



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

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
électronique  
Systèmes embarqués électroniques

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :  
**Troudi Ikram**

Le : [Click here to enter a date.](#)

## Simulation numérique d'une cellule solaire Tandem (4T) Pérovskite/Si

---

### Jury :

|      |                       |     |                      |            |
|------|-----------------------|-----|----------------------|------------|
| Mr.  | BENAKCHA ABDE ELHAMID | Pr  | Université de Biskra | Président  |
| Mr.  | BAKHOUCHE Khaled      | MCA | Université de Biskra | Examineur  |
| Mdm. | TERGHINI Ouarda       | MCA | Université de Biskra | Rapporteur |

---

## Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié les performances de cellules solaires tandem 4T à base de matériaux pérovskite et silicium, à l'aide d'un simulateur SCAPS.

L'objectif principal est d'exploiter au maximum le spectre solaire pour améliorer les performances de ces deux cellules en déterminant les paramètres optimaux pour leur fonctionnement. Dans ce contexte, de nombreux facteurs physiques contribuent à améliorer ses rendements. Nous nous intéressons particulièrement à l'étude de l'effet de l'épaisseur de la couche absorbante de pérovskite et de silicium.

**Les mots clés :** les cellules solaires, Cellules tandem, pérovskite, simulation, SCAPS

## ملخص

في هذا العمل ، درسنا أداء الخلايا الشمسية الترادفية ( T4 ) بناءً على مواد البيروفسكايت والسيليسيوم ، باستخدام جهاز محاكاة SCAPS.

الهدف الرئيسي هو تحقيق أقصى استفادة من الطيف الشمسي لتحسين أداء هاتين الخليتين من خلال تحديد المعلمات المثلى لتشغيلهما. في هذا السياق ، تساهم العديد من العوامل المادية في تحسين غلاتها. نحن مهتمون بشكل خاص بدراسة تأثير سماكة الطبقة الماصة من البيروفسكايت والسيليسيوم.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الشمسية ، الخلايا الترادفية ، البيروفسكايت ، المحاكاة ، SCAPS

# إهداء

إلى والديّ الأعتاء شكرًا على كل الدعم والحب والثقة و التضحيات التي قدمتموها  
إلي في مشواري الدراسي وكل دعواتكم لي بالتوفيق وأتمنى أن أكون قد أدبت  
الأمانة كما يجب . قد يكون العمل المتواضع تحقيقًا لرغباتكم المصاغة جيدًا وثمره  
الخاص بكم.

كما اهدي هذا العمل المتواضع إلى صديقة طفولتي " هاجر رحال " رحمها الله  
كانت تتمنى الالتحاق بصفوف الجامعة ولكن شاءت الأقدار أن تنتقل إلى جوار ربها  
قبل تحقيقها لذلك

" اللهم ارحمها واغفر لها واجعل قبرها روضه من رياض الجنة"

و إلى أخواتي الأعتاء " زهرة, ناريمان, جمانة وسلمى " ،أنا ممتن جدًا لكم و  
أشكركم لوجودكم وتشجيعكم ومساعدتكم التي لا تقدر بثمن

كما لا أنسى الإنسانة الداعمة لي في مشواري الجامعي خاصة " نوال حيزي " كل  
كلمات الحب والتقدير

إلى رفقاء دربي " وفاء, شيماء, مباركة, لبنى, أسماء, حليلة, أماني, اميمة, سمية,  
جميلة, رانيا, نصيرة ... " شكرًا على دعمكم المستمر لي .

---

# Remerciements

*Avant tout, nous voudrions remercier Dieu de m'avoir accordé force et courage dans ce travail.*

*Nous tenons à adresser nos sincères remerciements:*

*Prof. Ouarda Terghini*

*Qui a fait d'énormes efforts, avec ses informations, ses conseils, sa patience, son sens, face à tous les obstacles, et ses observations précises*

*Nous tenons également à remercier les membres du jury d'avoir veillé à ce que cette thèse soit corrigée et discutée*

*Et tous les professeurs du département électronique qui ont encadré mon parcours académique*

*Mes plus sincères remerciements à tous ceux qui  
Contribuez à la production de ce message.*

*Je suis tellement reconnaissant à ma famille pour  
Encouragement, confiance et soutien moral*

---

# SOMMAIRE

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Résumé</i>  |           |
| <i>Dédicaces</i>   |           |
| <i>Remerciements</i>   |           |
| <i>Liste des figures</i>   |           |
| <i>Liste des tableaux</i>  |           |
| <i>Liste des Symboles et abréviations</i>                                    |           |
| <b>Introduction Générale</b>   | <b>1</b>  |
| <b>Chapitre I : Concept théorique et généralité sur les cellules solaire</b> |           |
| <b>I.1.Introduction</b>  | <b>3</b>  |
| <b>I.2.La physique des semi-conducteurs</b>                                  | <b>3</b>  |
| <b>I.2.1 Les différents types de semi-conducteurs</b>                        | <b>3</b>  |
| I.2.1.1 Les semi-conducteurs intrinsèques                                    | <b>3</b>  |
| I.2.1.2 Les semi-conducteurs extrinsèques                                    | <b>3</b>  |
| I.2.1.3 équation de bas du semi-conducteur                                   | <b>3</b>  |
| a) Equation de poisson   | <b>4</b>  |
| b) Equation de continuité  | <b>4</b>  |
| c) Equation de transport   | <b>4</b>  |
| <b>I.3 Phénomènes de génération / Recombinaison</b>                          | <b>5</b>  |
| <b>I.3.1 Génération optique</b>  | <b>5</b>  |
| I.3.1.1 Coefficient d'absorption   | <b>6</b>  |
| I.3.1.2 Le coefficient de réflexion  | <b>6</b>  |
| <b>I.4 Mécanismes de recombinaison</b>                                       | <b>6</b>  |
| I.4.1 La recombinaison radiative   | <b>7</b>  |
| I.4.2 Recombinaison Auger  | <b>8</b>  |
| I.4.3 Recombinaison SRH (Schokley-Read-Hall)                                 | <b>9</b>  |
| I.4.4 Recombinaison en surface   | <b>10</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>I.5 Généralités sur les cellules solaires</b>                            | <b>10</b> |
| <b>I.5.1 Spectre solaire</b>  | <b>11</b> |
| <b>I.5.2 La cellule solaire</b>   | <b>12</b> |
| I.5.2.1 Historique  | <b>13</b> |
| I.5.2.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque             | <b>13</b> |
| I.5.2.3 Schéma équivalent d'une cellule solaire                             | <b>14</b> |
| I.5.2.4 Caractéristique courant - tension (I-V)                             | <b>15</b> |
| I.5.2.5 Paramètre des cellules photovoltaïques                              | <b>16</b> |
| a) Courant de court-circuit $I_{cc}$  | <b>16</b> |
| b) Tension de circuit-ouvert, $V_{co}$                                      | <b>16</b> |
| c) Puissance maximale $P_m$   | <b>16</b> |
| d) Facteur de forme FF  | <b>17</b> |
| e) Le rendement $\eta$  | <b>17</b> |
| f) Rendement quantique de la cellule QE                                     | <b>17</b> |
| <b>I.5.3 Les pertes interne et externe</b>                                  | <b>18</b> |
| a) L'ombrage  | <b>18</b> |
| b) Poussière et brouillard  | <b>18</b> |
| c) Température  | <b>18</b> |
| <b>I.6 l'état de l'art sur les photovoltaïques</b>                          | <b>19</b> |
| <b>I.6.1 Les technologies de cellules photovoltaïques et leur rendement</b> | <b>19</b> |
| I.6.1.1 Cellules solaires nano technologiques                               | <b>19</b> |
| a) Définition   | <b>19</b> |
| b) La nanotechnologie pour fabriquer des cellules solaires                  | <b>19</b> |
| c) Haute efficacité de la nouvelle technologie                              | <b>19</b> |
| I.6.1.2 Cellules solaires nocturnes   | <b>20</b> |
| a) Technologie des cellules solaires nocturnes                              | <b>20</b> |
| I.6.1.3 technologie demi-cellule  | <b>21</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| a) Définition   | 21        |
| b) Conception de panneau à demi-cellule   | 21        |
| <b>I.7 cellules solaires multi jonctions</b>  | <b>22</b> |
| I.7.1 Principe des multi-jonctions  | 23        |
| <b>I.8 Les filières photovoltaïques</b>   | <b>24</b> |
| <b>I.8.1 Cellule solaire du Première Génération à base de silicium cristallin</b>                 | <b>25</b> |
| a) Les cellules à base de Si monocristallin   | 25        |
| b) Les cellules à base de Si multi cristallin   | 25        |
| <b>I.8.2 Cellule solaire du Deuxième Génération (couche minces)</b>                               | <b>26</b> |
| a) Les cellules à base de Silicium Amorphes   | 26        |
| b) Les cellules à base de tellure de Cadmium (CdTe)   | 26        |
| c) Les cellules à base de Cuivre indium sélénium (CIS) / Cuivre indium Gallium sélénium (CIGS)    | 26        |
| d) Les cellules à base de CZTSSe  | 26        |
| <b>I.8.3 Cellule solaire de la Troisième génération</b>   | <b>27</b> |
| a) La filière des cellules organiques   | 27        |
| b) La filière des pérovskites   | 27        |
| <b>I.9 Pérovskite</b>   | <b>28</b> |
| I.9.1 Structure d'une cellule photovoltaïque a Pérovskite   | 30        |
| I.9.2 Cellule photovoltaïque pérovskite   | 30        |
| I.9.3 Cellules tandem   | 30        |
| I.9.3.1 pérovskite tandem évolution   | 31        |
| I.9.3.2 Configurations en tandem  | 31        |
| a) Tandem 4T avec connexion électrique indépendante aux deux cellules                             | 32        |
| b) Tandem connecté en série 2T  | 32        |
| c) Tandem série-parallèle   | 32        |
| d) Tandem réfléchissant avec réflecteur IR placé sur la cellule inclinée à bande interdite élevée | 32        |
| I.9.3.3 Empilement mécanique (4T)   | 33        |

|  |           |
|--|-----------|
| I.9.3.4 Cellule tandem pérovskite/Si   | 33        |
| <b>I.10 Conclusion</b>   | <b>33</b> |
| <b>CHAPITRE II : Le simulateur SCAPS</b>   |           |
| <b>II-1 Introduction</b>   | <b>34</b> |
| <b>II.2 Logiciel SCAPS</b>   | <b>34</b> |
| II.2.1 Interface du logiciel SCAPS   | 35        |
| <b>II.3 Fenêtre de conception du dispositif (Set Problem )</b>                   | <b>37</b> |
| <b>II.4 Fenêtre de résultat</b>  | <b>37</b> |
| <b>II.5. Conclusion</b>  | <b>41</b> |
| <b>Chapitre III : Résultats de simulation</b>                                    |           |
| <b>III.1 Introduction</b>  | <b>42</b> |
| <b>III.2 Étapes de conception pour la cellule solaire Pérovskite / Si Tandem</b> | <b>42</b> |
| <b>III.3 Méthodes et Matériels</b>   | <b>43</b> |
| <b>III.4 Le spectre solaire utilisé</b>  | <b>44</b> |
| <b>III.5 Cellule solaire Pérovskite individuelle</b>                             | <b>45</b> |
| III.5.1 Présentation de la structure   | 45        |
| III.5.2 Diagramme des bandes d'énergie   | 46        |
| III.5.3 Résultats des simulations et discussions                                 | 46        |
| III.5.4 Caractéristique J-V  | 47        |
| III.5.5 Efficacité quantique   | 47        |
| <b>III.6 Cellule solaire Si individuelle</b>                                     | <b>49</b> |
| III.6.1 Présentation de la structure   | 49        |
| III.6.2 Diagramme des bandes d'énergie   | 49        |
| III.6.3 Résultats des simulations et discussions                                 | 49        |
| III.6.4 Caractéristique J-V  | 50        |
| III.6.5 Efficacité quantique   | 50        |
| <b>III.7 Simulation de la cellule tandem pérovskite/Si empilée mécaniquement</b> | <b>51</b> |
| III.7.1 Simulation de cellule en silicium inférieure par spectre AM 1.5G filtré  | 51        |



---

|   |           |
|---|-----------|
| III.7.1.1 Résultats des simulations et discussions  | 51        |
| III.7.1.2 Caractéristique J-V   | 51        |
| III.7.2 la cellule tandem pérovskite/Si   | 52        |
| III.7.2.1 Résultats des simulations et discussions  | 52        |
| III.7.2.2 Caractéristique J-V   | 53        |
| <b>III.8 Cellule solaire tandem optimisée</b>   | <b>53</b> |
| III.8.1 Calcul du spectre filtré de la sous-cellule inférieure à différentes épaisseurs de couche pérovskite supérieure | 53        |
| III.8.2 Point de correspondance actuel (Current Matching)   | 54        |
| III.8.3 Résultats de simulation et discussions pour le point (current matching)   | 54        |
| III.8.4 Caractéristique J-V   | 55        |
| <b>III.9 Conclusion</b>   | <b>55</b> |
| <b><i>V. Conclusions Générale</i></b>   | <b>58</b> |
| <b>Bibliographie</b>  | <b>60</b> |

---

# liste des Figures

## Chapitre I

| Les figures        | Le titre   | La page   |
|--------------------|--|-----------|
| <b>Figure. I.1</b> | Schéma des principaux processus de recombinaisons dans les semi conducteurs . Les directions des flèches indiquent la transition des électrons | <b>7</b>  |
| <b>Figure I.2</b>  | Schéma d'une recombinaison radiative   | <b>7</b>  |
| <b>Figure I.3</b>  | Influence du dopage sur les durées de vie Auger et SRH dans le volume du silicium monocristallin   | <b>8</b>  |
| <b>Figure I.4</b>  | Schéma d'une recombinaison Auger faisant intervenir deux électrons de la bande de conduction et un trou de la bande de valence                 | <b>9</b>  |
| <b>Figure I.5</b>  | Schéma d'une recombinaison SRH faisant intervenir un défaut à l'énergie $E_t$  | <b>9</b>  |
| <b>Figure I.6</b>  | Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM  | <b>12</b> |
| <b>Figure I.7</b>  | Irradiante ou spectre solaire à la surface de l'atmosphère terrestre (AM0) et au sol (AM1.5D ETAM1.5G)   | <b>12</b> |
| <b>Figure I.8</b>  | Historique de la cellule solaire   | <b>13</b> |
| <b>Figure I.9</b>  | Schéma montrant le fonctionnement de la cellule solaire  | <b>14</b> |
| <b>Figure I.10</b> | Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque  | <b>14</b> |
| <b>Figure I.11</b> | la caractéristique I-V pour une cellule photovoltaïque   | <b>15</b> |
| <b>Figure I.12</b> | Comment connecter la cellule solaire   | <b>21</b> |
| <b>Figure I.13</b> | boîtes de jonction   | <b>21</b> |
| <b>Figure I.14</b> | Exemple d'une cellule multi jonctions  | <b>22</b> |
| <b>Figure I.15</b> | Evolution de la conversion du spectre solaire par une cellule mono jonction, tandem et triple jonction pour une MJ GaInP/GaAs/Ge               | <b>22</b> |
| <b>Figure I.16</b> | Efficacité et développement de différents types de cellules solaires depuis 1975   | <b>24</b> |
| <b>Figure I.17</b> | Organigramme représentant les différentes générations de cellules photovoltaïques  | <b>25</b> |
| <b>Figure I.18</b> | La pérovskite  | <b>28</b> |

|                    |  |           |
|--------------------|--|-----------|
| <b>Figure I.19</b> | Structure hybride de la pérovskite<br>Tirée de (Gheno, Vedraïne, Ratier, & Bouclé, 2016)   | <b>29</b> |
| <b>Figure I.20</b> | Structure d'une cellule photovoltaïque à pérovskites<br>(A) structure et (B) Image MEB montrant l'architecture d'une cellule solaire à hétérojonction planaire à base de matériaux pérovskites | <b>29</b> |
| <b>Figure I.21</b> | Évolution de l'efficacité des cellules solaires impliquant des pérovskites inorganiques-organiques aux halogénures métalliques   | <b>31</b> |
| <b>Figure I.22</b> | Configurations en tandem avec différents degrés d'indépendance électrique/optique.   | <b>31</b> |
| <b>Figure I.23</b> | Schéma de principe d'un assemblage mécanique de deux cellules GaAs et GaSb d'après   | <b>32</b> |
| <b>Figure I.24</b> | Cellule tandem Si/pérovskite   | <b>33</b> |

## Chapitre II

| <b>Les figures</b> | <b>Le titre</b>   | <b>La page</b> |
|--------------------|---|----------------|
| <b>Figure II.1</b> | Fenêtre d'exécution « action panel » du logiciel SCAPS  | <b>35</b>      |
| <b>Figure II.2</b> | La section (1) est le "point de fonctionnement"   | <b>35</b>      |
| <b>Figure II.3</b> | La section (2) de "Éclairage"   | <b>36</b>      |
| <b>Figure II.4</b> | section (3) tels que le point de départ de la polarisation appliquée  | <b>36</b>      |
| <b>Figure II.5</b> | La section (4) « Set problem » car il considère le lieu de travail et la conception de la cellule                   | <b>36</b>      |
| <b>Figure II.6</b> | La section (5) présente également certaines fonctionnalités pour le calcul  | <b>37</b>      |
| <b>Figure II.7</b> | La section (6) est de voir les résultats du calcul et d'afficher les courbes des simulations cellulaires réalisées. | <b>37</b>      |
| <b>Figure II.8</b> | Fenêtre de conception du dispositif (Set Problem )  | <b>28</b>      |
| <b>Figure II.9</b> | la section représente la définition des caractéristiques de la cellule solaire                                      | <b>28</b>      |

|                     |  |           |
|---------------------|--|-----------|
| <b>Figure II.10</b> | la section en nous montrant le schéma de travail et la forme de la cellule étudiée                           | <b>55</b> |
| <b>Figure II.11</b> | des boutons pour enregistrer le fichier de définition dans la bibliothèque SCAPS ou une bibliothèque externe | <b>55</b> |
| <b>Figure II.12</b> | Fenêtre de calcul des résultats  | <b>56</b> |
| <b>Figure II.13</b> | Vérifier la case des résultats, des paramètres et des courbes  | <b>56</b> |
| <b>Figure II.14</b> | Fenêtre des résultats  | <b>57</b> |

### ✚ Chapitre III

| <b>Les figures</b>  | <b>Le titre</b>   | <b>La page</b> |
|---------------------|---|----------------|
| <b>Figure III.1</b> | Cellule tandem 4T de la cellule supérieure (Pérovskite , Nio , PCBM , $\text{SnO}_2$ ) et de la cellule inférieure Si   | <b>42</b>      |
| <b>Figure III.2</b> | Spectre AM 1.5 absorbé par la cellule supérieure pérovskite   | <b>44</b>      |
| <b>Figure III.3</b> | AM 1.5 filtré absorbé par le silicium cellule inférieure obtenue avec l'équation (III.1)  | <b>45</b>      |
| <b>Figure III.4</b> | Coefficients d'absorption de $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$ , NiO, PCBM et $\text{SnO}_2$ utilisés dans la simulation et pour le calcul du spectre filtré | <b>45</b>      |
| <b>Figure III.5</b> | Structure la Cellule solaire Pérovskite individuelle à l'aide du logiciel de simulation SCAPS   | <b>46</b>      |
| <b>Figure III.6</b> | Diagramme des bands d'énergie de la cellule pérovskite à l'équilibre $v=0$  | <b>46</b>      |
| <b>Figure III.7</b> | Courbe (J-V) de simulation de la Cellule solaire Pérovskite individuelle dans le spectre solaire AM 1,5G  | <b>47</b>      |
| <b>Figure III.8</b> | Efficacité quantique externe (EQE) d'une cellule pérovskite individuelle  | <b>48</b>      |

|                      |   |           |
|----------------------|---|-----------|
| <b>Figure III.9</b>  | Structure de la Cellule silicium individuelle à l'aide du logiciel de simulation SCAPS  | <b>48</b> |
| <b>Figure III.10</b> | Diagramme des bands d'énergie de la cellule Si à l'équilibre( $v=0$ )   | <b>49</b> |
| <b>Figure III.11</b> | Courbe (J-V) de simulation de la Si de la Cellule silicium individuelle le spectre solaire AM 1,5G  | <b>49</b> |
| <b>Figure III.12</b> | Efficacité quantique externe (EQE) d'une cellule Silicium individuelle  | <b>50</b> |
| <b>Figure III.13</b> | Courbe (J-V) de simulation de la cellule inférieure silicium dans spectre filtré AM 1,5G  | <b>51</b> |
| <b>Figure III.14</b> | Courbe (J-V) de simulation de la cellule tandem pérovskite /Si (cellule inférieure Si dans spectre filtré AM 1,5G)  | <b>52</b> |
| <b>Figure III.15</b> | Les spectres filtrés de la sous-cellule inférieure à différentes épaisseurs de la couche supérieure   | <b>53</b> |
| <b>Figure III.16</b> | calcul du point de correspondance actuel en variant à la fois le l'épaisseur de la couche supérieure et inférieure de l'absorbeur.  | <b>54</b> |
| <b>Figure III.17</b> | Courbe (J-V) de simulation en tandem pour la pérovskite/Si, la cellule supérieure et la cellule inférieure (x (pérovskites)= $0.499\mu\text{m}$ , x (silicium)= $70\mu\text{m}$ ) | <b>55</b> |

---

# liste des tableaux

## Chapitre III

| Les tableaux         | Le titre   | La page   |
|----------------------|--|-----------|
| <b>Tableau III.1</b> | Propriétés électriques de base des matériaux utilisés dans la structure proposée                                     | <b>43</b> |
| <b>Tableau III.2</b> | Résultats et paramètres de la Cellule Pérovskite individuelle  | <b>47</b> |
| <b>Tableau III.3</b> | Résultats et paramètres de la cellule silicium individuelle  | <b>50</b> |
| <b>Tableau III.4</b> | Résultats et paramètres de la Silicium cellule inférieure  | <b>52</b> |
| <b>Tableau III.5</b> | Résultats et paramètres de la cellule tandem pérovskite /Si  | <b>53</b> |
| <b>Tableau III.6</b> | Résultats et paramètres de la cellule tandem pérovskite /Si (x (pérovskites)=0.499 $\mu$ m, x (silicium)=70 $\mu$ m) | <b>55</b> |

---

# Liste des Symboles et abréviations

|               |   |
|---------------|---|
| $I_{cc}$      | <i>Courant de court-circuit.</i>                      |
| $V_{co}$      | <i>Tension de circuit ouvert.</i>                     |
| $FF$          | <i>Facteur de forme</i>                               |
| $H$           | <i>Rendement de conversion de la cellule solaire.</i> |
| $SCAPS$       | <i>Capacitance Simulator one Dimension Plomb</i>      |
| $J_{cc}$      | <i>Densité du courant de court-circuit</i>            |
| $P_m$         | <i>Puissance maximale</i>                             |
| $QE$          | <i>Rendement quantique de la cellule</i>              |
| $R_s$         | <i>La résistance série</i>                            |
| $R_p$         | <i>Résistance shunt</i>                               |
| $LD$          | <i>longueur de diffusion</i>                          |
| $D$           | <i>Coefficient de diffusion</i>                       |
| $\tau$        | <i>le temps de vie des porteurs</i>                   |
| $\varphi$     | <i>le potentiel</i>                                   |
| $q$           | <i>la charge élémentaire</i>                          |
| $\varepsilon$ | <i>la permittivité</i>                                |
| $n$           | <i>la densité des électrons libres</i>                |
| $p$           | <i>a densité de trous libres</i>                      |
| $ND$          | <i>la densité de dopage de type donneur</i>           |
| $NA$          | <i>la densité de dopage de type accepteur</i>         |
| $pt$          | <i>la densité des piégé à trous</i>                   |
| $nt$          | <i>la densité des piégé à électrons</i>               |
| $G_n$         | <i>le taux de génération optique d'électrons</i>      |
| $G_p$         | <i>le taux de génération optique des trous</i>        |

|          |  |
|----------|--|
| $Rn$     | <i>le taux de recombinaison d'électrons</i>                  |
| $Rp$     | <i>le taux de recombinaison des trous.</i>                   |
| $Jn$     | <i>la densité de courant d'électrons</i>                     |
| $Jp$     | <i>la densité de courant des trous</i>                       |
| $\mu n$  | <i>la mobilité des électrons.</i>                            |
| $\mu p$  | <i>la mobilité des trous.</i>                                |
| $Dn$     | <i>le coefficient de diffusion des électrons.</i>            |
| $Dp$     | <i>le coefficient de diffusion des trous</i>                 |
| $K_B$    | <i>la constante de Boltzmann.</i>                            |
| $T$      | <i>la température.</i>                                       |
| $Ln$     | <i>la longueur de diffusion de l'électron</i>                |
| $Lp$     | <i>la longueur de diffusion de trou</i>                      |
| $\tau n$ | <i>la durée de vie de l'électron</i>                         |
| $\tau p$ | <i>la durée de vie de trou</i>                               |
| $NC$     | <i>la densité effective d'état de la bande de conduction</i> |
| $NV$     | <i>la densité effective d'état de la bande de valence</i>    |
| $SRH$    | <i>Shockley-Read-Hall</i>                                    |
| $\gamma$ | <i>le coefficient de recombinaison</i>                       |
| $n_i$    | <i>concentration intrinsèque.</i>                            |
| $n_0$    | <i>la concentration des électrons à l'équilibre</i>          |
| $p_0$    | <i>la concentration des trous à l'équilibre</i>              |
| $\alpha$ | <i>coefficient d'absorption</i>                              |
| $E_g$    | <i>Energie de gap.</i>                                       |
| $J_0$    | <i>le courant de saturation dans l'obscurité.</i>            |



|                              |  |
|------------------------------|--|
| <b>F</b>                     | le flux de l'espèce considérée   |
| <b>C</b>                     | la concentration de l'espèce   |
| <b><math>\sigma_p</math></b> | la section efficace de capture pour les trous ( $\text{cm}^2$ )                    |
| <b><math>N_T</math></b>      | la densité des centres recombinants ( $\text{cm}^{-3}$ )                           |
| <b><math>E_T</math></b>      | le niveau d'énergie introduit par le défaut ( eV )                                 |
| <b><math>E_i</math></b>      | le niveau de fermi intrinsèque ( eV )  |
| <b><math>\Delta p</math></b> | Différence de trous ( $P_n - P_0$ )  |
| <b><math>\Delta n</math></b> | Différence d'électrons ( $n_n - n_0$ )   |
| <b><math>n_s</math></b>      | les concentrations des électrons proches de la surface                             |
| <b><math>p_s</math></b>      | les concentrations des trous proches de la surface                                 |
| <b><math>N_{st}</math></b>   | la densité des centres de recombinaison par unité de surface ( $\text{cm}^{-3}$ ). |
| <b><math>R_s</math></b>      | le taux de recombinaison à la surface ( $\text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) .   |
| <b>I<sub>s</sub></b>         | courant de saturation de la diode.   |
| <b><math>V_m</math></b>      | tension correspondante à la puissance maximale fournie                             |
| <b><math>I_m</math></b>      | courant correspondant à la puissance maximale fournie.                             |

*Introduction*

*Générale*

# INTRODUCTION GENERALE

---

## INTRODUCTION GENERALE

La production d'électricité a connu de grands développements, en particulier ces derniers temps en trouvant de nouvelles façons de produire de l'électricité de manière propre et respectueuse de l'environnement, en particulier en augmentant la productivité et en utilisant des ressources non perméables. C'est ce qu'on appelle l'énergie renouvelable qui exploite tout dans la nature sans intervention humaine. , car il est généré par l'énergie éolienne et hydraulique Et le soleil et loin des principales méthodes des combustibles fossiles, du pétrole, du charbon et du gaz naturel.

Selon l'Agence internationale de l'énergie, plus de 20% de la population de notre planète n'a pas accès à l'énergie et parmi eux 80% vivent dans des zones rurales éloignées des réseaux de distribution d'électricité. En particulier, selon le Programme Algérien de Développement des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique (PENREE) de 2012, l'Algérie vise à avoir une capacité installée d'origine renouvelable de 22 000 MW d'ici 2030. Pour 2015, le rapport annuel de l'Agence Internationale de l'Energie sur l'énergie solaire a déclaré l'Algérie, annonçant qu'elle a installé 270 MW au cours de l'année, portant sa capacité solaire totale à 300 MW, mais l'énergie solaire du Conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC) sur l'énergie éolienne n'a pas mentionné l'Algérie [1].

Presque toutes les cellules solaires sont constituées de plaquettes de silicium cristallin d'une épaisseur de 150  $\mu\text{m}$  et d'efficacités de conversion de l'ordre de 17 à 23%, mais à un coût de production élevé [2].

À la fin des années 1960, on a découvert que l'électricité pouvait être générée en allumant des colorants organiques dans des cellules électrochimiques, où la chlorophylle était utilisée à l'Université de Californie à Berkeley.

La première électrode de zinc sensibilisée à la chlorophylle a été fabriquée en 1972. Pour la première fois, par injection électronique de molécules de colorant dans un semi-conducteur à large gamme d'énergie, les photons ont été convertis en électricité [3].

La dernière découverte des cellules solaires en pérovskite est un développement rapide et l'ouverture de nouvelles directions, actuellement de la troisième génération, la plus prometteuse parmi les autres générations en raison de son efficacité et de ses avantages qui correspondent aux exigences de notre temps et à ce que les scientifiques essaient d'atteindre.

## INTRODUCTION GENERALE

---

Les pérovskites sont des matériaux décrits avec la formule  $ABX_3$ , présentant des propriétés électriques, structurelles et optiques très utiles. La pérovskite en tant qu'absorbeur de lumière dans les cellules solaires a permis d'obtenir des améliorations significatives de l'efficacité de conversion d'énergie (PCE) en peu de temps. Depuis la première expérience d'une cellule solaire à base de pérovskite en 2009, le PCE de ces cellules solaires s'est rapidement amélioré de 3,8% à 25,2% [4].

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les scientifiques et les chercheurs s'efforcent toujours d'obtenir de meilleurs résultats et performances pour ces cellules solaires, et afin de faciliter le processus de prédiction, qui aide à atteindre l'objectif souhaité, en utilisant des programmes de simulation pour étudier l'effet de nombreux facteurs physiques sur les performances photovoltaïques des cellules solaires pérovskite et silicium en utilisant l'outil de simulation SCAPS à partir de l'épaisseur des couches et de l'effet de la température et autres afin d'arriver à ce que l'on cherche à prédire les paramètres optimaux qui contribuer à améliorer les performances de la cellule solaire.

Ce mémoire est structuré de la façon suivante :

- Après une introduction générale, le premier chapitre présente les généralités sur le concept théorique et la généralisation sur les cellules solaires, le principe de fonctionnement des cellules solaires et l'évolution technologique des différentes générations. Nous présenterons également les propriétés de base de la pérovskite et du silicium. Nous décrirons les propriétés optiques et électriques de ces matériaux et cellules tandem, leurs types et leur rôle dans le développement et l'amélioration de la productivité.
- Dans le deuxième chapitre, nous présenterons le logiciel SCAPS utilisé dans notre étude de simulation.
- Dans le troisième chapitre, étude et simulation de la cellule solaire pérovskite supérieure et de la cellule silicium inférieure, en plus de celle de la cellule tandem pérovskite et silicium. Dans ce chapitre, nous essaierons de Discussions et interprétations des résultats pour comprendre le rôle des différents facteurs affectant les performances cellulaires.
- Enfin nous clôturerons le travail par une conclusion générale ainsi que des perspectives de ce travail.

# **CHAPITRE**

## **I**

**Concepts théoriques et généralités  
sur les cellules solaires**

## **I.1.INTRODUCTION :**

Ce premier chapitre donne un aperçu des nombreuses générations de cellules photovoltaïques. Nous commencerons par les équations fondamentales des semi-conducteurs, ainsi que l'effet photoélectrique et les paramètres des cellules solaires. Ensuite, nous examinerons la cellule photovoltaïque en pérovskite et l'évolution des performances des cellules solaires en pérovskite.

## **I.2.LA PHYSIQUE DES SEMI-CONDUCTEURS :**

### **I.2.1 Les différents types de semi-conducteurs :**

#### **I.2.1.1 Les semi-conducteurs intrinsèques :**

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur dépourvu de toute impureté susceptible de modifier la densité de porteurs. Les électrons de la bande de conduction ne peuvent résulter que de l'excitation thermique d'électrons liés de la bande de valence. Il en résulte que les électrons et les trous existent nécessairement par paires et  $n=p=n_i$ .  $n_i$  est appelé densité de porteurs intrinsèques, c'est une caractéristique du semi-conducteur à une température donnée [32].

#### **I.2.1.2 Les semi-conducteurs extrinsèques :**

On peut modifier de façon considérable la concentration de porteurs de charge d'un semi-conducteur intrinsèque en lui ajoutant de faibles quantités d'atomes astucieusement choisis et que l'on appelle impuretés dopantes ou tout simplement dopants. On obtient alors un semi-conducteur extrinsèque ou dopé [32].

Selon la nature des atomes introduits, soit le nombre d'électrons devient très supérieur au nombre de trous et le semi-conducteur est appelé de type n, soit le nombre de trous devient très supérieur à celui des électrons et le semi-conducteur est appelé de type p [32].

#### **I.2.1.3 équation de base du semi-conducteur :**

Un programme de modélisation des cellules solaires devrait, au moins, être capable de résoudre les équations de base des semi-conducteurs qui sont les suivantes :

### a) Equation de Poisson :

L'équation de Poisson, dérivée des équations de Maxwell, est évidemment valable dans un semi-conducteur. Nous nous en tiendrons au modèle unidimensionnel [5]

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = - \frac{\rho}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (\text{I.1})$$

$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}$  : Le laplacien

$\epsilon_r, \epsilon_0$  : Permittivité du semi-conducteur

$\rho$  : Concentration de charge

La concentration de charge globale dans un semi-conducteur dopé par les deux types de dopants tient compte des porteurs libres et des atomes ionisés ou impuretés

$$\rho = q(p - n + N_D + N_A) \quad (\text{I.2})$$

### b) Equations de continuité :

Les équations de continuité décrivent les variations temporelles des densités de charge (électrons, trous), elles sont définies par les équations [7]

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_n + G_n - R_n \quad (\text{I.3})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_p + G_p - R_p \quad (\text{I.4})$$

Où  $n$  et  $p$  sont les concentrations des électrons et des trous,  $\vec{J}_n$  et  $\vec{J}_p$  sont les densités de courant d'électrons et de trous,  $G_n$  et  $G_p$  sont les taux de génération des électrons et des trous et  $R_n$  et  $R_p$  sont les taux de recombinaison des électrons et des trous, les quelle sont eux mêmes des expressions complexes, liées notamment à l'éclairement [7].

### c) Equations de transport :

Les porteurs de charge sont déplacés soit par l'action d'un champ électrique, soit par l'action d'un gradient de concentration de porteurs de charge. Il existe un courant appelé courant de dérive (ou courant de conduction) proportionnel au champ électrique et caractérisé par la relation suivante [7].

$$\vec{J}_n = n \cdot q \cdot \mu_n \cdot \vec{E} \quad (\text{I.5})$$

$$\vec{J}_p = p \cdot q \cdot \mu_p \cdot \vec{E} \quad (\text{I.6})$$

Où  $\vec{E}$  est le champ électrique et  $\mu_n$  et  $\mu_p$  les mobilités respectivement des électrons et des trous.

Les porteurs se déplacent des régions de forte concentration vers les régions de faible concentration en raison de l'impact d'un gradient (variation spatiale) de la densité des porteurs.

Le courant de diffusion est un type de courant que nous avons [7].

$$\vec{J}_n = q \cdot D_n \cdot \nabla_n \quad (\text{I.7})$$

$$\vec{J}_p = q \cdot D_p \cdot \nabla_p \quad (\text{I.8})$$

Où  $D_n$  et  $D_p$  sont les constantes de diffusion des électrons et des trous. Elles sont définies par la relation d'Einstein

$$D_n = \frac{\kappa_B T}{q} \mu_n \quad (\text{I.9})$$

$$D_p = \frac{\kappa_B T}{q} \mu_p \quad (\text{I.10})$$

Où  $\kappa_B$  désigne la constante de Boltzmann et T la température.

Nous obtenons l'expression suivante pour la densité de courant totale pour les électrons et les trous en additionnant ces deux types de courants (courant de dérive et diffusion) [7]

$$\vec{J}_n = n \cdot q \cdot \mu_n \cdot \vec{E} + q \cdot D_n \cdot \nabla_n \quad (\text{I.11})$$

$$\vec{J}_p = p \cdot q \cdot \mu_p \cdot \vec{E} + q \cdot D_p \cdot \nabla_p \quad (\text{I.12})$$

Dans le simulateur, ces équations sont directement résolues. Cependant, nous devons également préciser les modèles physiques qui ont été employés, ce qui sera discuté dans la section suivante. Certains de ces modèles sont programmés de manière indépendante puis fusionnés dans le simulateur, tandis que d'autres sont entrés directement dans le simulateur.

## I.3 PHÉNOMÈNES DE GÉNÉRATION / RECOMBINAISON :

### I.3.1 Génération optique :

Les photons d'énergie supérieure au gap du matériau entrant dans un semi-conducteur génèrent des paires électron-trous (on suppose implicitement la création d'une seule paire par photon). L'expression du taux de génération  $G(\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1})$  dépend de la forme du faisceau et de la surface éclairée, mais son intégrale sur tout le volume de génération donne le nombre total des photons absorbés par seconde.



### I.3.1.1 Coefficient d'absorption :

- d) L'absorption de la partie la plus intense du spectre solaire par un matériau adapté, entraînant la libération d'électrons, est le premier phénomène à optimiser.
- e) Auparavant, le matériau optimal était choisi parmi les matériaux avec un petit "gap" afin d'absorber tous les photons solaires, même les photons infrarouges avec des énergies inférieures à 1 eV, mais des tests récents ont révélé que même les matériaux à grand gap peuvent être extrêmement intrigants. Il convient de noter que la valeur de la tension de sortie de la cellule solaire est exactement proportionnelle au "gap" du matériau [8]

$$E_g \propto \frac{E_g}{4} \quad (\text{I.13})$$

En réalité, en raison d'une variété de pertes, la tension en circuit ouvert d'une cellule solaire dépasse rarement la moitié de la valeur de "gap".

### I.3.1.2 Le coefficient de réflexion :

Dans une cellule solaire idéale, tout le rayonnement solaire pénètre dans le matériau, mais en réalité, il est réfléchi par la face avant et absorbé par le verre qui est la couche protectrice de la cellule, et la surface active est perdue à cause de l'ombre qui il a prévu que les grilles de collecte métalliques doivent être prises en compte[8].

## I.4 Mécanismes de recombinaison :

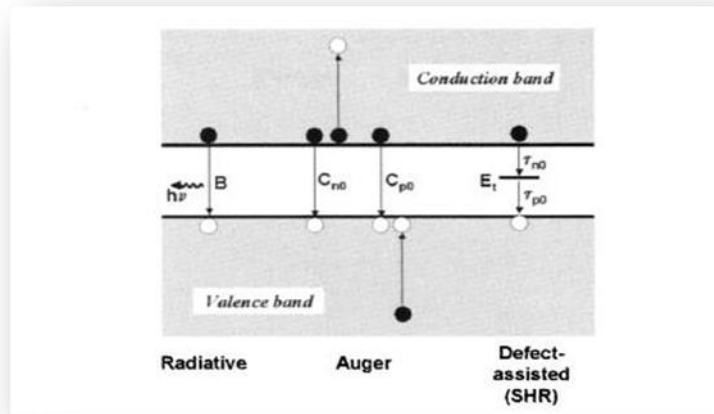
Dans un semi-conducteur, il existe deux types de recombinaison :

Recombinaison directe de bande à bande, dans laquelle un électron de la bande de conduction traverse la bande interdite jusqu'à un état inoccupé dans la bande de valence, et recombinaison indirecte, dans laquelle un électron de la bande de conduction passe par un niveau profond de la bande interdite avant de se recombiner avec un trou dans la bande de valence.

Lors de la recombinaison, une quantité d'énergie égale à l'énergie de la paire électron-trou est réémise dans le réseau cristallin, soit sous forme de rayonnement en émettant un ou plusieurs photons, soit sous forme de chaleur en émettant des phonons.

Ces types de recombinaisons se manifestent selon plusieurs mécanismes [9] :

- La recombinaison radiative.
- La recombinaison Auger.
- Et, la recombinaison Schokley Read Hall (SRH)
- Recombinaison en surface.



**Figure. I.1:** Schéma des principaux processus de recombinaisons dans les semi-conducteurs. Les directions des flèches indiquent la transition des électrons. [9]

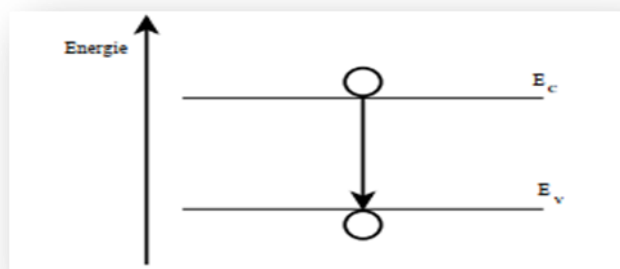
## I.4.1 La recombinaison radiative :

La recombinaison radiative, également appelée recombinaison inter bande, est l'inverse de la photo-génération. Pour les matériaux présentant des lacunes indirectes, comme le silicium, cette technique est inefficace. Par conséquent, ce mécanisme a peu d'impact sur la durée de vie des porteurs minoritaires [9].

Ce processus est important pour les matériaux à bande interdite directe et faible pour les matériaux à gaps indirects. Le taux de recombinaison net est défini par

$$R_R = \beta_{rad}(np - n_i^2) \quad (\text{I.14})$$

Où  $\beta_{rad}$ : le coefficient de recombinaison radiative, p et n niveau de dopage du semi-conducteur et  $n_i$  la densité de porteurs intrinsèque.

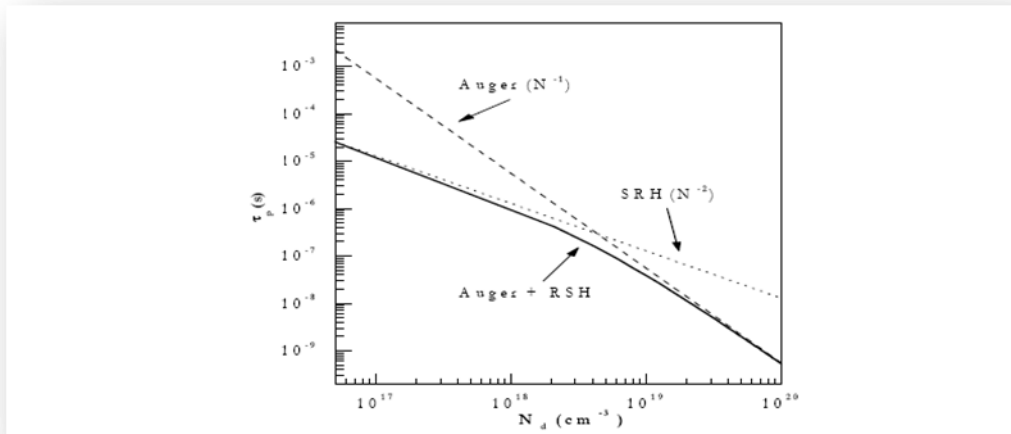


**Figure I.2:** Schéma d'une recombinaison radiative [10]

## I.4.2 Recombinaison Auger :

Un mécanisme à trois entités est utilisé pour expliquer cette forme de recombinaison. En effet, l'énergie supplémentaire libérée par une recombinaison électronique dans la bande de valence peut être transmise à une troisième particule libre, comme un électron ou un trou. Ces charges sont considérées comme quasi gratuites et n'interagissent pas entre elles [9].

A des niveaux de dopage élevés ( $N > 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ), la recombinaison Auger prédomine, réduisant rapidement la durée de vie. Comme l'illustre la figure I.3, le mécanisme de recombinaison Auger est proportionnel au carré du dopage se produit principalement dans les parties fortement dopées de la cellule solaire, telles que l'émetteur (n+) ou la zone de champ de surface arrière (p+) [9].

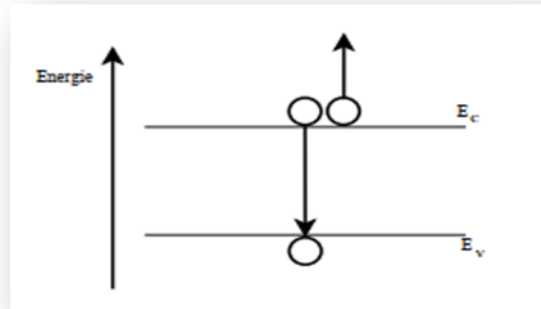


**Figure I.3 :** Influence du dopage sur les durées de vie Auger et SRH dans le volume du silicium monocristallin [9].

La thermalisation fait que ce support perd son énergie avec le temps. La relation suivante est utilisée pour calculer le taux de recombinaison)  $U_{Aug}$  :

$$R_{Auger} = (C_n n + C_p p)(np - n_i^2) \quad (I.15)$$

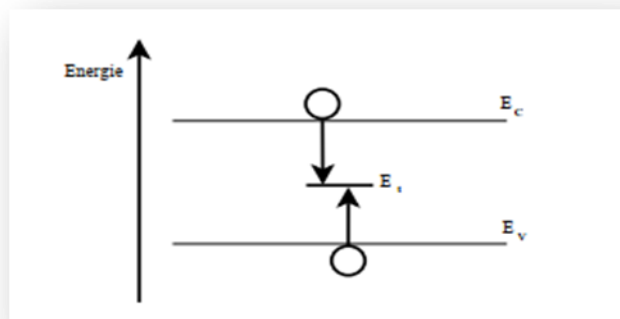
Où  $C_p$  et  $C_n$  sont les coefficients Auger pour les électrons et les trous.



**Figure I.4 :** Schéma d'une recombinaison Auger faisant intervenir deux électrons de la bande de conduction et un trou de la bande de valence [10]

### I.4.3 Recombinaison SRH (Schokley-Read-Hall)

La recombinaison de défauts, également connue sous le nom de recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH ou RHS), a lieu au niveau de la bande interdite via un niveau de piège ou un niveau d'énergie de défaut [11]. Les défauts du réseau cristallin peuvent se comporter comme des centres recombinants à charge libre. Comme représenté sur la figure I.5 [10].



**Figure I.5 :** Schéma d'une recombinaison SRH faisant intervenir un défaut à l'énergie  $E_t$  [11].

Un électron va d'abord se relaxer sur un niveau d'énergie intermédiaire lié à un défaut. Ensuite, il se recombinera avec un trou dans la bande de valence après une deuxième relaxation.

Le taux de recombinaison SRH des porteurs de volume s'écrit par l'équation suivante : [12]

$$R_{SRH} = \frac{V_{th} \cdot \sigma_n \cdot \sigma_p \cdot N_T \cdot [(N + \Delta n) \cdot (P + \Delta p) - n_i^2]}{\sigma_p \cdot [P + \Delta p + n_i \cdot e^{\frac{(E_i - E_T)}{KT}}] + \sigma_n \cdot [N + \Delta n + n_i \cdot e^{\frac{(E_T - E_i)}{KT}}]} \quad (I.16)$$

$V_{th}$  : est la vitesse thermique des porteurs ( $cm \cdot s^{-1}$ )

$\sigma_n$  : est la section efficace de capture pour les électrons ( $cm^2$ )

$\sigma_p$  : est la section efficace de capture pour les trous ( $cm^2$ )

$N_T$  : est la densité des centres recombinants ( $cm^{-3}$ )

$n_i$  : est la densité intrinsèque des porteurs dans le matériau ( $cm^{-3}$ )

$E_T$  : est le niveau d'énergie introduit par le défaut (ev)

$E_i$  : est le niveau de fermi intrinsèque (ev)

$\Delta p$  : Différence de trous ( $P_n - P_0$ )

$\Delta n$  : Différence d'électrons ( $n_n - n_0$ )

#### **I.4.4 Recombinaison en surface :**

La surface dénote une rupture importante dans la structure cristalline du silicium.

La rupture brutale de la périodicité du cristal provoque une multitude de défauts structuraux, introduisant des niveaux d'énergie dans l'écart de silicium qui facilitent le processus de recombinaison. Les liaisons pendantes, ou les atomes de silicium auxquels il manque une liaison covalente et qui ne sont donc pas dans un état électrique stable, sont les défauts les plus courants [9], le taux de recombinaison à la surface pour un type de centre de recombinaison non radiative s'écrit [12] :

$$R_s = \frac{V_{th} \cdot \sigma_n \cdot \sigma_p \cdot N_{st} \cdot (p_s \cdot n_s - n_i^2)}{\sigma_p \cdot [p_s + n_i \cdot e^{\frac{(E_i - E_T)}{KT}}] + \sigma_n \cdot [n_s + n_i \cdot e^{\frac{(E_T - E_i)}{KT}}]} \quad (I.17)$$

$n_s$  et  $p_s$  : sont les concentrations des électrons et des trous proches de la surface ( $cm^{-3}$ ).

$N_{st}$  : est la densité des centres de recombinaison par unité de surface ( $cm^{-3}$ ).

$R_s$  : est le taux de recombinaison à la surface ( $s^{-1} \cdot cm^{-2}$ ).

### **I.5 GÉNÉRALITÉS SUR LES CELLULES SOLAIRES :**

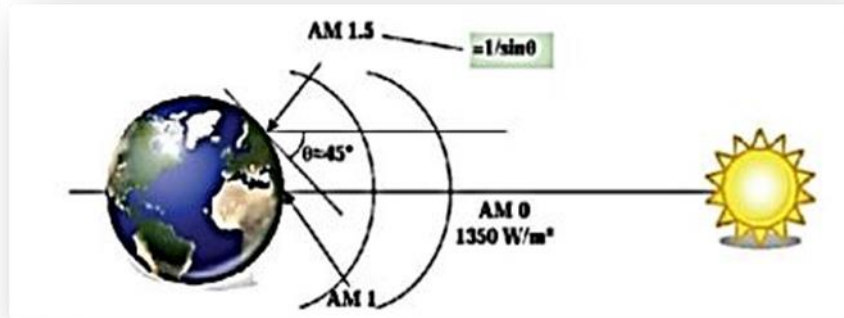
#### **I.5.1 Spectre solaire :**

La lumière du soleil est composée d'une variété de rayons, chacun avec une couleur et une longueur d'onde particulière. Le rayonnement électromagnétique est constitué de photons, ou grains de lumière. Les deux natures corpusculaire et ondulatoire de la lumière ont été vérifiées

## CHAPITRE I

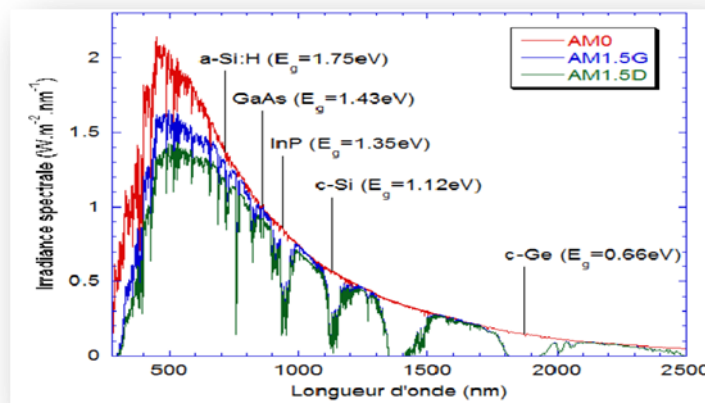
---

par Louis de Broglie en 1924 : la présence de corpuscules (photons) et la transmission d'ondes avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde [1]. Le rayonnement émis par le soleil équivaut à celui d'un corps noir à 6000°C. Au-dessus de l'atmosphère, l'intensité du rayonnement est de  $1,35 \text{ kW/m}^2$ , avec un spectre centré à  $\lambda = 0,48 \text{ m}$ . La densité de puissance à la surface de la terre n'est que de  $0,9 \text{ kW/m}^2$  en raison de l'absorption principalement par l'ozone, l'eau et le dioxyde de carbone. De plus, le spectre n'est plus continu, mais comprend plutôt des bandes d'absorption. [9] Pour quantifier l'effet de l'atmosphère, la masse d'air est définie comme  $AM = 1/\cos\alpha$ ,  $\alpha$  qui représente l'angle formé par la direction du soleil avec la verticale. AM0 est utilisé pour définir les circonstances au-dessus de l'atmosphère. AM 1,5 est le temps qu'il faut pour atteindre le sol par temps clair (un mètre carré avec un angle de  $48^\circ$  avec l'équateur). De plus, les spectres AM1.5D et AM1.5G correspondent respectivement aux flux direct et global (direct et diffus) [1].



**Figure I.6 :** Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM [1]

C'est le spectre AM1.5 qui correspond au rayonnement solaire traversant une masse d'air de 1,5, avec un angle  $\theta$  par rapport au zénith. Le spectre AM1.5 est représenté sur la figure I.7.



**Figure I.7:** Irradiante ou spectre solaire à la surface de l'atmosphère terrestre (AM0) et au sol (AM1.5D ETAM1.5G) [9]

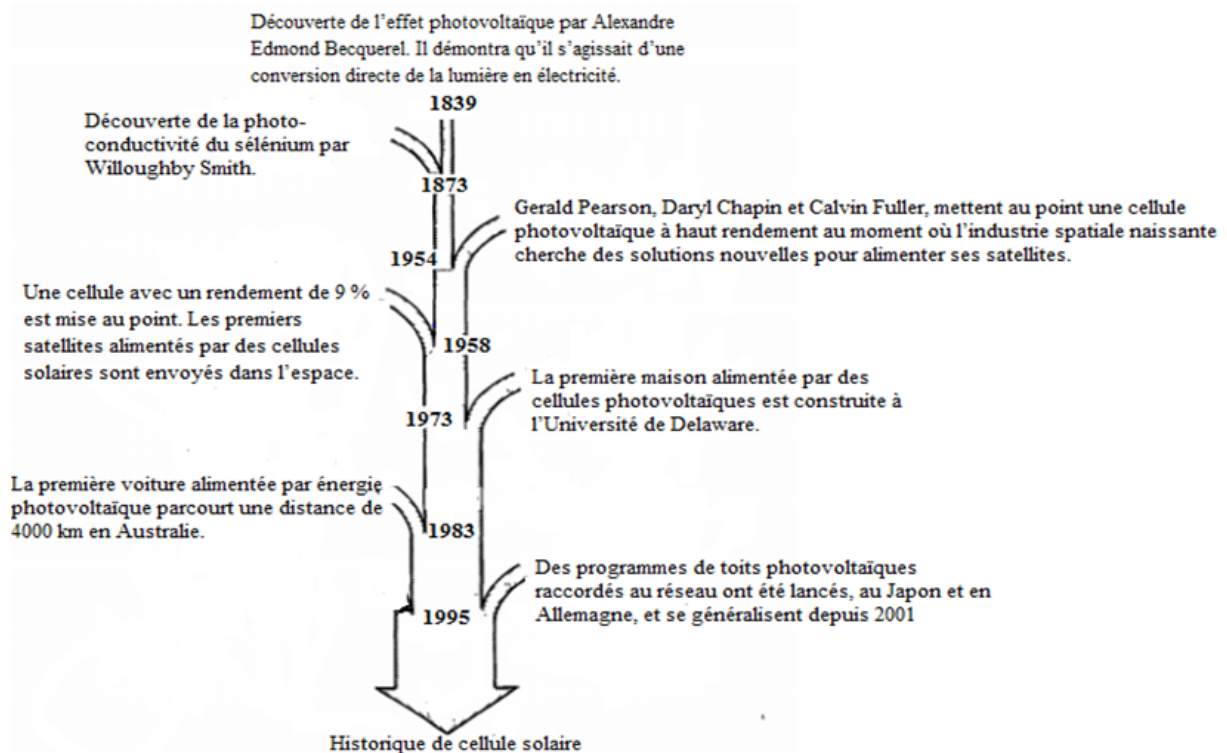
## I.5.2 Cellule solaire :

### I.5.2.1 Historique :

La conversion de la lumière en électricité, connue sous le nom d'effet photovoltaïque, a été découverte par le Français Antoine Becquerel en 1839, mais il a fallu près d'un siècle aux scientifiques pour étudier et utiliser ce phénomène physique .L'énergie photovoltaïque a été développée dans les années 1950 pour les équipements des engins spatiaux. À l'époque, c'était la seule méthode non nucléaire pour fournir de l'énergie aux satellites .Au cours des années 1970 et 1980, des tentatives ont été faites pour réduire les coûts afin que l'énergie photovoltaïque puisse également être utilisée à des fins terrestres.

# CHAPITRE I

Depuis, l'industrie photovoltaïque a connu une croissance spectaculaire. D'autres dates importantes dans l'histoire de la cellule solaire sont résumées dans la figure ci-dessous [9].



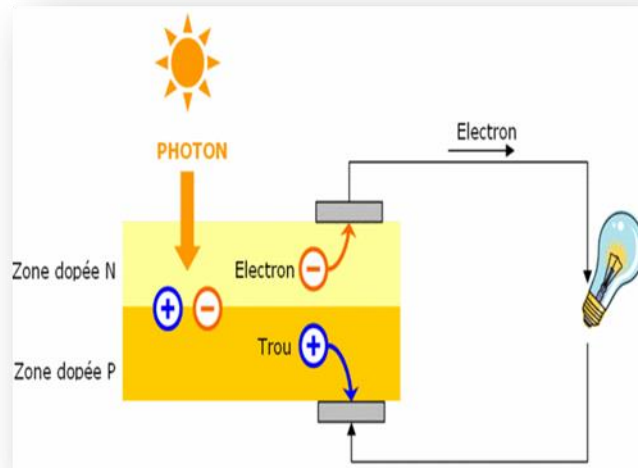
**Figure I.8:** Historique de la cellule solaire [9]

## I.5.2.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Lorsqu'une quantité suffisante de photons lumineux ou de rayonnement solaire est absorbée, certains électrons et trous du réseau cristallin sont libérés, ce qui correspond à une modification de leur énergie cinétique interne.

Ainsi, on peut croiser la différence de potentiel dans le champ électrique interne, c'est-à-dire le flux dans la photo courant.

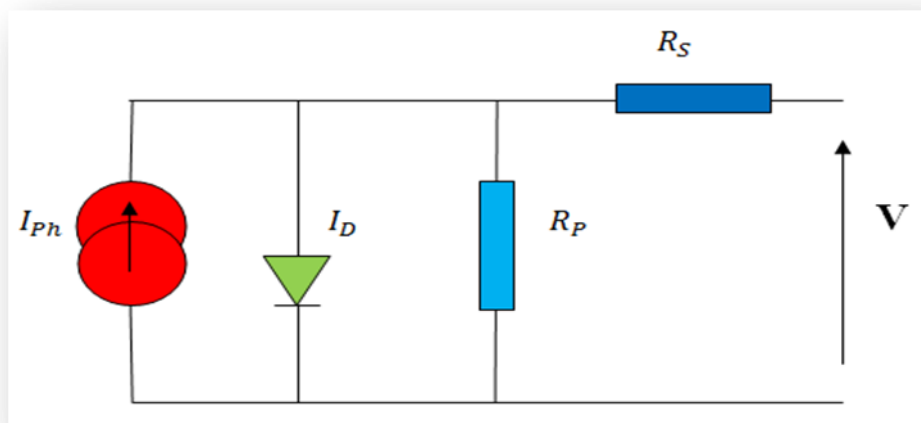




**Figure I.9** : Schéma montrant le fonctionnement de la cellule solaire [22]

### I.5.2.3 Schéma équivalent d'une cellule solaire

Le schéma de base équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque suit le modèle à une diode. Une cellule idéale à jonction soumise à un flux lumineux, fonctionne comme un générateur de courant, Sa caractéristique est comparable à celle d'une jonction. Le schéma équivalent de la cellule solaire est alors représenté par une diode idéale montée en parallèle avec une source de courant. Les résistances séries  $R_{set}$  shunt  $R_{sh}$  modélisent les pertes engendrées par la résistivité des couches et la présence de courants de fuite [4]



**Figure I.10**: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

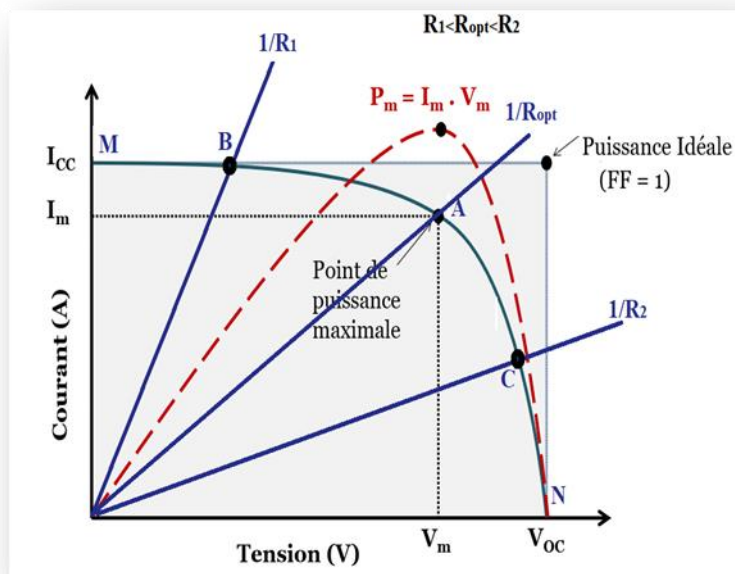
## CHAPITRE I

$R_s$  : représente la résistance série. Elle est attribuée aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours au niveau des différentes couches de la cellule (couche et contacts). Cette résistance doit être la plus faible possible [13].

$R_p$  : représente la résistance shunt qui prend en compte les fuites de courant qui interviennent entre les bornes opposées d'une photopile. Cette résistance doit être la plus grande possible [13].

### I.5.2.4 Caractéristique courant - tension (I-V)

La Figure I.11 montre la caractéristique I-V pour une cellule photovoltaïque. Si une résistance variable  $R$  est connectée aux bornes de la cellule le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de la caractéristique  $I=f(V)$  de la cellule avec la courbe de la charge. Pour une charge résistive, la courbe de charge est une droite de pente  $1/R$ . Par conséquent, si la résistance  $R$  est petite, le point de fonctionnement est situé dans la région MB de la courbe. Dans cette région le courant  $I$  varie peu en fonction de la tension, il est presque égal au courant de court-circuit. La cellule se comporte alors comme un générateur de courant. D'autre part, si la résistance  $R$  est grande, la cellule fonctionne dans la région CN. Dans cette zone, la tension de la cellule varie peu en fonction du courant  $I$  : la cellule comporte comme une source de tension qui est presque égale à la tension de fonctionnement à vide [13].



La Figure I.11 : la caractéristique I-V pour une cellule photovoltaïque

Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), la tension à circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et le facteur de forme (FF) est le rendement  $\eta$ [13].

### I.5.2.5 Paramètre des cellules photovoltaïques

#### a) Courant de court-circuit $I_{cc}$

Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  est la valeur maximale du courant obtenue en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant  $V=0$ ). Ce courant croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [4].

#### b) Tension de circuit-ouvert, $V_{co}$

La tension à circuit ouvert est définie comme la tension maximale générée par la cellule photovoltaïque. Elle représente la tension aux bornes de la cellule sous éclairement sans circuit de charge c'est-à-dire lorsque le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et du matériau de la couche active [4].

Le Voest donné par la relation :

$$v_{co} = \frac{nKT}{q} \ln \left( \frac{I_{cc}}{I_s} - 1 \right) \quad (\text{I.18})$$

K : la constante de Boltzmann.

T : la température absolue du corps.

q : charge de l'électron.

$I_s$  : courant de saturation de la diode.

Le  $V_{co}$  dépend du type de cellule solaire (homojonction, hétérojonction), des matériaux des différentes couches qui composent la cellule, de la nature des contacts de la couche active-électrode et de l'éclairement de la cellule. [13]

#### C) Puissance maximale $P_m$

Le point de fonctionnement de la cellule est imposé par la résistance de charge. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra d'obtenir la puissance maximale [4].

$$P_m = V_m \cdot I_m \quad (\text{I.19})$$

$V_m$  : Tension correspondante à la puissance maximale fournie.

$I_m$  : Courant correspondant à la puissance maximale fournie.

### f) Facteur de forme FF

Le facteur de forme où le facteur de remplissage où Fil Factor FF(%) est utilisé pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV. Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule ( $P_{max}$ ) et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} \cdot V_{co}$  [13]. Il est défini par la relation suivante:

Ce rapport doit avoir une valeur la plus proche possible de 1 (100%)

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{I.20})$$

Dans le cas d'une cellule idéale, le facteur de forme FF ne peut pas être supérieur à 0,89 du fait de la relation exponentielle liant courant et tension [4].

### g) Le rendement $\eta$

Le rendement  $\eta$  (%) des cellules solaires indique le rendement de conversion en puissance. C'est le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente,  $P_{in}$  [13].

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{ff \times V_{co} \times I_{cc}}{P_{in}} \quad (\text{I.21})$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule. [13]

### h) Rendement quantique de la cellule QE

Le rendement quantique définit la probabilité d'un transfert énergétique à partir d'un photon incident à un électron du cristal, ce paramètre décrit la qualité et la quantité de la conversion photovoltaïque dans la cellule solaire.

$$RQE = \frac{\Delta J/q}{\Phi} = \frac{\text{Nombre des paires (electron-trou) collectées}}{\text{Nombre des photons incidents}} \quad (\text{I.22})$$

### I.5.3 Les pertes interne et externe

#### a) l'ombrage

Il est naturel que la cellule solaire fonctionne ou tire son énergie de la lumière du soleil, et si son absence affecte son rendement, et cela en soi est une perte car notre objectif est d'augmenter le rendement et ce phénomène se produit lorsque la cellule est à l'ombre ou la nuit, Les scientifiques ont commencé à faire des recherches sur ce sujet afin de trouver des solutions à ce problème.

#### b) Poussière et brouillard

La couche supérieure de la cellule solaire est considérée comme importante, car c'est l'interface exposée et recevant les rayons. Si de la poussière et des embruns s'y accumulent, cela l'affecte car elle ne permet pas le passage des rayons, qui à leur tour traversent le reste de la cellule.

#### c) Réflexion

La cellule solaire peut réfléchir les rayons solaires, cela fait que la cellule solaire n'absorbe pas, et donc il n'y a pas de rendement ou un faible rendement en raison de l'absorption d'une petite quantité de rayons solaires.

#### d) Température

Une partie du courant électrique fuit par les points de connexion et la valeur du courant de fuite dépend de La température de la cellule, et donc la température des points de contact, plus cette température est élevée, plus la quantité de Le courant de fuite d'ici vient de l'importance du refroidissement des cellules solaires, de l'efficacité théorique des cellules au silicium.

### I.6 l'état de l'art sur les photovoltaïques

En fait, les cellules solaires utilisées dans le monde aujourd'hui ne sont pas assez efficaces, car elles ne peuvent pas convertir toute l'énergie solaire qu'elles absorbent en électricité, et elles ne sont même pas près d'atteindre cet objectif, et le plus grand inconvénient est leur prix élevé. Les cellules sont faites de silicium coûteux, même l'énergie solaire est plus chère que l'éolien ou l'hydroélectricité.

Il existe de nombreuses mises à jour et développements dans ce domaine, mais nous en aborderons certains :

#### I.6.1 Les technologies de cellules photovoltaïques et leur rendement

##### I.6.1.1 Cellules solaires nano technologiques

### **a) Définition**

Le terme nanotechnologie signifie toute conception, fabrication et utilisation des structures d'une dimension inférieure à 100 nanomètres (milliardième de mètre 10<sup>-9</sup>). Mais selon la national nanotechnology initiative au états unis (U.S.A), les nanotechnologies font référence à la recherche et à la mise au point de matières au niveau atomique et moléculaire dans un intervalle allant de 1 à 100 nm, afin de pouvoir étudier et connaître les phénomènes au niveau de la molécule, atome par atome, ainsi créer des structures ayant des propriétés fondamentalement nouvelles à cause de leurs tailles[14].

### **b) La nanotechnologie pour fabriquer des cellules solaires**

Les scientifiques affirment qu'il est urgent de développer également des alternatives moins chères, plus efficaces et plus respectueuses de l'environnement. Pour y parvenir, les scientifiques ont créé un nanomatériau qui rend les cellules solaires plus efficaces que les cellules à base de silicium. Les scientifiques ont nommé ces nouvelles cellules "Pérovskite solaire cellules" (cellules solaires pérovskites).PSC [15].

Ces nouvelles cellules sont très efficaces et faciles à produire, et elles se sont développées très rapidement au cours de la dernière période, mais d'énormes quantités d'entre elles n'ont pas été produites capables de couvrir les besoins du marché en raison de certains problèmes techniques qu'elles rencontraient, mais les scientifiques ont maintenant atteint pour inventer un matériau à l'échelle nanométrique capable de résoudre ces problèmes rencontrés le développement de cellules solaires pérovskite, et la capacité de produire de grandes quantités d'entre eux capables de couvrir le marché bientôt[15].

### **c) Haute efficacité de la nouvelle technologie**

Le professeur Joe Schapter, professeur agrégé de l'étude, a expliqué que "les cellules injectées ont montré une grande efficacité dans la conversion de l'énergie solaire en électricité, à un taux de plus de 21% par rapport aux cellules qui n'ont pas été injectées avec le nano catalyseur, ce qui donne une forte un élan à la production de panneaux solaires durables et efficaces, et surtout c'est bon marché et abordable pour tout le monde [15].

### I.6.1.2 Cellules solaires nocturnes

Les panneaux solaires photovoltaïques comptent aujourd'hui parmi les sources d'énergie électrique les plus propres jamais mises au point, et ce même si leur fabrication produit inexorablement des émissions de CO<sub>2</sub>. Une étude récente nous apprenait néanmoins qu'en 2018 ils sont parvenus à compenser tous les gaz à effet de serre qu'ils avaient pu engendrer en 40 ans. Mais la technologie sur laquelle ils reposent la conversion du rayonnement solaire en électricité grâce à des cellules exploitant l'effet photovoltaïque. Aujourd'hui, lorsqu'il pleut, un panneau solaire perd jusqu'à 90% de son efficacité. Et à la nuit tombée, celle-ci est réduite à néant [16].

#### c) Technologie des cellules solaires nocturnes

La problématique est donc simple : comment rendre une cellule solaire utile lorsque le Soleil n'éclaire justement plus sa surface ? Depuis plusieurs années, des équipes de chercheurs travaillent à résoudre ce casse-tête en exploitant un même principe : celui du rayonnement infrarouge émis par tout objet plus chaud que l'environnement dans lequel il se trouve. En somme, il s'agit du même principe que celui sur lequel s'appuient les panneaux photovoltaïques classiques des cellules, souvent à base de semi-conducteurs en silicium, convertissent une partie du rayonnement solaire en énergie thermique ou électrique, mais renversé : "Plutôt que d'être froids et pointés vers le Soleil chaud, les cellules de ces appareils sont chaudes et pointées vers quelque chose de plus froid, comme la simple température ambiante", explique à Sciences et Avenir Jeremy N. Munday, auteur principal d'une étude publiée le 29 janvier 2020 dans la revue ACS Photoniques [16].

Ce professeur du Département de génie électrique et informatique de l'Université de Californie a mis au point un prototype de cellule photovoltaïque capable de générer jusqu'à 50 watts de puissance par mètre carré la nuit dans des conditions optimales sans temps sec, soit environ un quart de ce que peut produire en une journée un panneau solaire conventionnel. "Au lieu d'absorber la lumière du Soleil comme le produit une cellule solaire normale, notre prototype de la chaleur sous forme de lumière infrarouge vers l'objet froid." Autrement dit, pour ces nouveaux capteurs, même le jour il fait nuit [16].

### I.6.1.3 technologie demi-cellule

#### a) Définition

## CHAPITRE I

Dans la technologie des demi-cellules, la cellule solaire est coupée en deux moitiés égales, et la tension de chaque moitié est égale à la tension de la cellule pleine, mais le courant et il est directement proportionnel à la surface, et sa valeur est réduite à la moitié par rapport aux cellules pleines [17], Il assure également une augmentation de l'efficacité des panneaux solaires et conduit ainsi à une amélioration de la valeur de production. D'autre part, ces cellules sont plus capables de résister aux chocs que les cellules pleines normales en raison de leur taille plus petite, ce qui les rend moins sensibles aux fissures et aux bris [18].

### d) Conception de panneau à demi-cellule

Les modules PV à demi-coupe diffèrent des modules PV à cellule complète de deux manières principales :

- 1- Les modules PV à cellule complète se composent de trois séries de cellules connectées ensemble en série, puis de trois diodes de dérivation connectées en parallèle, c'est-à-dire une diode de dérivation avec chaque série sur le parallélisme, comme dans les illustrations dans Figure I.12, Les modules PV demi-coupe se composent de six séries de cellules, trois dans la moitié supérieure du panneau et trois dans la moitié inférieure. Les deux séries sont connectées en parallèle, Une chaîne de la moitié supérieure et une chaîne de la moitié inférieure, Ensuite, la diode By-pass est connectée à ces deux chaînes en parallèle, Les trois groupes de chaînes sont connectés ensemble en série [17].

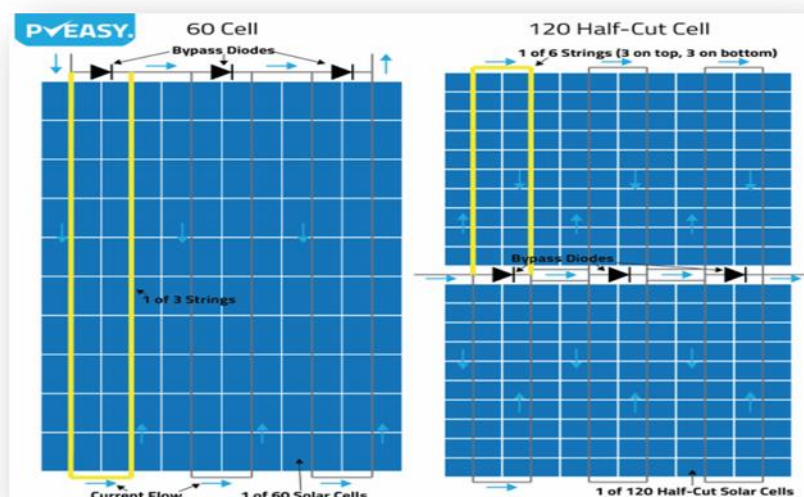
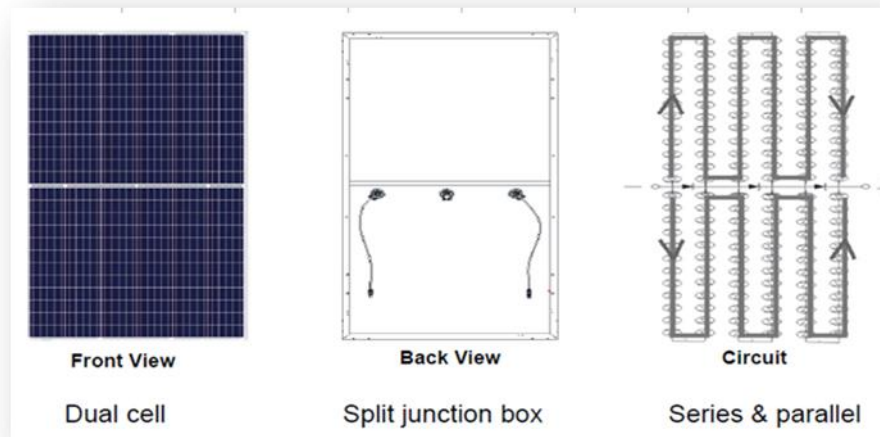


Figure I.12 : Comment connecter la cellule solaire [17]

- 2- Boîtes de jonction



Les panneaux à demi-cellules diffèrent des panneaux à cellules pleines en ce que les boîtes de jonction comportent trois parties, comme le montre l'image ci-dessous. Il s'agit de répartir les trois diodes de dérivation sur les six chaînes de cellules [17].



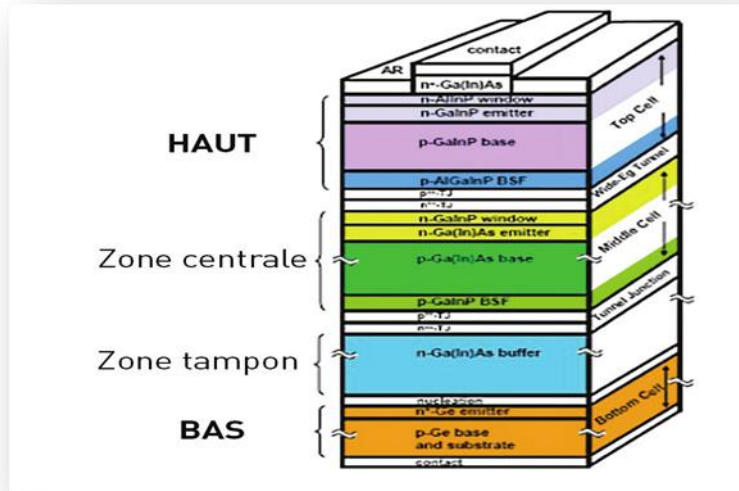
**Figure I.13** : boîtes de jonction [17]

### I.7 cellules solaires multi jonctions

Les cellules solaires à jonctions multiples (MJ) sont des cellules solaires à plusieurs jonctions p-n constituées de différents matériaux semi-conducteurs. La jonction pn de chaque matériau produira un courant électrique en réponse à différentes longueurs d'onde de lumière. L'utilisation de plusieurs matériaux semi-conducteurs permet d'absorber une plus large gamme de longueurs d'onde, ce qui améliore la lumière du soleil de la cellule en efficacité de conversion d'énergie électrique [19].

Actuellement, les meilleurs exemples de laboratoire de cellules solaires conventionnelles en silicium cristallin ont des rendements compris entre 20% et 25%, tandis que des exemples de laboratoire de cellules multi-jonctions ont montré un rendement supérieur à 46% sous une lumière solaire concentrée. Des exemples commerciaux de cellules tandem sont largement disponibles jusqu'à 30% sous illumination avec un seul soleil, et s'améliorent jusqu'à environ 40% avec une lumière solaire concentrée. Cependant, cette efficacité est obtenue au prix d'une complexité et d'un prix de fabrication accrus. Jusqu'à présent, son prix élevé et son rapport qualité-prix élevé ont limité son utilisation dans des travaux spéciaux, en particulier dans le secteur aérospatial, où un rapport résistance/poids élevé est souhaitable. Dans les applications terrestres, ces cellules solaires émergent dans les condenseurs

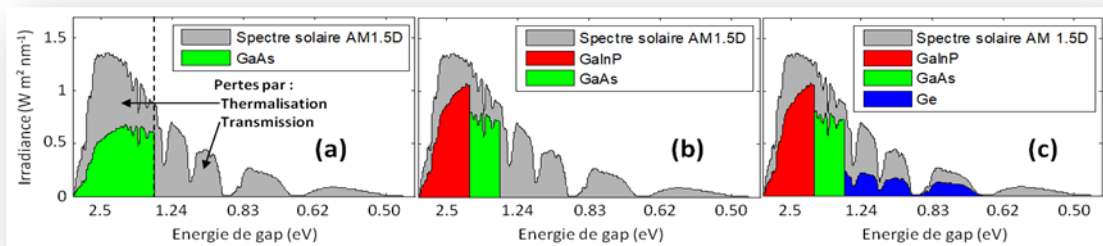
photovoltaïques à condensation (CPV), avec un nombre croissant d'installations dans le monde [20].



**Figure I.14 :** Exemple d'une cellule multi jonctions [22]

## I.7.1 Principe des multi-jonctions

Le principal intérêt des cellules MJ réside dans leur aptitude à convertir une partie beaucoup plus importante du spectre solaire que les cellules de première génération (avec une seule jonction) grâce à l'utilisation de différents matériaux semi-conducteurs de gaps différents. L'exemple est donné pour une triple jonction GaInP/GaAs/Ge au fur et à mesure de l'ajout de chaque jonction en Figure I.15 Henry a ainsi démontré en 1980 que l'on pouvait atteindre un rendement théorique de 72 % avec 36 jonctions de gaps différents, et 56 % avec seulement 3jonctions [23].



**Figure I.15:** Evolution de la conversion du spectre solaire par une cellule mono jonction, tandem et triple jonction pour une MJ GaInP/GaAs/Ge [23].

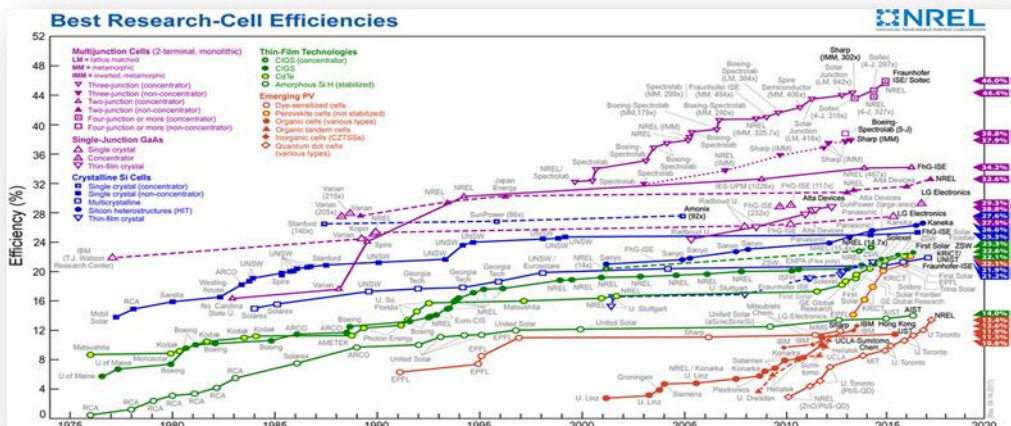
# CHAPITRE I

La proportion du spectre solaire convertie par une cellule mono-jonction GaAs ( $E_g = 1,424 \text{ eV}$ ) est représentée sur (la Figure I.15.a). Les photons d'énergie inférieure au gap sont perdus par transmission. L'écart d'énergie entre l'énergie d'un photon absorbé et celle du porteur récolté représente les pertes par thermalisation [23].

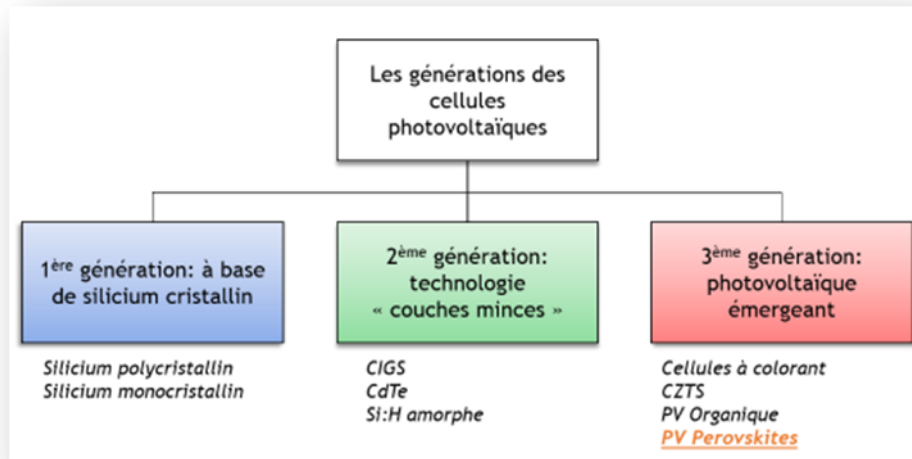
La superposition d'une cellule GaInP ( $E_g = 1,88 \text{ eV}$ ) permet une conversion plus efficace des photons de grandes énergie où les porteurs sont extraits à un et ension plus grande (liée au gap du GaInP). Les pertes par thermalisation sont ainsi réduites (Figure I.15.b). L'ajout d'une cellule en Ge en dessous de la cellule GaAs permet de convertir les photons perdus par transmission (Figure I.15.c) [23].

## I.8 Les filières photovoltaïques

Aujourd'hui, une grande variété de cellules photovoltaïques existe et peut être afin d'avoir une vision globale de ces technologies du point de vue de l'évolution de leur rendement en fonction des améliorations apportées, la Figure I.16 illustre une comparaison des principales familles et de leur progression passée et actuelle. Le choix d'une technologie relève d'un compromis entre rendement énergétique, encombrement associé et coût. Partagée en trois grandes familles selon les technologies utilisées.



**Figure I.16 :** Efficacité et développement de différents types de cellules solaires depuis 1975[22]



**Figure I.17:** Organigramme représentant les différentes générations de cellules photovoltaïques

[4]

## I.8.1 Cellule solaire du Première Génération à base de silicium cristallin

### a) Les cellules à base de Si monocristallin

Les panneaux PV avec des cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Les cellules à base de Si monocristallin ont un rendement de 12 à 18%, elles peuvent produire beaucoup d'énergie sur un petit espace (environ 150 WC/m<sup>2</sup>) et ont une durée de vie de 25 ans. Toutefois ces cellules ne fonctionnent qu'avec un fort ensoleillement et ont une méthode de production laborieuse qui coûte chère [4].

### b) Les cellules à base de Si multi cristallin

Le silicium multi cristallin (poly cristallin) est produit par des techniques de croissance qui permet d'assurer une structure colonnaire avec de gros cristaux, à lui seul il occupe plus de 57% du marché mondial, il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché vu qu'il offre un rendement intéressant (11 à 15%) pour des coûts de fabrication modérés. Cependant, le matériau multi cristallin est d'une part contraint et disloqué, et d'une autre part contaminé par des impuretés résiduelles de la matière première de silicium, notamment du fait qu'il est constitué en grande partie des rebus de l'industrie électronique [14].

## I.8.2 Cellule solaire du Deuxième Génération (couche minces)

### a) Les cellules à base de Silicium Amorphes

Les cellules solaires à base de silicium amorphe sont fabriquées en déposant une ou plusieurs couches minces sur un substrat de verre. Ces cellules possèdent un très faible rendement, de l'ordre de 5% à 8% et subissent une perte de rendement durant les premiers mois de leur utilisation (phénomène de "stabilisation sous lumière"). De plus ces cellules ont des durées de vie plus courtes que les siliciums cristallins (environ 10 ans) et leurs processus de fabrication ne sont pas bien maîtrisés [4].

### b) Les cellules à base de tellure de Cadmium (CdTe)

Jusqu'à présent, la cellule à base de CdTe (Tellure de Cadmium) est considérée comme l'approche la plus prometteuse pour le photovoltaïque terrestre, du fait de ses propriétés optiques optimales. Elle se caractérise par une bande interdite directe de 1,45 eV parfaitement adaptée au spectre solaire, en outre son très grand coefficient d'absorption fait que la quasi-totalité du spectre est absorbé sur une profondeur de 2/Jm, néanmoins les problèmes d'environnement associés à l'utilisation du cadmium ont largement freiné les tentatives de développement dans cette filière [14].

### e) Les cellules à base de Cuivre indium sélénium (CIS) / Cuivre indium Gallium sélénium (CIGS)

Cette filière présente un fort potentiel de développement dans le futur avec des rendements de plus de 20% en laboratoire. Cependant, les matériaux nécessaires à la fabrication de ce type de cellule ne sont pas disponibles en grandes quantités [4].

### f) Les cellules à base de CZTSSe

Le  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$  communément appelé (CZTSSe) apparaît comme un matériau très attractif et à fort potentiel, dans les cellules solaires à base de couches minces, du fait qu'il est fabriqué à partir de matériaux non toxiques, des matières premières abondantes en terres et à faible coût. Ce matériau présente un potentiel de rendement. Les travaux menés pour développer ces matériaux quaternaires ont pu atteindre un rendement jusqu'à 12.6% [4].

## I.8.3 Cellule solaire de la Troisième génération

Cette troisième génération de cellule solaire est encore au stade de la recherche. Cependant, leur développement est très actif et motivé par les applications spatiales vu qu'elles visent principalement à obtenir le plus haut rendement jamais obtenu auparavant, mais en plus à minimiser les inconvénients et les obstacles rencontrés dans les générations précédentes telles que coût de fabrication très élevé, la disponibilité des matériaux ou bien leurs toxicités. Ce genre de cellule aux perspectives très prometteuses offre bel et bien la possibilité de répondre à ces problématiques dans un avenir proche [14].

### c) La filière des cellules organiques

L'effet photovoltaïque a été observé dans les matériaux organiques depuis plus de 40 ans, depuis cette filière a connu le meilleur taux de croissance parmi les différentes filières photovoltaïque durant les 12 dernières années. Les dernières avancées dans le domaine ont permis d'atteindre des rendements de 13,2 %. Son développement à grande échelle est aujourd'hui freiné par la faible mobilité des porteurs de charges dans le matériau, limitant le rendement, et la faible durée de vie des cellules [4].

### d) La filière des pérovskites

C'est un nouveau type des cellules photovoltaïques, elle n'est pas encore sortie des laboratoires. Cette filière est considérée comme étant la technologie la plus prometteuse des systèmes photovoltaïques solaires récents. Les cellules solaires en pérovskite présentent aujourd'hui une alternative attrayante aux cellules en silicium qui dominant aujourd'hui le marché [4].

Par comparaison entre le silicium et les pérovskites, le premier a besoin de 30 ans pour atteindre le record 25,7%, mais les pérovskites ont besoin que de 6 ans pour atteindre un rendement de 20% [4]. De plus les pérovskites ont une capacité d'absorption des photons 10 fois supérieure au silicium et une bonne séparation des charges électriques et leur mobilité [4]. Malgré ces performances les cellules a pérovskites ne peuvent pas concurrencer les cellules à base de silicium car à partir de 40°C elles commencent à se dégradées, et aussi elles deviennent instable lorsque l'humidité dépasse 35%. Donc l'intérêt des chercheurs n'est pas toujours à trouver des meilleurs rendements, mais ils cherchent aussi à améliorer la stabilité de ces cellules [4].

## I.9 Pérovskite

## CHAPITRE I

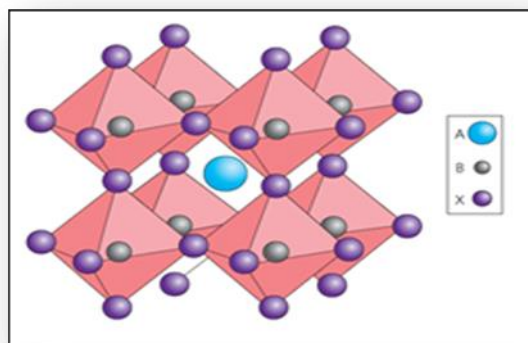
---

La pérovskite désigne originellement un minéral du titanate de calcium de formule  $\text{CaTiO}_3$ . On appelle plus généralement pérovskites les minéraux de même structure, dont un polymorphe de  $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$  considéré comme le minéral le plus abondant du manteau terrestre. Dans la croûte, les pérovskites sont des minéraux accessoires communément trouvés dans les carbonatâtes et l'un des hôtes majeurs pour les terres rares et le niobium[21].



**Figure I.18 :** La pérovskite [22]

La pérovskite possède des propriétés physiques impressionnantes, elle a une très grande absorption de la lumière et une grande longueur de diffusion des charges[24]. En effet, la pérovskite hybride  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ( $\text{MAPbI}_3$ ) a un grand coefficient d'absorption  $1.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$  à 550 nm, elle se caractérise par une grande longueur de diffusion des électrons et des trous (plus de 1  $\mu\text{m}$  et potentiellement 100  $\mu\text{m}$ ) et finalement d'une grande mobilité des porteurs de charges (Nazeeruddin & Snaith, 2015). Cette structure hybride une fois dopée au chlore devient  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ , c'est une structure équivalente à  $\text{MAPbI}_3$  et ayant presque la même mobilité [24]. Cependant, son dopage au chlore lui permet d'avoir une cristallinité élevée grâce aux joints de grains plus petits. De plus, la taille des grains représente un facteur qui limite la conduction des porteurs de charge, même dans les couches minces de meilleure qualité (Herz, 2017) [24]. Par contre, le dopage du chlore rend la mobilité des charges de  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$  légèrement inférieur par rapport à celle de sa voisine  $\text{MAPbI}_3$  (Motta, El-Mellouhi, & Sanvito, 2015) [24].

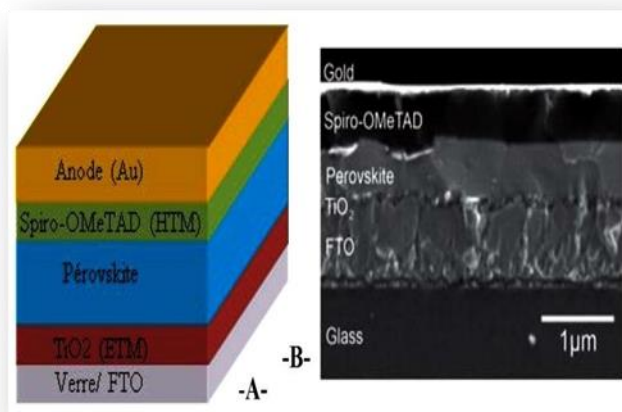


**Figure I.19:** Structure hybride de la pérovskite

Tirée de (Gheno, Vedraïne, Ratier, & Bouclé, 2016) [24]

## I.9.1 Structure d'une cellule photovoltaïque à Pérovskite

La structure obtenue est représentée sur (la figure 20.A) la topographie réalisée avec le microscope électronique à balayage MEB d'une cellule à pérovskite de type verre/FTO/TiO<sub>2</sub>/Pérovskite/Spiro-OMeTAD/Au est représentée sur (la figure 20.B) Différentes architectures et structures de cellules à pérovskites peuvent être réalisées comme le montre la figure 20[25].



**Figure I.20:** Structure d'une cellule photovoltaïque à pérovskites

(A) structure et (B) Image MEB montrant l'architecture d'une cellule solaire à hétérojonction planaire à base de matériaux pérovskites [25]

## I.9.2 Cellule photovoltaïque pérovskite

Nous pouvons constater que seulement pendant les 5 dernières années, le rendement des cellules solaires à base de la pérovskite a largement dépassé les 20 %, ce résultat correspond à titre de comparaison au rendement des cellules inorganiques à base de



silicium monocristallin après 50 ans de développement comme le montre la figure I.16[24].La conception des cellules solaires à base de la pérovskite, a connu un développement énorme, de nouvelles méthodes de fabrication ont été utilisées. Cependant, la technique d'impression révolutionner le domaine photovoltaïque pour les nombreux avantages qu'elle possède tels que, son adaptation facile aux conditions ambiantes et aussi sa flexibilité au niveau du choix des matériaux [24].

La structure multicouche représente la configuration standard pour les cellules photovoltaïques base de la pérovskite. Elle désigne un empilement de plusieurs couches minces. Cette configuration offre la possibilité d'un choix d'épaisseur plus large par rapport à la configuration bicouche, qui possède une épaisseur plus mince de la couche active (30-50 nm) ce qui pourrait éviter des courts-circuits (Drechsel et al. 2004) [24].

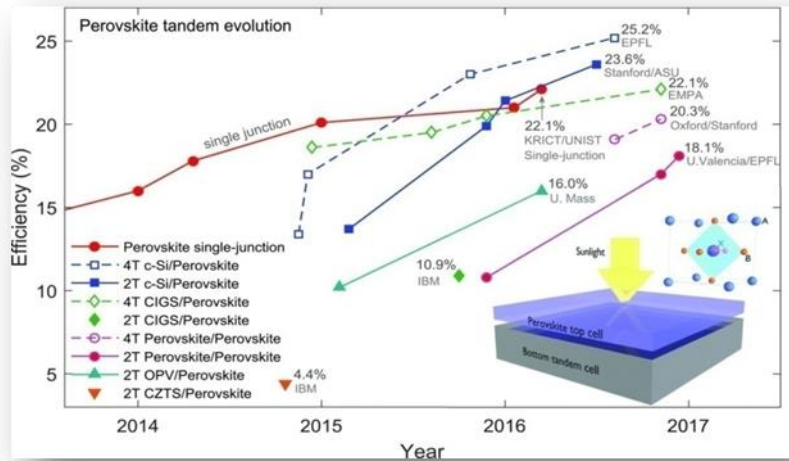
### **I.9.3 Cellules tandem**

Un défi permanent pour les scientifiques est d'améliorer l'efficacité des cellules solaires. Pour récolter le plus d'énergie solaire possible, sans augmenter le coût. Jusqu'à récemment, la technologie des cellules solaires reposait sur le silicium, qui absorbe efficacement certaines longueurs d'onde de la lumière solaire, laissant une partie de l'énergie solaire inexploitée.

Différents semi-conducteurs ont tendance à absorber différentes longueurs d'onde de la lumière solaire, ce qui limite la quantité d'énergie que les cellules solaires peuvent générer à l'aide d'un seul matériau semi-conducteur. Mais les cellules solaires en tandem n'utilisent pas un matériau, mais plusieurs, pour maximiser l'énergie qu'elles peuvent produire.

#### **I.9.3.1 pérovskite tandem évolution**

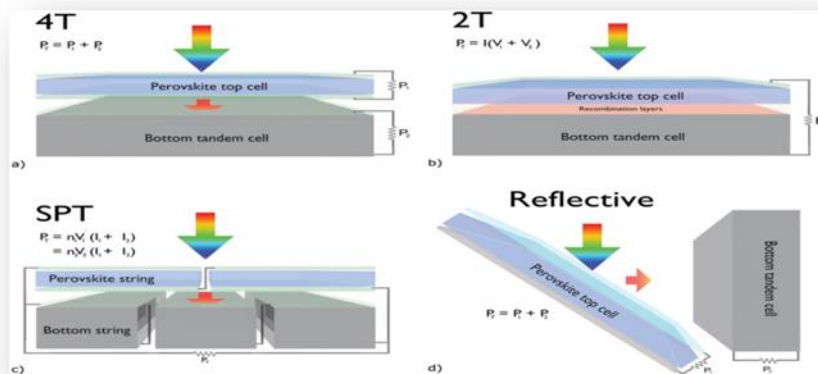
La conception en tandem multi-jonctions s'est avérée être un moyen efficace d'améliorer encore l'efficacité des cellules solaires. Cependant, sa part sur le marché du photovoltaïque (PV) est actuellement infime, puisque le dispositif tandem le plus efficace comprend des semi-conducteurs III-V, qui impliquent l'utilisation de procédés de fabrication coûteux. L'avènement de la pérovskite solaire.



**Figure I.21 :** Évolution de l'efficacité des cellules solaires impliquant des pérovskites inorganiques-organiques aux halogénures métalliques [26].

### I.9.3.2 Configurations en tandem

Les cellules solaires en tandem permettent des rendements plus élevés que les dispositifs à simple jonction en absorbant les photons solaires à plus haute énergie dans un matériau de cellule supérieure à bande interdite élevée où il peut générer un photo courant avec une tension plus élevée que la cellule solaire sous-jacente avec bande interdite plus faible mais coefficient d'absorption plus large[26].



**Figure I.22:** Configurations en tandem avec différents degrés d'indépendance électrique/optique. a) Tandem 4T avec connexion électrique indépendante à les deux cellules. b) Tandem connecté en série 2T. c) Tandem série-parallèle, comprenant des chaînes connectées en série à tension adaptée de cellules supérieures et inférieures. d) Tandem réfléchissant avec réflecteur IR placé sur la cellule inclinée à bande interdite élevée [26]

#### a) Tandem 4T avec connexion électrique indépendante aux deux cellules

## CHAPITRE I

La Figure I.22.a, la structure des deux cellules se présente sous la forme de chaque cellule indépendante, où la cellule, qui à son tour est exposée au rayonnement total, en absorbe une partie et la partie restante passe à la seconde cellule, qui est le rayon filtré.

### b) Tandem connecté en série 2T

La Figure I.22.b, on remarque que la connexion des deux cellules est en séquence, et entre les deux cellules il y a une couche transparente qui permet le passage des rayons.

### c) Tandem série-parallèle

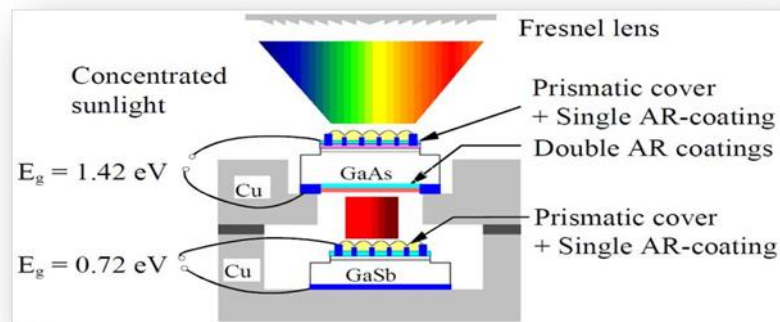
La Figure I.22.c, Tandem série-parallèle, comprenant des chaînes connectées en série à tension adaptée de cellules supérieures et inférieures

### d) Tandem réfléchissant avec réflecteur IR placé sur la cellule inclinée à bande interdite élevée

La Figure I.22.d, Ce dernier fonctionne à travers le processus de réflexion de sorte que la première cellule est inclinée à un certain angle et au-dessus d'elle une couche réfléchissante de rayons à travers laquelle la première cellule absorbe et réfléchit le reste des rayons vers la deuxième cellule, qui est verticale, et chaque cellule est connectée seule.

### I.9.3.3 Empilement mécanique (4T)

Le principe de cette méthode consiste à construire un empilement « mécanique » de cellules mises en série, à titre d'exemple nous donnons sur la Figure 23 le schéma de principe d'un empilement de cellules GaAs/GaSb. Le gros avantage de cette méthode est de pouvoir utiliser des cellules de natures cristallographiques très différentes sans contrainte sur les paramètres de maille des matériaux [23].



**Figure I .23:** Schéma de principe d'un assemblage mécanique de deux et GaSb d'après [23]

## I.9.3.4 Cellule tandem pérovskite/Si

Les technologies de cellules tandem pérovskite/silicium synthétiques constituent la future génération de cellules photovoltaïques. Ces tandems sont formés en installant une cellule à base de matériau pérovskite appelée "cellule supérieure" sur la cellule en silicium "cellule inférieure", en l'installant de l'une des quatre manières, et la cellule pérovskite est exposée au rayonnement, et ces tandems sont plus efficace pour convertir l'énergie solaire reçue, supérieure à celle des cellules silicium à simple jonction, la norme actuelle, à un faible surcoût

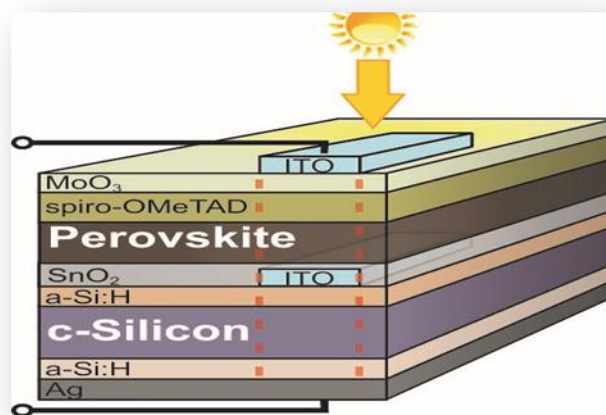


Figure I .24: Cellule tandem Si/pérovskite [22]

## I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le concept théorique et les informations générales sur les cellules solaires. Nous avons également abordé leurs caractéristiques et leurs paramètres, Nous avons également discuté des cellules solaires en tandem, de leurs types et de leur importance dans l'amélioration du rendement.

La chose la plus importante dont nous avons discuté est l'entrée de la pérovskite dans la fabrication des cellules solaires, ces dernières ayant de merveilleuses propriétés optiques et électroniques. Les propriétés optoélectroniques de la pérovskite nous amènent à conclure qu'il s'agit d'un matériau bien adapté aux applications photovoltaïques car il a une bonne absorption visuelle.

# **CHAPITRE**

## **II**

**Le simulateur SCAPS**

### II-1 INTRODUCTION :

La simulation est une méthode puissante pour analyser et comprendre les phénomènes physiques dans les dispositifs à semi-conducteurs. En fait, il existe une gamme d'algorithmes et de programmes différents pour simuler la cellule solaire et comprendre, prédire et améliorer son rendement car il nous en donne les caractéristiques scalaires du courant-tension  $I$  (V) dans des conditions d'éclairage AM1.5 solaire. Notre recherche consiste à connaître la sensibilité des paramètres PV ou de la sortie en courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), Rendement de conversion de la cellule solaire ( $\eta$ ), Tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et facteur de forme (FF).

Il existe de nombreux logiciels de simulation pour cellule photovoltaïque, on peut citer les suivants :

AMPS-1D, PC-1D, ASA, SCAPS-1D, Silvaco etc. Dans ce travail nous utiliserons le logiciel SCAPS-1D.

Dans ce travail, nous avons utilisé SCAPS-1D version 3.3.08 pour simuler et Optimisation d'une cellule solaire tandem pérovskite et silicium et de chaque cellule séparément. Nous étudierons les principaux effets qui affectent les performances des cellules solaires et améliorent le rendement, tels que la modification de l'épaisseur de la couche.

### II.2 LOGICIEL SCAPS :

SCAPS (a Solar Cell Capacitance Simulator) est un programme de simulation de cellule solaire unidimensionnel développé au Département d'Electronique et Systèmes d'Information (ELIS) de l'Université de Gand, Belgique [35]. 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 Burgenland, Koen Decock, Johan Verschraegen, Alex Niemeyer Stefaan Degrave [1].

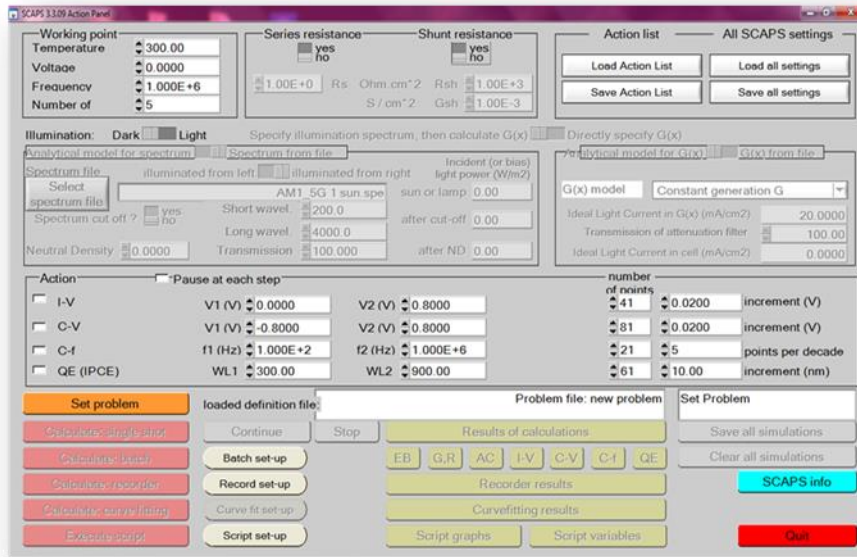


Figure II-1 : Fenêtre d'exécution « action panel » du logiciel SCAPS

### II.2.1 Interface du logiciel SCAPS

Lorsque nous ouvrons le programme SCAPS-1D, nous trouvons la fenêtre de démarrage, comme sur la figure II.2, qui contient un panneau dans lequel nous pouvons contrôler les paramètres externes de la simulation (tels que la température, la tension, la fréquence, la lumière du soleil, etc.)L'écran de démarrage peut être divisé en six parties ou sections qui peuvent être décrites comme suit:

- La section (1) : Indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifier le point de fonctionnement) [36].

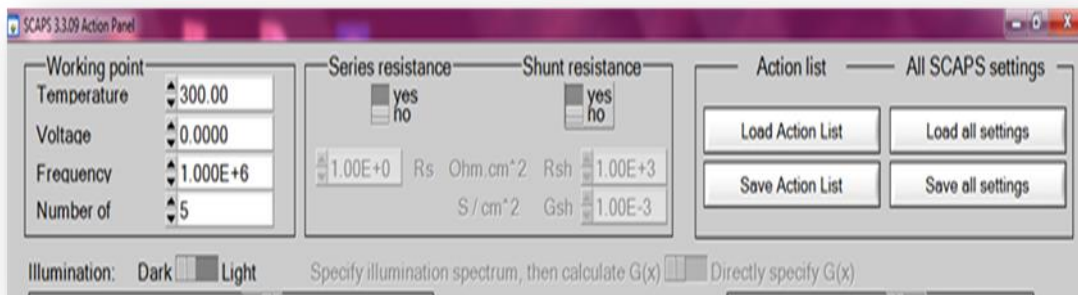
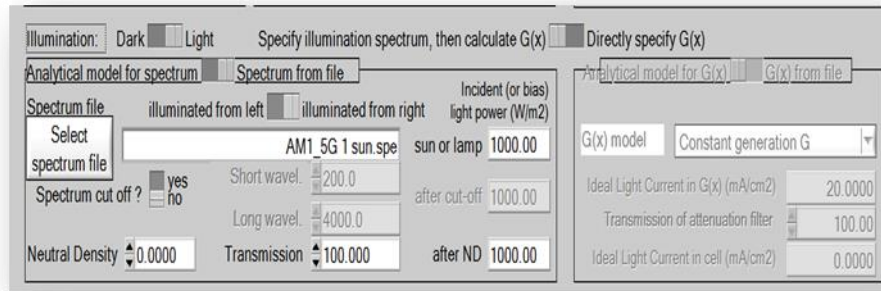


Figure II.2 : La section (1) est le "point de fonctionnement"

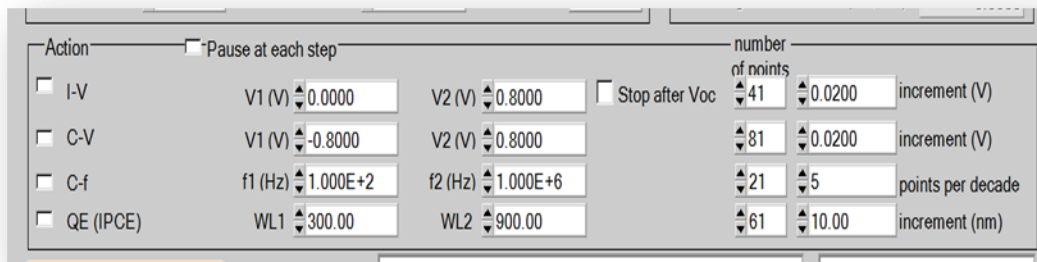
- La Section (2) : représentée dans «Illumination» est dédiée à la sélection des conditions de lumière et d'obscurité et du type de spectre pour la simulation



[1].

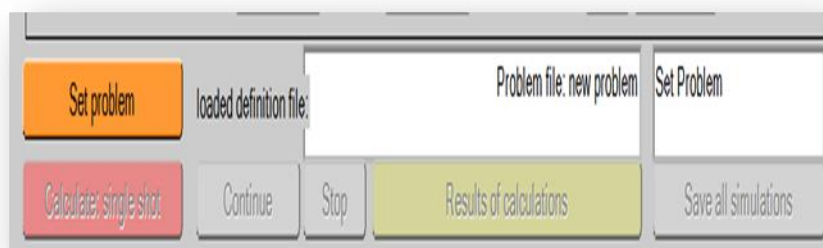
**Figure II.3 :** La section (2) de "Éclairage"

- La Section (3) : Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler



**Figure II.4 :** La section (3) tels que le point de départ de la polarisation appliquée

- La section (4) : Ce champ « Set problème » est un champ très important car il considère le lieu de travail et la conception de la cellule, en saisissant ses paramètres en termes d'épaisseur de cellule, de type et de matériaux, notamment dans la composition de la cellule...etc. Nous approfondirons cela plus tard.



**Figure II.5:** La section (4) « Set problem » car il considère le lieu de travail et la conception de la cellule

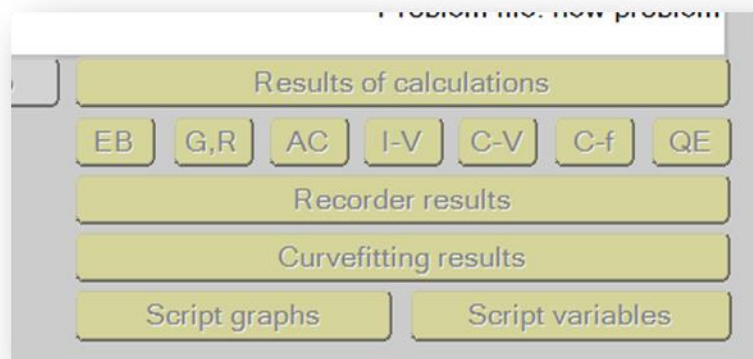


- La section (5) : Dans cette section, nous pouvons commencer le processus de calcul pour la cellule solaire. Cette section présente également certaines fonctionnalités pour le calcul, telles que la saisie de variables qui se produisent sur la cellule, comme un changement d'épaisseur sans avoir à répéter le processus.



**Figure II.6 :** La section (5) présente également certaines fonctionnalités pour le calcul

- Section (6) représentée par «Résultat des calculs» avec le rôle d'affichage des courbes et des résultats de l'appareil simulé

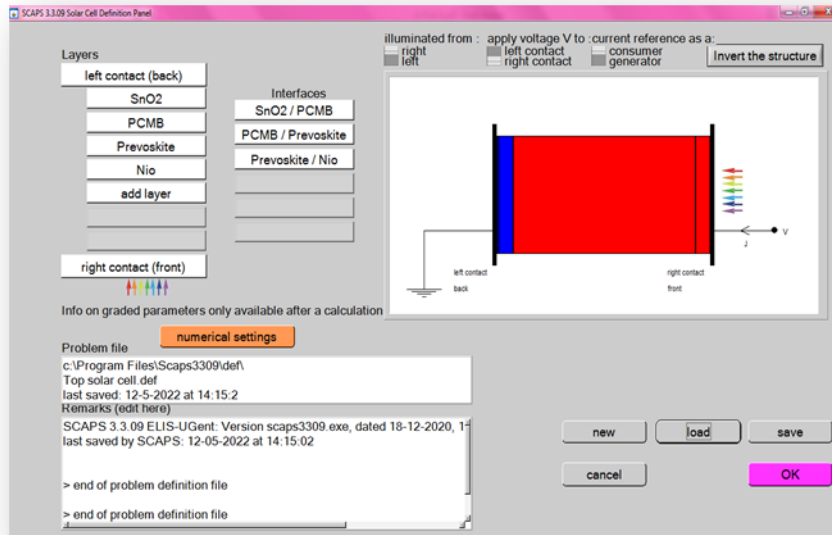


[1].

**Figure II.7:** La section (6) est de voir les résultats du calcul et d'afficher les courbes des simulations cellulaires réalisées.

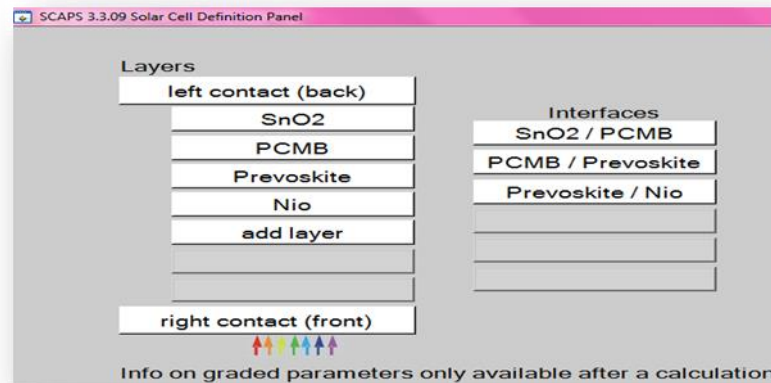
### II.3 .Fenêtre de conception du dispositif (Set Problem)

Lorsque nous entrons dans la zone "Set Problem", la fenêtre suivante apparaît, où il y a un groupe de sections dont nous discuterons pour expliquer chaque section :



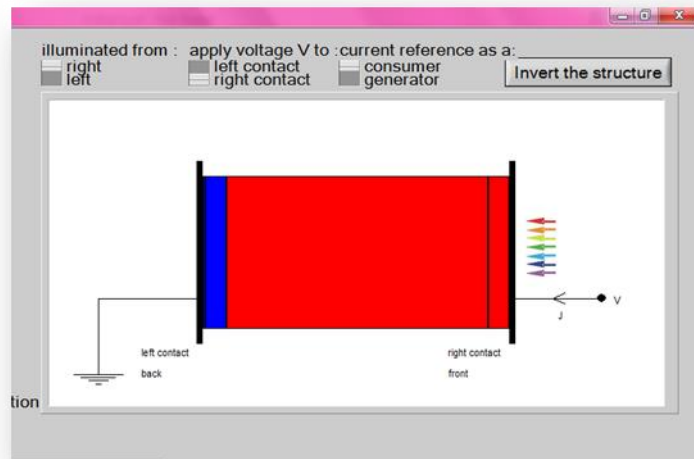
**Figure II.8:** Fenêtre de conception du dispositif (Set Problem)

- dans cette Figure II.9, nous pouvons définir des structures comprenant jusqu'à 9 couches. La première couche est le contact arrière, le dernier est le contact frontal. L'utilisateur peut spécifier les propriétés de toutes les couches [1]:

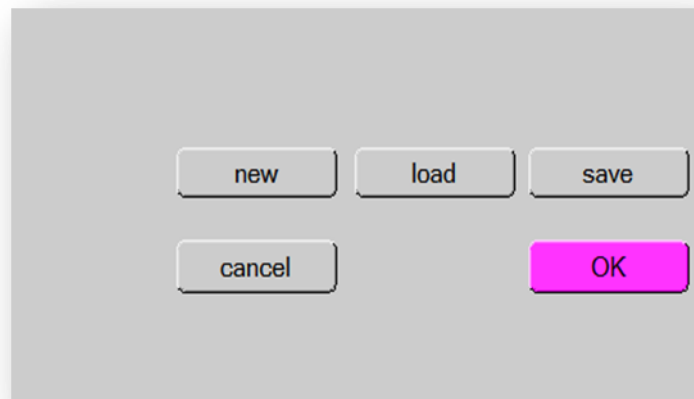


**Figure II.9 :** la section représente la définition des caractéristiques de la cellule solaire

- Figure II.10 : est un affichage de la structure définie du dispositif photovoltaïque avec contact avant et arrière. Il existe également des boutons supplémentaires pour la sélection de l'éclairage du dispositif soit du côté contact arrière soit du côté contact avant, le sens de la tension appliquée à un appareil et enfin un bouton dédié inverser l'ordre des couches de structure [1]:



**Figure II.10 :** la section en nous montrant le schéma de travail et la forme de la cellule étudiée

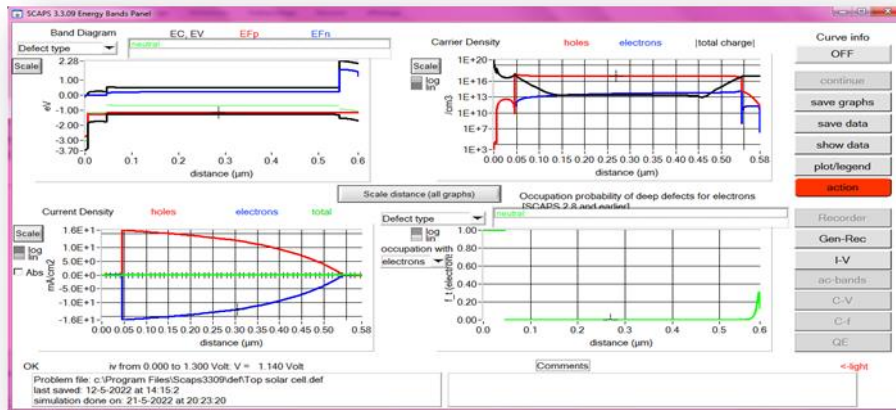


**Figure II.11 :** des boutons pour enregistrer le fichier de définition dans la bibliothèque SCAPS ou une bibliothèque externe

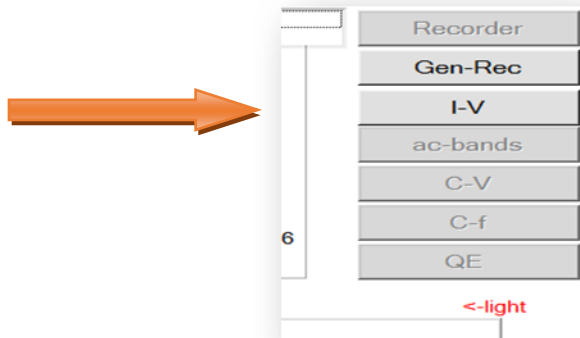
- Figure II.11 : a des boutons pour enregistrer le fichier de définition dans la bibliothèque SCAPS ou une bibliothèque externe, en chargeant les fichiers de définition de structure précédemment enregistrés. Les boutons Annuler et OK permettent de quitter ou d'entrer dans l'interface de définition de l'appareil et de revenir à l'interface de démarrage [1].

### II.4 Fenêtre de résultat

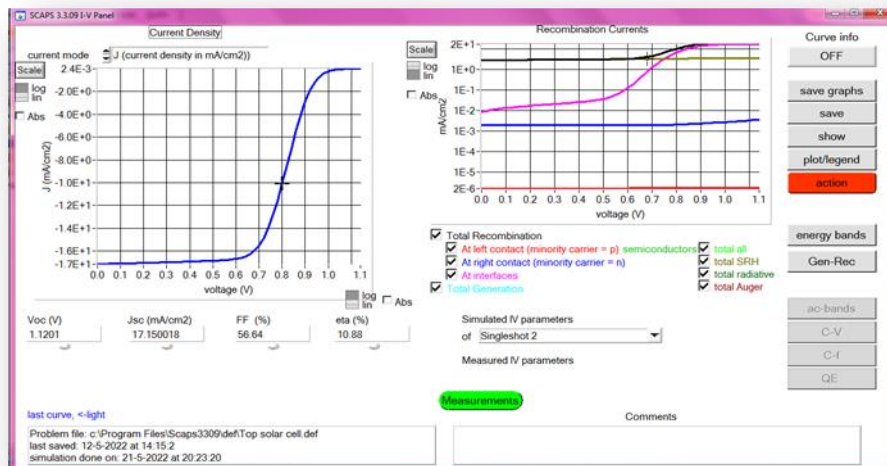
Dans cette fenêtre, vous obtenez les résultats de la cellule à partir de ses paramètres et de ses courbes, comme le montre la figure suivante :



**Figure II.12 : Fenêtre de calcul des résultats**



**Figure II.13 : Vérifier la case des résultats, des paramètres et des courbes**



**Figure II.14 : Fenêtre des résultats**

### II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons découvert l'un des programmes de simulation que nous avons utilisé dans ce chapitre, le programme SCAPS, pour concevoir et simuler des cellules solaires.

Ce programme nous permet d'estimer et d'analyser les paramètres des différentes couches sur les performances des cellules solaires, ainsi que d'améliorer leur efficacité et leurs performances, et c'est notre objectif et ce que nous recherchons.

# **Chapitre III**

## **Résultats de simulation**

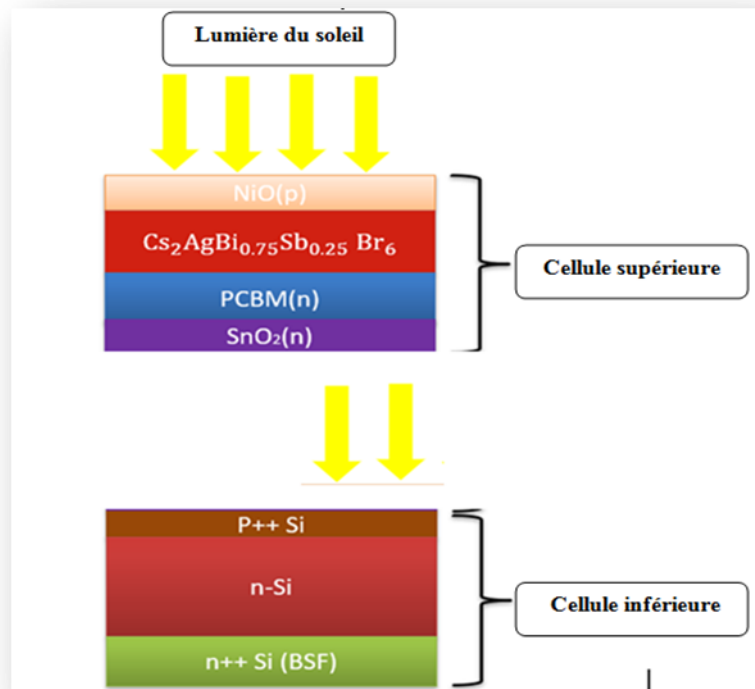
### III.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous étudierons et simulerons les cellules solaires à travers le programme de simulation SCAPS, grâce auquel nous pouvons prédire les caractéristiques de la cellule et connaître son rendement, car nous pouvons contrôler certains facteurs afin d'obtenir des résultats satisfaisants.

Nous allons simuler chaque cellule séparément qui est la cellule de pérovskite/Nio/PCBM/SnO<sub>2</sub>, supérieure et la cellule de silicium inférieure, puis simuler la cellule tandem pérovskite /silicium (4T).

### III.2 Étapes de conception pour la cellule solaire Pérovskite / Si Tandem

La structure de la cellule solaire en tandem basée sur une cellule inférieure en silicium et une cellule supérieure en pérovskite (couche de transport de trous : NiO ; absorbeur : Cs<sub>2</sub>AgBi<sub>0.75</sub>Sb<sub>0.25</sub>Br<sub>6</sub> et une couches de transport d'électrons : PCBM / SnO<sub>2</sub>) [36], Comme le montre la figure III.1



**Figure III.1** : Cellule tandem (4T) avec cellule supérieure (Pérovskite/Nio/ PCBM /SnO<sub>2</sub> ) et une cellule inférieure Si

### III.3 Méthodes et Matériels

## CHAPITRE III

- ✚ La cellule supérieure est constituée d'un groupe de semi-conducteurs représentés dans la pérovskite qui est la couche absorbante, tandis que la couche de transport des trous est représentée par le NiO, Les deux dernières couches (PCBM/SnO<sub>2</sub>) représentent la couche de transport des électrons.
- ✚ La cellule inférieure est représentée par le silicium est constituée de trois couches (type P++ Si, type N-Si, type N++ Si(BSF)).

Les paramètres électriques de tous les matériaux utilisés dans cette simulation sont résumés dans Tableau III.1

**Tableau III.1 :** Propriétés électriques de base des matériaux utilisés dans la structure proposée [36]

| Paramètres   | SnO <sub>2</sub>       | PCBM                 | Pérovskite             | NiO                    | P++ Si                 | n-Si                   | n++ Si                 |
|--|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Épaisseur (µm)   | 0.006                  | 0.04                 | 0.4                    | 0.04                   | 0.02                   | 80                     | 0.1                    |
| Bande interdite (eV)                                     | 3.6                    | 2                    | 1.8                    | 3.8                    | 1.12                   | 1.12                   | 1.12                   |
| Affinité électronique (eV)                               | 4                      | 3.9                  | 3.58                   | 1.8                    | 4.05                   | 4.05                   | 4.05                   |
| Permittivité diélectrique                                | 9                      | 4                    | 6.5                    | 11.7                   | 11.9                   | 11.9                   | 11.9                   |
| Densité effective CB de États (cm <sup>-3</sup> )        | 2.2 × 10 <sup>18</sup> | 1 × 10 <sup>21</sup> | 2.2 × 10 <sup>18</sup> | 2.5 × 10 <sup>20</sup> | 2.8 × 10 <sup>19</sup> | 2.8 × 10 <sup>19</sup> | 2.8 × 10 <sup>19</sup> |
| Densité effective VB de États (cm <sup>-3</sup> )        | 1.8 × 10 <sup>19</sup> | 2 × 10 <sup>20</sup> | 1.8 × 10 <sup>19</sup> | 2.5 × 10 <sup>20</sup> | 2.6 × 10 <sup>19</sup> | 2.6 × 10 <sup>19</sup> | 2.6 × 10 <sup>19</sup> |
| Mobilité électronique (cm <sup>2</sup> /V <sub>s</sub> ) | 100                    | 0.01                 | 2                      | 1 × 10 <sup>-3</sup>   | 1.04 × 10 <sup>3</sup> | 1.04 × 10 <sup>3</sup> | 1.04 × 10 <sup>3</sup> |
| Mobilité des trous (cm <sup>2</sup> /V <sub>s</sub> )    | 25                     | 0.01                 | 2                      | 1 × 10 <sup>-3</sup>   | 4.2 × 10 <sup>2</sup>  | 4.2 × 10 <sup>2</sup>  | 4.2 × 10 <sup>2</sup>  |
| Densité des donateurs (cm <sup>-3</sup> )                | 5 × 10 <sup>14</sup>   | 5 × 10 <sup>14</sup> | 1 × 10 <sup>13</sup>   | 0                      | 0                      | 1 × 10 <sup>14</sup>   | 1 × 10 <sup>22</sup>   |



|                               |   |   |                    |                             |   |   |
|-------------------------------|---|---|--------------------|-----------------------------|---|---|
| Densité                       | 0 | 0 | $1 \times 10^{17}$ | $5 \times 5 \times 10^{19}$ | 0 | 0 |
| d'accepteurs<br>( $cm^{-3}$ ) |   |   |                    | $10^{17}$                   |   |   |

### III.4 Le spectre solaire utilisé

La cellule supérieure a base de pérovskite a été simulée selon la norme Spectre AM 1,5 G représenté dans la figure III.2, La cellule inférieure a été simulée par le spectre filtré AM 1,5 G (Figure III.3) obtenu à partir de la relation suivante :

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) \times \exp\left(-\sum_{i=1}^4 (\alpha_{material_i}(\lambda) \times d_{material_i})\right) \quad (III.1)[36]$$

Talque

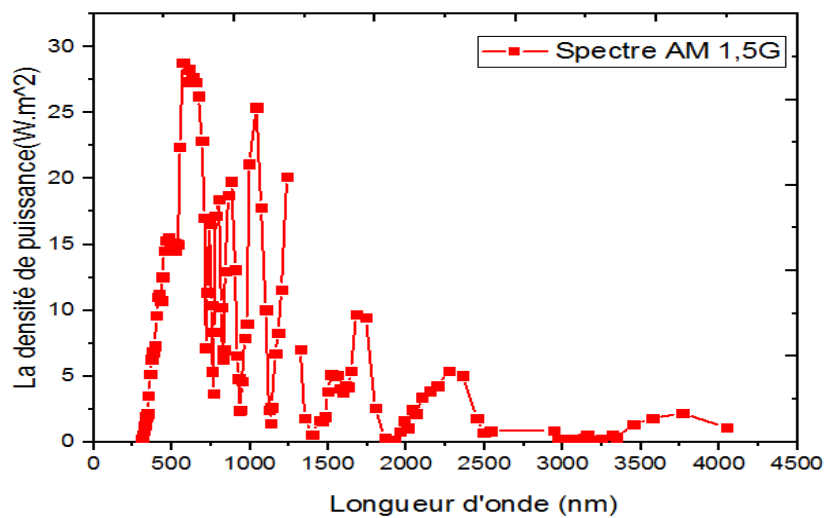
$S(\lambda)$ : Puissance du spectre filtré (Watt/m<sup>2</sup>) à différentes longueurs d'onde.

$S_0(\lambda)$ : Puissance spectrale AM 1,5 G (Watt/m<sup>2</sup>) à différents longueur d'onde.

$\alpha_{material_i}(\lambda)$ : Coefficient d'absorption de différents matériaux à différents longueur d'onde.

$d_{material_i}$ : Épaisseur de différents matériaux.

Les coefficients d'absorption de différents matériaux sont représentés dans la figure III.4.



**Figure III.2:** Spectre AM 1.5G absorbé par la cellule supérieure pérovskite

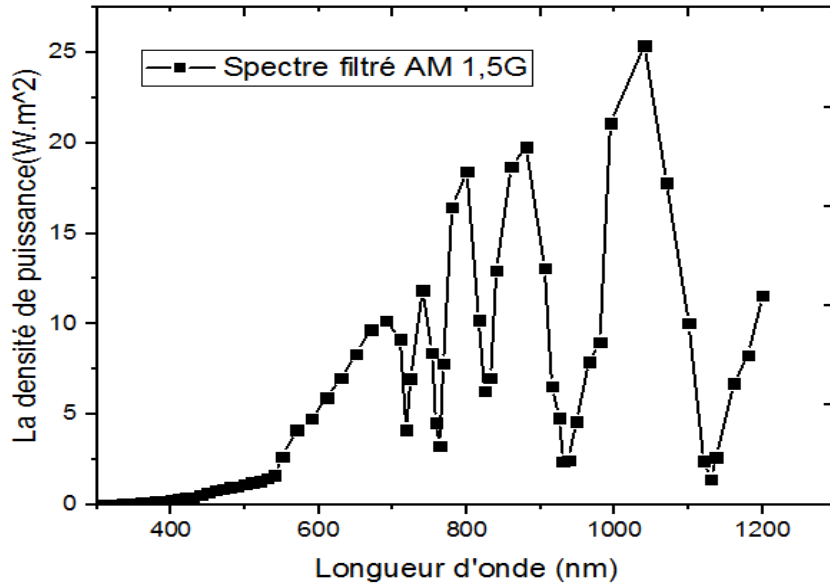


Figure III.3: Spectre filtré AM 1.5G absorbé par le silicium de la cellule inférieure

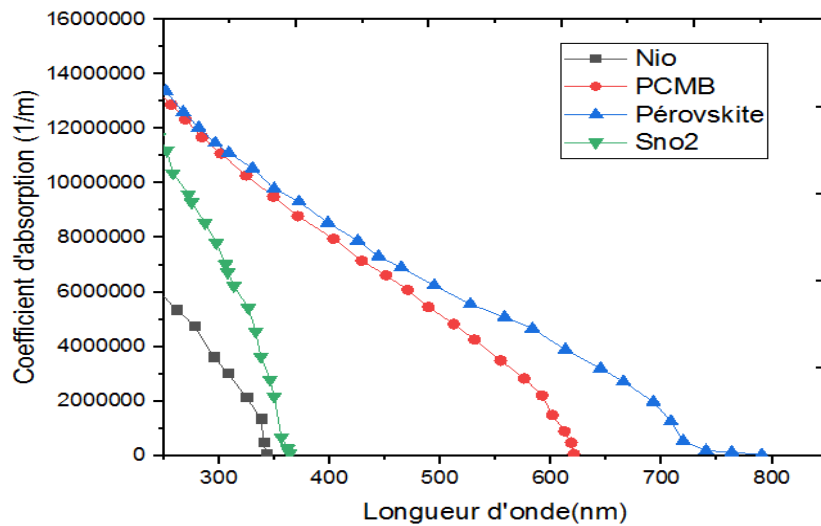
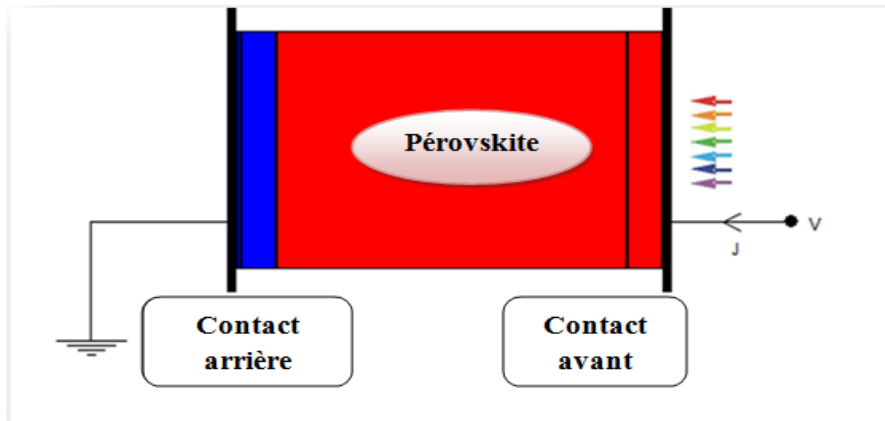


Figure III.4 : Coefficients d'absorption de  $\text{Cs}_2\text{AgBi}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}\text{Br}_6$ , NiO, PCBM et SnO<sub>2</sub> utilisés dans la simulation [36]

### III.5 Cellule solaire Pérovskite individuelle

#### III.5.1 Présentation de la structure

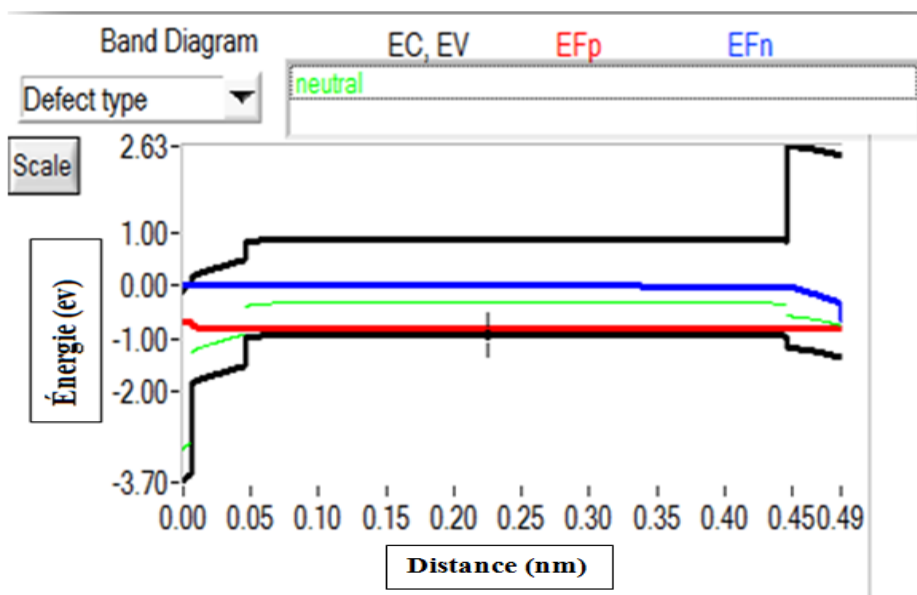
La figure III.5 représente la structure la Cellule solaire Pérovskite individuelle dans le programme de simulation SCAPS, après le saisie des paramètres des matériaux cellulaires.



**Figure III.5 :**Structure la Cellule solaire Pérovskite individuelle à l'aide du logiciel de simulation SCAPS

### III.5.2 Diagramme des bandes d'énergie

La figure III.6 est le diagramme de bandes d'énergie de la cellule supérieure à l'état indépendant c'est-à-dire en l'absence du spectre solaire et ( $V=0$ )



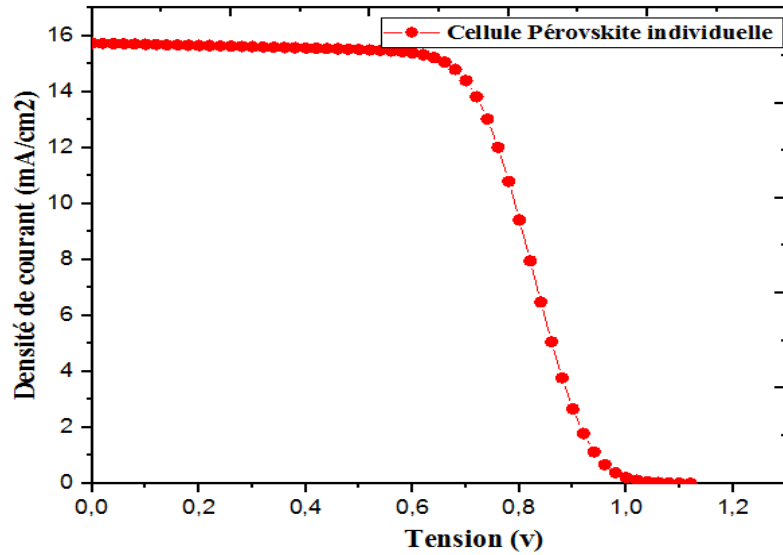
**Figure III.6 :**Diagramme des bandes d'énergie de la cellule pérovskite à l'équilibre ( $v=0$ )

### III.5.3 Résultats des simulations et discussions

La figure III.7 représente la courbe J-V de simulation de la Cellule solaire Pérovskite individuelle dont le spectre solaire est le AM 1.5G, En analysant cette courbe, on obtient les résultats suivants :

- ✓ Lorsque ( $V=0$  v ) Nous trouvons ( $J_{cc} = 15.73 \text{ mA/cm}^2$ ) qui représente Densité du courant de court-circuit

✓ Lorsque ( $J_{cc} = 0 \text{ mA/cm}^2$ ) Nous trouvons ( $V_{co} = 1.1136 \text{ v}$ ) qui représente la tension de circuit ouvert.



**Figure III.7 :** Courbe (J-V) de simulation de la Cellule solaire Pérovskite individuelle dans le spectre solaire AM 1,5G

### III.5.4 Caractéristique J-V

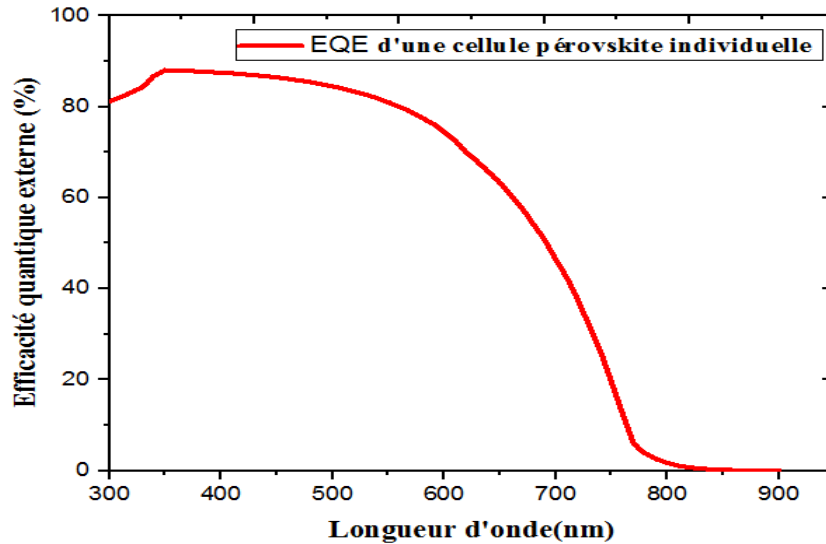
Le tableau III.2 regroupe les paramètres électrique de la Cellule Pérovskite individuelle.

**Tableau III.2 :** Résultats et paramètres de la Cellule Pérovskite individuelle

| Paramètres                                    | $J_{cc} \text{ (mA.cm}^{-2}\text{)}$ | $V_{co} \text{ (V)}$ | FF (%) | $\eta \text{ (%)}$ |
|---|--------------------------------------|----------------------|--------|--------------------|
| <b>Cellule Pérovskite individuelle 1.8 eV</b> |                                      |                      |        |                    |
| Références<br>[36]                            | 15.1                                 | 1.12                 | 58     | 9.80               |
| Notre travail                                 | 15.73                                | 1.1136               | 57.39  | 10.48              |

### III.5.5 Efficacité quantique

La cellule supérieure atteint plus de 80 % d'EQE à une longueur d'onde d'environ 400 nm, puis diminue à une longueur d'onde d'environ 800 nm en raison de la bande interdite élevée de la pérovskite (1.8 eV).

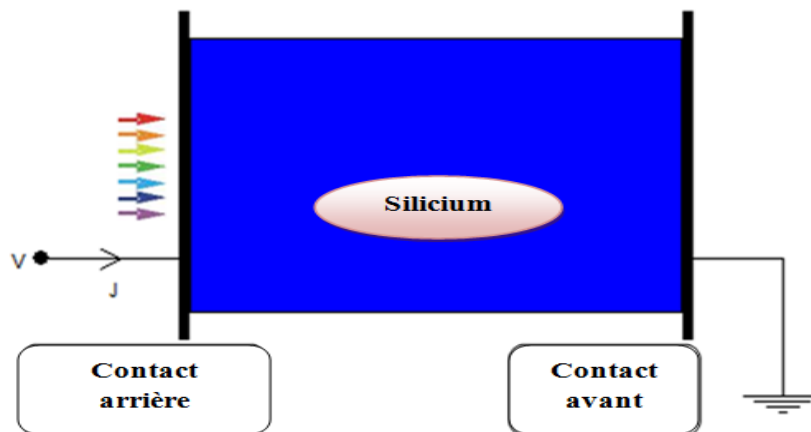


**Figure III.8 :** Efficacité quantique externe (EQE) d'une cellule pérovskite individuelle

### III.6 Cellule solaire Si individuelle

#### III.6.1 Présentation de la structure

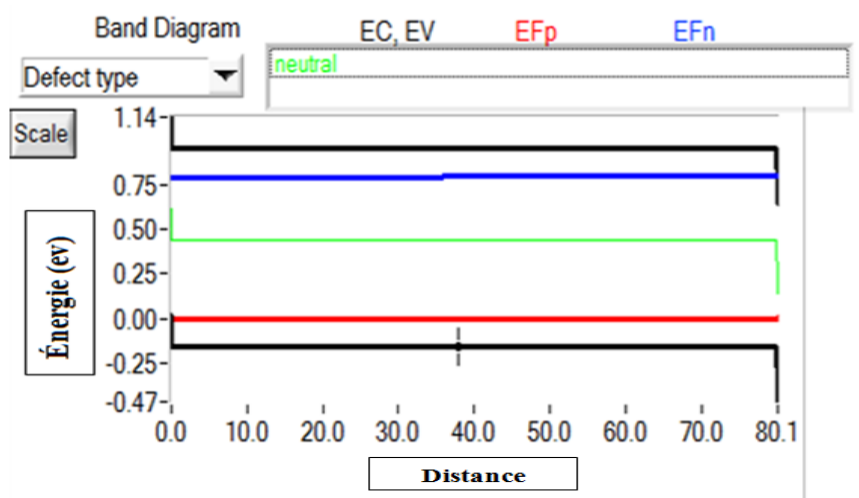
La figure III.9 représente la structure de la Cellule solaire silicium individuelle dans le logiciel de simulation SCAPS, après la saisie des paramètres des matériaux cellulaires.



**Figure III.9 :** Structure de la Cellule silicium individuelle à l'aide du logiciel de simulation SCAPS

#### III.6.2 Diagramme des bandes d'énergie

La figure III.10 est le diagramme de bandes d'énergie de la Cellulesilicium individuelleà l'état indépendant c'est-à-dire en l'absence du spectre solaire et ( $V=0$ )

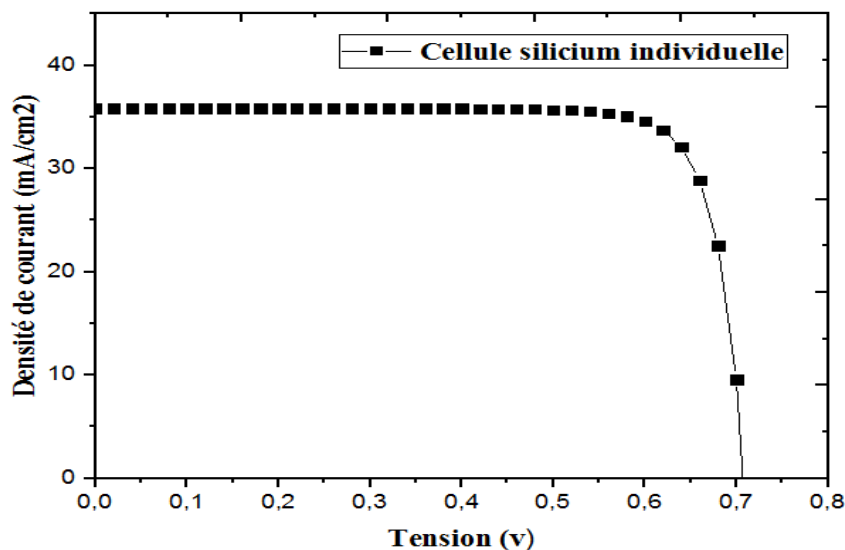


**Figure III.10** :Diagramme des bandes d'énergie de la cellule Si à l'équilibre(  $v=0$ )

### III.6.3 Résultats des simulations et discussions

La figure III.11 représente la courbe (J-V)de simulation de la Cellule solaire silicium individuelle dont le spectre solaire est AM 1.5G, En analysant cette courbe, on obtient les résultats suivants :

- ✓ Lorsque ( $V=0$  v ) Nous trouvons(  $I_{cc} = 37.22\text{mA/cm}^2$ ) qui représente Densité du courant de court-circuit
- ✓ Lorsque (  $I_{cc} = 0\text{mA/cm}^2$ ) Nous trouvons ( $V_{co} = 0.70$  v) qui représente la tension de circuit ouvert.



**Figure III.11** : Courbe (J-V) de simulation de la Cellule individuelle a base de silicium le spectre solaire AM 1,5G

### III.6.4 Caractéristique J-V

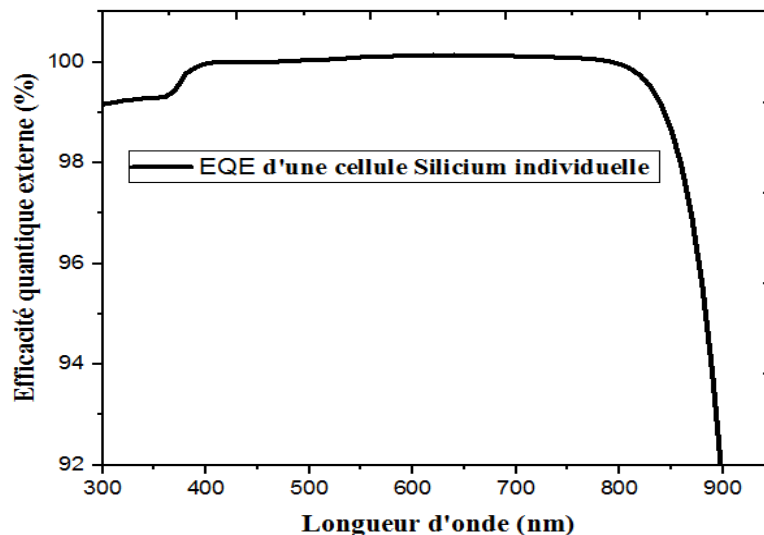
Le tableau III.3 regroupe les paramètres électrique de la cellule individuelle a base de silicium.

**Tableau III.3** : Résultats et paramètres de la cellule silicium individuelle

| Paramètres                                   | Jcc (mA.cm <sup>-2</sup> ) | Vco(V) | FF (%) | η(%)  |
|--|----------------------------|--------|--------|-------|
| <b>Cellule Silicium individuelle 1.12 eV</b> |                            |        |        |       |
| Références [36]                              | 37.7                       | 0.620  | 78.0   | 18.9  |
| Notre travail                                | 37.22                      | 0.70   | 82.46  | 21.01 |

### III.6.5 Efficacité quantique

La Cellule Silicium individuelle plus de 90 % de rendement quantique à une longueur d'onde d'environ 300 nm, puis une diminution à une longueur d'onde d'environ 900 nm en raison de la bande interdite pour le silicium (1.12 eV).



**Figure III.12** : Efficacité quantique externe (EQE) d'une cellule Silicium individuelle

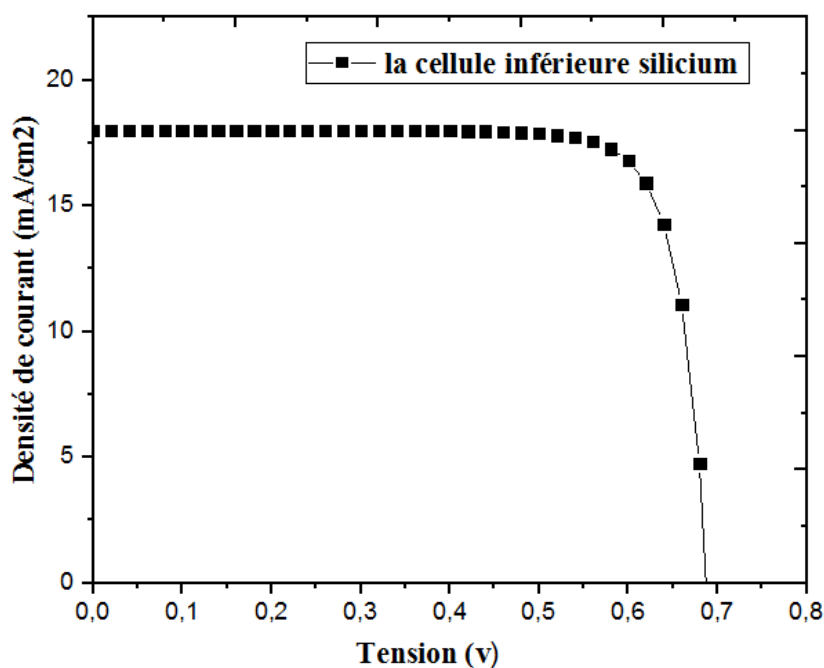
**III.7 Simulation de la cellule tandem pérovskite/Si empilée mécaniquement**

**III.7.1 Simulation de cellule en silicium inférieure par spectre AM 1.5G filtré**

**III.7.1.1 Résultats des simulations et discussions**

Nous avons simulé la cellule inférieure base de silicium par spectre AM 1.5G filtré d'après l'équation III.1, a fin d'étudier la cellule tandem pérovskite / silicium, où nous avons obtenu la courbe (J-V) suivante et les résultats suivants :

- ✓ Lorsque ( $V=0$  v ) Nous trouvons ( $J_{cc} = 17.64$  mA/cm<sup>2</sup>) qui représente la densité du courant de court-circuit.
- ✓ Lorsque ( $J_{cc} = 0$  mA/cm<sup>2</sup>) Nous trouvons ( $V_{co} = 0.688$  v) qui représente la tension de circuit ouvert.



**Figure III.13:** Courbe (J-V) de simulation de la cellule inférieure silicium dans spectre filtré AM 1,5G

**III.7.1.2 Caractéristique J-V**

Le tableau III.4 regroupe les paramètres électrique de la cellule inférieure a base de silicium.

**Tableau III.4 :** Résultats et paramètres de la Silicium cellule inférieure



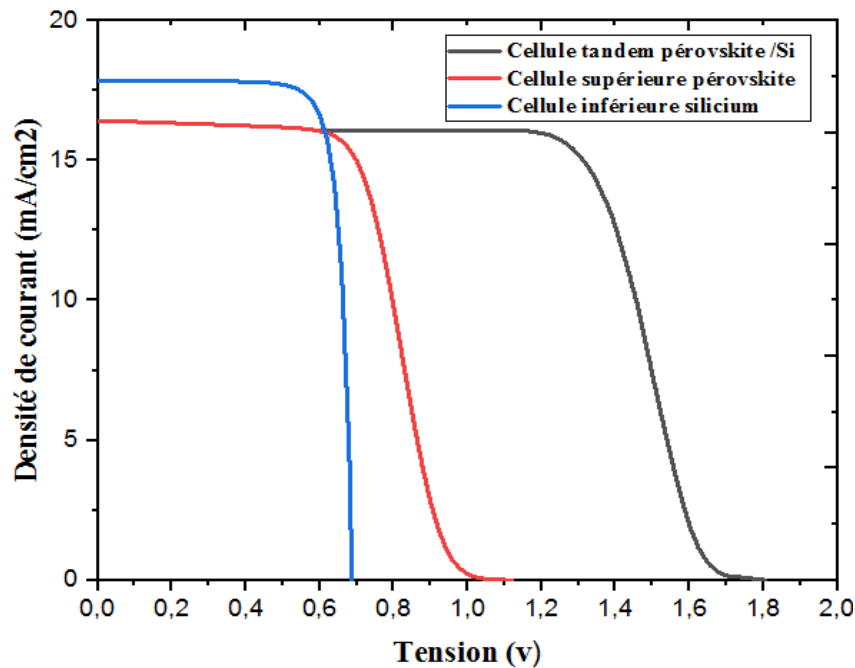
| Cellule inférieure à base de Silicium 1.12 eV |                               |                     |        |       |  |
|---|-------------------------------|---------------------|--------|-------|--|
| Paramètres                                    | Jcc<br>(mA.cm <sup>-2</sup> ) | V <sub>co</sub> (V) | FF (%) | η(%)  |  |
| Cellule inférieure                            | Si 17.64                      | 0.688               | 81.88  | 10.36 |  |
| Cellule individuelle                          | Si 37.22                      | 0.70                | 82.46  | 21.01 |  |

### III.7.2 la cellule totale (tandem) pérovskite/Si

#### III.7.2.1 Résultats des simulations et discussions

La figure III.14 représente la courbe (J-V) de la cellule tandem pérovskite / silicium, où la cellule supérieure a été simulée en utilisant le spectre solaire AM.1.5G et la cellule inférieure dont le spectre utilisé est le spectre filtré. Comme nous le notons :

- ✓ Le courant de la cellule tandem est imposé par le plus faible courant qui est représenté par le courant de la cellule supérieure à base de pérovskite (15.73 mA/cm<sup>2</sup>).
- ✓ La tension  $V_{co}$  de la cellule tandem est égale à la somme de  $V_{co}$  de la cellule supérieure et  $V_{co}$  de la cellule inférieure (1.8016V).



**Figure III.14:** Courbe (J-V) de simulation de la cellule tandem pérovskite /Si (cellule inférieure Si dans spectre filtré AM 1,5G)

**III.7.2.2 Caractéristique J-V**

Le tableau III.5 regroupe les paramètres électrique de la cellule tandem pérovskite /Si, cellule inférieure Si dans spectre filtré AM 1,5G)

**Tableau III.5 :** Résultats et paramètres de la cellule tandem pérovskite /Si

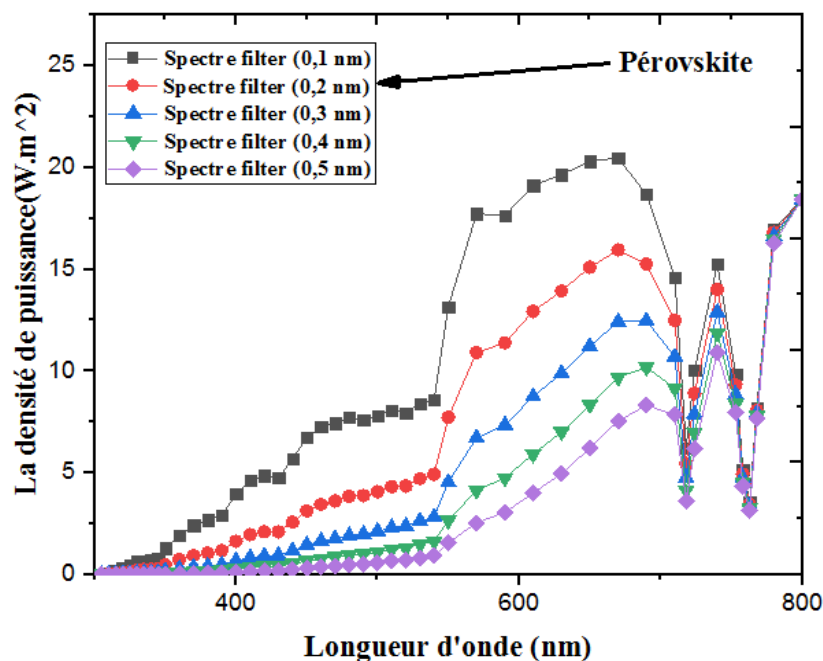
| Tandem     |                            |        |        |       |
|------------|----------------------------|--------|--------|-------|
| Paramètres | Jcc (mA.cm <sup>-2</sup> ) | Vco(V) | FF (%) | η(%)  |
|            | 15.73                      | 1.8016 | 73.78  | 21.87 |

- ✓ Nous obtenons la valeur de FF à partir de la relation (I.20)
- ✓ On trouve la valeur du rendement η à partir de la relation (I.21)

**III.8 Cellule solaire tandem optimisée**

**III.8.1 Calcul du spectre filtré de la sous-cellule inférieure à différentes épaisseurs de couche pérovskite supérieure**

La figure III.15 représente les spectres filtrés de la sous-cellule inférieure de silicium à différentes épaisseurs de la couche supérieure de pérovskite.

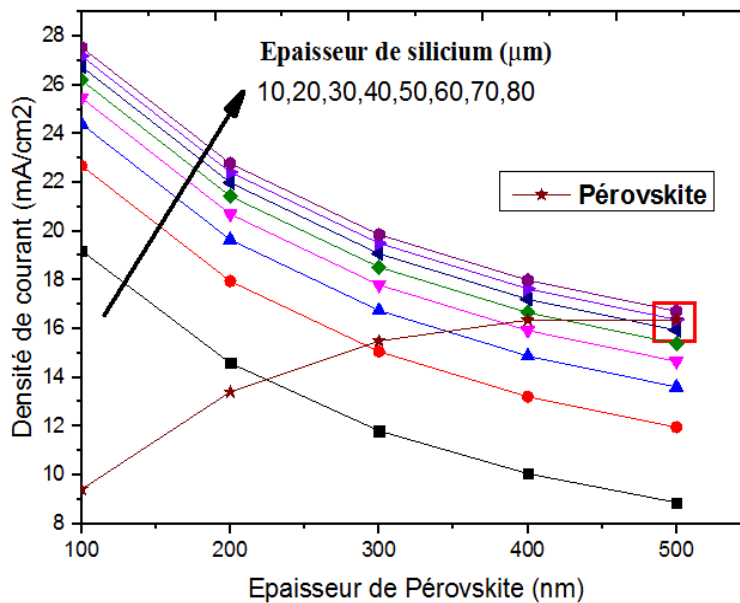


**Figure III.15:** Les spectres filtrés de la sous-cellule inférieure à différentes épaisseurs de la couche supérieure

**III.8.2 Point de correspondance actuel (Current Matching)**

Pour optimiser notre cellule tandem, nous avons modifié l'épaisseur de la cellule inférieure de silicium et les spectres filtrés à partir d'un changement d'épaisseur de la cellule supérieure à base de pérovskite, Les résultats obtenus à partir de la Figure III.16:

- ✓ En changeant l'épaisseur de la cellule inférieure à base de silicium de (10 à 80 $\mu\text{m}$ ).
- ✓ En changeant l'épaisseur de la cellule supérieure à base de pérovskite (0.1 à 0.5 nm).
- ✓ Trouver et déterminer le plus grand point d'intersection de la courbe de pérovskite avec les courbes de silicium, Les coordonnées du point d'intersection sont : (x (pérovskites)=0.499 $\mu\text{m}$ , x (silicium)=70 $\mu\text{m}$ ).



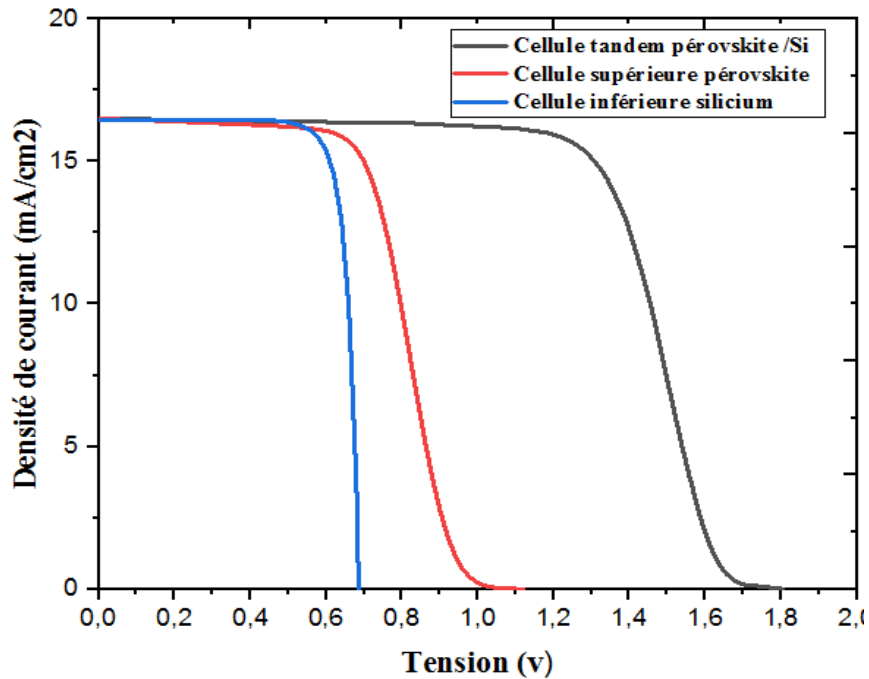
**Figure III.16 :** calcul du point de correspondance actuel en variant à la fois le l'épaisseur de la couche supérieure et inférieure de l'absorbeur.

**III.8.3 Résultats de simulation et discussions pour le point (current matching)**

Lors de la simulation de cellules tandem pérovskite /silicium au point d'intersection d'une épaisseur de pérovskite (x (pérovskites)=0.499 $\mu\text{m}$ ) et d'un épaisseur de silicium (x (silicium)=70 $\mu\text{m}$ )

Nous obtenons les résultats suivants à partir de la figure III.17

- ✓ La cellule tandem et les cellules supérieure et inférieure ont le même courant ( $J_{cc}=16.48\text{mA/cm}^2$ )
- ✓  $V_{co}$  de la cellule tandem est égal à la somme de  $V_{co}$  de la cellule supérieure et  $V_{co}$  de la cellule inférieure (1.1186V).



**Figure III.17 :** Courbe (J-V) de simulation en tandem pour la pérovskite/Si, la cellule supérieure et la cellule inférieure ( $x$  (pérovskites)= $0.499\mu\text{m}$ ,  $x$  (silicium)= $70\mu\text{m}$ )

### III.8.4 Caractéristique J-V

Le tableau III. regroupe les paramètres électrique de la cellule tandem pour la pérovskite/Si, la cellule supérieure et la cellule inférieure ( $x$  (pérovskites)= $0.499\mu\text{m}$ ,  $x$  (silicium)= $70\mu\text{m}$ )

**Tableau III.6 :** Résultats et paramètres de la cellule tandem pérovskite /Si ( $x$  (pérovskites)= $0.499\mu\text{m}$ ,  $x$  (silicium)= $70\mu\text{m}$ )

| Cellule supérieure Pérovskite 1.8 eV |                             |        |        |            |
|--------------------------------------|-----------------------------|--------|--------|------------|
| Paramètres                           | Jcc ( $\text{mA.cm}^{-2}$ ) | Vco(V) | FF (%) | $\eta$ (%) |
| Pérovskite=<br>$0.499(\mu\text{m})$  | 16.50                       | 1.1186 | 56.86  | 10.91      |
| Cellule inférieure Si 1.12 eV        |                             |        |        |            |

|                          |       |        |       |       |
|--------------------------|-------|--------|-------|-------|
| Si = (70 $\mu\text{m}$ ) | 16.48 | 0.688  | 81.54 | 9.49  |
| <b>Tandem</b>            |       |        |       |       |
|                          | 16.48 | 1.8066 | 74    | 23.04 |

- ✓ Nous obtenons la valeur de FF à partir de la relation (I.20)
- ✓ On trouve la valeur du rendement  $\eta$  à partir de la relation (I.21)

### III.9 Conclusion

Dans ce troisième et dernier chapitre, les performances optimales des cellules tandem à base de pérovskite et de silicium ont été déterminées par simulation avec le logiciel SCAPS. Les résultats de la simulation ont clairement montré que l'épaisseur des couches absorbantes de la cellule et ses paramètres (épaisseur de couche) jouent un rôle important dans les performances des cellules solaires. Des résultats de simulation sont attendus. L'efficacité de conversion est d'environ 10,48% de la cellule pérovskite dont la cellule solaire individuelle à base de silicium est d'environ 21,01%. La simulation de la cellule tandem, a donné un rendement de 21,78%.Après l'optimisation, on utilisant la méthode de (Current matching), Le rendement de la cellule tandem est augmenté est atteint une valeur de 23,04 %.

*Conclusion*

*Générale*

### *Conclusions Générale*

Le travail effectué dans cette mémoire constitue une contribution à l'étude et à la simulation de cellules solaires tandem (4T) pour la pérovskite et le silicium.

Notre objectif principal était de modéliser les propriétés électriques des cellules solaires et de prédire leur comportement à l'aide du simulateur solaire SCAPS. Nous nous intéressons principalement à l'étude des cellules solaires en À base de pérovskite et de silicium. L'objectif est de maximiser ses rendements en définissant des paramètres de fonctionnement optimaux.

Nous avons planifié notre travail pour étudier l'effet de l'épaisseur des couches de pérovskite et de silicium sur les propriétés de la cellule solaire tandem.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à étudier chaque cellule séparément, la cellule supérieure pérovskite et la cellule inférieure silicium, puis les performances des deux cellules ensemble (cellule tandem) ont été étudiées sans aucun effet, et nous avons constaté une amélioration des performances avec une valeur de 21,78%. Ensuite, nous avons étudié l'effet de l'épaisseur de la couche absorbante des cellules supérieure et inférieure, et il a été constaté que la valeur optimale de l'épaisseur est de 0.499  $\mu\text{m}$  pour une cellule à base de pérovskite et de 70  $\mu\text{m}$  pour une cellule à base de silicium. Les résultats obtenus montrent qu'il y a une augmentation du rendement de 23,04

---

# Bibliographie

[1] Mme CHADEL Meriem « Modélisation et simulation de la production photovoltaïque, de la cellule au système. Optimisation du fonctionnement des installations photovoltaïques et des performances des nouvelles cellules CZTSSe », mémoire de DOCTORAT , UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEN

[3] <https://www.youtube.com/watch?v=JUUUUCTjqxYQ>

[4] GOUFI Meriem , HAMDOUNI Badr « Etude et Simulation D'une Cellule Photovoltaïque à Pérovskite » , Mémoire de Master, Université Larbi Bun M'Hidi O.E.B 2020/2021 .

[7] Abdoulwahab ADAINE « Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN » , DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE , 06 juillet 2018

[8] Hasni Hadjèr « Caractérisation Automatisée d'une cellule solaire » , Mémoire de Master, Université Med Khider Biskra , Domaine des Sciences de la Matière, 2013 /2014

[9] <http://dspace.univ-tlemcen.dz>

[10] David Reaux « Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium (a-SiH/c-Si) : modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface » DE L'UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY PRÉPARÉE À L'UNIVERSITÉ PARIS-SUD , de doctorat , 30 juin 2017.

[11] <https://www.pveducation.org>

[12] des écoles doctorales et des diplômes d'études approfondies de l'INSA de Lyon

<http://csidoc.insa-lyon.fr>

[13] BENDJEBBAR Kamel Eddine « Amélioration des rendements des cellules photovoltaïques à filière silicium » جامعة وهران للعلوم والتكنولوجيا محمد بوضياف  
de doctorat Année universitaire 2020 – 2021

[14] Mohamad mimoune « ÉTUDE DES CAPTEURS PHOTOVOLTAÏQUES BASÉS SUR LES NANOTECHNOLOGIES » l'université DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES MARS 2016

[15] <https://www.aljazeera.net/>

[16] <https://www.sciencesetavenir.fr>

[17] <https://thesolarest.com>

[18] <https://solarabic.com>

[19] <https://stringfixer.com>

[20] <https://www.hisour.com>

[21] <https://ar.wikipedia.org>

[22] <https://www.google.com/> image



---

[23] Alexandre Vauthelin « Fabrication et caractéristiques de cellules photovoltaïques multi-jonctions à base de matériaux antimoniures (III-Sb) pour applications sous fortes concentrations solaires » En spécialité Electronique École doctorale Information Structures Systèmes I2S Unité de recherche Institut d'Electronique et des Systèmes IES **Le 23 Novembre 2018**

[24] Moulay Ahmed SLIMANI « Cellules solaires pérovskites imprimées et optimisation des couches pérovskites pour les cellules tandems » ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC 2019

[25] O. Ourahmoun « Les cellules solaires à base de matériaux pérovskites - Structures et performances » Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, UMMTO, B.P. N°17 15000, Tizi-Ouzou, Algérie Décembre 2018

[26] Niraj N. Lal, Yasmina Dkhissi, Wei Li, Qicheng Hou, Yi-Bing Cheng, and Udo Bach « Perovskite Tandem Solar Cells » PROGRESS REPORT

[27] <https://www.lenntech.fr>

[28] <https://www.futura-sciences.com>

[29] <http://www.physique-et-matiere.com>

[30] <https://stringfixer.com>

[31] <https://www.mapfreglobalrisks.com>

[32] <http://www.ech-chaab.com/>

[33] Hajar Britel « Le rôle du partenariat algéro-étranger dans le financement et le développement des énergies renouvelables en Algérie » Université Mohamed KHIDHER – Biskra Faculté des Sciences Economiques , Mémoire présenté pour l'obtention d'un doctorat

[34] Bousha Asmahan « Tableau d'utilisation de l'énergie solaire comme énergie renouvelable et possibilité de l'utiliser dans les échanges commerciaux extérieurs (étude de cas Algérie) » Université Mohamed KHIDHER – Biskra Faculté des Sciences Economiques , Mémoire présenté pour l'obtention d'un doctorat

[35] <https://scaps.elis.ugent.be/>

[36] Khaoula Amri , Rabeb Belghouthi , Michel Aillerie , Rached Gharbi « Device Optimization of a Lead-Free Perovskite/Silicon Tandem Solar Cell with 24.4% Power Conversion Efficiency » Article