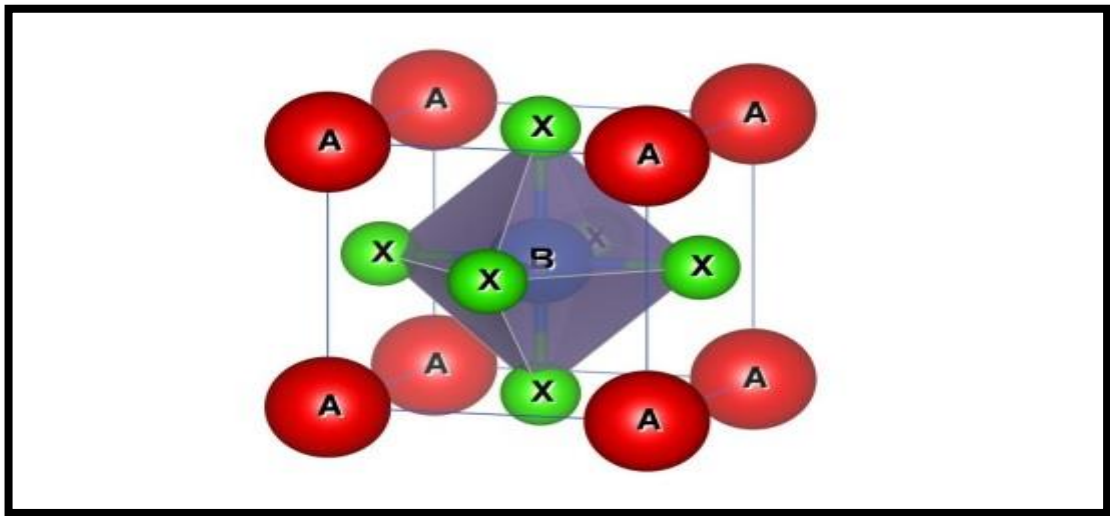


Figure III-3 : Cellule unitaire de la structure pérovskite de type ABO<sub>3</sub>.

### III.3.2 Type de structure Perovskites :

❖ **Les pérovskites simples** : Ce sont des pérovskites dans lesquelles le site A et le site B sont occupés par un seul type d'atome. A titre d'exemple, les composés CaTiO<sub>3</sub>, BaTiO<sub>3</sub>, NaTaO<sub>3</sub>, PbTiO<sub>3</sub>... peuvent être cités.

❖ **Les pérovskites complexes** : Ce sont des pérovskites dans lesquelles l'un des deux sites A ou B est occupé par deux types d'atomes, et la répartition des cations peut être aléatoire ou ordonnée. A titre d'exemple, prenons le composé PbMg<sub>0.33</sub>Nb<sub>0.67</sub>O<sub>3</sub> utilisé dans la fabrication de condensateurs. .. 66O<sub>3</sub>, PbSc<sub>0.5</sub>Ta<sub>0.5</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>0.5</sub>Bi<sub>0.5</sub>TiO<sub>3</sub> [41].

### III.3.3 Critères de stabilité d'une structure perovskites :

La sélection des atomes situés aux sites des cations A et B dans la structure cristalline de la pérovskite est fondamentale pour la stabilité de ces composés, notamment la relation liant la longueur des rayons cationiques des cations A, B et des anions X est due à l'ionicité de la liaison et à l'électronégativité différente entre les cations et les anions. Ceux-ci ont un effet décisif sur les propriétés de ces matériaux.

#### III.3.3.a Facteur de tolérance "Facteur de Goldschmidt":

La relation entre les longueurs du sous-réseau A-O et du sous-réseau B-O joue un rôle très important dans la détermination des propriétés de ces matériaux. Dans une structure idéale où les atomes entrent en contact, la distance BO est égale à  $a/2$  (a est un paramètre de réseau cubique) et la distance AO est égale à  $\frac{a}{\sqrt{2}}$ .

$$r_A + r_O = \sqrt{2}(r_B + r_O) \quad (\text{III.1})$$

La structure cubique est conservée pour les atomes dont les valeurs de rayon ionique ne respectent pas strictement cette équation. En 1926, Goldschmidt a proposé un rapport appelé facteur de tolérance (t) [42], qui est défini comme une mesure de l'écart par rapport à la structure cubique idéale de la pérovskite:

$$t = \frac{(r_A + r_O)}{\sqrt{2}(r_B + r_O)} \quad (\text{II.4})$$

Avec  $r_A$ ,  $r_B$  et  $r_O$  ce sont les rayons ioniques des cations A, B et  $O^{2-}$ . Ceci est vrai à température ambiante et avec des rayons ioniques empiriques. [43].

Le rayon ionique utilisé pour calculer la valeur de "t" a été déterminé

empiriquement et est indiqué dans le tableau de Shannon et Prewitt [44]. Selon la valeur de  $t$ , des changements structuraux sont observés par rapport à la structure prototype du cube. La structure cubique de la pérovskite est respectée avec une valeur de «  $t$  » proche de 1. Si la valeur de ce coefficient s'écarte de 1, cette structure sera déformée. Tant que cette valeur est incluse dans l'intervalle, le matériau reste stable dans la structure pérovskite. Exemple :  $0.75 < t < 1.06$  [45]. Le tableau III-1 montre les différentes structures possibles du cristal en fonction de la valeur du facteur de tolérance de Goldschmidt.

$t < 0.75$	$0.75 < t < 1.06$			$t > 1.06$
ilménite	Pérovskite			hexagonal
	$0.75 < t < 0.90$ Distorsion <b>orthorhombique</b>	$0.90 < t < 0.95$ Distorsion <b>rhomboédrique</b>	$0.95 < t < 1.06$ <b>cubique</b>	

Tableau III-1 : Évolution structure cristalline par valeur du facteur de tolérance  $t$ .

### III.3.3.b Ionicité des liaisons :

Les propriétés ioniques ou ioniques moyennes de la liaison anionique peuvent être utilisées pour tester la stabilité thermique de la structure pérovskite  $ABO_3$ . Ceci est exprimé par une équation basée sur la différence d'électronégativité de l'échelle de Pauling [46]. A cette échelle, plus la valeur de  $\bar{\chi}$  est élevée, plus la stabilité thermique du composé est élevée.:

$$\bar{\chi} = \frac{\chi_{A-O} + \chi_{B-O}}{2} \quad (\text{II.4})$$

Avec  $\chi_{A-O}$  et  $\chi_{B-O}$  les cations A, B et O associés.

### III.4 Pérovskites hybrides

Le début d'une nouvelle ère dans les technologies photo électroniques a été marqué par le développement récent de pérovskites hybrides (organiques et

inorganiques). Les scientifiques l'ont défini comme un cristal constitué de molécules contenant une partie organique et une partie inorganique sous la forme de la Fig. 4 [47]. Ils ont extrait la formule chimique de  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ , le composé de base le plus connu dans le domaine photoélectrique. 3. La première étude théorique a consisté à calculer la structure de bandes de ce matériau à l'aide de techniques issues de la physique du solide [48], puis ces études ont amené la pérovskite hybride dans le monde des semi-conducteurs.

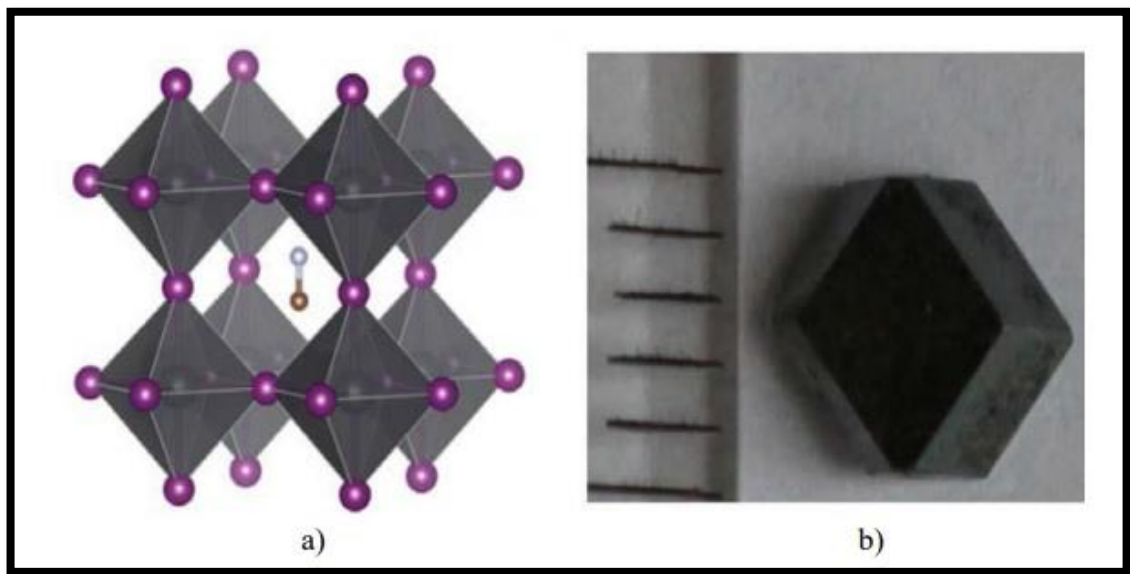


Figure III-4 : (a) Structure cristalline de  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$  (X : I, Br, Cl), le cation organique  $\text{CH}_3\text{NH}_3^+$  est entouré de  $\text{PbX}_6$  octaèdre 2. (B) Image optique d'un monocristal millimétrique de  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  [14].

Les matériaux pérovskites hybrides ont d'excellentes propriétés telles qu'une mobilité élevée des porteurs, une plage d'absorption spectrale réglable, une grande longueur de diffusion, une facilité de fabrication et un prix abordable. Ces propriétés font de la pérovskite le matériau optoélectronique le plus compétitif pour les applications photovoltaïques, les diodes électroluminescentes, les photodétecteurs, les lasers et plus encore. De plus, la polyvalence des architectures de dispositifs et la capacité de fournir des dispositifs relativement puissants grâce à une variété de techniques de traitement font de la pérovskite un matériau très prometteur pour une variété d'applications

pratiques [49]. L'essor de la pérovskite hybride a surpris la communauté photovoltaïque avec ses performances remarquables et ses progrès rapides au cours des cinq dernières années [50]. Ce matériau extraordinaire a connu un développement sans précédent, atteignant 20% d'efficacité de conversion de puissance (PCE) dans les dispositifs photovoltaïques (PV) [52].

### **III.5 Applications des matériaux pérovskites**

#### **III.5.1 Ferroélectricité :**

Les pérovskites à base d'oxydes ont été historiquement les plus en raison de son excellente ferroélectricité, de son magnétisme et de sa supraconductivité, il est activement étudié par la famille des pérovskites [53]. La première structure pérovskite à base d'halogénure a été observée par Moller en 1958 avec l'halogénure de plomb césium ( $\text{CsPbX}_3$ ) [54]. Comprendre, étudier et exploiter les propriétés ferroïques des oxydes de pérovskite a fasciné les chimistes et les physiciens et reste un sujet important dans la science des matériaux à ce jour. Ce n'est pas seulement pour des raisons de recherche fondamentale, mais aussi pour des applications techniques actuelles et potentielles dans la conception de capteurs, de convertisseurs d'énergie et de systèmes de stockage de données [55]. La bonne composition de ces pérovskites révèle une variété de propriétés électroniques, notamment des propriétés capacitives, ferroélectriques, piézoélectriques, supraconductrices, métalliques, catalytiques et magnétiques. Les propriétés ferroélectriques montrent de nombreux effets bénéfiques dans le photovoltaïque, mais les grandes lacunes de l'oxyde pérovskite n'utilisent que 8 à 20 % du spectre solaire, ce qui limite leur utilisation dans les applications solaires [50]. La pérovskite ferroélectrique a un effet bénéfique sur les applications PV car une forte rupture de symétrie due à la polarisation spontanée améliore la séparation des porteurs pendant la photoexcitation, permettant une durée de vie des porteurs et une tension accrue qui peut traverser les lacunes [57]. La pérovskite hybride a ensuite

présenté une polarisation électrique spontanée par le domaine ferroélectrique, aidant à séparer les porteurs de charge photoexcités, réduisant efficacement la recombinaison et induisant un champ électrique interne qui facilite l'extraction de charge. .. La polarisation électrique spontanée résulte du déplacement du cation B du centre de l'octaèdre BX<sub>6</sub>, provoquant une perturbation de la symétrie [56].

### III.5.2 Diode électroluminescente (LED) :

Les premières LED à base de pérovskite halogénée ont été introduites dans les années 1990 et le matériau actif était une structure lamellaire [58-59]. Récemment, les matériaux à base de pérovskite halogénée à structures colloïdales (nanocristaux, boîtes quantiques, etc.) ont montré un plus grand potentiel. Les écarts dans ces matériaux sont réglables. Cela a permis de réaliser des LED multicolores [59-60-61]. De manière générale, parmi ces matériaux figurent les composés CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> et les composés bromés, qui présentent des propriétés optiques particulièrement intéressantes. Grâce à son architecture et son procédé de fabrication simples, les composants (diodes organiques) basés sur les technologies liées aux OLED sont prometteurs [62-63].

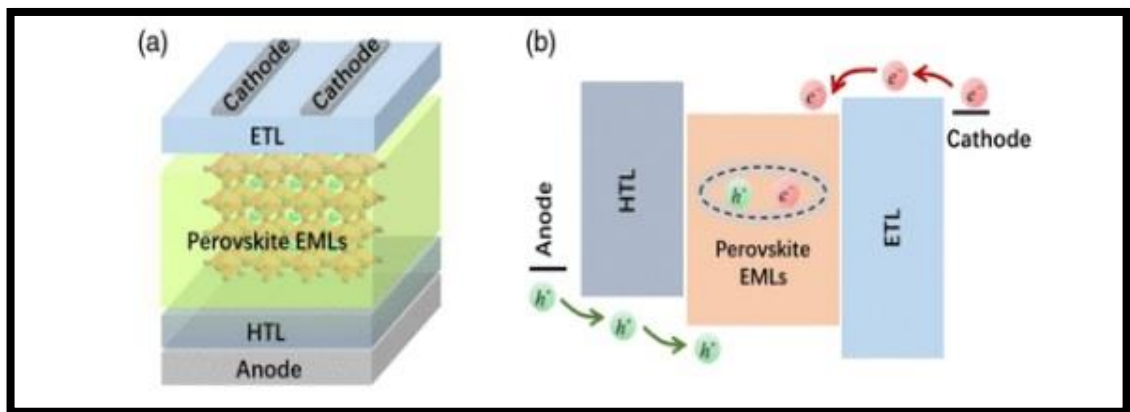


Figure III-5 : (a) Structure de dispositif typique pour les LED à pérovskite p-i-n. (B) Injection et transport de porteurs de charge dans des LED à pérovskite p-i-n. HTL, couche de transport de trous ; EML, couche d'émetteur ; ETL, couche de transport d'électrons.

### **III.5.3 Cellules solaires :**

#### **III.5.3.a Pérovskites en cellules solaires :**

L'énergie solaire, avec le vent, la biomasse, l'énergie marémotrice et géothermique, apparaît comme une source d'énergie alternative pour les planètes pauvres en énergie. Parmi ces sources d'énergie, l'énergie solaire est une énergie renouvelable et propre qui apporte une réponse aux inquiétudes croissantes concernant le réchauffement climatique et les gaz à effet de serre d'origine fossile. Au cours des dernières décennies, les cellules solaires ont fait de grands progrès à la fois en termes de coût de fabrication et d'efficacité [64].

La technologie des cellules solaires à base de silicium offre une combinaison de propriétés telles qu'une passivation de surface facile, un faible coût, une ténacité et une stabilité à haute température, ce qui en fait le choix préféré pour les applications photovoltaïques. Les technologies qui promettent une combinaison de faible coût, de facilité de fabrication et d'une meilleure matrice de récupération d'énergie offrent une alternative intéressante au silicium. En tant que nouveau venu dans ce domaine, la pérovskite aux halogénures organométalliques offre une perspective passionnante.[65].

Ces matériaux ont amélioré l'efficacité de conversion de puissance (PCE) des dispositifs photovoltaïques (PV) de plus de 20 %. [66].

#### **III.5.3.b Architectures des cellules à base des pérovskites :**

Il existe quatre grandes architectures utilisées dans la conception et la fabrication de cellules solaires à base de pérovskite avec des performances différentes. Ces architectures sont appelées mésoporeuses, couches de couverture, pincement planaire et broches planaires, comme le montre la figure III.6. Pour la modélisation et la simulation numérique, il peut être souhaitable d'utiliser des broches solaires à couche mince ou des configurations de

pincement plan à hétérojonction. Ce dernier caractérise les cellules solaires à base de pérovskite d'une manière similaire à la construction de cellules solaires semi-conductrices composées à couches minces telles que CIGS [67-68].

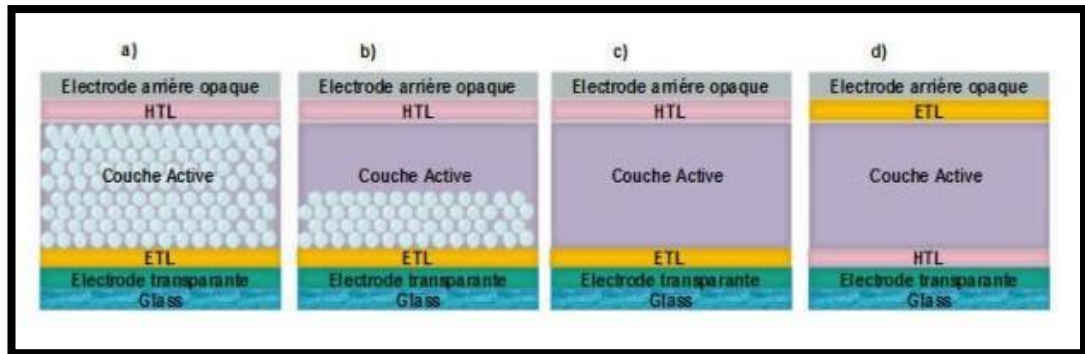


Figure III-6 : Les architectures les plus couramment utilisées pour les cellules solaires à base de pérovskite : (a) mésoporeuses, (b) couches de protection, (c) espaces plans et (d) mâchoires planes.

La configuration ci-dessus est couramment utilisée dans les dispositifs de cellules solaires à pérovskite. La figure III-6 (a) montre une structure mésoporeuse. Une couche de transport d'électrons en vrac (ETL) (généralement  $\text{TiO}_2$ ) est déposée sur un substrat de verre et des électrodes transparentes. Des ETL mésoporeux ( $\text{TiO}_2$  ou  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) sont ensuite créés par frittage de petites particules entre elles à haute température ( $> 400^\circ\text{C}$ ). Cette structure mésoscopique poreuse est ensuite remplie d'une couche active de pérovskite sur laquelle est placée une couche fixe de transport de trous (HTL), généralement du 2,2',7,7'-tétrakis (N,N-di-4-méthoxy-phénylamino) enrobée de 9,9'-SpiroOMeTAD et contacts arrière opaques (généralement en or (Au)). La structure de niveau supérieur s'est développée à partir de cette structure mésoscopique. La pérovskite ne nécessite pas d'interface ETL / pérovskite pour séparer les excitons photogénérés en charges libres, et les matériaux pérovskites peuvent transporter efficacement les charges bipolaires, ce qui entraîne une réduction significative de l'épaisseur de la structure mésoscopique. La couche supérieure pure devient plus épaisse. Une pérovskite se forme au sommet (Fig.

III.6 (b)) [69-70]. En éliminant complètement la structure mésoporeuse, une structure de pincement planaire est formée sans avoir besoin d'une étape de frittage à haute température (Fig. III-6 (c)). La structure de broche planaire est fabriquée en déposant du HTL (généralement du poly (3,4 éthylènedioxythiophène) : acide polystyrène sulfonique (PEDOT : PSS)) sur un substrat de verre recouvert d'une électrode transparente. Ensuite, une couche de pérovskite est déposée, suivie d'ETL (généralement [6,6] phényl C61 butyrate méthyl ester (PCBM)) et de contacts arrière opaques (aluminium (Al) ou argent (Ag)) (Figure III-6 (d)).

### **III.5.3.c Principe de fonctionnement de la cellule solaire à base de pérovskite :**

Les principes fonctionnels simplifiés des cellules solaires à base de pérovskite incluent l'absorption des photons par la couche absorbante de pérovskite. L'absorbeur de pérovskite a une faible énergie de liaison des excitons, ce qui indique que des porteurs libres sont générés lors de l'absorption des photons, qui se produit en quelques picosecondes. Ces porteurs de charge gratuits générés sont transportés vers les contacts d'interface. En cours de transfert Figure III-7,

Le processus souhaité (flèche rouge) s'effectue en trois étapes :

- Photoexcitation dans un absorbeur pérovskite (1).
- Transfert d'électrons dans ETL (2).
- Transfert de trous dans le HTL (ou transfert équivalent d'électrons du HTL vers la pérovskite) (3).

Divers processus indésirables (flèches vertes) peuvent se produire. Ils consistent en :

- Reliage d'espèces photogéniques (4).
- Transfert de charge inverse à l'interface entre HTL et TiO<sub>2</sub> et pérovskite (5, 6).
- Contact direct entre HTL et TiO<sub>2</sub> (7).

Enfin, après avoir surmonté la barrière d'extraction à l'interface, les porteurs de charge restants sont transférés à travers l'interface de contact sélectif et extraits de leurs électrodes respectives [71-72].

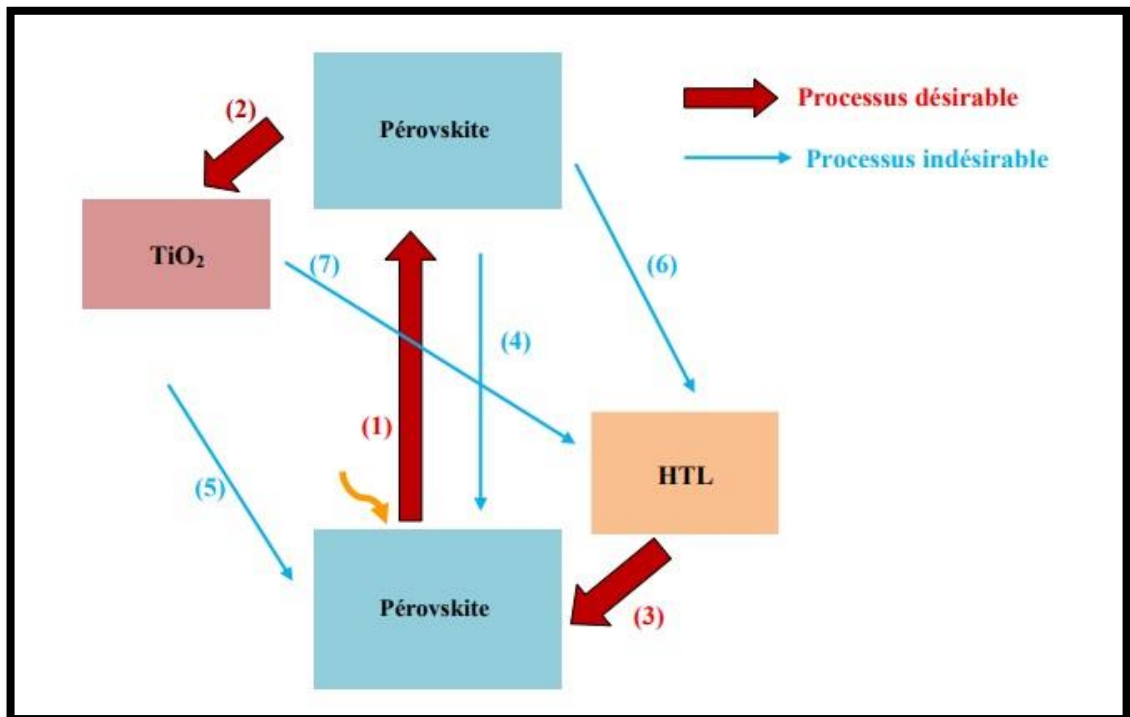


Figure III-7 : Schéma des processus de transfert et de recombinaison d'électrons dans une cellule solaire à base de pérovskite.

### III.6 Conclusion

Pour conclure ce chapitre, nous nous sommes concentrés sur deux types de matériaux pérovskites, leurs structures cristallines et différents critères de stabilité. Les diverses propriétés supérieures de la pérovskite en font un candidat de choix pour remplacer le silicium et d'autres semi-conducteurs pour une

variété d'applications à court et moyen terme. Cette étude confirme que la pérovskite présente de nombreux avantages par rapport au Si dans la fabrication des cellules solaires en raison de sa structure cristalline régulière et ordonnée. C'est la principale raison des performances des matériaux pérovskites dans les cellules solaires, permettant le transport de charges sur une longueur d'environ 100 nm et la réutilisation des photons (absorption, diffusion, émission, réabsorption). La double pérovskite est l'un des matériaux les plus couramment utilisés dans la fabrication des cellules solaires.



Chapitre IV:

Etude du logiciel de simulation

SCAPS

## IV.1 Introduction

Pour calculer les paramètres physiques des semi-conducteurs, plusieurs méthodes sont utilisées. Dans ce chapitre nous allons citer l'une de ces méthodes, en suite nous présenterons le simulateur utilisé au cours de notre étude.

## IV.2 Présentation de simulateur scaps

SCAPS 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 , StefaanDegrave.[73]

Une description des logiciels et des algorithmes utilisés peut être trouvée dans la littérature. Ce logiciel est disponible gratuitement pour la communauté de recherche PV. SCAPS a été l'origine pour les structures cellulaires CuInSe<sub>2</sub> et CdTe. Cependant, certaines versions ont une fonctionnalité améliorée pour une application aux cellules solaires cristallines (Si et GaAs) et aux cellules amorphes (aSi et micromorph Si). Voici un aperçu des principales caractéristiques :

- ❖ Presque tous les paramètres peuvent être introduits par étapes (selon la configuration et la profondeur de la cellule) : par exemple,  $\chi$ ,  $\epsilon$ , NC, NV,  $V_{thn}$ ,  $V_{thp}$ ,  $\mu_n$ ,  $\mu_pNA$ , ND, tous les pièges (Défectueux) Nt.

- ❖ Mécanisme de recombinaison : entre bandes (directement), tarière SRH.

- ❖ Niveau de défaut : au niveau de la masse ou de l'interface, en tenant compte de leur état de charge et de la recombinaison à ces 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).

- ❖ Degré d'erreur, propriétés optiques : Une excitation directe par la lumière est possible (effet dit indéfini : travail de sortie du métal ou régime de bande plate ; propriétés optiques du filtre (réflexion ou transmission). Pureté photovoltaïque, IPV).
- ❖ Tunnellisation, bande à bande (bande de conduction ou bande de valence), tunnelisation vers/ou interface.
- ❖ Généré : calculé en interne ou à partir d'un fichier g (x) fourni par l'utilisateur.
- ❖ Illuminations : Du côté p ou du côté n.
- ❖ Points de calcul : tension, fréquence, température.
- ❖ Le logiciel calcule la bande d'énergie, la concentration et le courant en spécifiant les caractéristiques du point de travail (JV), les caractéristiques AC (C et G en fonction de V et/ou f) et la sensibilité spectrale.
- ❖ Le calcul par lots est possible. Affichage des résultats et de leurs paramètres correspondants.
- ❖ Charger et enregistrer tous les paramètres. Lancez SCAPS avec une configuration personnalisée, un langage de script avec des fonctionnalités utilisateur gratuites.
- ❖ Script Language Center pour l'exécution de SCAPS à partir d'un "fichier de script" Toutes les variables internes peuvent être visualisées et rendues par un script.
- ❖ Fonction d'ajustement de courbe intégrée.
- ❖ Commission d'interprétation des mesures d'agrément[73].

### IV.3 Base :

SCAPS est un programme conçu pour fonctionner sur les systèmes Windows et a été développé par le National Instruments Lab-Windows / CVI. SCAPS s'ouvre avec l'icône du panneau d'action. La fenêtre à ouvrir est représentée sur la figure IV-1.

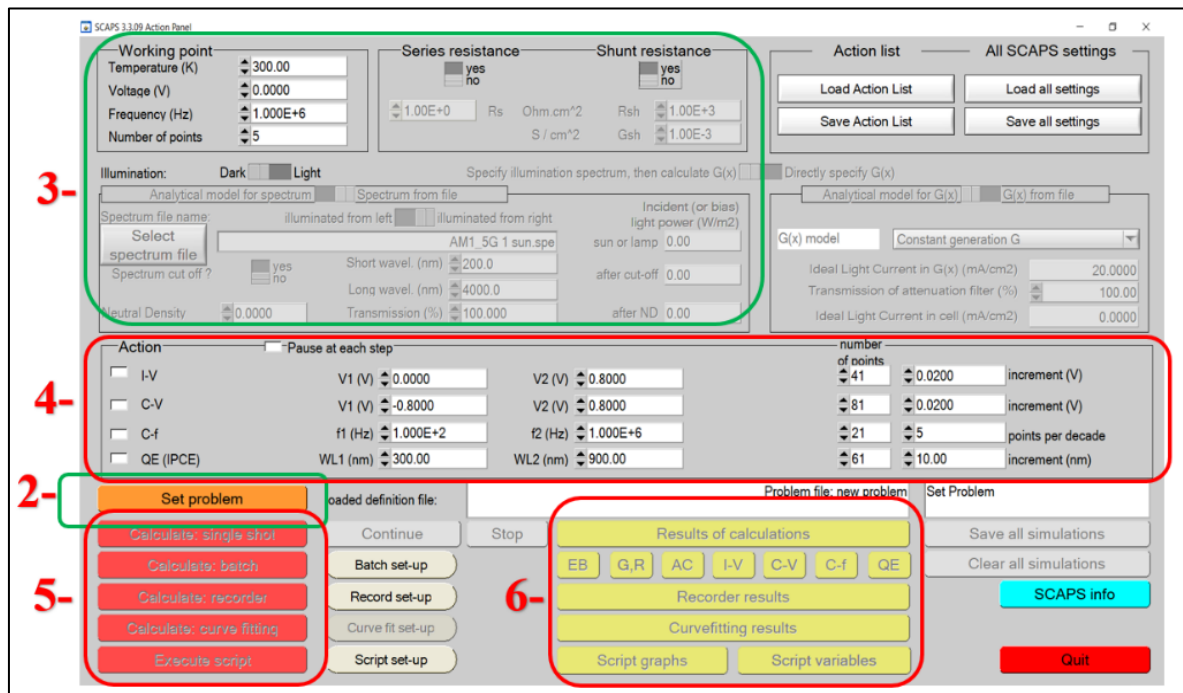


Figure IV-1 : panneau de démarrage SCAPS, action ou panneau principal.

La signification des blocs numérotés de 1 à 6 est expliquée dans le texte. Il existe un panneau spécial pour les actions de base :

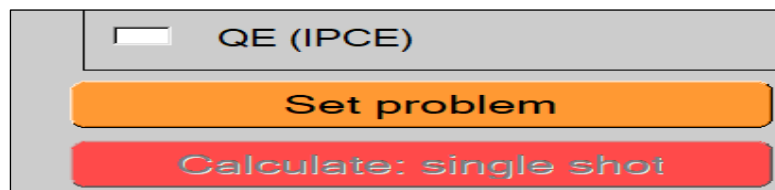
1. Démarrez SCAPS.
2. Définissez le problème et la forme, le matériau et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.
3. Décrivez la situation dans laquelle la simulation sera exécutée (précisez le point de fonctionnement).
4. Entrez la valeur mesurée (fonction) à simuler.
5. Lancez le calcul.
6. Visualisez la courbe de simulation (Section 6). Ces étapes sont décrites en détail ci-dessous.

### IV.3.1 Démarrez SCAPS:



Cliquez sur l'icône en haut de votre bureau ou double-cliquez sur le fichier SCAPS3200.EXE dans votre gestionnaire de fichiers (ou toute autre version de SCAPS). SCAPS s'ouvre dans le panneau d'action [74].

### IV.3.2 Définissez le problème:



Cliquez sur le bouton Définir le problème dans le champ d'action et sélectionnez Charger dans le champ qui apparaît en bas à droite. Sélectionnez et ouvrez (par exemple, NUMOS CIGS Baseline.def. Il s'agit d'un exemple de fichier d'une cellule solaire basée sur CIGS. Vous pouvez ensuite cliquer sur Définir le problème dans le volet d'action pour modifier toutes les propriétés de la cellule. augmenter.[74].

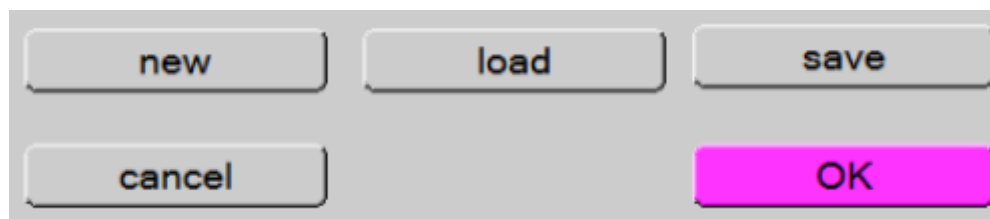


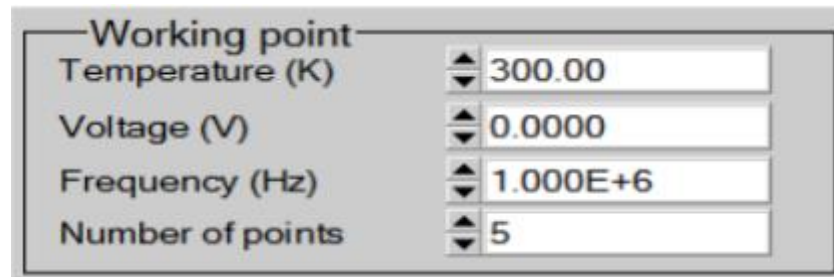
Figure IV-2 : Définition du problème.

### IV.3.3 Précise le point de fonctionnement:

Le point de fonctionnement n'est pas variable dans la mesure de simulation et précise les paramètres associés à l'opération de mesure. Ça signifie:

- ❖ **température T** : Important pour toutes les mesures. Remarque : Pour SCAPS :  $N_c(T)$ ,  $N_v(T)$ , la vitesse thermique, la contrainte thermique  $kT$

et toutes leurs dérivées sont les seules variables avec une dépendance thermique explicite. Pour chaque valeur T, vous devez saisir manuellement les paramètres du matériau correspondant.



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

Figure IV-3 : Points de travail

❖ **voltage V** : Elle ne s'applique pas aux simulations IV et CV. Il s'agit de la tension de polarisation continue pour la simulation Cf et QE ( $\lambda$ ). SCAPS démarre toujours à 0V et effectue plusieurs étapes à la tension du point de fonctionnement.

❖ **fréquence F** : Cela n'affecte pas la simulation de IV, QE ( $\lambda$ ) et Cf, mais cela affecte la fréquence à laquelle les caractéristiques CV sont simulées.

❖ **Illumination** : utilisé pour toutes les mesures. Pour QE ( $\lambda$ ), il détermine les conditions de polarisation de la lumière. Les paramètres de base sont : Obscurité ou lumière, sélection du côté éclairé, sélection du spectre. 1.5 Le spectre d'éclairement solaire global de la masse d'air (= 1000 W / m<sup>2</sup>) est le spectre par défaut, mais il existe également une large gamme de lumières et de spectres monochromatiques pour des simulations plus personnalisées. Si un simulateur optique est disponible, le profil généré peut être chargé immédiatement à la place du spectre [74].

#### IV.3.4 Entrez la valeur mesurée (fonction) à simuler:

Dans la zone d'action du volet d'action, vous pouvez sélectionner une ou plusieurs mesures à simuler : IV, CV, Cf et QE ( $\lambda$ ). Vous pouvez également personnaliser les valeurs de début et de fin des arguments et le nombre d'étapes.

### IV.3.5 Lancez calcul:



### IV.3.6 Visualisez la courbe de simulation:

Après le calcul, SCAPS passe au champ de bande d'énergie illustré à la Figure IV8. Dans ce panneau, vous pouvez voir le diagramme de bande, la densité de porteurs libres et la densité de courant. Au dernier point de précontrainte. Si vous voulez voir le résultat de la tension intermédiaire, utilisez le bouton pause sur le panneau d'action. Les résultats peuvent être affichés avec les commandes PRINT, SAVE GRAPHS, SHOW et les valeurs sont affichées à l'écran. Vous pouvez couper et coller Excel etc. et enregistrer la valeur dans un fichier de données. Vous pouvez passer à l'un des panneaux personnalisés (à condition de simuler au moins une mesure).

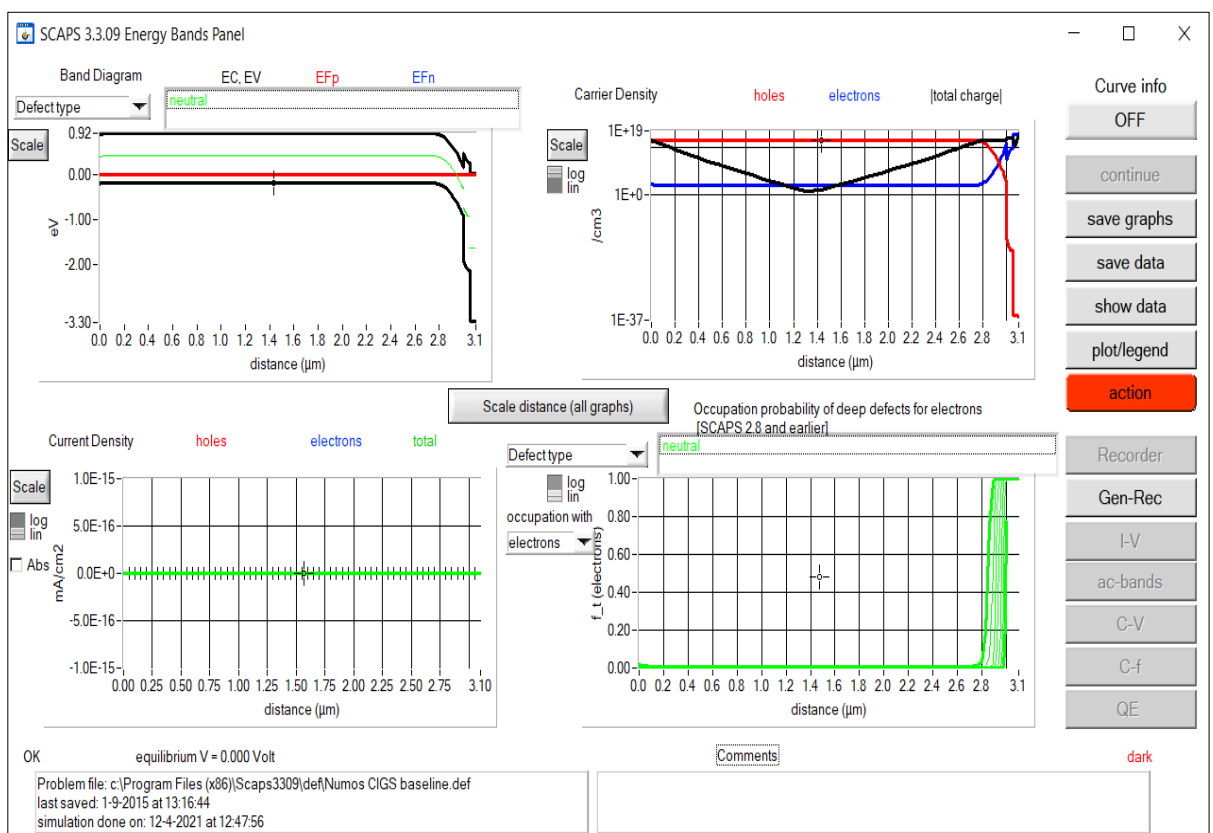


Figure IV-4 : Panneau de bande d'énergie.

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

La figure IV-5 montre le panneau d'affichage de la forme d'onde I-V dans l'obscurité et sous éclairage. La couleur de la dernière courbe calculée est affichée (si le graphique est trop encombré, cliquez sur CLEAR ALL GRAPHS dans le volet Actions). La courbe du taux de recombinaison n'est visible que dans la dernière simulation. La couleur de la légende correspond à la couleur de la courbe [75]. Lorsque CURVE INFO est activé et que vous cliquez sur une courbe dans un graphique, un panneau contextuel apparaît avec des informations sur le graphique, la courbe et le point sur lequel vous avez cliqué.

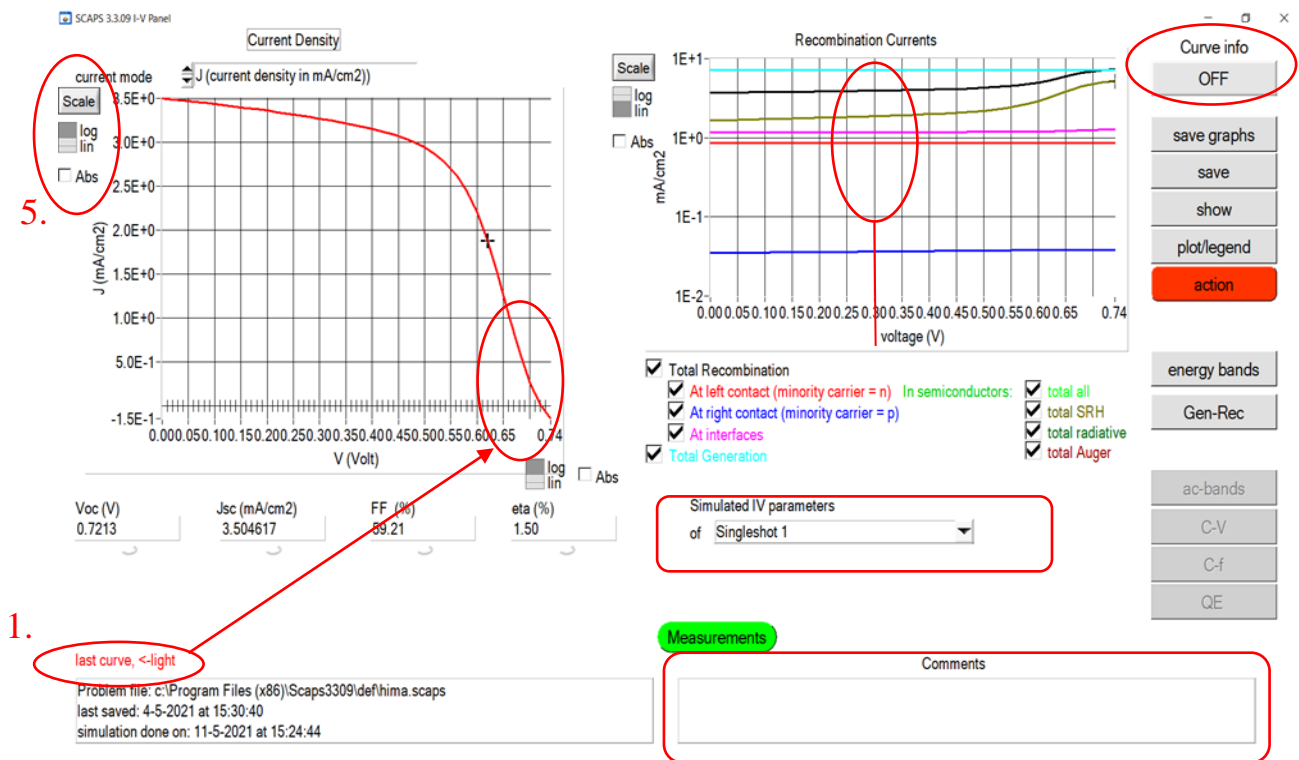


Figure IV-5 : Panneau d'affichage de forme d'onde IV sombre et éclairé

Le bouton SCALE utile pour modifier la plage et l'échelle de l'axe. Si vous maintenez la touche Ctrl enfoncée et sélectionnez une zone rectangulaire dans le graphique, le graphique zoomera (agrandit) la zone sélectionnée. Maintenez la touche Ctrl enfoncée et cliquez avec le bouton droit pour effectuer un zoom arrière.[75].

## IV.4 Définition d'une cellule solaire

La méthode recommandée pour introduire les cellules solaires est d'utiliser l'interface graphique du programme. De cette façon, vous pouvez saisir de manière interactive tous les paramètres contrôlés par SCAPS pour éviter d'obtenir des valeurs impossibles ou incohérentes.

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

Cliquez sur le bouton "SET PROBLEM" sur le panneau d'action pour afficher le panneau "SOLARCELL DEFINITION". Ce dernier vous permet de créer, modifier, enregistrer ou charger des structures de cellules solaires à partir d'autres fichiers. Ces fichiers de définition sont des fichiers ASCII standard (code standard américain pour l'information, l'échange) avec une extension .def qui peuvent être ouverts avec Notepad.exe ou Wordbad.exe. Nous vous déconseillons de le changer au risque de l'indisponibilité ultérieure. Vous pouvez modifier les propriétés de couche, de contact et d'interface en cliquant sur les boutons appropriés, comme illustré à la figure IV-6. De même, vous pouvez ajouter une couche en cliquant sur 'ADD LAYER'

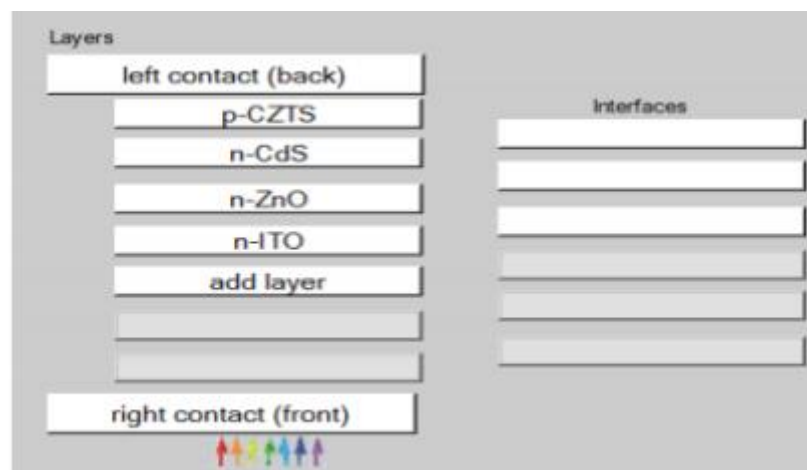


Figure IV-6 Définition de la structure d'une cellule solaire.

#### IV.4.2 Contacts :

Les propriétés de contact peuvent être saisies en cliquant sur le bouton de contact avant ou arrière dans le champ de définition de cellule. Le panneau Propriétés de contact s'ouvre pour les propriétés de contact, comme illustré à la Figure IV-7.

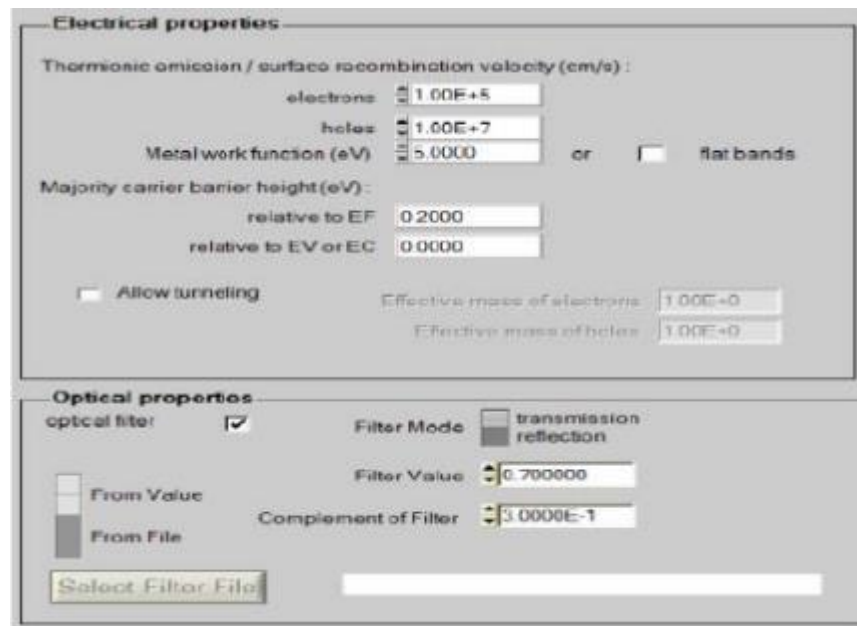


Figure IV-7 : Panneau Propriétés du contact.

Les caractéristiques de contact sont divisées en caractéristiques électriques et en caractéristiques optiques. Les caractéristiques électriques sont définies comme suit :

Taux de recombinaison de surface des électrons libres et des trous.

- Si les contacts ont ou sont idéaux (régime de bande plate).
- Nombreuses barrières porteuses.
- Effet tunnel (si vous voulez l'envisager).
- Pour les propriétés optiques, la transmission ou la réflexion peuvent être définies par valeur ou fichier de données [76].

### IV.4.3 Définition des couches :

Cliquer sur le bouton "add layer" ouvre la fenêtre de la figure IV-8, qui contient divers paramètres pour le matériau à introduire. Ces paramètres peuvent avoir une distribution uniforme ou non uniforme, selon les propriétés physiques du matériau. Dans le premier champ, saisissez le nom de la couche (correspondant au type de dopage). L'épaisseur de la couche est entrée dans le deuxième champ. Le troisième bloc concerne la pureté du matériau et son profil. Le quatrième bloc présente la bande interdite d'énergie, l'affinité électronique, la constante diélectrique, la densité effective des bandes de conduction et de valence, la vitesse thermique des électrons libres et des trous, et la mobilité des électrons et des trous. Enfin, compte tenu du transport des porteurs de charges par effet tunnel, c'est une boîte qui peut additionner la masse effective des électrons et des trous. dans le cas de

Le matériau est une combinaison d'éléments de concentration non uniforme, ce qui peut introduire des changements progressifs dans les paramètres précédents. Le cinquième bloc, la figure IV-9, montre le dopage, le type et la densité. Le dopage peut être introduit même lorsqu'une variabilité graduelle (linéaire, parabolique, etc.) peut être présente. Le sixième bloc définit l'absorption de la couche comme le montre la figure IV-10. L'absorbance peut être introduite sous forme de données et peut être définie dans le modèle analytique fourni par SCAPS. SCAPS fournit différentes données d'absorption pour différents types de semi-conducteurs. Vous pouvez également utiliser d'autres données d'absorbance des semi-conducteurs non disponibles avec SCAPS, tant que l'extension de fichier est la même que celle du fichier d'absorbance fourni par SCAPS.[77]

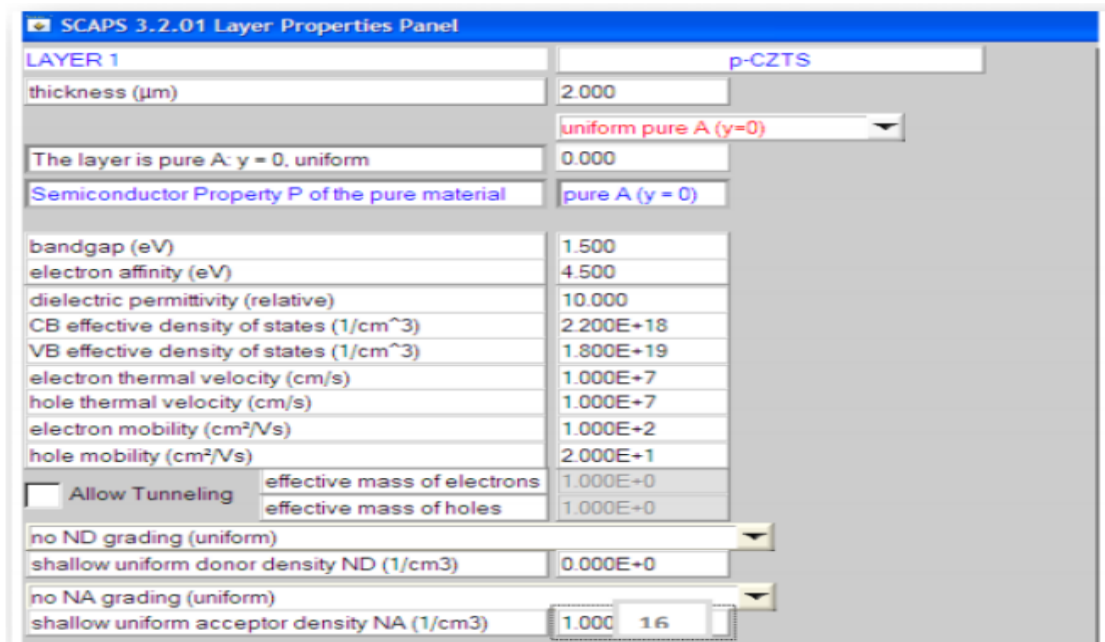


Figure IV-8 : Propriétés de la couche ajoutée



Figure IV-9 : Propriétés de dopage définies.



Figure IV-10 : Modèle d'absorption

La nature des jonctions de volume existantes est indiquée sur le côté droit du panneau Propriétés de la couche dans la Figure IV-11. Il existe toutes sortes de recombinaisons. Directement ou par chute.

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/cm3)	Left (x=0) : 1.000E+15    Right (x=1) : 1.000E+14
Nt peak (1/eV/cm3)	Left (x=0) : 2.821E+15    Right (x=1) : 2.821E+14

Figure IV-11 : Définition types recombinaison présents

Lors de l'introduction d'un bug (piège). Ils peuvent être gaussiens, donneurs, accepteurs, neutres, monovalents ou divalents, uniformes ou hétérogènes, discrets. Vous pouvez également définir des transitions de porteurs de charge entre différents niveaux d'énergie du piège [78].

#### IV.5 Conclusion

SCAPS1D est un logiciel adapté à la simulation numérique unidimensionnelle de dispositifs photovoltaïques. Ce modèle est basé sur la résolution de l'équation de continuité des électrons et des trous et de l'équation de Poisson. Il est très facile à utiliser. Ce chapitre détaille le fonctionnement de cet outil de simulation 1D, les différents modules, les parties qui définissent la structure, et enfin la partie qui affiche les résultats. En raison des avantages de ce logiciel, nous avons décidé d'utiliser SCAPS1D pour simuler la structure classique d'un substrat de cellule solaire basé sur une couche mince de composés CZTS.



Chapitre V:

Simulations de MAGEI3,  
Résultats et discussion

## V.1 Introduction

$\text{MASnGeI3}$  est un matériau sans plomb prometteur pour les applications de cellules solaires. Dans ce métier, les cellules solaires doivent être simulées sur la base des matériaux ci-dessus dans le but d'utiliser les matériaux pour améliorer l'efficacité ETL et HTL différents et des paramètres d'ingénierie.

Dans ce travail cellules solaires simulées et optimisées à l'aide du logiciel SCAPS1D à pérovskite  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnGeI3}$  avec différentes couches de transport de trous (HTMs). Étudiez les principaux effets qui affectent les performances des cellules solaires, tels que les changements d'épaisseur de la couche d'absorption et le matériau constituant la couche HTM.

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

## V.2 Structure et paramètres de la cellule étudiée

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

Notre travail consiste à simuler une cellule solaire à base de  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnGeI3}$  En raison de leurs excellentes propriétés telles qu'une bande interdite idéale, un large spectre d'absorption, un excellent mécanisme de transmission, une fabrication facile sur des substrats flexibles, une adaptation d'espacement, une longue longueur de câble, ils sont électriques, optiques et géométriques. Vous pouvez répartir les paramètres et les simuler pour concevoir le cellule optimale efficacité électrique.

Notre recherche utilise une cellule solaire composée des hétérojonctions suivantes : (PEDOT: PSS/  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnGeI3}$ / PCBM)

La structure typique d'une cellule solaire est basée sur  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnGeI3}$  se compose d'une couche absorbante et d'un dessus de p-type (PCBM) et n- type

(PEDOT: PSS) Il est placé en bas. Comme le montre la figure IV.1.

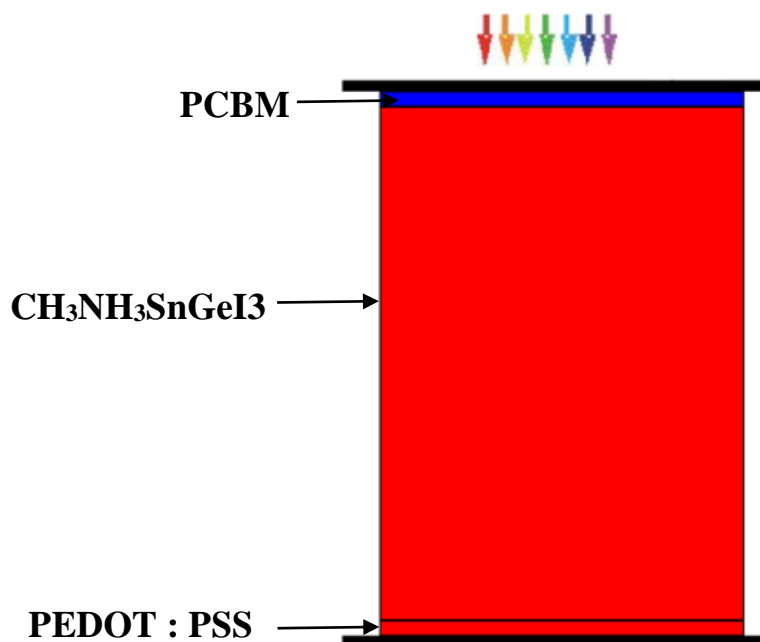


Figure V-1 : Vue simplifiée des cellules solaires utilisées

## V.2.2 Les paramètres du dispositif étudié:

### ❖ Propriétés des différentes couches:

Couche / Propriété	PEDOT: PSS	$MAGeI_3$	PCBM
Épaisseur ( $\mu\text{m}$ )	0.030	1.000	0.030
Bande interdite (eV)	1.600	1.900	2
Affinité électronique (eV)	3.400	3.980	3.900
Permittivité diélectrique	3.000	10.000	3.900
CB densité effective d'états ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1.000\text{E}+22$	$1.000\text{E}+16$	$2.500\text{E}+21$
VB densité d'états effective ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1.000\text{E}+22$	$1.000\text{E}+15$	$2.500\text{E}+21$

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	1.620E+1	2.000E-1
Trou de la mobilité (cm <sup>2</sup> / V.S.)	9.900E-5	1.010E+1	2.000E-1
densité de donneur uniforme peu profonde ND (cm <sup>-3</sup> )	0.000E+0	0.000E+0	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	1.500E+16	1.000E+0

Tableau V-1 : Propriétés des différentes couches (PEDOT: PSS/ CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>SnGeI<sub>3</sub>/PCBM).

❖ **Cellule de base:**

Le tableau V (1 et 2) résume les épaisseurs et les paramètres utilisés pour les différentes couches de la cellule de base examinées

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

Tableau V-2 : épaisseur chaque couche de cellule base étudiée.

### V.3. Alignement des bandes énergétiques

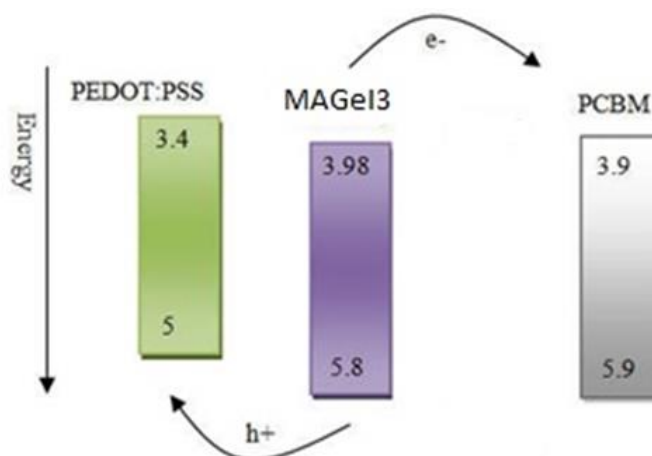


Figure V-2 : Alignement des bandes d'énergie de divers matériaux

### V.4. Simulation par SCAPS

#### V.4.1 Effet de l'épaisseur de couche PEDOT/PSS, CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>GeI<sub>3</sub> et PCBM sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire:

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

##### ✂ Premier cas:

Si l'épaisseur du matériau (PEDOT / PSS) est modifiée de (0,01 à 0,05  $\mu\text{m}$ ), sélectionnez la meilleure propriété et lorsque l'épaisseur du tissu (PEDOT / PSS) atteint la propriété ajoutée elle sera unique au tableaux V(1 et 2).

valeur	Épaisseur ( $\mu\text{m}$ )	eta (%)	Voc (V)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)
1	0.01	1.49	0.71	3.47	60.23
2	0.02	1.49	0.71	3.47	60.23
3	0.03	1.49	0.71	3.47	60.23
4	0.04	1.49	0.71	3.47	60.23

<b>5</b>	<b>0.05</b>	<b>1.49</b>	<b>0.71</b>	<b>3.47</b>	<b>60.23</b>
----------	-------------	-------------	-------------	-------------	--------------

Tableau V-1 : Propriété de couche(PEDOT: PSS)

Nous avons développé à la Tableau V-3, Lors du changement de couche PEDOT / PSS, Il s'avère qu'il n'y a pas de valeur optimale car les caractéristiques photoélectriques sont les mêmes pour toutes les valeurs. Par conséquent, la modification de l'épaisseur de PEDOT / PSS n'affecte pas les caractéristiques photoélectriques. donc toute valeur pour lui comme valeur optimale.

✎ **Deuxième cas:**

Nous changeons aussi, Si l'épaisseur du matériau (CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>GeI<sub>3</sub>) est (0,2-1,2μm), sélectionnez la meilleure propriété et une fois l'épaisseur du tissu (PEDOT / PSD) et (PCBM) ajoutée aux propriétés répertoriées, votre propre épaisseur Installer dans le tableau V-2.

<b>Valeur</b>	<b>Épaisseur(μm)</b>	<b>eta(%)</b>	<b>Voc(V)</b>	<b>Jsc(mA/cm2)</b>	<b>FF (%)</b>
<b>1.00</b>	0.10	3.01	0.83	5.20	69.50
<b>2.00</b>	0.20	4.62	0.84	8.21	66.82
<b>3.00</b>	0.30	5.43	0.84	9.99	64.42
<b>4.00</b>	0.40	5.81	0.84	11.05	62.22
<b>5.00</b>	0.50	5.94	0.84	11.70	60.20
<b>6.00</b>	0.60	5.93	0.84	12.08	58.34
<b>7.00</b>	0.70	5.85	0.84	12.30	56.63
<b>8.00</b>	0.80	5.73	0.83	12.41	55.06
<b>9.00</b>	0.90	5.58	0.83	12.45	53.61

Tableau V-4 : Propriété de couche(CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>GeI<sub>3</sub>)

L'épaisseur optimale de la couche de CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>GeI<sub>3</sub> a été observée à 1  $\mu\text{m}$ . Il a également souligné que le paramètre photovoltaïque diminue à mesure que l'épaisseur augmente. La raison en est que lorsque l'épaisseur de la couche (CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>GeI<sub>3</sub>) augmente, la résistivité du matériau augmente et le mouvement des électrons est supprimé.

Par conséquent, sélectionnez 0,70  $\mu\text{m}$  comme valeur optimale.

### ✎ Troisième cas:

Et enfin, changez l'épaisseur du matériau (PCBM) de 0,01 à 0,05  $\mu\text{m}$ , sélectionnez les meilleures propriétés et installez votre propre épaisseur.

Valeur	Épaisseur( $\mu\text{m}$ )	eta (%)	Voc (V)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)
<b>1.00</b>	0.01	1.50	0.71	3.50	60.25
<b>2.00</b>	0.02	1.49	0.71	3.49	60.23
<b>3.00</b>	0.03	1.49	0.71	3.47	60.23
<b>4.00</b>	0.04	1.48	0.71	3.45	60.23
<b>5.00</b>	<b>0.05</b>	<b>1.47</b>	<b>0.71</b>	<b>3.44</b>	<b>60.22</b>

Tableau V-5 : Propriété de couche(PCBM)

Nous avons également constaté que l'épaisseur optimale de la couche PCBM est de 0,1  $\mu\text{m}$  et que le paramètre photovoltaïque diminue avec l'augmentation de l'épaisseur. Plus l'épaisseur de couche (PCBM) est épaisse, plus la distance entre les deux couches est grande.

Cela rend difficile le déplacement des électrons entre les deux couches. Sélectionnez ensuite 0,1  $\mu\text{m}$  comme valeur idéale.

Et enfin : récupérez les propriétés suivantes :

$$\mathbf{Voc} = 0.83, \mathbf{Jsc} = 12.45, \mathbf{FF} = 53.62, \mathbf{\eta} (\%) = 5.59.$$

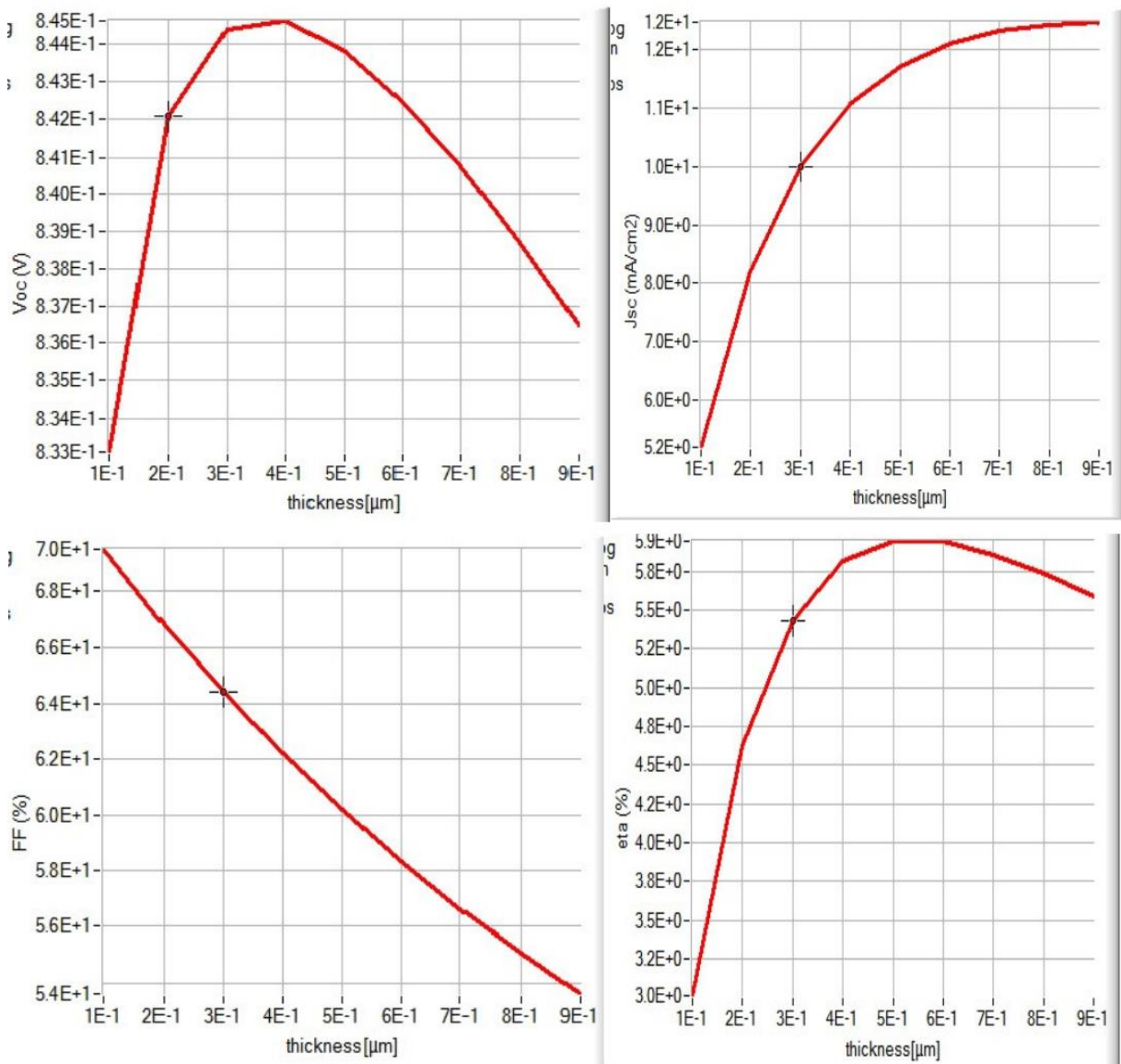


Figure V-3 : Modifications des paramètres photovoltaïques ( $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ ,  $FF$ ,  $\eta$ ) dues aux changements de température

La figure V-3 support solaire associé aux changements d'épaisseur de la couche d'absorption. Il convient de noter que l'épaisseur de la couche absorbant la lumière ne doit pas dépasser la longueur des électrons et des trous pour gérer leur mouvement vers leurs positions respectives. Comme l'épaisseur de la couche d'absorption, l'absorption affecte le nombre de photons de grande longueur d'onde. Cela forme un certain nombre de paires électriques dont la valeur du coefficient d'absorption varie.

### V.4.2 Effet de température sur la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{GeI}_3$ les caractéristiques électriques de la cellule :

Pour améliorer l'efficacité, la structure cellulaire de la pérovskite ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{GeI}_3$ ) 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 ont été calculés et rapportés dans le tableau V-2.

MATERIAL	PARAMETER			
	Voc(V)	Jsc(mAcm <sup>-2</sup> )	FF	eta (%)
CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> GeI <sub>3</sub>	0.83	12.45	53.62	5.59

Tableau V-6 : Different calculated parameters for studied perovskitesolarcell

### V.4.3. Courbedu paramètres photovoltaïques

Après cela, nous avons tracer la courbe de variation du paramètres photovoltaïques ( $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF et  $\eta$  (%) ) des couches  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$ .

#### V.4.3.a. Le courant de court circuit

La figure V-2 montre des courbes I-V mesurées à différentes températures sous un éclairage de 100 mW/cm<sup>2</sup> d'une cellule en silicium PC.

Vous pouvez voir que le courant de court-circuit augmente à mesure que la température augmente. Le comportement thermique de ce dernier est représenté sur la figure. Une augmentation linéaire de  $I_{sc}$  a également été observée à des températures de l'ordre de 250 à 350 K. Le coefficient de température du courant de court-circuit calculé ( $\mu I_{sc} = 0,002 \text{ 1 A / K}$ ) est : Elle est en bon accord avec

celle de De Soto et al [49] (0,00238 A/K) pour la même technique dans les mêmes conditions opératoires.

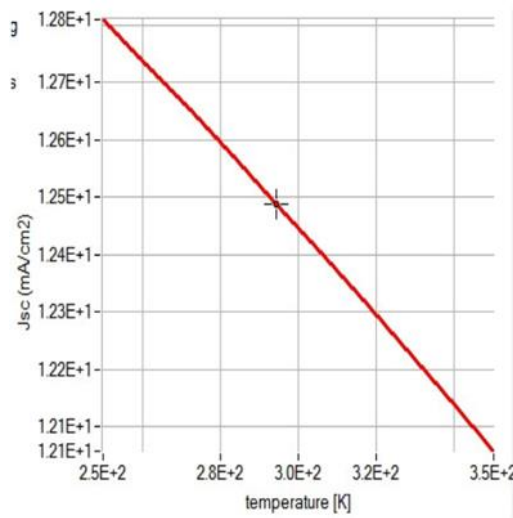


Figure V-4 : Génération de courant de court-circuit ( $I_{cc} \approx I_{ph}$ ) en fonction de la température

Le photocourant ( $I_{ph}$ ) la température d'une cellule solaire augmente généralement légèrement avec l'augmentation de la température. Cette augmentation est due à une diminution de la largeur de la bande interdite ( $E_g$ ) des matériaux semi-conducteurs. Il permet également l'utilisation de certains photons de faible énergie. En conséquence, le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) de la cellule augmente.

Sous un éclairage constant, la variation de ( $I_{cc}$ ) en fonction de la température sur une plage thermique étroite de cellules solaires en silicium polycristallin est très faible et peut ne pas être importante.

#### V.4.3.b. La tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ )

Sur la même figure, vous pouvez voir qu'une augmentation de la température entraîne une diminution de  $V_{co}$ . Comportement thermique du  $V_{co}$  sous éclairage constant. A un éclairement de 100 mW/cm<sup>2</sup>, la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  diminue de l'ordre de 2,1 mV/K avec l'augmentation de la

température. Ceci est en bon accord avec la notation de Singh et al [32]. Pour les cellules solaires au silicium avec  $dV_{co} / dT$  dans l'espace  $[-2.17, -2.07]$  mV/K.

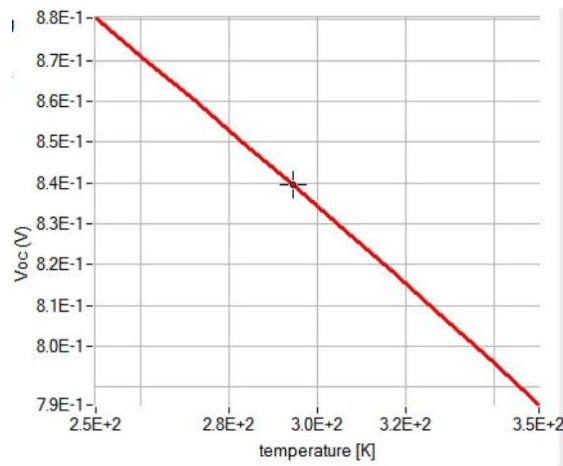


Figure V-5 : Tension en circuit ouvert  $V_{co}$  d'une cellule solaire en polysilicium en fonction de la température

#### V.4.3.c. Le facteur de forme (FF)

Les changements de FF avec des températures dans la gamme 250-350K des cellules solaires en silicium polycristallin sont indiqués. À 100 mW / cm<sup>2</sup> d'éclairage, FF diminue avec l'augmentation de la température. Ceci s'applique à toutes les cellules solaires.

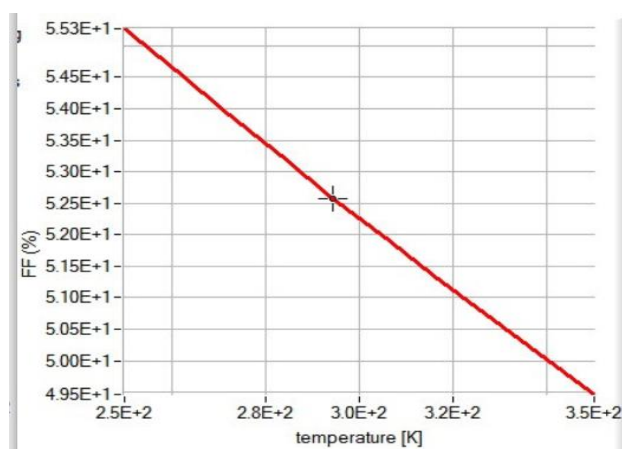


Figure V-6 : Changement de FF lorsque la température de la cellule solaire est dans la plage de 250 350 K

#### V.4.3.e. Le rendement $\eta$ (eta (%))

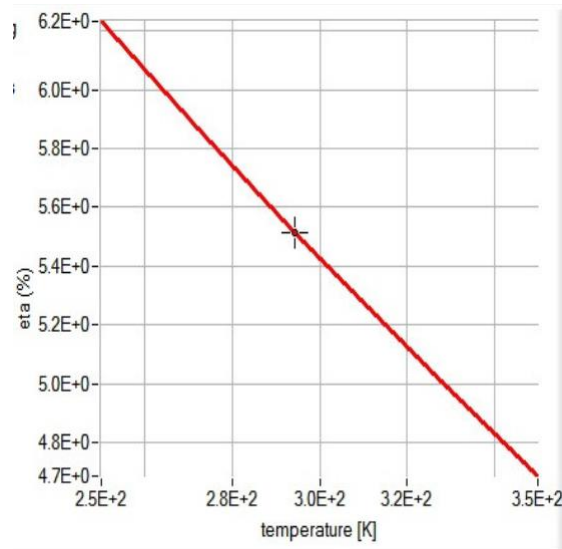


Figure V-7 : Dépendance à la température de l'efficacité de conversion PV  $\eta$  de la cellule solaire

Notez que lorsque la température augmente, l'efficacité des paramètres photovoltaïques diminue.

Cela affecte négativement la température en tant que paramètre photovoltaïque.

#### V.4.4. Courbe courant-tension:

La courbe IV finale peut être obtenue en conservant tous les paramètres améliorés du modèle du concepteur. La forme finale comprend l'épaisseur d'une couche PEDOT/Pss = 0.03  $\mu\text{m}$ ,  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{GeI}_3$  = 0.7  $\mu\text{m}$  et PCBM = 0.03  $\mu\text{m}$ .

$$\mathbf{Voc} = 0.83, \mathbf{Jsc} = 12.45, \mathbf{FF} = 53.62, \mathbf{\eta} (\%) = 5.59.$$

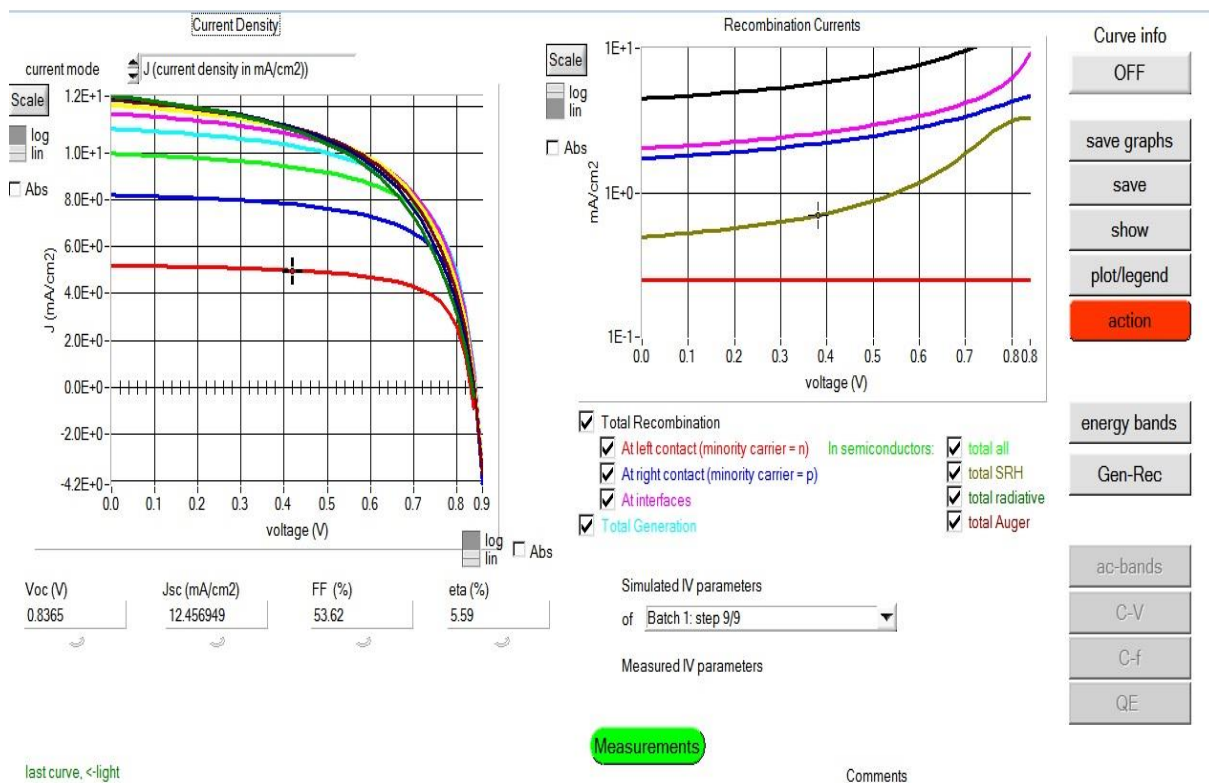


Figure V-8 : Courbe I-V simulée.

## V.5 Conclusion

Des cellules solaires en pérovskite à structure de verre (PEDOT : PSS/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>GeI<sub>3</sub>/PCBM) sont conçues et analysées à l'aide d'un simulateur de capacité de cellule solaire. L'épaisseur et la densité de défauts de la couche absorbante affectent les performances de la cellule solaire, et la concentration de dopage de HTM et ETM affecte les caractéristiques PV.

L'absorbeur avec une épaisseur modérée et peu de défauts montrera les meilleures performances. Les concentrations de dopage HTM, ETM apportent une amélioration significative des paramètres PV.

Simulation de cellules examinées par le programme scaps :

Après optimisation de tous les paramètres et sélection des meilleurs résultats obtenus :

Épaisseur d'absorption de la couche (PEDOT : PSS = 0,03  $\mu\text{m}$  ); (CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>GeI<sub>3</sub> = 0,7  $\mu\text{m}$ ) ; (PCBM = 0,3  $\mu\text{m}$ ) FF (53,62 %) et Voc à côté des valeurs FF (53,62 %) et Voc (0,83 V) À côté de la valeur de (0,83 V) est le rendement de conversion d'énergie. La bonne valeur Jsc de 12,45 mA/cm<sup>2</sup> obtenue avec un faible rendement à 5,59% est due à la bande interdite de la couche CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>GeI<sub>3</sub>.

Enfin, notez que lorsque la température augmente entre (250-350 K), le rendement des paramètres photovoltaïques diminue.



*Conclusion générale*

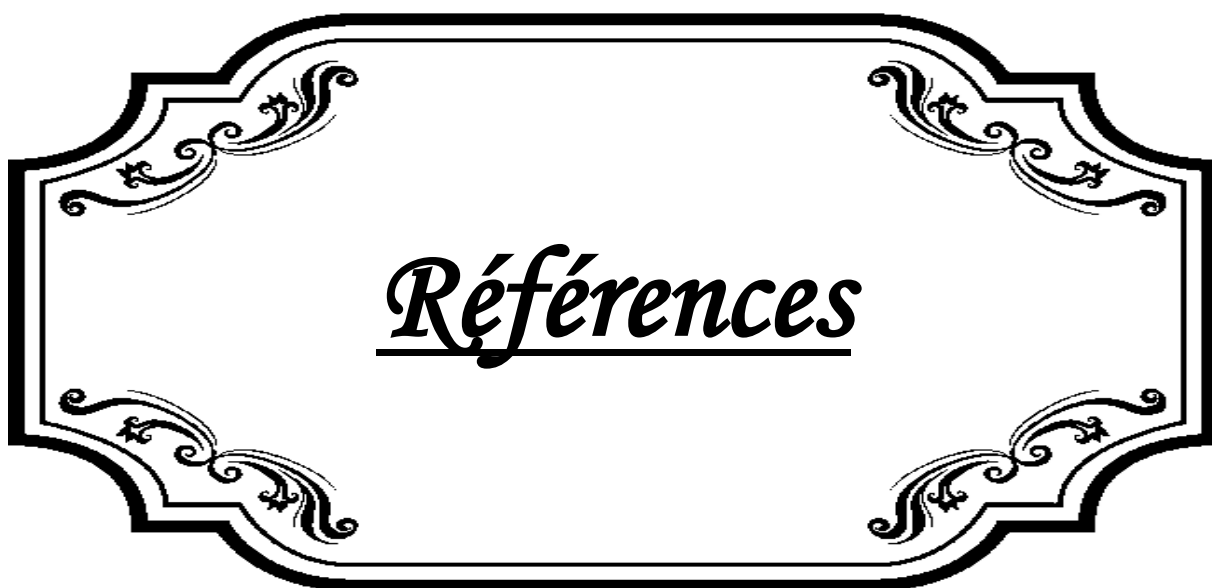
## Conclusion générale

Parmi toutes les technologies photovoltaïques solaires de troisième génération qui ont fait l'objet de recherches au cours des deux dernières décennies, la seule technologie qui a marqué de manière significative l'efficacité de conversion d'énergie est constituée par les cellules solaires basées sur des matériaux structurés à base de pérovskite, par exemple les matériaux hybrides organiques-inorganiques tel que  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{GeI}_3$ .

Pour cela, Nous avons d'abord mené une étude théorique sur le principe de fonctionnement des cellule solaires, leurs caractéristiques électriques, ensuite les paramètres d'une cellule photovoltaïque et les différentes filières et enfin la cellule PV à base du matériau émergent : la pérovskite.

Ce travail est préoccupé par la conception et les analyses de pérovskite à base de plomb modèle de cellule solaire avec l'architecture flexible glass (PEDOT: PSS,  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{GeI}_3$  et PCBM).

Le l'analyse de l'architecture des cellules solaires est réalisée à l'aide du simulateur de capacité de cellules solaires (SCAPS), C'est un ordinateur outil logiciel et est bien adapté aux analyses des homo et hétérojonctions, des multi-jonctions et de la barrière de Schottky dispositifs photovoltaïques. 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, il est utilisé pour optimiser les différents paramètres tels que l'épaisseur, la densité de défauts de l'absorbeur couche, concentrations de dopage (Na) du matériau de transport d'électrons (ETM) et du matériau de transport de trous (HTM).



Références

## Références

- [1]. LATRECHE Abdelhakim,"PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION, Option Physique des Matériaux ". Université El Bachir El Mohamed Université,2014.
- [2] Z. Liu, M. Osamura, et Effect of a Fe<sub>3</sub>Si β- , J. of Crystal Growth 307 (2007) 82-86.
- [3] Formation de bandes d'énergie par interaction de niveaux atomiques (2005EncyclopediaUniversalis France S.A.).
- [4] Julien Bok, « semiconducteurs », EncyclopediaUniversalis, Paris, 2014.
- [5] [wikimedia.org/wikipedia/commons/3/38/Silicon2.jpg](http://wikimedia.org/wikipedia/commons/3/38/Silicon2.jpg).
- [6] [http://www.semiwafer.com/images/20170913\\_100824.jpg](http://www.semiwafer.com/images/20170913_100824.jpg).
- [7] Tararbit Abderahmane, (Si, Ge, SiC, GaAs, NGe), Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
- [8] H. Mathieu, physique des semiconducteurs et des composant électroniques,éditionDunod .Paris (2009).
- [9] Alain Chovet, Pascal Masson, Cours de Semi-conducteurs
- [10] Francis, Physique et technologie des semiconducteurs, V18,1995.
- [11] A.ABDELALI, l'étude de nanoagrégatssemiconducteurs de ZnS, thèse de magister, université CONSTANTINE
- [12] F.BOUROUBA, Modélisation des contacts semiconducteur àbarrière inhomogène, département de Physique (Sétif).
- [13] Journal of Electron Devices, Vol. 5, 2007, Etude de la jonction PN d'unsemi-conducteur.

- [14] I. Sari-Ali, Etude de la jonction PN d'un semiconducteur, Université Abou-BakrBelkaïd, Tlemcen, Journal of ElectronDevices, Vol. 5, 2007, pp. 122-126.
- [15] I. Sari-Ali, B. Benyoucef, B. Chikh-Bled, Etude de la jonction PN d'un semiconducteur à l'équilibre thermodynamique, Université Abou-BakrBelkaïd, Tlemcen, ElectronDevices, Vol. 5, 2007, pp. 122-126.
- [16] Philippe ROUX, Théorie des semiconducteurs, jonctionPN au silicium, 2008.
- [17] Honsberg C, Bowden S. PVCDROM. Disponible sur <http://pvc-drom.pveducation.org/index.html>, 2009.
- [18] Green, « Solar Cells », s Ed. (1982).
- [19] S. Mohamed « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques » 2007.
- [20] American Society. Solar, spectral irradiance : A.m 1.5. 2017.
- [21] M. Petibon « nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » Université d Toulouse, 2009.
- [22] DIB W. « Modélisation Des Structures Photovoltaïques : Aspects Fondamentaux Et Appliqués » Tlemcn, 2010/2011.
- [23] [www.pvresources.com](http://www.pvresources.com)
- [24] Adolf and al, Crystalline ls, John Wiley & Sons, 1997
- [25] S. Quoizola, valeur de silicium soporeux pour report sur Substrats application photovoltaïque bas cout, Ecole Doctorale : Electronique, de Lyon, N d'ordre :( 03ISAL0078) 2003

- [26] J. F. Lelievre, « Elaboration de SiN<sub>x</sub> : H par PECVD : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour application photovoltaïques ». Institut National, (2007).
- [27] Labouret, A (2006). Energie photovoltaïque (Dunod).
- [28] Bagher, A. M Mohsen, M. (2015). solar cells and application, 3(5), 94-113.
- [29] Statistics, (2016). International Renewable Energy Agency
- [30] MOSTAFA KARRA, ETUDE ET SIMULATION DE CELLULES PHOTOVOLTAIQUES.
- [31] <http://lyc.mgenvxix-ingre.tice.ac-orleans>.
- [32] H. Chenoufi' Optimisation du procédés technologiques de réalisation d'une cellule solaire, université d Batna-2005.
- [33] Labouret, A (2006). Energie solaire photovoltaïque. Dunod.
- [34] Labouret, A., & Viloz, M. (2003). Energie solaire photovoltaïque: Dunod.
- [35] A .Abaidia, A. Dahmane, « Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction : a-Si:H(n)/c-Si(p) », en Génie Electrique, Université de Oargla, 2016.
- [36]. Mr. HOUARI, propriétés Structurales, Optoélectroniques et Thermodynamiques. UNIVERSITE ABDELHAMIDBADIS de MOSTAGANEM, 2019.
- [37]. E. C. C. d, "Properties and applications of pérovskite proton conductors, vol. 385-394, 2010
- [38] Bahalla A Roy R. 2000 — The perovskite structure — Material Research 4 3-26.
- [39] Gupta K. M., 2015 — Processes and Applications | Scrivener

---

PublishingMA America.

[40] J. Scott "Oxygen-vacancy ordering as a fatigue mechanism in perovskiteferroelectrics," 2000.

[41] J. J. Urban "Synthesis of single-crystalline perovskitenanorods composed of barium titanate and strontium titanate," American Chemical, vol. 124, pp. 1186-1187, 2002.

[42] A. Dejnneka, "perovskite ferroelectric tuned by thermal strain."

[43] S. A. Khan, "Piezoelectric and ferroelectric properties of lead-free Ga-modified 0.65 BiFeO<sub>3</sub>–0.35 BaTiO<sub>3</sub> ceramics by water quenching process, vol. 541, pp. 54-60, 2019.

[44] R. Song, Y "High Temperature Stability and Mechanical Quality Factor of Donor-Acceptor Co-Doped BaTiO<sub>3</sub> Piezoelectrics," Available at SSRN 34069252, 2019.

[45] B. Garbarz-Glos G. Klimskowski, "Effects of CuOdoping on structure, microstructure and dielectric properties of BaTiO<sub>3</sub>–PbTiO<sub>3</sub> solid solution, vol. 196, pp. 70-77, 2019.

[46] R. Gotardo, G. Sanntos, "Dielectric, magnetic and structural characterizations in Mn doped 0.9 BiFeO<sub>3</sub>-0.1 BaTiO<sub>3</sub> compositions, vol. 534, pp. 95-102, 2018.

[47]. Emmanuelle, des excitons sur mesure pour l'optoélectronique'Laboratoire-ENS Paris-Saclay.

[48]. J. Even, Rev. B 86, 205301 (2012).

[49]. H. DiabC. Violar, G. Bouchez, V.L.R. Jacques, A. Tejeda,. Chem. Lett. 7, 5093–5100 (2016).

- [50] Xiangye Liu et al. 2015 — revolutionary progress in photovoltaics| Inorganic 21315-335.
- [51] Nam-Gyu Park 2015 — an emerging photovoltaic technology| 18 (2) 65-75.
- [52] Pena M. A. & Fiersro 2001 —Chemical structures and performance of perovskiteoxides| 1981-2017.
- [53] Moller c. 1958 — CæsiumpIumbohalides| Nature 182 1436.
- [54] Giustino Feliciano 2018 —The geometric PNAS 15 (21) 53987-5402.
- [55] Frost J. 2014 —Atomistic Origins of High- Nano Letters 14 2584-2560.
- [56] Grinberg I. et al. 2013 — 503 509-512.
- [57]. Eras, MOrganic-Inorganic Heterostructure El Device Using a Layered Perovskite. Appl. Phys. Lett. 1994, 65 (6), 676–678.
- [57]. Chondroudís, K.; Kagan, COrganic – InorganicElectronics. IBMJ.RES.. 2001, 45 (1), 29–45.
- [58]. Tan, Z.-K.; Deschler, F.; Price, M.; Emitting Diodes Based on etal Halide Perovskite. Nat. Nanotechnol. 2014, 9 (9), 687–692.
- [59]. Kumawat, N Kabra, D Diodes Based on Organometallic Halide Perovskites: Structural . ACS Photonics 2015, 2 (3), 349–354.
- [60]. Li, G.; Tan Light-on NanocrystallinePerovskite in a Dielectric Poer Nano Lett. 2015, 15 (4), 2640–2644.
- [61]. Gao, J. Polymer Electrochemical Cells—RecentFuture Trends. Curr. Opin. Electrom. 2018, 7 (sd), 87–94.
- [62]. Meier, S. BA.; Roldán-Carmona, C.; Ortí, E.; Bolink, H. J. Light-Emitting:

Rece Prospects. Mater. Today 2014, 17 (5), 217–223.

[63]. Kondo, T.; Biexciton Lasing in the Layered Commun. 1998, 105 (4), 253-255

[64] Cunningham Nick PRICE.COM renewables-close-fossil-fuels-challenging-

[65] BoschlooGerrit 2017 —Simple-additive in cobalteelectrolyte the efficiency - sensitized solar .

[66]. KANOUN applications photovoltaïques \_ ‘ UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEN, 2019.

[67] T. Minemoto solar cells,|| Journal of applied physics, vol. 116, no. 5, p. 054505, 2014.

[68] Lee, J. Teuscher, —Efficient hybrid solar cells,|| 338, no. 61607, pp. 643–62847, 2012.

[69] T. Minesmoto M.s Mudrata, —Device modeling, Journal of applied physics, vol. 116, no. 5, p. 054505, 2014.

[70]. M. A. Gdreen, aA. Ho-Baillie, and H. J. Snasith, —The emeeenceNature photodnics, vol. 8, no. 7, p. 506, 2014.

[71] T. Minedmoto l. Musrata, —Device modeling,|| Journal of applied physics, vol. 116, no. 5, p. 0524505, 2014.

[72] Waneg Q. et al. 2019 —Enhancement in lifespan EnvironmentalScience 12, 865-8286.

[73]. M. Budrgelman, Modelling polycrystalline semiconductor 361 (2000) 527-532.

[74]. Ddecock, S. Khselifi, M. BModelling multivalent, 519 (2011) 7481-7484.

[75].M.Burgdelman Marleein, Analysis of graded band, Valencia, 2008, pp. 2151-2155.

[76]. J. Verschraegen, solar cells in SCAPS, Solid Films, 515 (2007) 62276-621079.

[77]. M. Burgelman, P. Nollet, Modelling of polycrystalline thin film solar cells Conversion, Osaka, 2003, pp. 487-490.

[78] M. Burgelman, NumericalPhotovoltaic Conference, WashingtonDC, 1996, pp.901-904.

## Résumé

Dans ce présent travail, nous rapportons une modélisation numérique de la pérovskite à base de tri-iodure de méthylammonium germanium cellules solaires à l'aide du programme desimulation 1D-SCAPS. Pour améliorer les performances de l'appareil, l'amélioration de la lastructure du dispositif et les matériaux de transport d'électrons et de transport de trous sont le moyen efficace. En conséquence, ce L'étude est principalement axée sur l'exploration de matériaux de transport de trous (HTM) potentiellement très stables. Dans ce contexte, on a étudié l'influence de plusieurs paramètres physiques qui contribuent à améliorer leurs rendements. On s'est intéressé plus particulièrement à étudier l'effet de l'épaisseur des couches pérovskite et HTM, l'effet de la température, l'effet de la densité des défauts et de la concentration de la couche pérovskite sur les caractéristiques de la cellule solaire.

**Mots clés :** cellule solaire, température, épaisseur, simulation.

## Abstract

In this present work, we report a numerical modeling of perovskite based methylammonium germanium tri-iodide solar cells using the 1D-SCAPS simulation program. To improve the performance of the apparatus, improving the structure of the device and the electron transport and hole transport materials is the effective way. As a result, this study is primarily focused on the exploration of potentially very stable hole transport materials (HTMs). In this context, we studied the influence of several physical parameters that help to improve their power efficient. We were particularly interested to study the effect of the thickness of the perovskite and HTM layers, the effect of temperature, the effect of the density of the defects and the concentration of the perovskite layer on the characteristics of the studied solar cells.

**Key words:** solar cell, temperature, thickness, simulation.

## ملخص

في هذا العمل الحالي ، أبلغنا عن نمذجة عددية للخاليا الشمسية ثنائية يوديد الميثيل الأمونيوم الجرمانيوم القائمة على لتحسين أداء الجهاز ، فإن تحسين بنية الجهاز ونقل الإلكترون ومواد SCAPS-D. البيروفسكايت باستخدام برنامج محاكاة نقل الفتحات هي الطريقة الفعالة. نتيجة لذلك ، تركز هذه الدراسة بشكل أساسي على استكشاف مواد نقل الحفرة التي يحد، بما في ذلك المواد العضوية وغير العضوية ، ودراستها (HTMs) . في هذا السياق، درسنا تأثير العديد من العوامل الفيزيائية التي تساعد على تحسين أدائها. كنا مهتمين بشكل خاص بدراسة تأثير سمك طبقات البيروفسكايت و HTM ، وتأثير درجة الحرارة ، وتأثير كثافة العيوب وتركيز طبقة البيروفسكايت على خصائص طبقة الخاليا الشمسية.

**الكلمات المفتاحية:** الخلية الشمسية، درجة الحرارة، السمك، المحاكاة.