

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'électronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Electronique

Spécialité : Industries Electroniques

Par

➤ **ABED OUSSAMA**

➤ **AMIRI SAMIR**

Intitulé

**Investigation et Optimisation Numérique d'une Cellule Photovoltaïque
À base de matériau Pérovskite**

Soutenu le : 28/05/2024

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. Rafik Zouache</i>	<i>MAB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Abderrahim Yousfi</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Abdelouahab Djomouai</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2023/2024

Remerciements

Au nom d'**ALLAH**, le Tout Miséricordieux et le Très Miséricordieux. Grâce à **ALLAH**, qui est la source de toute connaissance dans ce monde, pour les forces et les orientations dans l'achèvement de ce manuscrit.

Tout d'abord, ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide et les conseils du **Mr. Yousfi Abderrahim**, nous le remercions pour la qualité de sa supervision exceptionnelle, pour sa patience, sa disponibilité lors de la préparation de cette thèse, son soutien moral et ses encouragements. Nous remercions également, **Mr. Saidani Okba**, pour ses commentaires et suggestions pendant la rédaction de ce manuscrit.

Nous sommes conscients d'avoir été honorés par le président du jury et l'examineur pour avoir accepté de réviser ce travail.

Nos remerciements vont également à tous les enseignants, les professeurs, nos parents, nos frères, nos sœurs, nos chers amis, pour leur aide et leurs sacrifices.

Dédicace

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur
Tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chers frères, pour leur appui et leur encouragement.

Nos professeurs et enseignants.

Nos amis et proches

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail soit
possible, je vous dis merci.

ABED OUSSAMA

AMIRI SAMIR

Table des matières

Table des matières	i
Liste des Figures	v
Les tableaux	vii
Acronymes et abréviations	viii
Résumé	xii
Introduction Général	1

Chapitre I : Notions générale sur les cellules solaires.

I.1.Introduction	4
I.2 Histoire du photovoltaïque	4
I.3.Soleil	5
I.3.1. Rayonnement solaire	5
I.3.2 Spectre solaire	6
I.3.3 Masse d'air	6
I.4 Cellule solaire photovoltaïque	7
I.4.1 Définition	7
I.4.2 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	8
I.4.3 Caractéristiques électriques d'une cellule solaire	8
I.4.4 Circuit équivalent d'une cellule solaire	9
I.5 Paramètres d'une cellule solaire	10
I.5.1 courant de court-circuit (I_{CC})	10
I.5.2 Tension en circuit ouvert (V_{CO})	11
I.5.3 Puissance maximale (P_m)	11
I.5.4 Facteur de forme (FF)	11

Table des matières

I.5.5 Rendement photovoltaïque (η)	11
I.6. Résistances parasites	12
I.6.1 Résistance Série (R_s)	12
I.6.2 Résistance shunt(R_{SH})	12
I.7. Différents types de cellules solaires photovoltaïques	13
I.8. Avantages et inconvénients d'un système photovoltaïque :	14
I.9 Conclusion	14

Chapitre II : Les cellules solaires à base de matériaux pérovskites.

II.1. Introduction :	16
II.2. Historique	16
II.3. Matériau pérovskite	17
II.3.1 Structure cristallographique de la pérovskite	17
II.3.2 Structure morphologique de la pérovskite	18
II.3.3 Stabilité de la pérovskite	18
II.3.4 Propriétés des matériaux pérovskites	19
II.4 Applications des matériaux pérovskites	20
II.4.1 Les diodes électroluminescentes (LEDs)	20
II.4.2 Les lasers	21
II.4.3 Les cellules solaires	21
II.5. Structure des cellules solaires pérovskites	21
II.6. Principes de fonctionnement des cellules solaires pérovskites	23
II.7 Conclusions	24

Chapitre III : Généralité sur le simulateur SCAPS-1D.

III.1 Introduction	26
III.2 Logiciel de simulation SCAPS	26
III.2.1. Utilisation du SCAPS	26
III.2.2. Interface du logiciel SCAPS	27
III.2.3. Définir le point de fonctionnement	27
III.2.4. Fenêtre de conception du dispositif	28
III.2.5. Les propriétés des couches	30
III.2.6. Fenêtre de résultat	32
III.3 Avantages et inconvénients du SCAPS	33
III.4 Conclusion	33

Chapitre IV : Résultats et interprétation.

IV.1 Introduction	36
IV.2. Description de la structure du cellule solaire à base de pérovskite	36
IV.2.1. Description de la structure	36
IV.2.2. Modèles et paramètres de simulation	37
IV.2.3. Diagramme de bande d'énergie	38
IV.2.4. Influence de l'épaisseur de l'absorbeur (RbGeI3)	39
IV.2.5. Influence de l'épaisseur ETL	41
IV.2.6. Influence de l'épaisseur HTL	43
IV.2.7. Influence des défauts d'absorbeur	45
IV.2.8. Influence de la température	46
IV.2.9. Impact de la résistance série et shunt	49
IV.3. Conclusion	51

Table des matières

Conclusion Générale	52
Bibliographie	55

Chapitre I : Notions générale sur les cellules solaires.

Figure I.1 : Cellules photovoltaïques.....	5
Figure I.2 : Analyse spectrale du rayonnement solaire	6
Figure I.3 : Description du nombre de masse d'air (AM)	7
Figure I.4 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	8
Figure I.5 : Caractéristique Courant – Tension (I-V)	9
Figure I.6 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	10
Figure I.7 : Influence de la résistance série	12
Figure I.8 : Influence de la résistance shunt	13

Chapitre II : Les cellules solaires à base de matériaux pérovskites.

Figure II.9 : Minéral pérovskite	16
Figure II.10 : Structure cubique de la pérovskite	17
Figure II.11 : Structure pérovskite ABX ₃	18
Figure II.12 : Structure d'une cellule photovoltaïque à pérovskites (A) structure et Image MEB montrant l'architecture d'une cellule solaire à hétérojonction planaire à base d matériaux pérovskites (B)	22
Figure II.13 : Différentes structures d'une cellule à pérovskites	23
Figure II.14 : Diagramme de transfert des électrons et les processus de recombinaison dans les cellules solaires à base de pérovskite	24

Chapitre III : Généralité sur le simulateur SCAPS-1D.

Figure III.15 : Panneau de démarrage de SCAPS.....	27
Figure III.16 : Point de fonctionnement.....	28
Figure III.17 : Paramètres d'illumination.	28
Figure III.18 : Interface de définition du dispositif.....	29

Liste des Figures

Figure III.19 : Propriétés de la couche ajoutée.	31
Figure III.20 : Propriétés des dopages définis.	31
Figure III.21 : Modèle de l'absorption.....	31
Figure III.22 : Définition des types de recombinaison présents.	32
Figure III.23 : Fenêtre de résultat.	33

Chapitre IV : Résultats et interprétation.

Figure IV.24 : Configuration de conception de la PSC basée sur RbGeI3.....	37
Figure IV.25 : Alignement du niveau d'énergie à base de RbGeI3.	39
Figure IV.26 : Effet de l'épaisseur de pérovskite sur J-V (a), QE (b) et V_{CO} , J_{SC} , FF, PCE(c). ...	41
Figure IV.27 : Effet de l'épaisseur de l'ETL sur V_{CO} , J_{SC} , FF, PCE pour le dopage donneur ND (b) et l'épaisseur (a).....	43
Figure IV.28 : Effet de l'épaisseur de l'HTL sur V_{CO} , J_{SC} , FF, PCE.....	45
Figure IV.29 : Effet de la densité de défauts NT (cm^{-3}) sur V_{CO} , J_{SC} , FF et PCE.	46
Figure IV.30 : Effet de température sur J-V (a), V_{CO} , J_{SC} , FF, PCE (b) et QE (c).	48
Figure IV.31 : Effet de R_S (a) et R_{SH} (b) sur V_{CO} ; J_{SC} ; FF ; PCE.	51

Les tableaux

Tableau I.1 : Facteur de tolérance [19].....	19
Tableau IV.2 : Paramètres de chaque couche de la cellule utilisés dans la simulation.	38

Acronymes et abréviations

λ	Longueur d'onde de la lumière	μm
Rs	Résistance série	Ω
R_{SH}	Résistance shunt	Ω
I_{CC}	Courant de court-circuit	A
V_{CO}	Tension de circuit ouvert	V
V_t	Tension thermique de la jonction	V
I₀	Courant de saturation	A
K	Constante de Boltzmann	J /K
T	Température	K
E	Charge électrique	C
FF	Facteur de forme	%
P_{max}	Puissance maximale	W
η	Rendement énergétique	%
P_{inc}	Puissance incidente	W
N	Facteur d'idéalité de la diode	
E_g	Energie de gap	Ev
K	Affinité électrique	Ev
N_c	Densité d'état de la bande de conduction	cm^{-3}
N_v	Densité d'état de la bande de valence	cm^{-3}
ND	Concentration de donneur	cm^{-3}

Acronymes et abréviations

NA	Concentration d'accepteur	cm^{-3}
ϵ_r	Permittivité relatives	
μ_n	Mobilité d'électrons	$\text{cm}^2\text{v}^{-1}\text{s}^{-1}$
μ_h	Mobilité des trous	$\text{cm}^2\text{v}^{-1}\text{s}^{-1}$
C	Vitesse de lumière dans le vide	m/s
H	Constante de Planck ($6,626.10^{-34}$)	J.S
ν	La fréquence	Hz
I_{ph}	Photo Courant	A
HTL	Hole Transport Layer	
ETL	Electron Transport Layer	
Ag	L'argent	
AM	Mass d'Air	
AM1.5G	Spectre solaire terrestre (global).	
PV	Photovoltaïque	
(P-V)	La caractéristique puissance-tension	
(P-I)	La caractéristique puissance-courant	
(I-V)	La caractéristique courant-tension	

Abstract

Perovskite-based solar cells represent a transformative approach to photovoltaic technology, combining high efficiency, flexibility, and cost-effectiveness. The current numerical simulation of solar cell-based perovskite, employing RbGeI₃ as absorber, ETL like C60 and CBTS as HTL is simulated by SCAPS-1D. The suggested configuration of ITO/C60/RbGeI₃/CBTS/Ag examined in terms of J_{SC}, V_{OC}, FF, and Efficiency by varying the thickness, temperature, doping, defects, R_S and R_{SH}. Results show an excellent PCE of 24.62%, a FF of 82.8%, a V_{OC} of 0.99 V, and a J_{SC} of 33.20 mA/cm². This study provides a promising perspective for the improvement of perovskite solar cells.

Keywords : Solar cell, RbGeI₃, SCAPS-1D, Efficiency.

Résumé

Les cellules solaires à base de pérovskite représentent une approche transformatrice de la technologie photovoltaïque, combinant la haute efficacité, flexibilité et rentabilité. La simulation numérique actuelle de la cellule solaire à base de pérovskite utilise SCAPS-1D, employant RbGeI₃ comme absorbeur, ETL comme C60 et CBTS comme HTL. La configuration suggérée de l'ITO/C60/RbGeI₃/CBTS/Ag examinée en termes de J_{SC}, V_{CO}, FF et le Rendement ; en faisant varier l'épaisseur, la température, le dopage, les défauts, R_S et R_{SH}. Les résultats montrent un excellent PCE de 24,62 %, un FF de 82,8 %, un V_{CO} de 0,99 V et un J_{SC} de 33,20 mA/cm². Cette étude offre une perspective prometteuse pour l'amélioration des cellules solaires à pérovskite.

Mots clés : Cellule solaire, RbGeI₃, SCAPS-1D, Rendement.

ملخص

تمثل الخلايا الشمسية القائمة على البيروفسكايت نهجًا تحويليًا للتكنولوجيا الكهروضوئية، حيث تجمع بين الكفاءة العالية والمرونة والفعالية من حيث التكلفة. المحاكاة الرقمية الحالية للبيروفسكايت المعتمد على الخلايا الشمسية بمحاكات SCAPS-1D، تستخدم RbGeI₃ كمتنص، و ETL مثل C60 و HTL مثل CBTS. تم فحص التكوين المقترح لـ ITO/C60/RbGeI₃/CBTS/Ag من حيث J_{SC} و V_{OC} و FF والمردود من خلال تغيير السمك ودرجة الحرارة والمنشطات والعيوب و R_S و R_{SH}. تظهر النتائج كفاءة ممتازة بنسبة 24.62%، و FF بنسبة 82.8%، و V_{OC} يبلغ 0.99 فولت، و J_{SC} يساوي 33.20 مللي أمبير/سم²، وبهذا توفر هذه الدراسة منظورًا واعدًا لتحسين خلايا البيروفسكايت الشمسية.

الكلمات المفتاحية: الخلية الشمسية، RbGeI₃، SCAPS-1D، المردود.

Introduction Général

Introduction Générale

L'approvisionnement énergétique constitue l'un des défis majeurs du XXI^e siècle pour l'humanité. La demande mondiale en énergie ne cesse d'augmenter en raison de la croissance économique et démographique. Le soleil, source d'énergie quasi illimitée, engendre une multitude d'effets biologiques essentiels à la vie, tels que la chaleur, la photosynthèse et la vision. L'énergie photovoltaïque se distingue par sa capacité à convertir directement la lumière solaire en électricité, exploitant ainsi un potentiel solaire largement supérieur à notre consommation énergétique totale. Cette énergie renouvelable contribue à préserver l'environnement en réduisant les émissions de gaz à effet de serre [1]. Parmi les sources d'énergie renouvelable les plus prometteuses, l'énergie solaire, notamment l'énergie solaire photovoltaïque, occupe une place prépondérante. Cette technologie utilise des matériaux semi-conducteurs pour convertir la lumière solaire en électricité, offrant un avantage majeur en termes de propreté énergétique lors de son utilisation quotidienne. Les cellules solaires à base de pérovskite, un type émergent de cellules solaires, se révèlent particulièrement prometteuses. Ces cellules, nommées d'après leur principal composant, les pérovskites, présentent des propriétés électriques, optiques et structurales remarquables, en faisant un matériau idéal pour la conversion photovoltaïque [2]. Depuis leur introduction, les cellules solaires à pérovskite ont enregistré une progression significative de leur efficacité de conversion énergétique, passant de 3.8% à 33.5% au cours des dix dernières années. Comparées aux cellules solaires conventionnelles en silicium, elles offrent un rendement énergétique plus élevé, tout en utilisant moins de matériaux et en bénéficiant d'une méthode de fabrication par solution. Plusieurs architectures ont été développées pour ces cellules solaires, dont l'architecture à jonction plane, qui a permis d'atteindre des performances élevées. Pour optimiser ces dispositifs, il est essentiel de comprendre le fonctionnement de chaque couche constitutive, notamment la couche de transport d'électrons. Une étude approfondie de cette couche et de son influence sur les paramètres photovoltaïques est cruciale pour améliorer l'efficacité globale de la cellule solaire à pérovskite (PSC) [3]. Dans ce travail, nous avons présenté une investigation et une optimisation de la simulation des cellules solaires en utilisant le simulateur SCAPS-1D. Notre approche intègre une couche de transport d'électrons (ETL) constituée Buckminsterfullerène (C_{60}) et une couche de transport de trous (HTL) composée de CTBS. Cette démarche vise à déterminer les paramètres cruciaux pour optimiser le fonctionnement de la cellule pérovskite. L'étude se concentre principalement sur le choix de la configuration adéquate qui est basé sur la sélection des matériaux de transport des trous (HTL) et des électrons (ETL) afin d'améliorer la reproductibilité et la stabilité

des cellules solaires à base de pérovskite RbGeI_3 . Les simulations effectuées avec SCAPS-1D permettent d'obtenir les valeurs de la densité de courant de court-circuit (J_{SC}), de l'efficacité de conversion de puissance (PCE), du facteur de forme (FF) et de la tension de circuit ouvert (V_{CO}) en fonction d'épaisseur, température, dopage, défaut, R_{S} et R_{SH} . Nos recherches approfondies améliorent non seulement notre compréhension des complexités impliquées dans les cellules solaires, mais ouvrent également de nombreuses opportunités pour la recherche et le développement futurs dans le domaine de la photonique.

Le mémoire est divisé en quatre chapitres :

Le chapitre I : Nous découvrirons l'histoire du photovoltaïque et nous explorerons les principes fondamentaux du rayonnement solaire. Nous aborderons également le principe de fonctionnement d'une cellule solaire, ses caractéristiques et ses paramètres électriques, ainsi que les résistances parasites.

Le chapitre II : Nous découvrirons l'histoire des pérovskites, leur structure cristallographique et morphologique, ainsi que leur stabilité, leurs propriétés optoélectroniques, ainsi que leurs applications. Nous aborderons également la structure des cellules solaires à pérovskites et les principes de fonctionnement qui les sous-tendent.

Le chapitre III : nous expliquerons le programme SCAPS-1D et découvrirons ses paramètres et comment l'utiliser. Enfin, nous découvrirons les avantages et les inconvénients de SCAPS.

Le chapitre IV : Nous discuterons de la structure de la cellule solaire à pérovskite RbGeI_3 , ainsi que les paramètres physiques utilisés dans la simulation numérique. Enfin, nous étudierons et interpréterons les résultats de la simulation électrique de cette structure.

*Chapitre I : Notions générale sur
les cellules solaires.*

I.1.Introduction

L'énergie solaire, qui dépend directement du soleil, est exploitée de manière efficace à travers l'utilisation de cellules photovoltaïques. Ces cellules, exposées aux photons de la lumière, génèrent de l'électricité, offrant ainsi une solution optimale pour répondre à nos besoins énergétiques tout en préservant l'environnement.

Dans ce chapitre, nous aborderons l'histoire du photovoltaïque, le rayonnement solaire ainsi que des informations générales sur la source d'énergie des cellules solaires. Nous expliquerons ensuite le principe de fonctionnement de ces cellules, ainsi que leurs caractéristiques et paramètres. Enfin, nous discuterons des différents types de cellules solaires.

I.2 Histoire du photovoltaïque

L'histoire de l'énergie photovoltaïque remonte à 1839, lorsque le physicien français Antoine César Becquerel découvrit le principe photovoltaïque, précurseur de l'énergie solaire, tandis que son petit-fils, Antoine Henri Becquerel, est crédité de la découverte de la radioactivité. En 1887, le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz identifia l'effet photovoltaïque, suivi en 1921 par Albert Einstein, qui fournit la première explication théorique, recevant par la suite le prix Nobel de physique. [4] Les avancées significatives dans le domaine ont été réalisées par des chercheurs américains travaillant pour les laboratoires Bell Téléphone, aujourd'hui Alcatel-Lucent Bell Labs, en 1955, avec le développement d'une cellule photovoltaïque à haut rendement de 6%. Le premier satellite alimenté par des piles photovoltaïques, le Vanguard, a été lancé en 1959, offrant un rendement de 9%. L'application domestique de cette technologie a été concrétisée en 1973, avec la première maison équipée d'une installation photovoltaïque à l'université de Delaware, aux États-Unis. En 1983, l'Australie a vu la première voiture fonctionnant à l'énergie photovoltaïque parcourir 4000 kilomètres. Actuellement, l'énergie photovoltaïque est largement accessible aux entreprises et aux particuliers, avec des panneaux solaires offrant des rendements atteignant environ 20% [4].



Figure I.1 : Cellules photovoltaïques [5].

I.3.Soleil

Le Soleil est une sphère de gaz extrêmement chaud, avec un diamètre de $1,39 \times 10^9$ m et une distance moyenne de la Terre d'environ $1,49 \times 10^{11}$ m. Depuis la perspective terrestre, le Soleil effectue une rotation sur son axe toutes les quatre semaines, bien que cette rotation ne soit pas uniforme ; elle prend environ 27 jours à l'équateur et environ 30 jours aux régions polaires [4].

Classé comme un corps noir, le Soleil a une température effective de 5777 K. Les régions internes centrales affichent des températures allant de 8×10^6 à 40×10^6 K, avec une densité estimée à environ 100 fois celle de l'eau. Le Soleil agit essentiellement comme un réacteur de fusion en continu, où la matière gazeuse est maintenue par la force gravitationnelle. Plusieurs réactions de fusion nucléaire sont déclenchées pour produire l'énergie rayonnée par le Soleil, la plus significative étant la transformation de l'hydrogène en hélium par une réaction thermonucléaire. Dans ce processus, la masse perdue est convertie en énergie, car le noyau de l'hélium est moins massif que quatre protons d'hydrogène [6].

I.3.1. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est un ensemble d'ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il s'agit d'un rayonnement à spectre complet, allant de l'ultraviolet lointain (comme les rayons gamma) aux ondes radio et à la lumière visible. Le rayonnement solaire contient également des rayons cosmiques avec des particules animées avec une vitesse et énergie extrêmement élevées.

Une partie de ce rayonnement est filtrée par la couche d'ozone avant d'atteindre la troposphère. Grâce à la photosynthèse, elle est nécessaire à la plupart des espèces vivant sur terre. Le rayonnement électromagnétique est constitué de "grains" lumineuses appelées photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ [7].

I.3.2 Spectre solaire

Le spectre solaire et la distribution spectrale en fonction de la longueur d'onde (λ) ou de la fréquence (ν). Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde qui varie entre de 0.22 à 10 μm . La (figure I.2) représente la variation de la répartition spectrale énergétique [8]. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 6.4% dans la bande des ultraviolets ($0.20 < \mu < 0.38 \mu\text{m}$).
- 48% dans la bande visible ($0.38 < \mu < 0.78 \mu\text{m}$). 45.6% dans la bande des infrarouges ($0.78 < \mu < 10 \mu\text{m}$) [8].

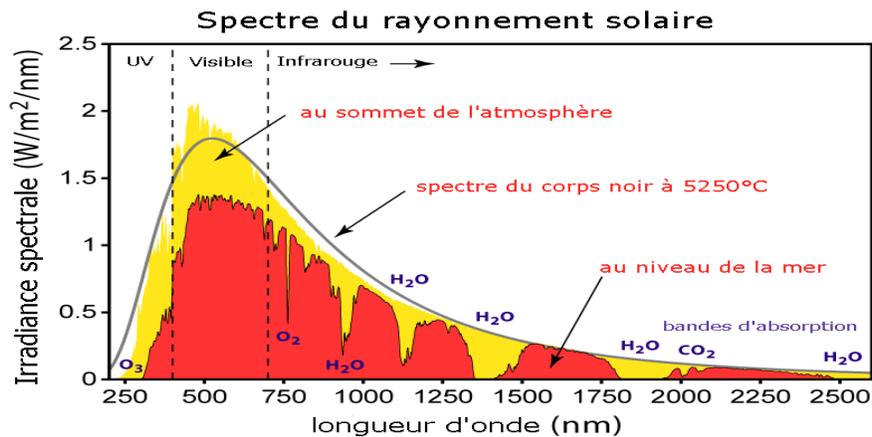


Figure I.2 : Analyse spectrale du rayonnement solaire [8].

I.3.3 Masse d'air

On appelle « masse d'air » AM, la partie de l'énergie solaire par absorption atmosphérique. Elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire. La masse d'air est influencée par plusieurs facteurs tels que la pression atmosphérique, la hauteur du soleil, et la composition de l'atmosphère. Elle varie en fonction de l'altitude et de la position du soleil dans le ciel [9]. Au niveau de la mer, la masse d'air est plus élevée que dans les régions montagneuses où l'atmosphère est plus raréfiée.

La masse d'air est utilisée pour définir les spectres de rayonnement solaire, tels que le spectre AM0 qui représente le rayonnement solaire à la surface externe de l'atmosphère, et le spectre AM1.5 qui est utilisé pour les tests standardisés des panneaux solaires et correspond à la traversée d'une atmosphère et demie [9].

$$AM \sim \frac{1}{\sin \theta} \quad (\text{I.1})$$

θ : représente l'angle entre la position du soleil et l'horizon figure (I.3) [9].

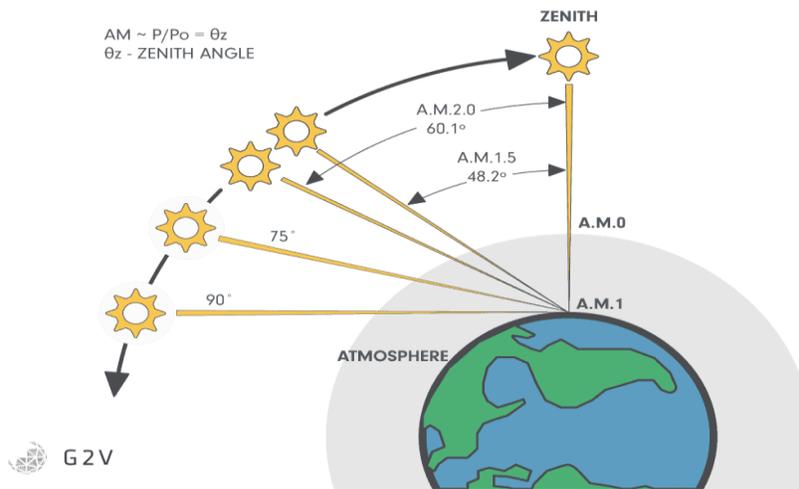


Figure I.3 : Description du nombre de masse d'air (AM) [9].

I.4 Cellule solaire photovoltaïque

I.4.1 Définition

Les cellules photovoltaïques, dérivées du terme "photon" désignant une particule de lumière et de "volt" représentant l'unité de tension, constituent des dispositifs électroniques à semi-conducteurs, généralement fabriqués à partir de silicium dans ses différentes formes. Leur fonction principale est de convertir directement l'énergie lumineuse en électricité sous forme de courant continu à basse tension, exploitant ainsi l'effet photovoltaïque. Étant donné que la source d'énergie lumineuse est le Soleil, ces cellules sont communément désignées comme des cellules solaires [10].

I.4.2 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Le fonctionnement fondamental de toute cellule photovoltaïque repose sur la création d'un champ interne permettant de séparer les paires électron-trou générées par l'absorption de la lumière. Le processus opérationnel d'une cellule est détaillé dans la figure (I.4). Lorsque des photons incidents interagissent avec la cellule, des paires électron-trou sont générées, et deux scénarios distincts peuvent se produire en fonction de l'emplacement de leur création. Dans le premier scénario, si une paire électron-trou est engendrée dans une région électriquement neutre (p ou n), les porteurs minoritaires se diffusent sous l'influence du champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires, contribuant ainsi à un courant de diffusion. Dans le deuxième scénario, si une paire électron-trou est produite dans la région de charge d'espace, l'électron et le trou sont séparés par le champ électrique et se déplacent chacun vers la région où ils sont les porteurs majoritaires (région n pour l'électron et région p pour le trou), engendrant ainsi un courant de génération. Ces deux contributions combinées génèrent un photo-courant, qui contribue au courant inverse de la diode formée par la jonction [10].

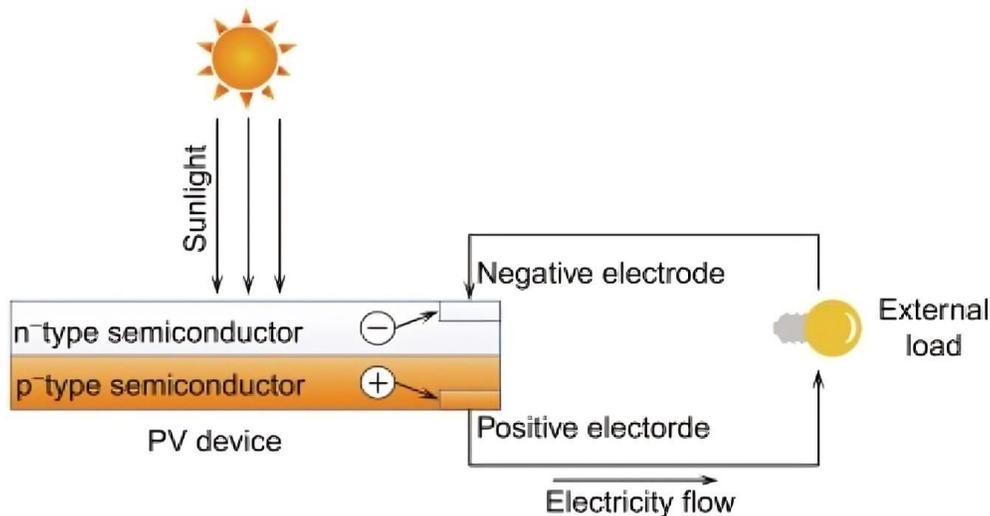


Figure I.4 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [11].

I.4.3 Caractéristiques électriques d'une cellule solaire

La puissance électrique générée par une cellule photovoltaïque est le produit de la tension et du courant qu'elle produit. Ces deux paramètres dépendent à la fois des propriétés intrinsèques de la cellule et de la charge électrique appliquée à ses bornes. Les caractéristiques électriques de la cellule sont résumées dans un graphique appelé courbe courant-tension. Chaque dipôle

électrique est entièrement défini par sa propre courbe courant-tension, qui lui est spécifique. En tant que dipôle électrique, une cellule photovoltaïque possède sa propre courbe courant-tension, comme illustré ci-dessous, Cette caractéristique courant-tension est une relation entre la tension et le courant délivrés par la cellule photovoltaïque [12].

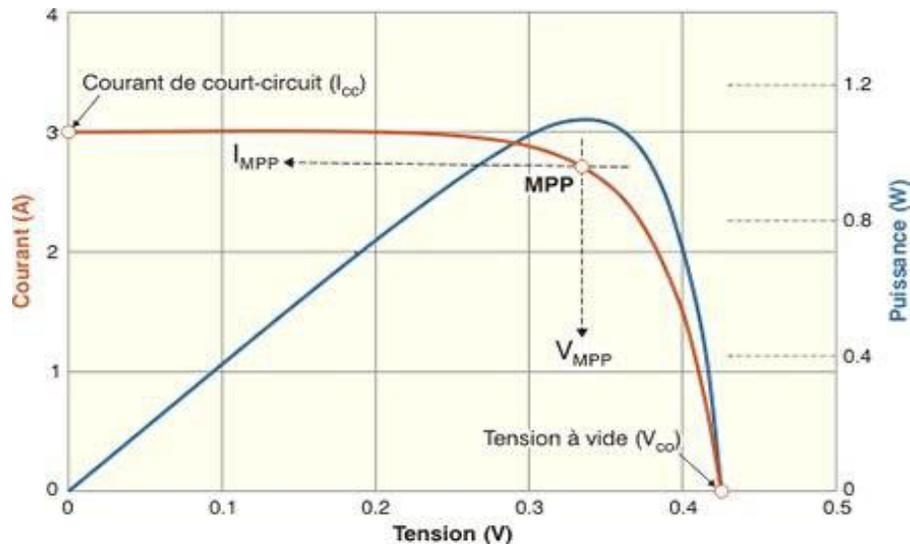


Figure I.5 : Caractéristique Courant – Tension (I-V) [12].

I.4.4 Circuit équivalent d'une cellule solaire

Si l'on considère le cas simple d'une cellule idéale à jonction PN exposée à un flux lumineux, elle fonctionne comme un générateur de courant. Son schéma équivalent, illustré dans la Figure I-6, est composé d'une diode idéale en parallèle avec une source de courant. R_s est une résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux. La pente de la courbe $I(V)$ au point V_{co} correspond à l'inverse de la résistance série ($1/R_s$). R_{sh} est une résistance shunt associée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques. La pente de la courbe $I(V)$ au point I_{cc} représente l'inverse de la résistance shunt ($1/R_{sh}$). En général, la valeur de R_{sh} est plus élevée que celle de R_s d'au moins un ordre de grandeur. Pour réduire les pertes, il est nécessaire de diminuer R_s et d'augmenter R_{sh} (le cas idéal étant R_{sh} égal à l'infini et R_s égal à zéro) [13].

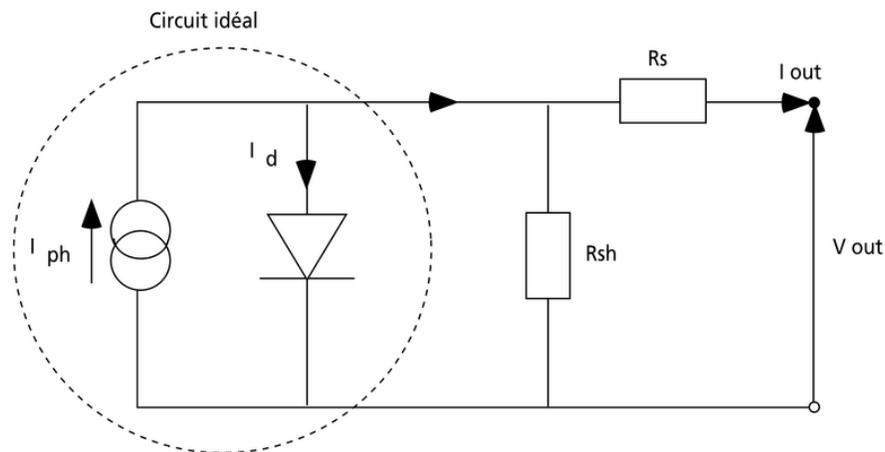


Figure I.6 : schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [13].

La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité. Le générateur de courant modélise le courant I_{ph} généré par un éclairage [13]. Enfin, les deux résistances modélisent les pertes internes :

- **Résistance série (R_s) :** modélise les pertes ohmiques du matériau.
- **Résistance shunt (R_{SH}) :** modélise les courants parasites qui traversent la cellule.

I.5 Paramètres d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque est définie par plusieurs paramètres, notamment son rendement de conversion η , sa tension de circuit ouvert V_{CO} , son courant de court-circuit I_{CC} , et son facteur de forme FF. Ces caractéristiques sont obtenues à partir des courbes courant-tension, lesquelles sont utilisées pour déterminer les performances et les propriétés d'une cellule solaire [14].

I.5.1 courant de court-circuit (I_{CC})

Le courant de court-circuit, exprimé en mA, correspond au courant circulant dans la cellule sous éclairage sans qu'une tension extérieure ne soit appliquée (en considérant $V=0$ dans le schéma équivalent). Sa croissance est linéaire en fonction de l'intensité lumineuse reçue par la cellule, et il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges, et de la température [14]. L'expression du courant de court-circuit est la suivante :

$$I_{CC} = q \cdot G(I_n + I_p) \quad (I.2)$$

Avec G : représente le taux de génération des porteurs de charges.

I.5.2 Tension en circuit ouvert (V_{oc})

La tension en circuit ouvert, exprimée en millivolts, est mesurée lorsque aucun courant ne circule dans la cellule. Elle dépend de la différence de travail des électrodes et de la résistance de fuite (Shunt). Elle diminue avec la température et varie en fonction de l'intensité lumineuse [14].

$$V_{oc} = \frac{K_i}{Q} \times q \times I_n \left(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right) \quad (I.3)$$

I.5.3 Puissance maximale (P_m)

La puissance délivrée par une cellule solaire est maximale lorsque le produit $V \cdot I$ est maximal. Si V_m et I_m sont la tension et le courant pour lesquels ce maximum est atteint, la puissance maximale est égale à l'aire du plus grand rectangle délimité par V_m et I_m [14] :

$$P_m = (V \cdot I)_{\max} = I_m \cdot V_m \quad (I.4)$$

I.5.4 Facteur de forme (FF)

Les valeurs V_{\max} et I_{\max} sont choisies de manière à maximiser le produit $|V_{\max} \cdot I_{\max}|$. Ce produit correspond à la puissance maximale P_{\max} pouvant être fournie par la cellule photovoltaïque. Ce point P_{\max} est obtenu en ajustant la résistance externe de la cellule. Le facteur de forme (FF) est défini comme le rapport de la surface du rectangle P_{\max} sur celle du rectangle dont les côtés sont V_{CO} et I_{CC} . Il est calculé par la relation suivante [14] :

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (I.5)$$

Un Facteur de Forme élevé indique une meilleure efficacité de conversion. En dehors du point de fonctionnement P_m , la diminution du courant due à la recombinaison survient lorsque V_x est supérieur à V_m , et des pertes par chauffage (effet Joule) dans les résistances série apparaissent lorsque $I > I_m$ [14].

I.5.5 Rendement photovoltaïque (η)

Le rendement (η) est exprimé en pourcentage, désigne l'efficacité de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{inc} [9].

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{inc}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{oc}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (I.6)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert [14].

I.6. Résistances parasites

Les résistances parasites font généralement référence à des composants indésirables dans un circuit électrique, qui présentent une résistance non souhaitée. Elles peuvent résulter de facteurs tels que des connexions imparfaites, des pistes de circuit imparfaites, ou d'autres éléments contribuant à une résistance non intentionnelle. La minimisation des résistances parasites revêt une importance capitale pour maintenir les performances et l'efficacité des circuits électroniques [10].

I.6.1 Résistance Série

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte Comme un générateur de tension, et lorsqu'elle augmente elle diminue la valeur de courant de court-circuit I_C figure I.7 [15].

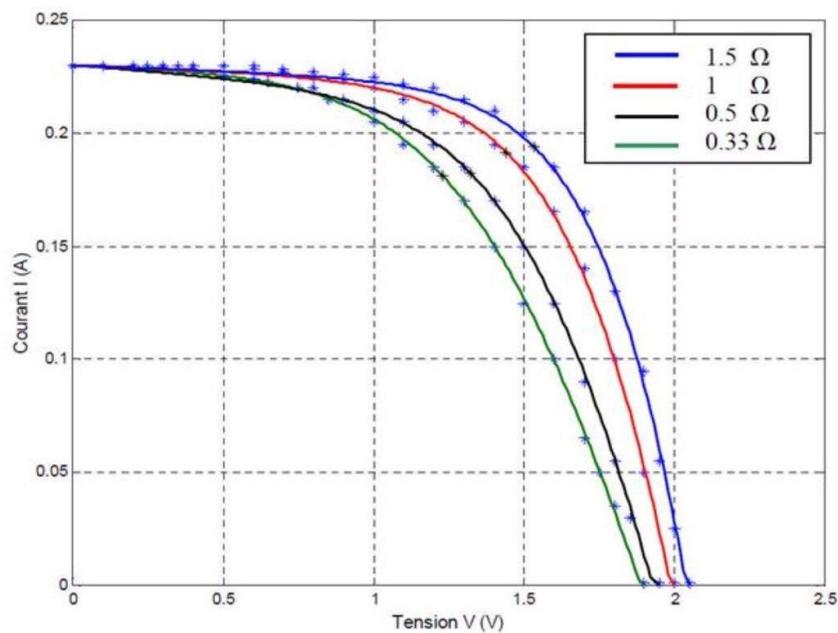


Figure I.7 : Influence de la résistance série [15].

I.6.2 Résistance shunt

Il s'agit généralement d'une conductance de fuite, qui agit comme une sorte de "courant de diode" à soustraire du photocourant. La résistance shunt associée est généralement très élevée. Une légère pente près du point de court-circuit peut indiquer une anomalie dans la caractéristique. Une résistance shunt trop faible peut affecter la tension en circuit ouvert de la cellule ; ainsi, une photopile avec une résistance shunt insuffisamment élevée ne produira pas de tension sous un faible éclairage. La figure I.8 illustre l'influence de la résistance shunt [15].

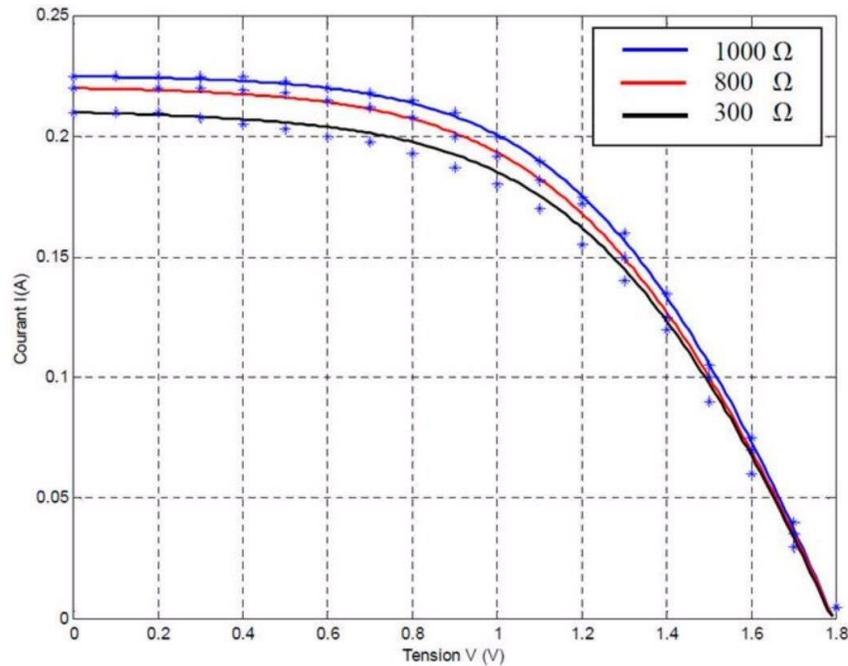


Figure I.8 : Influence de la résistance shunt [15].

I.7. Différents types de cellules solaires photovoltaïques

La majorité des panneaux photovoltaïques actuellement commercialisés proviennent de la filière du silicium cristallin massif, dont les prix et les performances varient en fonction des procédés de fabrication employés. Cette filière se divise principalement en deux catégories :

- Les matériaux polycristallins, qui représentent environ la moitié du marché mondial et affichent des rendements de modules compris entre 12 et 17 %.
- Les matériaux monocristallins (c-Si), qui constituent environ 30 % de la production de modules et présentent des rendements de modules compris entre 14 et 20 %. Toutefois, leur coût de production est généralement plus élevé [12].

Par ailleurs, les hétérostructures de silicium, combinant du silicium monocristallin et du silicium amorphe hydrogéné, ont démontré un fort potentiel, avec des rendements en laboratoire atteignant 23 % pour une surface de 100 cm² [12]. Cette filière suscite un intérêt particulier dans cette étude en raison de sa capacité à fournir des rendements élevés sur de grandes surfaces, tout en permettant une partie du processus de fabrication à basse température, contrairement à la filière classique.

D'autres filières, utilisant des matériaux semi-conducteurs autres que le silicium, sont également présentes dans le domaine industriel, telles que les cellules CIGS (alliage Cuivre, Indium, Gallium et Sélénium), les cellules CdTe (Tellure de Cadmium) et les cellules organiques [15].

I.8. Avantages et inconvénients d'un système photovoltaïque :

Le système photovoltaïque a beaucoup d'avantages :

- Utilisation d'une source d'énergie solaire inépuisable.
- Absence de coût lié au carburant.
- Fourniture d'électricité aux zones rurales les plus isolées grâce à l'énergie solaire.
- Besoin de très peu d'entretien pour les panneaux solaires.
- Fonctionnement silencieux et non intrusif des panneaux solaires.
- Possibilité de recyclage des panneaux solaires.

Malgré cela, les sources photovoltaïques présentent aussi quelques inconvénients :

- Dépendance aux conditions météorologiques : les systèmes photovoltaïques ne fonctionnent pas en l'absence d'énergie solaire.
- Fabrication des modules photovoltaïques requérant une technologie avancée.
- Coût élevé de l'installation des systèmes photovoltaïques.
- Rendement de conversion relativement faible des modules photovoltaïques.
- Besoin d'une grande surface pour les installations photovoltaïques dans le cadre d'une production importante d'énergie, ce qui peut rendre l'énergie solaire moins compétitive.

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons défini les notions fondamentales sur l'effet photovoltaïque. Dans un premier temps, nous avons donné une description du fonctionnement de la cellule solaire en décrivant les différents paramètres de cette dernière. Enfin nous avons donné les différents types des cellules solaires.

*Chapitre II : Les cellules solaires
à base de matériaux pérovskites*

II.1. Introduction :

Ce chapitre se concentre sur les avancées et les applications des cellules solaires à base de matériaux pérovskites. Les matériaux pérovskites ont suscité un intérêt considérable dans le domaine de la recherche sur l'énergie photovoltaïque en raison de leurs propriétés opto-électroniques remarquables et de leur potentiel pour fournir une alternative efficace et peu coûteuse aux technologies photovoltaïques traditionnelles. Dans cette partie, nous examinerons en détail les aspects clés des matériaux pérovskites, en commençant par un historique de leur développement et en explorant ensuite leur structure cristallographique, leur morphologie, leur stabilité et leurs propriétés opto-électroniques. Nous analyserons la structure spécifique des cellules solaires pérovskites et les principes fondamentaux qui sous-tendent leur fonctionnement.

II.2. Historique

En 1839, le minéralogiste russe Gustav Rose a découvert le minéral titanate de calcium (CaTiO_3) dans des roches métamorphiques de contact calco-silicates (Figure II.9) dans les montagnes de l'Oural en Russie et l'a appelé "Pérovskite" en l'honneur du minéralogiste russe, le comte Lev Alexevich von Perovski. La première application des matériaux pérovskites (PVK) dans le domaine photovoltaïque a été réalisée par le groupe de Tsutomu Miyasaka, basé à Tokyo, qui a enregistré un rendement de conversion d'énergie de 2.2 % en 2006 et de 3.8 % en 2009. Le rendement de conversion d'énergie des PSC est ensuite passé à 6.5 % en 2011, à 20.1 % en 2015, à 22.1 % en 2016 et enfin à 33.5 % en 2023[16].



Figure II.9 : Minéral pérovskite [17].

II.3. Matériau pérovskite

Le titanate de calcium (CaTiO_3), connu sous le nom de pérovskite en l'honneur du minéralogiste russe Lev Perovski, a été identifié pour la première fois en 1839 par le minéralogiste allemand Gustav Rose. Cette structure cristalline, caractérisée par la formule générale ABX_3 , possède une capacité d'accueil pour diverses combinaisons élémentaires, ce qui en fait la classe de minéraux la plus répandue sur Terre. Dans cette structure, décrite dans la Figure II.10, le cation A occupe les huit sommets d'un cube, entouré par douze anions X, tandis que le cation B est localisé au centre d'un octaèdre formé par six anions X $[\text{BX}_6]^{4-}$ placés aux centres des faces du cube [17].

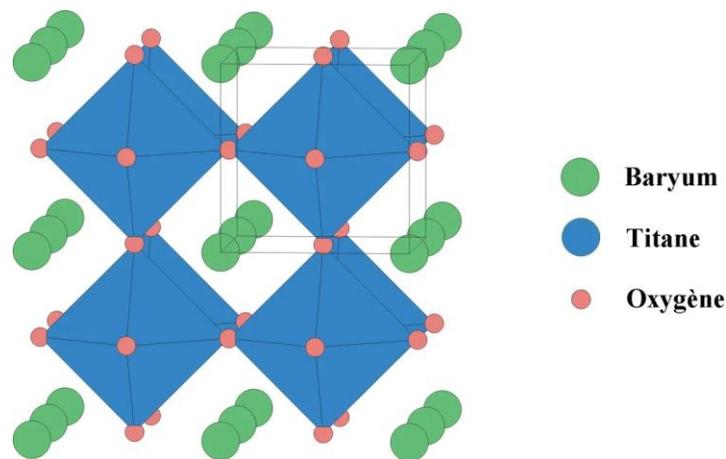


Figure II.10 : Structure cubique de la pérovskite [17].

II.3.1 Structure cristallographique de la pérovskite

La structure pérovskite est définie par la formule chimique ABX_3 (voir la Figure II.11 ci-dessus). Ce groupe forme une cage contenant en son centre le groupe BX_3 , qui adopte la forme d'un octaèdre. Les groupes A et B représentent respectivement des cations (+1 ou +2) et (+2 ou ± 4), tandis que le groupe X représente un anion (-1 ou -2). Le rôle du cation A est de fournir un électron au système, formant ainsi l'octaèdre. En réalité, l'octaèdre est la partie responsable du transport des porteurs. Ce qui rend ce type de cristal intéressant, c'est la possibilité de substituer le cation A par un autre cation sans affecter de manière significative les propriétés électroniques [18].

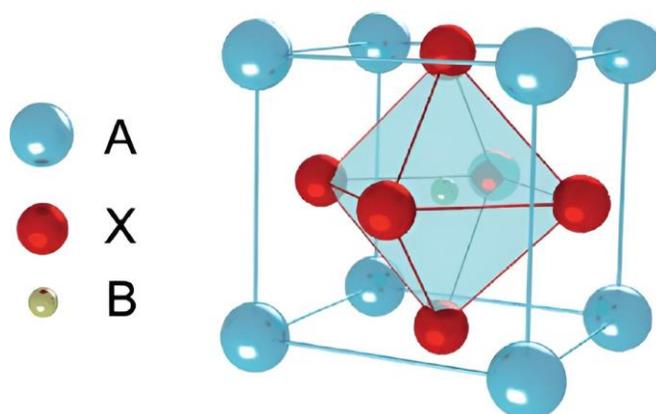


Figure II.11 : Structure pérovskite ABX₃ [18].

II.3.2 Structure morphologique de la pérovskite

Contrairement aux semi-conducteurs inorganiques dans leur application traditionnelle, la pérovskite 3D n'est pas monocristalline, mais cristallise sous forme de microcristaux. En général, pour un dépôt par tournette de MAPI à partir d'une solution liquide, la taille des grains obtenus varie entre 200 nm et plusieurs micromètres. Il semble qu'il n'existe pas de structure ordonnée lors de la formation des cristaux, et les grains présentent des formes diverses. La taille et la forme des cristaux dépendent étroitement des conditions de fabrication, y compris de l'utilisateur, ainsi que des précurseurs utilisés. Par exemple, l'ajout de chlore dans la solution de pérovskite améliore la cristallinité et entraîne une augmentation significative de la taille des grains [18].

II.3.3 Stabilité de la pérovskite

La stabilité de pérovskite dépend essentiellement de deux facteurs :

a) Facteur de tolérance

Ce facteur tient compte de la taille des ions pour caractériser les différentes structures dérivées de la structure pérovskite. La symétrie cubique de la structure pérovskite idéale peut être abaissée selon la nature chimique des cations des sites A et B. La stabilité de ce type de structure est gouvernée par l'inégalité $0.75 \leq t \leq 1$ où t est le facteur de tolérance définie par :

$$t = \frac{r_a + r_0}{\sqrt{2} * (r_b + r_0)} \quad (\text{II.1})$$

r_a : le rayon ionique de cation A.

r_b : le rayon ionique de cation B.

r_0 : Le rayon ionique de l'oxygène.

D'après ce critère, la structure cubique est observée pour t très proche de 1, les limites de stabilité

de la phase pérovskite (plus ou moins distordue) étant définies par t compris entre 0.75 et 1.06. En fonction de facteur de tolérance t on peut distinguer plusieurs situations [18] :

$t < 0.75$: Ilménite	$0.75 < t < 1.06$:			$t > 1.06$ Hexagonal
	Pérovskite			
	$0.75 < t < 0.96$ Distorsion Orthorhombique	$0.96 < t < 0.99$ Distorsion Rhomboédrique	$0.99 < t < 1.06$ Cubique	

Tableau I.1 : Facteur de tolérance [19].

b) L'ionicité des liaisons anions-cations : Le caractère ionique d'une composition ABX_3 est quantifié d'après l'échelle de Pauling à partir de la différence d'électronégativité [18] :

$$\Delta E = \frac{(X_A + X) + (X_B + X)}{2} = \frac{(X_A) + (X_B)}{2} \quad (\text{II.2})$$

$(X_A - X)$ et $(X_B - X)$ sont respectivement les différences d'électronégativité entre A et X, B et X.

II.3.4 Propriétés des matériaux pérovskites

Ces dernières années, les matériaux de type pérovskite suscitent de plus en plus d'intérêt en raison de leur grand potentiel pour différents domaines tels que les piles à combustible solide, les électrolytes solides, les résistances fixes, les actionneurs, les appareils électromécaniques, les transducteurs, etc. Cela est dû à leur structure cristalline particulière, leur magnétisme, leur conductivité électrique, leur piézoélectricité, leurs propriétés électro-optiques, leur activité catalytique et leur sensibilité aux gaz [18].

a) Propriété optoélectronique

Depuis plus de quarante ans, on s'intéresse aux oxydes de structure pérovskite ABX_3 en raison de la possibilité de modifier les cations A et B présents dans la structure. Cette modification des éléments entraîne un changement des propriétés du matériau, offrant ainsi diverses propriétés physiques en fonction de la nature chimique et électronique des deux atomes A et B [19].

b) Propriétés électriques

Il est possible de modifier les propriétés électriques de la pérovskite en changeant sa composition. Concernant la longueur de diffusion, on la définit comme étant la relation entre le coefficient de diffusion D et le temps de vie des porteurs τ :

$$L_D = \sqrt{D\tau} \quad (\text{II.3})$$

La longueur de diffusion des électrons et des trous est une caractéristique importante dans le domaine du photovoltaïque puisqu'elle va entrer en jeu dans le choix de l'épaisseur de la couche active. Dans le cas du silicium, la longueur de diffusion est de quelques centaines de micromètres. Pour la pérovskite, les longueurs de diffusion des porteurs sont très inférieures à celles du silicium. Des longueurs de diffusion de l'ordre de 100 nm pour les trous et les électrons ont été mesurées par photoluminescence sur une couche de MAPI d'épaisseur 180 nm, mais jusqu'à 1 µm pour des couches minces de MAPI_{3-x}Cl_x d'épaisseur 270 nm. Il est donc préférable d'avoir des couches de pérovskite de l'ordre de la centaine de nanomètre pour optimiser les propriétés électriques [20].

c) Propriétés optiques

La pérovskite est un matériau à bande interdite directe, ce qui signifie qu'elle a une forte capacité d'absorption optique et une large plage d'absorption solaire, ce qui conduit à une efficacité de conversion de puissance plus élevée. Au niveau de la longueur d'onde visible, la pérovskite a un coefficient d'absorption plus élevé, ce qui lui permet d'absorber davantage de photons par rapport au silicium cristallin. En conséquence, l'épaisseur de la couche pérovskite peut être réduite à environ 500 nm pour assurer une absorption presque totale. Les porteurs de charges photo générées peuvent alors être collectés plus facilement en raison de la distance plus courte à parcourir [21].

II.4 Applications des matériaux pérovskites

Les pérovskites à un rôle important dans la technologie de l'industrie. Elles sont utilisées dans les cellules solaires et sur la base de leurs seules propriétés ferroélectriques, magnétique, optoélectroniques, thermodynamique, les composés pérovskites sont intégrés dans de nombreuses applications [22].

II.4.1 Les diodes électroluminescentes (LEDs)

Les premières LED à base d'halogénure de pérovskite sont apparues dans les années 1990, et le matériau actif était une structure en couches. Plus récemment, les matériaux à base de pérovskite halogénée dans des structures colloïdales (nanocristaux, points quantiques...Etc.) ont montré un plus grand potentiel. Les écarts pour ces matériaux sont réglables. Ceci permet la réalisation de LED multicolores. Parmi ces matériaux, les composés CH₃NH₃PbBr₃ et les composés bromés présentent généralement des propriétés optiques particulièrement favorables. Les composants basés sur des technologies proches de l'OLED (diode organique) sont prometteurs en raison de la simplicité de l'architecture et du processus de fabrication [23].

II.4.2 Les lasers

Kondo et ses collaborateurs ont observé pour la première fois l'effet laser dans les matériaux pérovskites en 1998. Ils ont observé un effet laser à double exciton sur le composé pérovskite stratifié $(\text{C}_6\text{H}_{13}\text{NH}_3)_2\text{PbI}_4$ à une température de 16°K et un pompage optique. Vingt ans plus tard, Zhu et ses collaborateurs ont produit des nanotubes tridimensionnels à base de pérovskite. Ces nanotubes ont des longueurs d'onde d'émission accordables à température ambiante [22].

II.4.3 Les cellules solaires

Les cellules solaires à base de matériaux pérovskites sont un type de cellule solaire qui inclut un matériau pérovskite structuré, généralement un matériau hybride à base de matériaux organiques et inorganiques, comme les halogénures de plomb ou de tin. Ces cellules solaires ont montré des niveaux d'efficacité élevés, pouvant dépasser ceux des cellules à base de silicium polycristallin. Les matériaux pérovskites sont connus pour leur capacité à absorber efficacement les photons, ce qui les rend adaptés à une variété d'applications telles que les systèmes photovoltaïques intégrés aux bâtiments (BIPV) [24]. Les cellules solaires à base de matériaux pérovskites sont caractérisées par leur structure cristalline unique, leur capacité à atteindre des rendements de conversion élevés et leur fabrication relativement simple et coûteuse [25]. Les progrès récents dans la recherche sur la pérovskite ont conduit à des améliorations remarquables de l'efficacité, certaines cellules atteignant des rendements de conversion supérieurs à 25% [24]. Cependant, les cellules solaires en pérovskite sont encore aux premiers stades de développement et leur stabilité et leur durabilité à long terme ne sont pas encore parfaitement comprises. Ils sont sensibles à l'humidité et à la lumière ultraviolette (UV), ce qui peut entraîner une dégradation au fil du temps. Les chercheurs travaillent actuellement à l'amélioration de la stabilité et de la durabilité des cellules solaires en pérovskite, notamment en développant des techniques d'encapsulation, en ingénierant les interfaces et en optimisant la composition des matériaux [24].

II.5. Structure des cellules solaires pérovskites

Une cellule solaire à pérovskite est constituée d'un substrat verre/FTO sur lequel est déposé l'oxyde d'étain dopé au fluor FTO et sur FTO est déposé le dioxyde de titane TiO_2 . Le TiO_2 sert à améliorer le transport d'électrons. La couche active est constituée d'un matériau pérovskite. Pour améliorer le transport de trous, une couche de spiro-OMeTAD est déposée entre l'électrode en Or et la couche active. La structure obtenue est représentée sur la figure II.12. La topographie réalisée avec le microscope électronique à balayage MEB d'une cellule à pérovskite de type

verre/FTO/TiO₂/Pérovskite/Spiro-OMeTAD/Au est représentée sur la figure. Différentes architectures et structures de cellules à pérovskites peuvent être réalisées comme le montre la figure. On trouve des structure mésoscopiques figure II.12, planaires figure B ou inversées figure C [23].

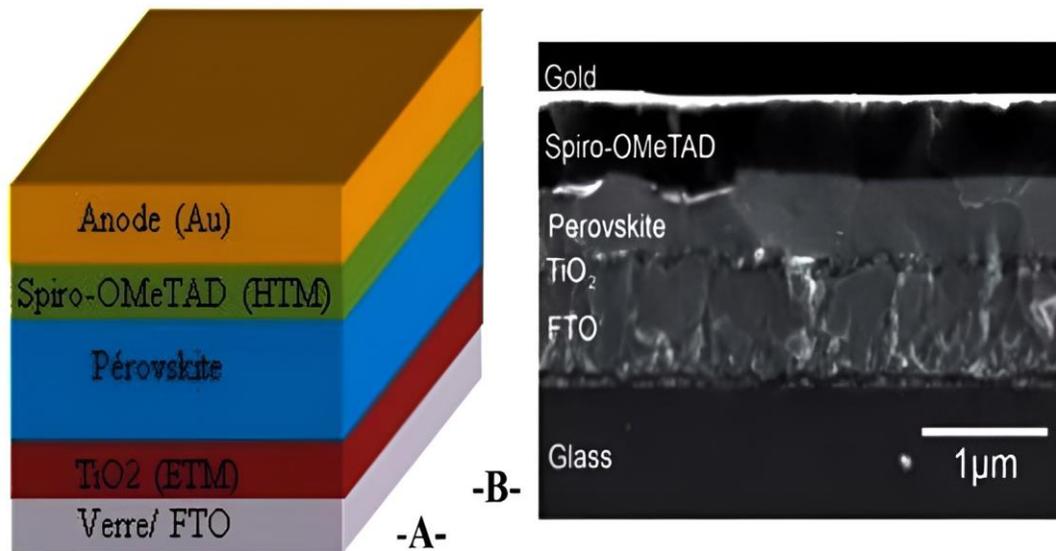


Figure II.12 : Structure d'une cellule photovoltaïque à pérovskites (A) structure et (B) Image MEB montrant l'architecture d'une cellule solaire à hétérojonction planaire à base d matériaux pérovskites [23].

Il existe différentes architectures de cellules solaires à base de Pérovskite. À ce jour, deux principales architectures sont étudiées : la mésoporeuse et la planaire. Ces deux structures peuvent être de type N-I-P ou P-I-N. La Figure II.13 une description des architectures qui existent et leur développement, ainsi que les principaux matériaux utilisés pour chaque type de structure [23].

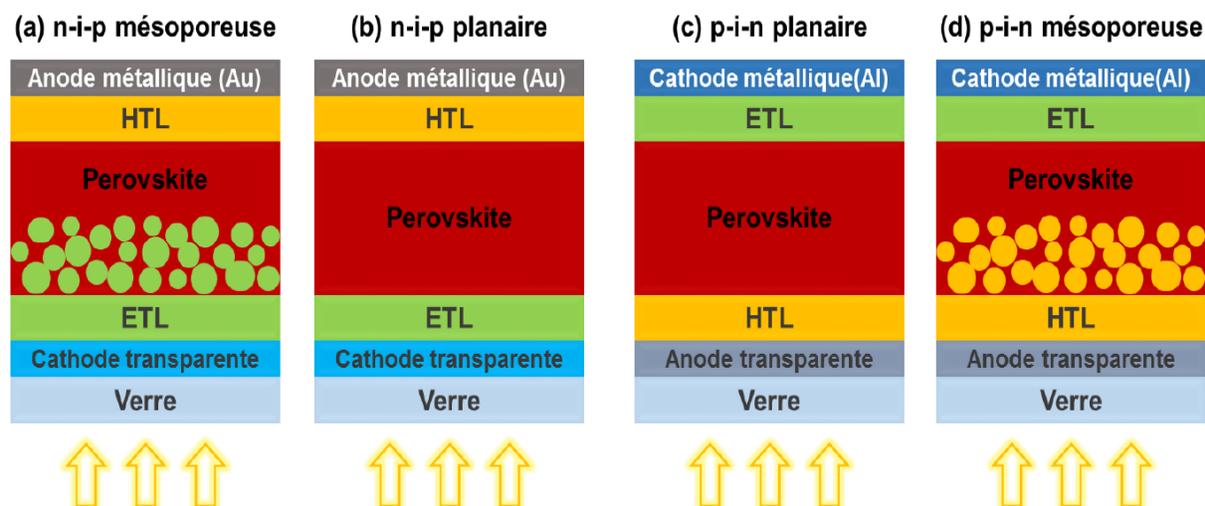


Figure II.13 : Différentes structures d'une cellule à pérovskites [23].

II.6. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire a pérovskite

Dans une cellule pérovskite la couche active est prise en sandwich entre une couche de type p, également appelée HTM (Hole Transport Material), et une couche de type n appelée ETL (Electron Transport Layer), créant ainsi une configuration p-i-n. Le succès de la pérovskite en tant qu'absorbeur solaire dépend en grande partie de la longue longueur de diffusion des charges et des mobilités élevées des porteurs dans le milieu. Le principe de fonctionnement de la cellule solaire à base de pérovskite repose sur l'absorption de photons par la couche active de pérovskite. L'absorbeur de pérovskite a une faible énergie de liaison à l'exciton qui indique la génération de porteurs de charge libre lors de l'absorption de photons et se produit en quelques pico secondes. Ces porteurs de charge libres générés sont ensuite transportés vers les contacts d'interface. Pendant le processus de transfert (figure II.14), le processus souhaité (flèche rouge) se déroule en trois étapes [26] :

- Photo-excitation dans l'absorbeur de pérovskite (1).
- Transfert d'électrons dans l'ETL (2).
- Transfert de trous en HTL (ou transfert équivalent d'électrons de HTL en pérovskite) (3).

Toutefois un grand nombre de processus indésirables peuvent survenir (flèche verte). Ces processus consistent en :

- Une recombinaison des espèces photo-générées (4).

- Un transfert de charge arrière aux interfaces de HTL et de TiO₂ avec de la pérovskite (5, 6).
- Un contact direct entre HTL et TiO₂ (7).

Finalement, après avoir surmonté les barrières d'extraction au niveau des interfaces, les porteurs de charge restants peuvent être transférés via des interfaces de contact sélectives et peuvent être extraits par les électrodes respectives [26].

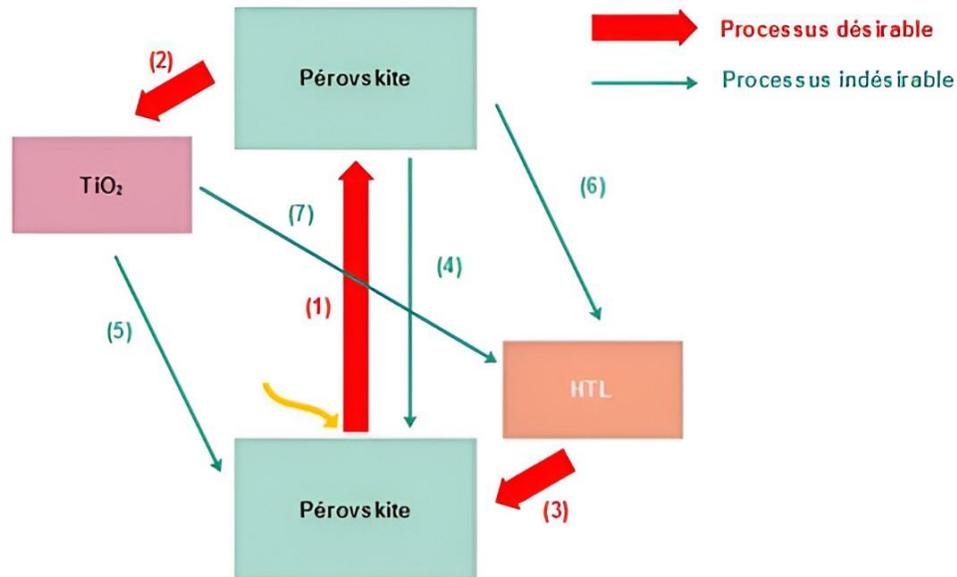


Figure II.14 : Diagramme de transfert des électrons et les processus de recombinaison dans les cellules solaires à base de pérovskite [26].

II.7 Conclusions :

Cette partie a permis d'explorer en profondeur les aspects essentiels des cellules solaires à base de matériaux pérovskites. A travers l'analyse de l'historique de ces matériaux, de leur structure cristallographique et morphologique, de leur stabilité et de leurs propriétés opto-électroniques, nous avons pu saisir la complexité et la diversité de ces composés. Nous examinerons également l'architecture des cellules solaires utilisant les pérovskites ainsi que les principes fondamentaux qui les régissent.

*Chapitre III : Généralité sur le
simulateur SCAPS-1D.*

III.1 Introduction

Le logiciel de simulation SCAPS-1D (Solar Cell Capacitance Simulator in one Dimension) est un outil numérique conçu pour simuler les caractéristiques électriques des cellules solaires unidimensionnelles. Il a été développé à l'Université de Gent en Belgique et est disponible gratuitement pour la communauté des recherches photovoltaïques. SCAPS-1D est un outil puissant pour la simulation et l'optimisation des cellules solaires, permettant aux utilisateurs de modéliser et d'analyser les caractéristiques électriques de ces dispositifs photoniques.

Dans ce chapitre, nous allons donner un aperçu complet des principales caractéristiques du logiciel SCAPS.

III.2 Logiciel de simulation SCAPS

SCAPS est un logiciel de simulation des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électronique et informatique (ELIS) de l'Université de Gent, Belgique. SCAPS est développé à l'origine pour des structures des cellules de CuInSe₂ et de CdTe. Cependant, Plusieurs version ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour des cellules solaires cristallines (Si et GaAs) et des cellules amorphes (a-Si et de Si micro-morphe).

III.2.1. Utilisation du SCAPS

Avec SCAPS, il est possible de simuler des structures constituées d'un nombre définis de couches (jusqu'à 7 couches intermédiaires ainsi que les contacts avant et arrière). Les différents profils de dopage avec les distributions énergétiques des niveaux donneurs et accepteurs (dans le volume et aux interfaces) sont considérés. En fait, n'importe quel programme de simulation, capable de résoudre les équations de transport électronique dans les semi-conducteurs, peut toujours être employé pour modéliser les piles solaires. Cependant, puisqu'il est assez puissant et donne des résultats plus précis, SCAPS reste un logiciel convivial pour la modélisation des cellules en couches minces [27].

III.2.2. Interface du logiciel SCAPS

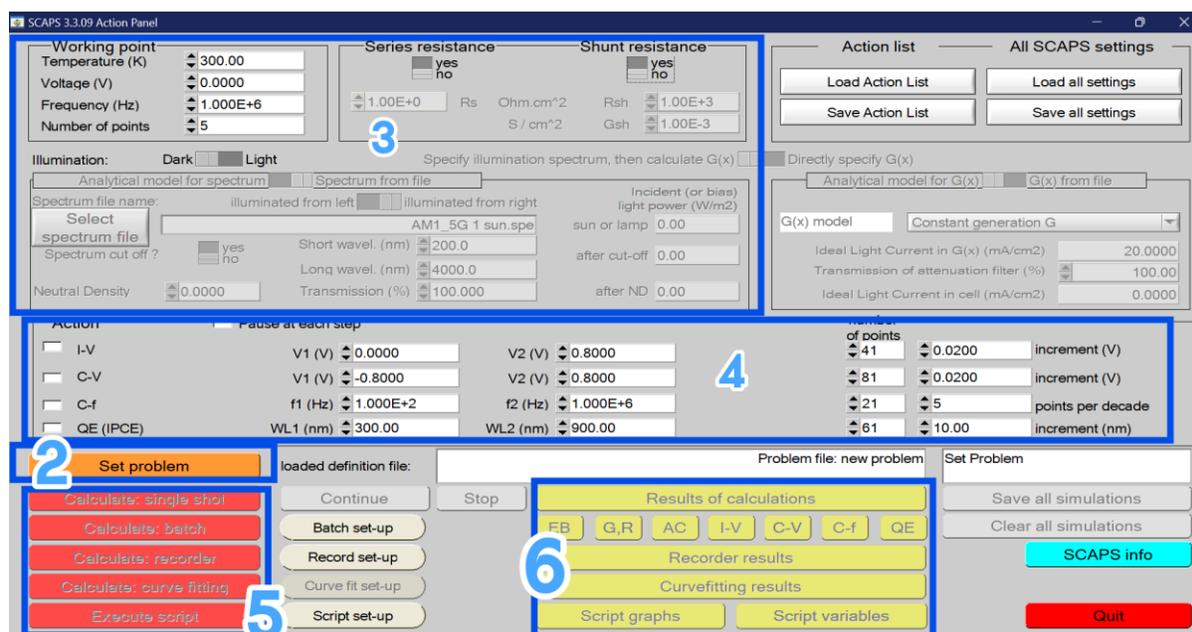


Figure III.15 : Panneau de démarrage de SCAPS.

La signification des blocs nommés de 1 à 6 est expliquée comme suivant :

1. Lancer SCAPS.
2. Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.
3. Indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifier le point de Fonctionnement).
4. Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.
5. Commencer le(s) calcul(s).
6. Afficher les courbes de simulation Ces étapes sont plus détaillées dans ce qui suit [28].

III.2.3. Définir le point de fonctionnement

Le point de fonctionnement spécifie les paramètres qui ne sont pas variables dans les mesures de la simulation, et qui sont relatifs à l'opération de mesure. Ceci implique :

- **Température (T)**

Importante pour toutes les mesures. Note : dans SCAPS, seulement $N_c(T)$, $N_v(T)$, les vitesses thermiques, le voltage thermique kT et tous leurs dérivés sont les seules variables qui ont une dépendance thermique explicite ; on doit saisir manuellement, pour chaque valeur T , les paramètres du matériau correspondant [29].

- **Tension(V)**

Il ne concerne pas les simulations I-V et C-V. C'est le voltage de la polarisation DC dans une simulation C-f et $QE(\lambda)$. SCAPS commence toujours à 0 V, et s'exécute au voltage du point de fonctionnement par un nombre d'étapes qu'on doit aussi spécifier [29].

- **Fréquence(f)**

Elle ne concerne pas les simulations I-V, $EQ(\lambda)$ et C-f. C'est la fréquence dans laquelle la caractéristique C-V est simulée [29].

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

Figure III.16 : Point de fonctionnement.

- **Illumination**

Elle est utilisée dans toutes les mesures. Pour $EQ(\lambda)$, elle détermine les conditions de polarisation de la lumière. Les paramètres de base sont : l'obscurité ou la lumière, le choix du côté illuminé, le choix du spectre. Le spectre d'illumination one sun (=1000W/m²) avec la masse d'air 1.5 global est le spectre par défaut, mais il existe aussi une large gamme de lumières monochromatiques et de spectres pour plus de simulations personnalisées. S'il y a un simulateur optique, on peut immédiatement charger un profil de génération au lieu d'utiliser un spectre [29].

Illumination:		Specify illumination spectrum, then calculate G(x)	
<input type="checkbox"/> Dark	<input type="checkbox"/> Light		
Analytical model for spectrum		Spectrum from file	
Spectrum file name:	illuminated from left	illuminated from right	Incident (or bias) light power (W/m ²)
Select spectrum file	AM1_5G 1 sun.spe	sun or lamp	1000.00
Spectrum cut off ?	Short wavel. (nm)	after cut-off	1000.00
<input type="checkbox"/> yes	200.0		
<input type="checkbox"/> no	Long wavel. (nm)		
	4000.0		
Neutral Density	Transmission (%)	after ND	1000.00
0.0000	100.000		

Figure III.17 : Paramètres d'illumination.

III.2.4. Fenêtre de conception du dispositif

Pour définir le problème dont la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire, on doit cliquer sur le bouton « Définir le problème » sur le panneau d'action, une nouvelle fenêtre s'ouvre qui est le panneau de définition de la cellule solaire (Figure III.18). Cette interface

joue un rôle important dans la simulation de la cellule, dans ce panneau, nous pouvons créer différentes couches et définir leurs paramètres physiques et leurs propriétés, nous pouvons également avoir une visualisation de la structure du dispositif. Il y a trois parties de l'interface de définition de périphérique et des détails dans ce panneau [30] :

- **Section (1)** dans cette partie, 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 [30].
- **Section (2)** 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 dispositif et enfin un bouton dédié à inverser l'ordre des couches de structure [30].
- **Section (3)** 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 du dispositif et de revenir à l'interface de démarrage [30].

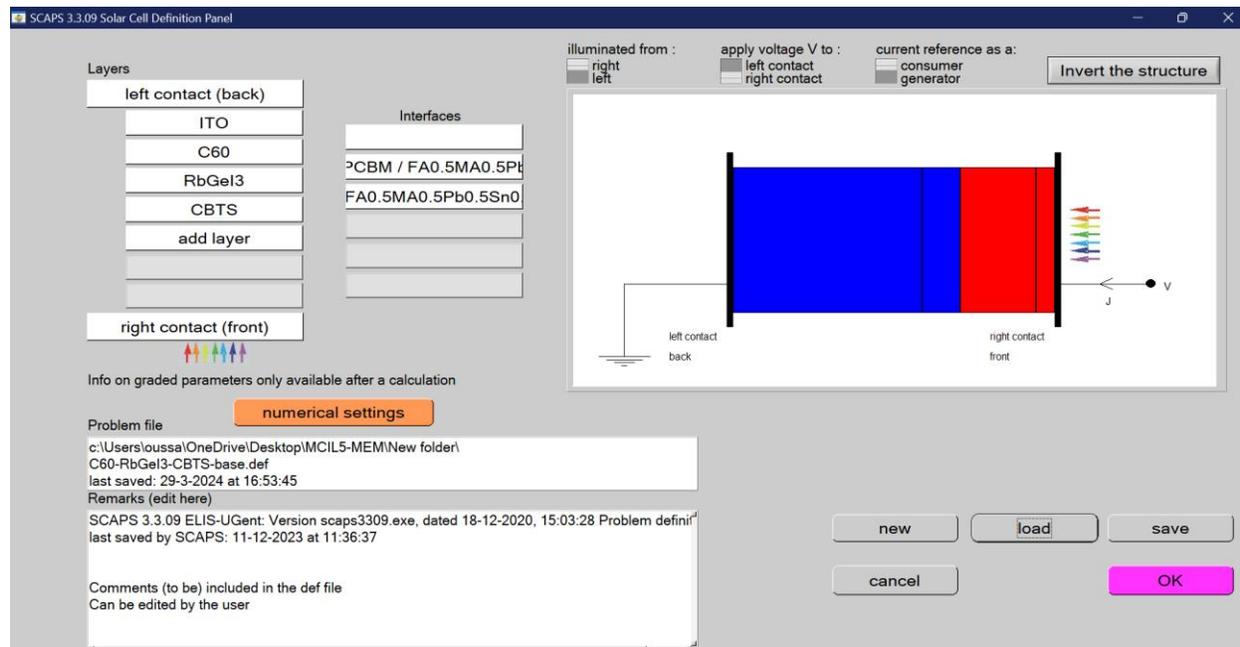


Figure III.18 : Interface de définition du dispositif.

III.2.5. Propriétés des couches

En cliquant sur le bouton « add layer », une fenêtre (Figure III.19) les différents paramètres du matériau à introduire. Ces paramètres peuvent avoir des distributions uniformes ou non uniformes, selon la physique du matériau. Dans la première case, on introduit le nom de la couche (qui correspond au type dopage). Dans la deuxième case, l'épaisseur de la couche est introduite. Le troisième block, concerne la pureté du matériau et son profile. Dans le quatrième block, on introduit : le gap d'énergie, l'affinité électronique, la permittivité diélectrique, les densités effectives des bandes de conduction et thermiques des électrons et des trous libres, les mobilités des électrons et des trous. Finalement, Une case, qui permet d'ajouter les masses effectives des électrons et des trous si on tient compte du transport des porteurs par effet tunnel. Si le matériau est un composé d'éléments avec des concentrations non uniforme, on peut introduire des variations graduelles des précédents paramètres. Dans le cinquième block, figure (III.20) on introduit le dopage, type et densité. Le dopage aussi peut être introduit comme étant uniforme, comme il peut avoir des variations graduelles (linéaire, paraboliques,). Dans le sixième block, on définit l'absorption de la couche, comme le montre la figure (III.21) L'absorption peut être définie par le modèle analytique fourni par SCAPS, comme elle peut introduite sous forme de données. SCAPS fourni un nombre de données de l'absorption pour plusieurs types de semi-conducteur. On peut également utiliser d'autres données de l'absorption pour des semi-conducteurs non disponibles dans SCAPS, à condition que le fichier ait la même extension des fichiers de l'absorption fournis par SCAPS [31].

SCAPS 3.3.09 Layer Properties Panel

LAYER 1	layer 1
thickness (μm)	2.000
	uniform pure A (y=0)
The layer is pure A: y = 0, uniform	0.000
Semiconductor Property P of the pure material	pure A (y = 0)
bandgap (eV)	1.200
electron affinity (eV)	4.500
dielectric permittivity (relative)	10.000
CB effective density of states ($1/\text{cm}^3$)	1.000E+19
VB effective density of states ($1/\text{cm}^3$)	1.000E+19
electron thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
hole thermal velocity (cm/s)	1.000E+7
electron mobility (cm^2/Vs)	5.000E+1
hole mobility (cm^2/Vs)	5.000E+1
<input type="checkbox"/> Allow Tunneling	effective mass of electrons 1.000E+0 effective mass of holes 1.000E+0
no ND grading (uniform)	
shallow uniform donor density ND ($1/\text{cm}^3$)	1.000E+15
no NA grading (uniform)	
shallow uniform acceptor density NA ($1/\text{cm}^3$)	1.000E+15

Figure III.19 : Propriétés de la couche ajoutée.

no ND grading (uniform)	
shallow uniform donor density ND ($1/\text{cm}^3$)	1.000E+18
no NA grading (uniform)	
shallow uniform acceptor density NA ($1/\text{cm}^3$)	0.000E+0

Figure III.20 : Propriétés des dopages définis.

Absorption interpolation model

alpha pure A material (y=0)

from file from model

Set absorption model

show

save

List of absorption submodels present:
sqrt(hv-Eg) law (SCAPS traditional)

Figure III.21 : Modèle de l'absorption.

Le type des recombinaisons en volume présent est indiqué dans le côté droite du panneau des propriétés de la couche la figure (III.22), Tous les types des recombinaisons sont présents directs ou à travers les pièges.

Recombination model

Band to band recombination

Radiative recombination coefficient (cm ³ /s)	0.000E+0	0.000E+0	uniform
Auger electron capture coefficient (cm ⁶ /s)	0.000E+0	0.000E+0	uniform
Auger hole capture coefficient (cm ⁶ /s)	0.000E+0	0.000E+0	uniform

Recombination at defects: Summary

Defect 1

Defect 1
charge type : neutral
total density (1/cm³): Uniform 1.000e+14
grading Nt(x): uniform
energydistribution: uniform; Et = 0.30 eV above EV; Ekar = 0.10 eV
this defect only, if active: tau_n = 2.0e+00 ns, tau_p = 1.0e+03 ns
this defect only, if active: Ln = 7.2e-01 µm, Lp = 8.0e+00 µm

Edit Defect 1 Add a Defect 2 [] [] [] []

Remove

(no metastable configuration possible)

Figure III.22 : Définition des types de recombinaison présents.

Si on introduit les défauts (pièges) ; ils peuvent être uniformes ou non uniformes, discrets, avec des distributions gaussiennes, donneurs, accepteurs, neutres, monovalents ou divalents. On peut même définir des transitions de porteurs entre les différents niveaux d'énergie des pièges [31].

III.2.6. Fenêtre de résultat

Cette fenêtre affiche les résultats de la simulation sous forme de graphe avec la possibilité de les sauvegarder ou exporter leurs valeurs. Les grandeurs simulées sont [32] :

- ✓ Caractéristique I-V
- ✓ Capacité en fonction de la tension « C-V »
- ✓ Capacité en fonction de la fréquence « C-f »

✓ Quantum efficiency Q-E

✓ Bande d'énergie « Energy band » et bande d'énergie en régime alternatif « AC Band » [32].

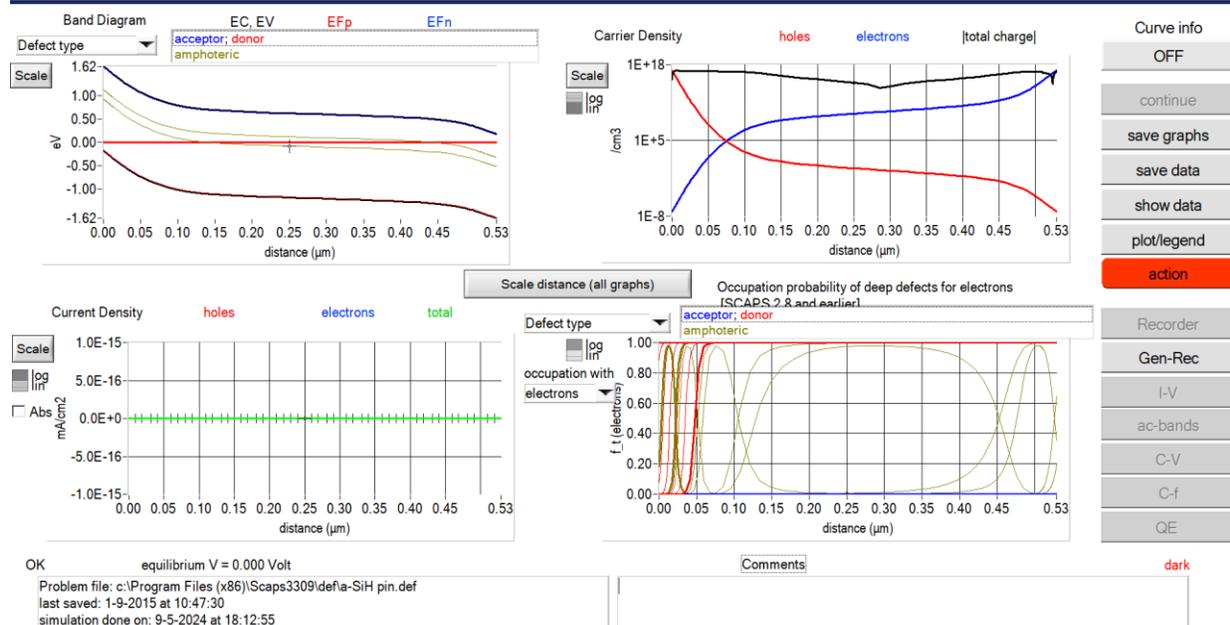


Figure III.23 : Fenêtre de résultat.

III.3 Avantages et inconvénients du SCAPS

Les avantages du logiciel SCAPS sont multiples à savoir : la grande vitesse d'exécution, les fichiers d'entrée sont accessibles à l'utilisateur en format texte, la possibilité d'introduire des interfaces et prise en compte du phénomène de recombinaison, l'introduction de résistances série, et l'obtention des caractéristiques capacité-tension et capacité-fréquence. Cependant, ses inconvénients sont l'absence de la réflexion aux interfaces de différentes couches constituant la cellule l'instabilités lorsque le dispositif est loin d'être idéal et comprend des barrières secondaires [33].

III.4 Conclusion

Le simulateur SCAPS-1D est un outil puissant pour la modélisation et l'analyse des dispositifs photovoltaïques, en particulier les cellules solaires à couches minces. Son utilisation permet aux chercheurs et ingénieurs de comprendre les comportements électriques et optiques des matériaux et des structures de dispositifs sans nécessiter de coûteuses et longues expérimentations physiques.

Le simulateur SCAPS-1D joue un rôle crucial dans la recherche et le développement des

technologies photovoltaïques. En permettant des simulations précises et détaillées, il réduit le besoin de prototypes physiques, accélérant ainsi le cycle de développement et réduisant les coûts. Les perspectives d'avenir pour SCAPS-1D incluent son intégration avec d'autres outils de simulation et l'amélioration continue de ses capacités de modélisation pour rester à la pointe de la recherche photovoltaïque.

En somme, SCAPS-1D est un outil indispensable pour quiconque impliqué dans le domaine des énergies renouvelables, offrant un équilibre entre simplicité d'utilisation et profondeur d'analyse technique.

Chapitre IV : Résultats et interprétation

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons procéder à une simulation numérique de la cellule solaire à base de pérovskite (RbGeI_3), en utilisant le logiciel de simulation SCAPS-1D. Cette démarche vise à déterminer les paramètres cruciaux pour optimiser le fonctionnement de la cellule pérovskite. L'étude se concentre principalement sur le choix de la configuration adéquate qui est basé sur les matériaux pérovskite, HTL et ETL afin d'améliorer la reproductibilité et la stabilité des cellules solaires à base de pérovskite RbGeI_3 . Les simulations effectuées avec SCAPS-1D permettent d'obtenir les valeurs de la densité de courant de court-circuit (J_{SC}), de l'efficacité de conversion de puissance (PCE), du facteur de forme (FF) et de la tension de circuit ouvert (V_{CO}) en fonction de l'épaisseur, température, dopage, défauts, R_{S} et R_{SH} . L'objectif principal de cette étude est d'optimiser la conception d'une cellule solaire à pérovskite RbGeI_3 pour maximiser son rendement.

IV.2. Description de la structure de la cellule solaire à base de pérovskite

IV.2.1. Description de la structure

L'architecture de la cellule solaire utilisée dans notre étude est structurée avec trois composants principaux : la couche responsable du transport des électrons (ETL), la couche de pérovskite dopée avec un matériau de type p, et la couche facilitant le transport des trous (HTL) [34]. Lorsqu'elle est exposée à la lumière, cette configuration conduit à la génération d'excitons, des paires de particules dans un état d'énergie confiné, principalement au sein de la couche de pérovskite. Ces excitons, composés d'électrons et de trous, possèdent des longueurs de diffusion relativement longues, ce qui leur permet de se déplacer dans la région p (pour les électrons) ou la région n (pour les trous). Au niveau de la jonction entre l'ETL et la couche de pérovskite, les excitons (paires de trous et d'électrons) subissent une séparation. Par la suite, les électrons sont transportés à travers l'ETL vers l'électrode correspondante, tandis que les trous traversent efficacement le HTL. La présence d'un champ électrique intégré entre l'ETL (ou le HTL) et la couche de pérovskite facilite la dissociation des excitons et leur transport. Ce champ électrique accélère le mouvement des électrons et des trous vers leurs contacts respectifs, contribuant à l'efficacité globale de la cellule solaire. Dans nos simulations, nous avons incorporé des matériaux avancés pour les couches ETL et HTL, en utilisant spécifiquement du dioxyde de cérium (C60) pour l'ETL et CBTS pour le HTL [35]. Les résultats des simulations ont démontré que les structures de cellules solaires composées de dioxyde d'indium-étain ITO/ C60 / RbGeI_3 /CBTS/Ag présentent

une efficacité de conversion photo remarquablement, comme illustré dans la Figure (IV.24). L'intégration de ces matériaux avancés contribue à l'amélioration des performances globales de la cellule solaire [34-35].

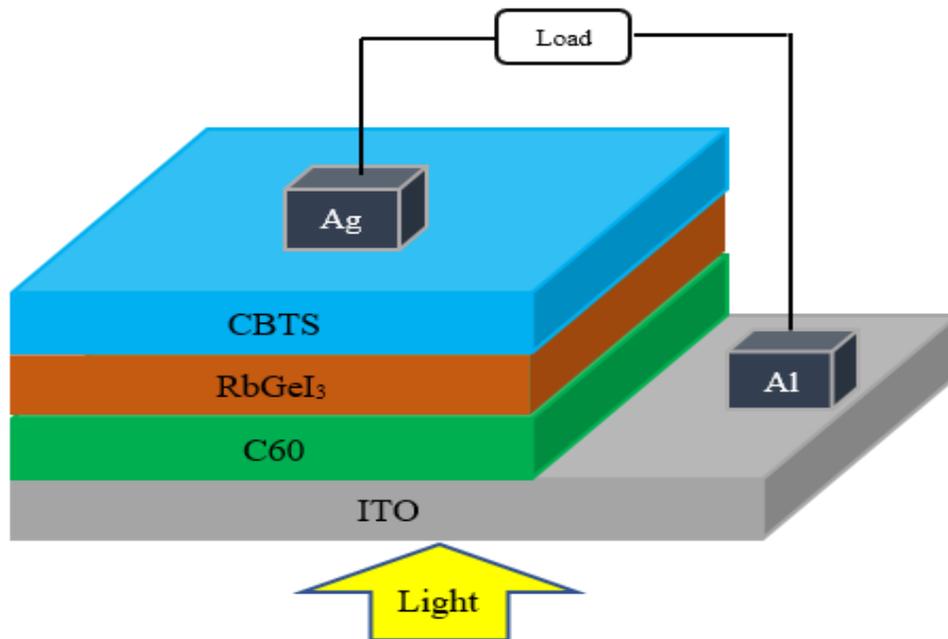


Figure IV.24 : Configuration de conception de la PSC basée sur RbGeI3.

IV.2.2. Modèles et paramètres de simulation

Les simulations réalisées à l'aide de SCAPS-1D permettent de dériver les valeurs de la densité de courant de court-circuit (J_{SC}), de l'efficacité de conversion de puissance (PCE), du facteur de forme (FF) et de la tension de circuit ouvert (V_{CO}) en fonction des épaisseurs et des températures variables. Ces simulations peuvent être effectuées à la fois dans des environnements éclairés et dans l'obscurité, en tenant compte d'une gamme de températures, et elles peuvent être appliquées à sept couches différentes de la cellule solaire. Des conditions de fonctionnement standard ont été utilisées pour les simulations, à savoir une lumière AM1.5G et une température ambiante de 300 K. De plus, comme indiqué dans les tableaux (IV.2), nous avons défini méticuleusement les paramètres de modélisation d'entrée pour la couche de transport des trous (HTL), la couche absorbante (RbGeI3) et la couche de transport des électrons (ETL). Afin de représenter et de mimer avec précision le comportement et les performances de la cellule solaire dans le cadre de la simulation, certains paramètres sont cruciaux. Grâce à l'utilisation de simulations numériques

SCAPS-1D, notre compréhension des idées de base et du fonctionnement des cellules solaires s'est considérablement améliorée. Les principales variables ayant les plus grands effets sur les performances de ces dispositifs ont été découvertes grâce à ces simulations. En utilisant des méthodes numériques pour résoudre les équations de continuité des porteurs et l'équation de Poisson unidimensionnelle, SCAPS-1D nous donne de nouvelles compréhensions importantes du comportement des matériaux semi-conducteurs dans des conditions stables.

Paramètres	ITO	ETL (C60)	PVK (RbGeI ₃)	HTL (CBTS)
Épaisseur (μm)	0.5	0.1	0.4	0.05
Affinité Electronique χ (eV)	4.1	3.9	3.9	3.6
L'Energie de Gap E_g (eV)	3.5	1.31	1.31	1.9
Permittivité diélectrique ϵ_r	9	7.5	23.01	5.4
Densité effective des états (CB)	2.2×10^{18}	1×10^{19}	1.8×10^{18}	10^{19}
Densité effective des états (VB)	1.8×10^{18}	1×10^{19}	1×10^{18}	10^{19}
Mobilité des électrons μ_n (cm^2/Vs)	20	10^{-2}	28.6	200
Mobilité des trous μ_p (cm^2/Vs)	10	10^{-2}	27.3	8.6×10^3
Densité d'accepteur N_A (cm^{-3})	0	0	1×10^{15}	10^{18}
Densité de donneurs N_D (cm^{-3})	10^{21}	10^{18}	0	2
Densité de défauts N_t	10^{14}	10^{14}	1×10^{14}	10^{14}

Tableau IV.2 : Paramètres de chaque couche de la cellule utilisés dans la simulation.

IV.2.3. Diagramme de bande d'énergie

La Figure IV.25 présente graphiquement l'alignement des bandes d'énergie au sein de l'hétérostructure utilisant la pérovskite organométallique à base de (RbGeI₃) pour l'absorption. Cet alignement est crucial car il influence le déplacement des électrons et des trous à travers le matériau. Dans notre recherche, nous avons utilisé des couches spécifiques pour transporter les électrons (ETL) et les trous (HTL). Les ETL sont composées de fullerène (C60), tandis que le HTL est constitué (CBTS) [36]. En examinant le schéma, nous pouvons également voir comment les contacts en or et en dioxyde d'indium (ITO) jouent un rôle crucial dans la collecte des charges.

L'or, en raison de sa fonction de travail élevée (WF) de 5.1 eV, est idéal pour collecter les trous du HTL, tandis que l'ITO, avec un WF de 4.0 eV, est parfait pour collecter les électrons. Le choix de ces matériaux et de leurs valeurs de WF contribue directement à l'optimisation des performances de la cellule solaire, car ils garantissent une collecte efficace des charges et un fonctionnement fluide du dispositif.

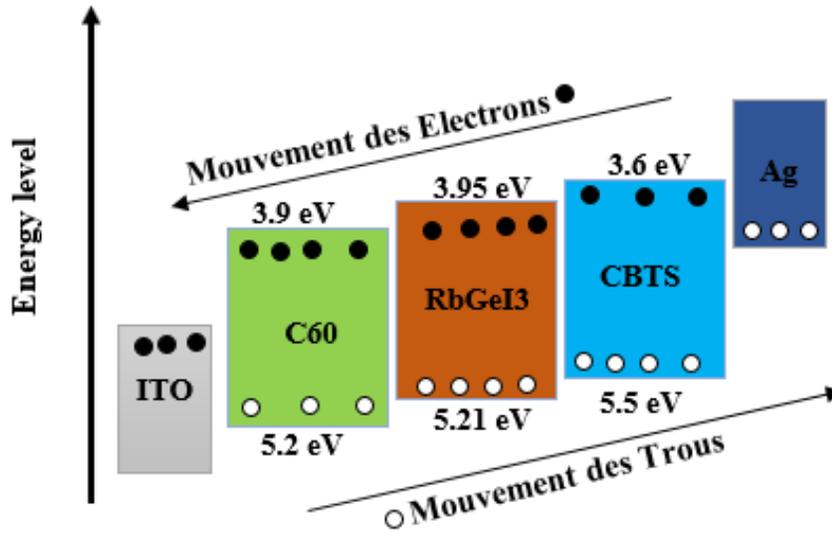


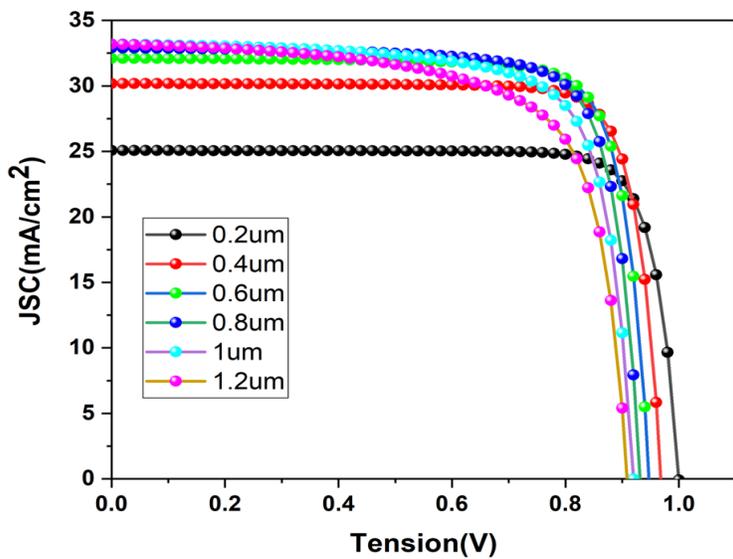
Figure IV.25 : Alignement du niveau d'énergie à base de RbGeI3.

IV.2.4. Influence de l'épaisseur de l'absorbeur (RbGeI3)

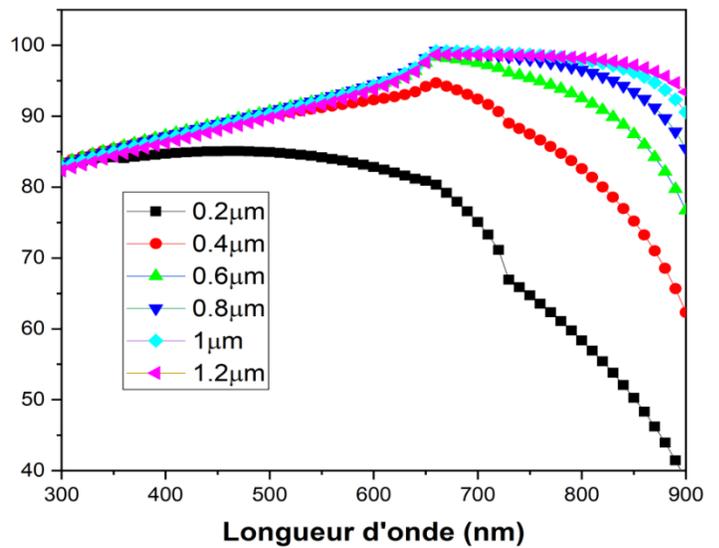
Dans cette section, la structure proposée de la cellule solaire à base de pérovskite, contenant les couches mentionnées précédemment, est examinée et divisée en plusieurs sous-sections. Nous commençons par la section de l'épaisseur, où la figure IV.26.a illustre les caractéristiques courant-tension (J-V) des cellules solaires à base de pérovskite composées de RbGeI3. L'épaisseur de la couche de pérovskite (RbGeI3) a été variée pour examiner son impact, le J_{SC} augmente proportionnellement avec l'augmentation de l'absorbeur, mais le V_{CO} diminue comme présenté dans la figure IV.26.a. Dans la figure IV.26.b, on illustre le QE externe qui analyse l'impact de la variation de l'épaisseur de l'absorbeur de 200 nm à 1200 nm le long de la plage de longueurs d'onde de 300 nm à 900 nm. Le QE de la structure a été visiblement amélioré lorsque l'épaisseur du collecteur de lumière RbGeI3 était inférieure à 0.6 μm , ce qui indique que l'amélioration de l'absorption était élevée. Néanmoins, le QE de la structure a augmenté moins lorsque l'épaisseur de RbGeI3 était supérieure à 0.6 μm , ce qui indique que l'augmentation de l'absorption était moins

significative. A mesure que l'épaisseur du film de RbGeI3 augmentait, il était mieux capable d'absorber la lumière de longueurs d'onde plus longues. La densité de courant de court-circuit (J_{SC}) et l'efficacité de conversion de puissance (PCE) sont présentées, démontrant une augmentation avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche de pérovskite, mais à $0.6 \mu\text{m}$, la PCE diminue. Une couche de pérovskite plus mince améliore l'absorption de la lumière du soleil, ce qui conduit à une tension de circuit ouvert plus élevée et à un facteur de forme amélioré, cette réduction étant attribuée à des problèmes potentiels tels qu'une recombinaison de charges accrue, un piégeage et une non-uniformité au sein de la couche de pérovskite. Une épaisseur excessive entrave l'extraction de charge, impactant négativement l'efficacité globale de la cellule solaire. La cellule solaire délivre un J_{SC} de 33.20 mA cm^{-2} , avec un V_{CO} de 0.99 V , un FF de 82.8% et une efficacité de conversion de puissance de 24.62% .

(a)



(b)



(c)

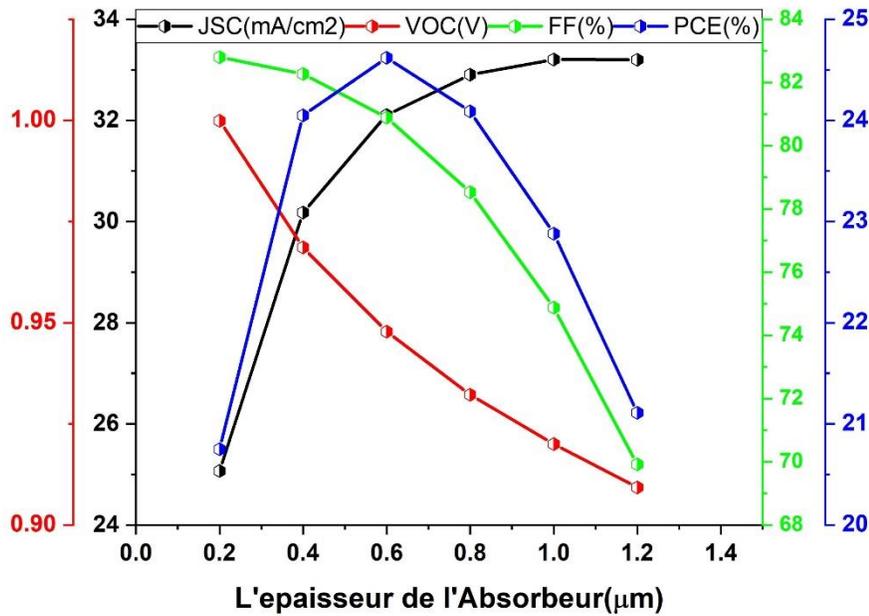


Figure IV.26 : Effet de l'épaisseur de pérovskite sur J-V (a), QE (b) et V_{CO} , J_{SC} , FF, PCE(c).

Dans la figure IV.26.c, les spectres d'efficacité quantique pour les cellules solaires à base de pérovskite $RbGeI_3$ sont présentés. Les informations révèlent une valeur de QE substantielle dépassant 90% sur un large spectre de longueurs d'onde allant de 600 à 850 nm, et la réponse spectrale des photons s'étend jusqu'à environ 850 nm. Les densités de photocourant dérivées des spectres de QE sont cohérentes avec les valeurs de J_{SC} acquises dans les courbes J-V enregistrées sous un simulateur solaire.

IV.2.5. Influence de l'épaisseur ETL

Dans les cellules solaires à base de pérovskite, la couche de transport d'électrons (ETL) joue un rôle crucial en facilitant l'extraction efficace et le transport des électrons générés lors de l'absorption de la lumière. Le dopage donneur fait référence à l'introduction intentionnelle d'atomes dopants qui donnent des électrons dans le matériau ETL. Le rôle du dopage donneur intense de la couche de transport d'électrons dans les cellules solaires à base de pérovskite comprend plusieurs aspects importants ; le dopage donneur peut augmenter la mobilité des électrons au sein de l'ETL. Cela signifie que les électrons générés par la couche de pérovskite peuvent se déplacer plus facilement à travers l'ETL, réduisant ainsi la probabilité de recombinaison et améliorant l'efficacité globale de la cellule solaire, le dopage donneur aide à créer un alignement des niveaux d'énergie

plus favorable à l'interface entre la couche de pérovskite et l'ETL. Cet alignement facilite l'extraction efficace des électrons de la couche de pérovskite, empêchant leur perte due à la recombinaison. De plus, les barrières énergétiques réduites permettent aux électrons de se déplacer plus librement à travers l'ETL. Cette réduction des barrières énergétiques contribue à un processus de transport de charges plus efficace. Les matériaux ETLs fortement dopés au donneur peuvent améliorer la stabilité de la cellule solaire à pérovskite. Cette stabilité est cruciale pour les performances à long terme et la fiabilité de la cellule solaire dans des conditions réelles. Le dopage donneur permet un réglage précis des niveaux d'énergie au sein de l'ETL. Ce réglage est important pour optimiser l'alignement des niveaux d'énergie entre différentes couches de la cellule solaire, ce qui conduit à un transport de charges amélioré et à des pertes réduites. Réduction de la recombinaison, le transport efficace des électrons est essentiel pour minimiser les pertes de recombinaison dans la cellule solaire à pérovskite. L'ETL fortement dopé au donneur peut aider à supprimer les événements de recombinaison, entraînant une efficacité photovoltaïque plus élevée. Il est important de noter que, bien que le dopage donneur puisse offrir des avantages, il est nécessaire d'optimiser avec soin, car un dopage excessif peut entraîner des effets indésirables tels qu'un piégeage accru des porteurs ou une instabilité du matériau. Le choix du dopant, de la concentration de dopage et les caractéristiques spécifiques du matériau pérovskite sont tous des facteurs à prendre en compte pour l'amélioration efficace de la couche de transport d'électrons dans les cellules solaires à pérovskite. Comme présenté dans la Figure IV.27.a, les caractéristiques courant-tension (J-V) de la configuration suggérée, composée de C60, sont représentées en faisant varier son épaisseur. La variation de C60 pour examiner son impact sur la cellule solaire (SC), l'amélioration des performances de sortie nécessite la plus mince possible en raison de ses valeurs optimales à 0.4 μm . La figure IV.27.b illustre le dopage donneur des fonctions ETL de performance de sortie, le dispositif montre une couche de C60 fortement dopée à 10^{20}cm^{-3} avec $J_{\text{SC}}=25.13\text{ mA/cm}^2$, $V_{\text{CO}}=1.00\text{ V}$, $\text{FF}=83.09\%$ et $\text{PCE}=20.99\%$.

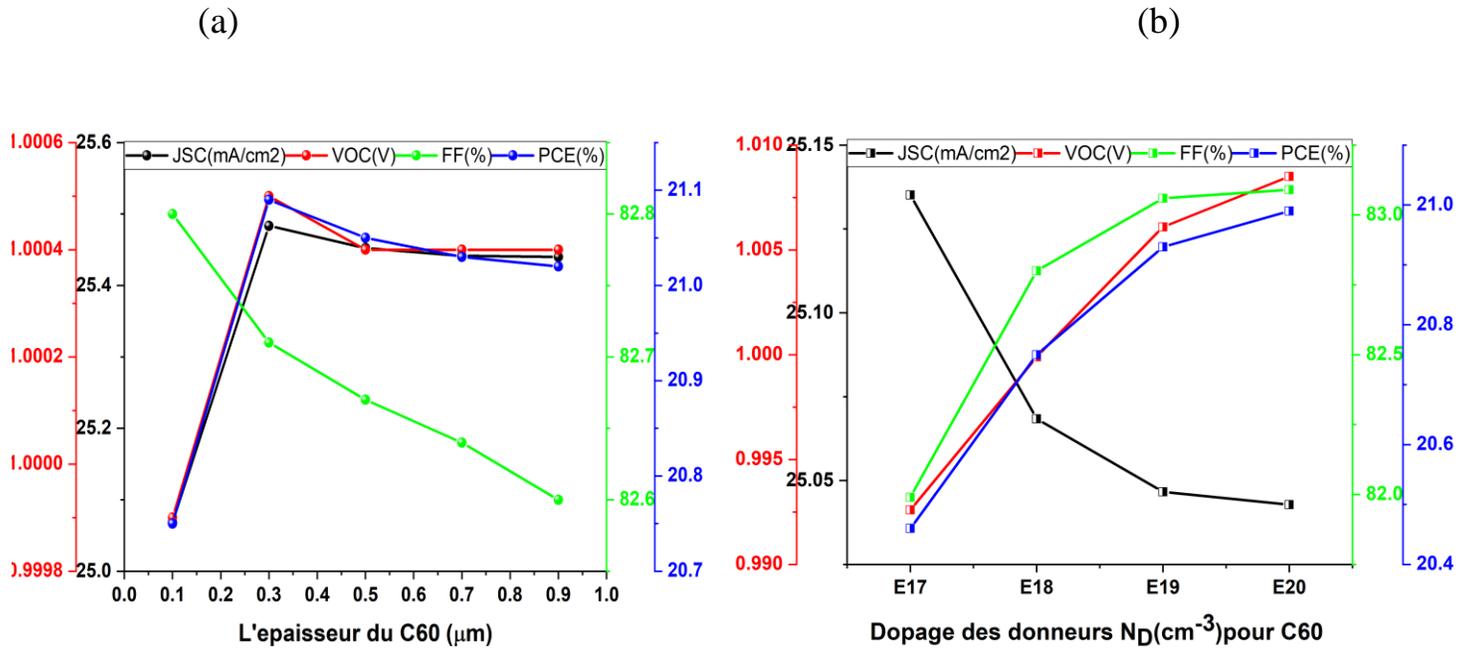


Figure IV.27 : Effet de l'épaisseur de l'ETL sur V_{CO} , J_{SC} , FF, PCE pour le dopage donneur ND (b) et l'épaisseur (a).

IV.2.6. Influence de l'épaisseur HTL

L'épaisseur de la couche de transport des trous (HTL) dans une cellule solaire à pérovskite peut influencer considérablement les performances du dispositif. Plusieurs aspects clés de la façon dont l'épaisseur de l'HTL affecte le comportement et l'efficacité des cellules solaires à pérovskite sont à considérer : Collecte et extraction de charges, l'épaisseur optimale de l'HTL est cruciale pour une extraction efficace des charges de la couche de pérovskite. Elle garantit que les trous générés dans le matériau de pérovskite peuvent atteindre efficacement l'HTL et être collectés à l'électrode. Si l'HTL est trop mince, il peut ne pas collecter et transporter efficacement les trous, ce qui augmente les chances de recombinaison et diminue les performances globales du dispositif. Augmentation de l'épaisseur, à mesure que l'épaisseur de l'HTL augmente, la résistance de contact entre l'HTL et l'électrode peut augmenter. Une résistance de contact élevée peut entraver le flux de porteurs de charge, affectant négativement les performances électriques du dispositif. Équilibre de l'épaisseur, il est nécessaire de trouver un équilibre dans l'épaisseur de l'HTL qui permet un transport efficace des charges tout en minimisant la résistance de contact. Absorption dans l'HTL, surtout s'il est organique, l'HTL peut absorber une partie de la lumière. Une augmentation de

l'épaisseur de l'HTL pourrait entraîner une absorption accrue de lumière à l'intérieur de l'HTL, réduisant potentiellement la quantité de lumière atteignant la couche de pérovskite. Une absorption excessive de lumière dans l'HTL peut entraîner un phénomène appelé *soakage* lumineux, où la lumière absorbée génère des porteurs supplémentaires ou de la chaleur, affectant la stabilité globale du dispositif. Impact sur la stabilité, l'épaisseur de l'HTL peut influencer la stabilité de la cellule solaire à pérovskite. Assurer la compatibilité entre le matériau HTL et la couche de pérovskite est crucial pour la stabilité à long terme du dispositif. Influence sur l'alignement des niveaux d'énergie, l'épaisseur de l'HTL peut influencer l'alignement des niveaux d'énergie à l'interface entre la couche de pérovskite et l'HTL. Optimiser cet alignement est important pour une extraction et un transport efficace des charges. Il est à noter qu'il peut y avoir des compromis entre le transport optimal des charges et d'autres facteurs, tels que la facilité de fabrication et le coût. La figure (IV.28) illustre la variation de l'épaisseur de la couche HTL (CBTS) et a été examinée pour comprendre ses effets. Une diminution de la densité de courant de court-circuit (J_{SC}), de l'efficacité de conversion de puissance (PCE) et de la tension de circuit ouvert (V_{CO}) est observée pour des épaisseurs allant de 0.001 à 0.2 μm . Une diminution de l'épaisseur de la couche CBTS améliore les propriétés de transfert d'électrons, améliorant l'extraction de charges et augmentant la densité de courant de court-circuit. Cela conduit à une amélioration globale de l'efficacité de conversion d'énergie et à une augmentation de la tension de circuit ouvert (V_{CO}), attribuée à une recombinaison réduite. La couche CBTS plus mince diminue la probabilité de recombinaison de porteurs de charge, en particulier à l'interface entre la couche active (RbGeI3) et C60, favorisant ainsi une tension de circuit ouvert plus élevée. Cependant, la figure (IV.28) indique également une diminution du facteur de forme (FF) à mesure que l'épaisseur de la couche HTL (CBTS) diminue. La cellule solaire a démontré une efficacité de conversion de puissance (PCE) de 21.69 %, avec un V_{CO} de 1.00 V, un J_{SC} de 26.08 mA cm^{-2} et un FF de 82.93 %.

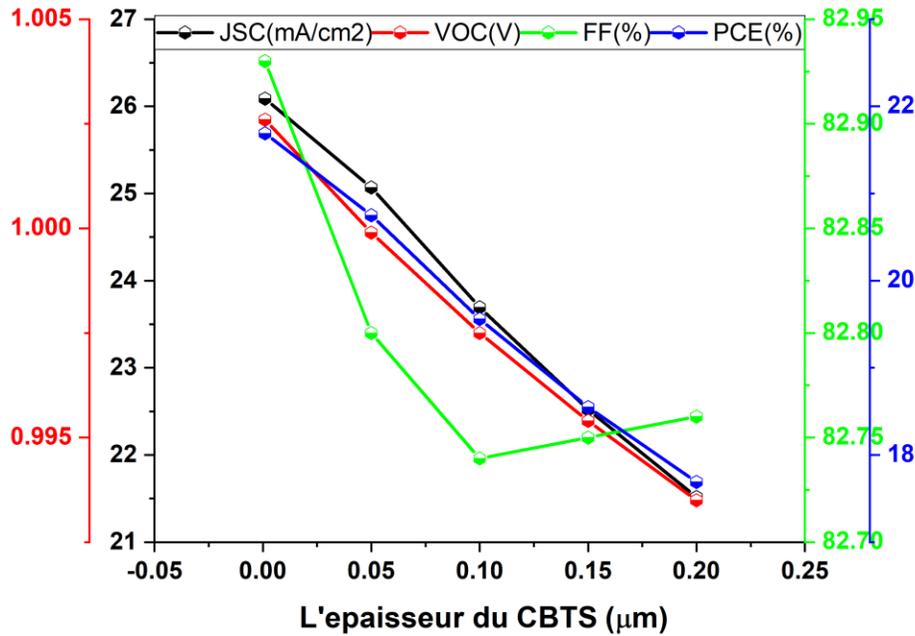


Figure IV.28 : Effet de l'épaisseur de l'HTL sur V_{CO} , J_{SC} , FF, PCE.

IV.2.7. Influence de l'absorbeur de défauts

La présence de défauts dans la couche absorbante de pérovskite d'une cellule solaire à pérovskite peut avoir un impact significatif sur les performances et la stabilité du dispositif. Voici quelques considérations importantes concernant l'influence des défauts dans la couche absorbante de pérovskite : Les défauts dans la couche de pérovskite peuvent agir comme des centres de recombinaison, facilitant la recombinaison des paires électron-trou photo-générées. Ce processus de recombinaison peut réduire l'efficacité globale de la cellule solaire en limitant le nombre de porteurs de charge qui contribuent à la génération de courant électrique. Niveaux d'énergie, les défauts peuvent créer des états de piégeage dans la bande interdite du matériau de pérovskite ; ces états de piégeage peuvent capturer et immobiliser temporairement les porteurs de charge, entraînant une recombinaison retardée et impactant le transport des porteurs de charge à travers le dispositif. Les états de piégeage peuvent créer des barrières énergétiques pour les porteurs de charge, affectant leur mobilité et contribuant à la recombinaison non radiative. La présence de défauts peut entraîner une diminution de la tension de circuit ouvert V_{CO} de la cellule solaire à pérovskite. Cela est dû au fait que les défauts peuvent introduire des niveaux d'énergie supplémentaires qui impactent la séparation et l'extraction des porteurs de charge et affectent également le facteur de forme (FF) de la cellule solaire, qui mesure son efficacité à utiliser le

courant électrique généré. Les défauts peuvent contribuer à la dégradation du matériau de pérovskite avec le temps, en particulier lorsqu'il est exposé à l'humidité, à la chaleur ou à la lumière. Cette dégradation peut entraîner une diminution des performances et de la stabilité du dispositif. Dans la Figure (IV.29), les caractéristiques de performance de l'absorbeur de défauts, avec un examen de la variation de la densité de défauts pour comprendre son impact, montrent une diminution de la densité de courant de court-circuit (J_{SC}), de la tension de circuit ouvert (V_{CO}), du facteur de forme (FF) et de l'efficacité de conversion de puissance (PCE) avec l'augmentation de la densité de défauts. La cellule solaire a démontré une efficacité de conversion de puissance (PCE) de 23.14 %, avec un V_{CO} de 1.09 V, un J_{SC} de 25.07 mA cm⁻² et un FF de 84.25 %.

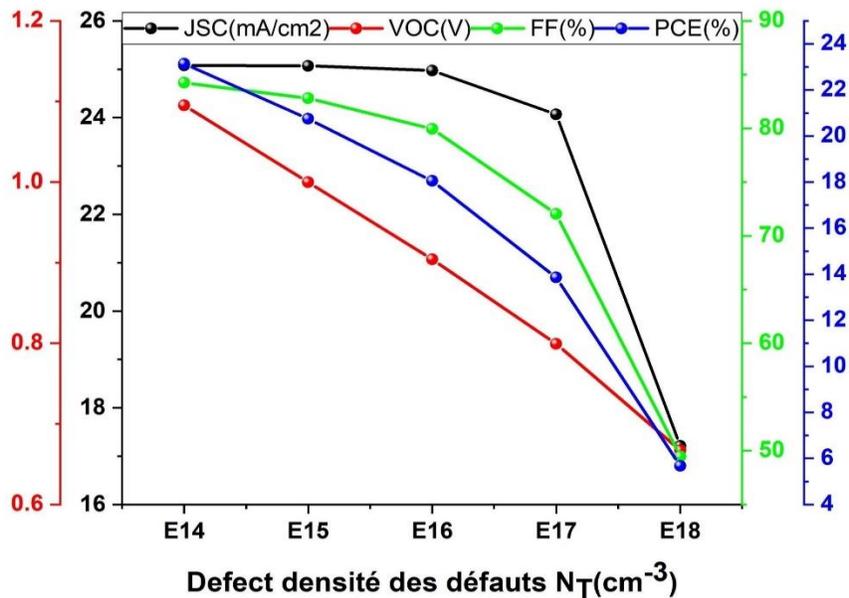


Figure IV.29 : Effet de la densité de défauts N_T (cm^{-3}) sur V_{CO} , J_{SC} , FF et PCE.

IV.2.8. Influence de la température

Dans la Figure (IV.30.a), les caractéristiques courant-tension (J-V) sont illustrées, affichant l'impact des variations de température, on remarque que la V_{CO} diminue lorsque la température augmente. La Figure (IV.30.b) révèle une diminution de la densité de courant de court-circuit (J_{SC}), à moins que d'autres paramètres n'augmentent tels que la tension de circuit ouvert (V_{CO}) le facteur de forme (FF) et l'efficacité de conversion de puissance (PCE) selon l'augmentation de la température. La Figure (III.30.c) illustre les fonctions de QE en fonction de la longueur d'onde,

selon la variation de température de 280 à 380 K. L'efficacité quantique fournit des informations sur l'efficacité de la collecte et de l'extraction des charges de la cellule solaire. Des valeurs élevées de QE indiquent qu'une grande proportion de charges générées contribuent au courant électrique externe, fournissant également des informations sur la stabilité et la fiabilité des cellules solaires à pérovskite. Les changements dans l'efficacité quantique au fil du temps peuvent indiquer des mécanismes de dégradation, aidant les chercheurs à développer des dispositifs plus stables et durables. L'efficacité quantique affecte l'emplacement et la forme de la courbe courant-tension (I-V), en particulier la position du point de puissance maximale (MPP). Une efficacité quantique bien adaptée au spectre solaire contribue à un suivi optimal du MPP, assurant la sortie de puissance maximale de la cellule solaire. L'efficacité quantique peut être déterminée par les porteurs de charge transportés et collectés par les électrodes. Dans ce cas particulier, la recombinaison en surface avant, la grande longueur de diffusion et les pertes par réflexion entraînent une chute de QE de 300 à 550 nm, une augmentation significative de la production de porteurs de charge par absorption de lumière, ce qui améliore la probabilité de collecte et l'efficacité de la cellule. L'analyse montre que le QE moyen obtenu pour une épaisseur de 500 nm de la couche absorbante est de 87%. Il est également important de noter que le QE est une mesure de l'efficacité de la cellule solaire à convertir les photons en porteurs de charge (électrons et trous). L'amélioration liée à la variation de température est la suivante : Efficacité de conversion de puissance (PCE) de 21.53 %, avec une V_{CO} de 1.02 V, un J_{SC} de 25.32 mA/cm² et un FF de 84.01 %.

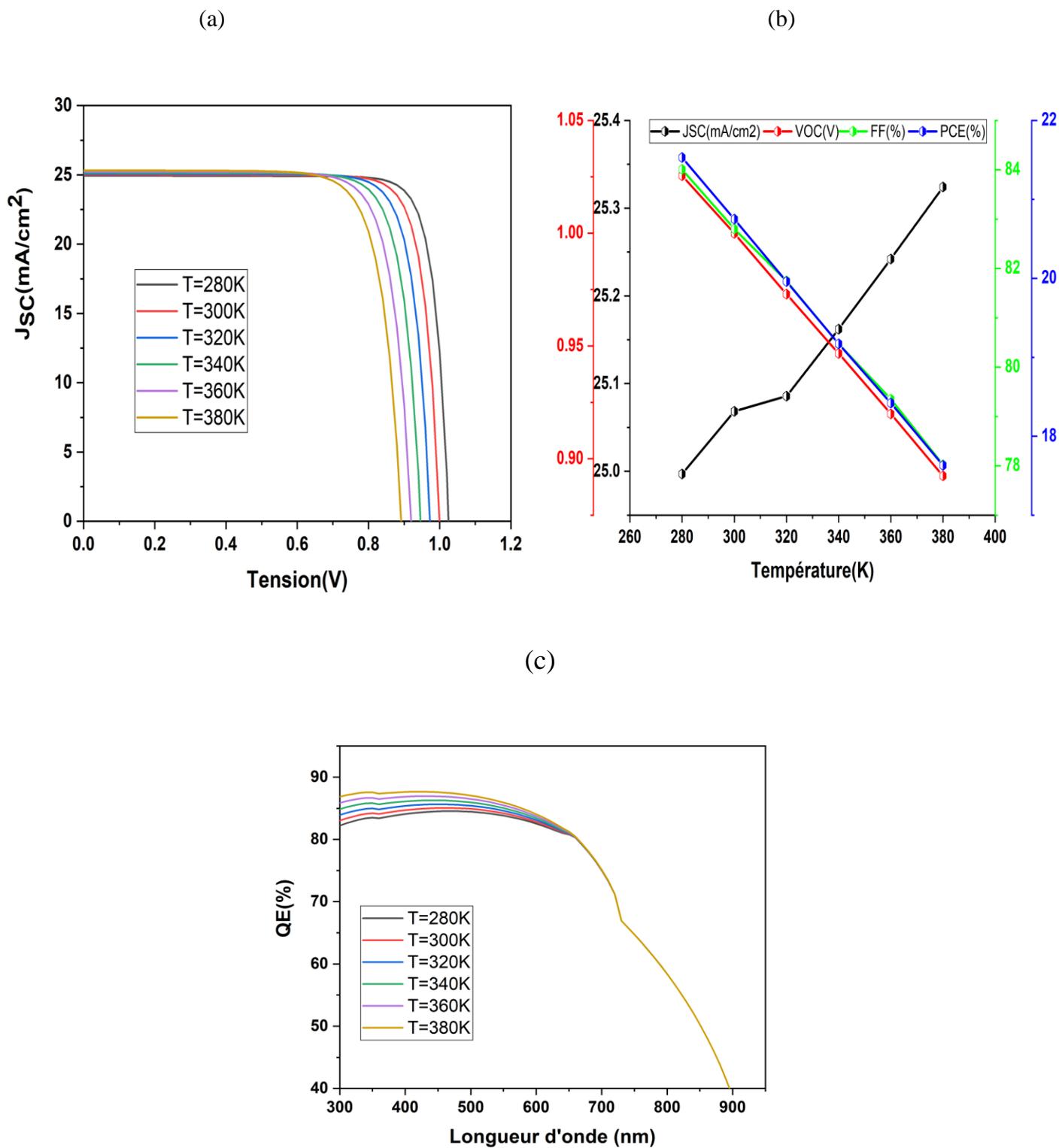


Figure IV.30 : Effet de la température sur J-V (a), V_{co} , J_{sc} , FF, PCE (b) et QE (c).

IV.2.9. Impact de la résistance série et de la résistance shunt

La résistance en série (R_S) et la résistance shunt (R_{SH}) sont des paramètres importants qui peuvent avoir un impact significatif sur les performances des cellules solaires en pérovskite. Ces deux résistances contribuent aux caractéristiques électriques globales de la cellule solaire, influençant des facteurs tels que l'efficacité, le facteur de forme et la puissance de sortie.

Voici un aperçu de l'impact de la résistance en série et de la résistance shunt sur les cellules solaires en pérovskite. Des stratégies efficaces pour minimiser la résistance en série, maximiser la résistance shunt et atteindre un équilibre optimal entre les deux sont cruciales pour améliorer l'efficacité et les performances globales de la technologie des cellules solaires en pérovskite.

Le choix des matériaux pour les différentes couches de la cellule solaire et les interfaces entre elles peut avoir un impact sur les résistances en série et de shunt. Architecture du dispositif : La conception de l'architecture de la cellule solaire, y compris l'agencement des couches et des contacts, joue un rôle crucial dans la détermination des valeurs des résistances en série et de shunt.

Il y a souvent un compromis entre les résistances en série et shunt. L'optimisation des deux paramètres est nécessaire pour trouver le bon équilibre et obtenir des performances optimales. Les résistances en série et shunt affectent toutes deux la capacité de la cellule solaire à fournir une puissance maximale. Minimiser la résistance en série et maximiser la résistance shunt sont essentielles pour atteindre une haute efficacité. La résistance shunt (R_{SH}) représente la résistance en parallèle au chemin du courant, permettant à une partie du courant de contourner la région active de la cellule solaire, une résistance shunt plus élevée permet à moins de courant de contourner la région active, réduisant ainsi la probabilité de fuites de courant. De plus, une résistance shunt plus élevée contribue à augmenter la tension de sortie de la cellule solaire.

La résistance shunt est cruciale pour maintenir un facteur de forme élevé, car elle aide à prévenir les fuites de courant indésirables et améliore les caractéristiques électriques globales. La résistance en série (R_S) représente la résistance rencontrée par le courant à travers les différents composants de la cellule solaire, y compris les matériaux conducteurs et les interfaces.

La résistance en série provoque une chute de tension le long du chemin du courant, ce qui entraîne une réduction de la tension de sortie de la cellule solaire. Pertes de puissance : Les chutes de tension à travers la résistance en série entraînent des pertes de puissance, réduisant la puissance de sortie globale de la cellule solaire. La résistance en série peut réduire le facteur de forme de la cellule solaire, car elle affecte la tension au point de puissance maximale et le courant de court-circuit.

Comme présenté dans la figure IV.31.a, b. une augmentation de la résistance en série correspond à une augmentation de la tension de circuit ouvert (V_{CO}). La chute de tension à travers R_s augmente, mais comme aucun courant ne circule dans la condition de circuit ouvert, cette chute de tension élevée n'affecte pas directement V_{CO} . Par conséquent, V_{CO} tend à augmenter avec une augmentation de la résistance en série. Dans la Figure IV.34.b, une augmentation de la tension de circuit ouvert (V_{CO}), du facteur de forme (FF) et de l'efficacité de conversion de puissance (PCE) est observée pour une résistance shunt allant de 10^2 à $10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$. La résistance shunt fournit un chemin alternatif pour que le courant circule, réduisant l'amplitude du courant de fuite. Cette réduction de la chute de tension à travers la résistance shunt contribue à une augmentation de la tension de circuit ouvert (V_{CO}). Une résistance shunt plus élevée minimise les pertes de tension dues aux courants de fuite, ce qui se traduit par une tension plus élevée à travers la cellule solaire. Cette réduction des pertes améliore le facteur de forme (FF) et, par conséquent, l'efficacité de conversion de puissance (PCE).

Il est important de noter que la densité de courant de court-circuit (J_{SC}) n'est pas affectée par la résistance shunt. J_{SC} Est principalement influencée par des facteurs tels que l'absorption de la lumière, la génération de porteurs de charge et l'efficacité de collecte, qui ne sont généralement pas directement affectés par les variations de la résistance shunt. La cellule solaire a démontré une efficacité de conversion de puissance (PCE) de 20.75 %, avec un V_{CO} de 0.99 V, un J_{SC} de 25.06 mA/cm^2 et un FF de 82.8 %.

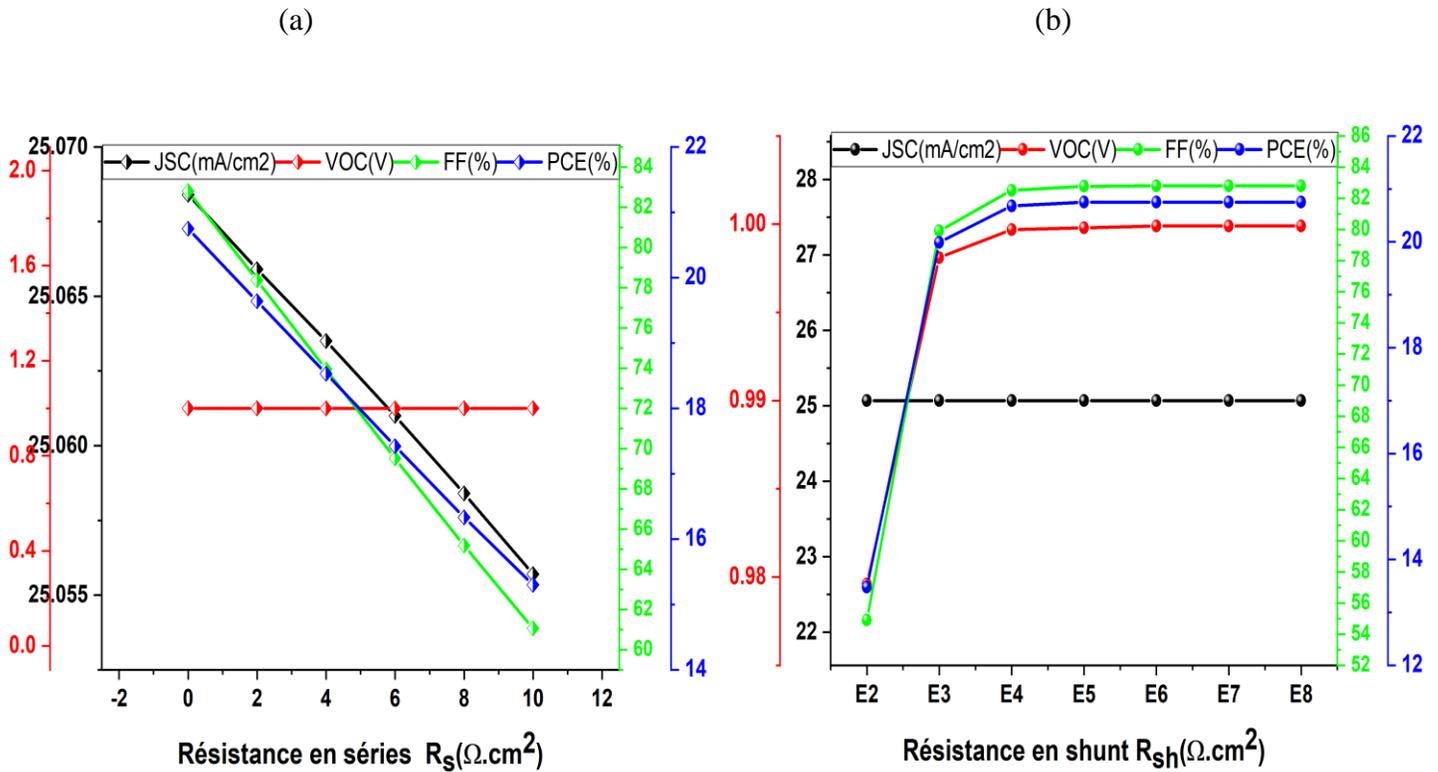


Figure IV.31 : Effet de R_s (a) et R_{SH} (b) sur V_{CO} ; J_{SC} ; FF ; PCE.

IV.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté et interprété les résultats de la simulation numérique, les caractéristiques électriques de la structure proposée d'ITO/C60/RbGeI3/CBTS/Ag est réalisée à l'aide du simulateur SCAPS-1D. Nous avons examiné l'impact de plusieurs paramètres, notamment l'épaisseur de la couche de pérovskite, l'épaisseur des couches ETL et HTL, les défauts de la couche de pérovskite, la température, ainsi que la résistance série et shunt. Nous avons également analysé les paramètres V_{CO} , J_{SC} , FF et PCE, ainsi que représenté les spectres QE est la caractéristique I-V. Les résultats de cette approche de simulation ont démontré un V_{CO} optimal de 0.99 V, un J_{SC} de 25.06 mA/cm^2 , un FF de 82.8%, et un rendement global de 20.75%.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons présenté une investigation et une optimisation de la simulation des cellules solaires en utilisant le simulateur SCAPS-1D. Notre méthodologie intègre des couches de transport d'électrons (ETL) avancées à base de Buckminsterfullerène (C60) et des couches de transport de trous (HTL) composées de (CBTS). Les simulations ont démontré que la cellule solaire ITO/C60/RbGeI3/CBTS/Ag présente une efficacité de conversion photovoltaïque exceptionnellement élevée.

Au début, nous avons présenté les concepts et paramètres généraux sur les cellules solaires, les caractéristiques des cellules photovoltaïques et une étude des générations de cellules solaires. Nous avons ensuite étudié la structure du matériau pérovskite et les performances des cellules pérovskites et réalisé des opérations simulées.

Pour simuler les caractéristiques électriques d'une cellule solaire à l'aide du logiciel SCAPS-1D, nous avons tout d'abord défini la structure de la cellule solaire, spécifiant les différentes régions de la cellule ainsi que les électrodes et le dopage associés. Ensuite, nous avons procédé à la définition des paramètres des matériaux utilisés dans la cellule solaire, ainsi qu'aux modèles physiques décrivant son fonctionnement.

L'optimisation des épaisseurs, des défauts, de la température, de la résistance série et shunt de la cellule solaire à base de RbGeI3 avec une structure ITO/C60/RbGeI3/CBTS/Ag a conduit à une série de résultats significatifs :

- Avec une épaisseur de 0.6 μm pour la couche pérovskite de RbGeI3, la cellule solaire a présenté des paramètres photovoltaïques tels qu'un courant de court-circuit J_{SC} de 33.20 mA/cm^2 , une tension à vide V_{CO} de 0.99 V, un facteur de forme FF de 82.8 % et un rendement PCE de 24.62 %.
- Pour la couche de C60 avec une épaisseur de 0.4 μm , les paramètres photovoltaïques obtenus sont : un J_{SC} de 25.13 mA/cm^2 , une V_{CO} de 1.00 V, un FF de 83.09 % et un rendement PCE de 20.99 %.
- Une couche de CBTS avec une épaisseur de 0.001 μm a affiché une efficacité de conversion de puissance (PCE) de 21.69 %, avec un V_{CO} de 1.00 V, un J_{SC} de 26.08 mA/cm^2 et un FF de 82.93 %.
- Une couche pérovskite de RbGeI3 avec un défaut de 10^{14} a montré une efficacité de conversion de puissance (PCE) de 23.14 %, avec un V_{CO} de 1.09 V, un J_{SC} de 25.07 mA/cm^2 et un FF de 84.25 %.

Conclusion Générale

- Pour la cellule solaire ITO/C60/RbGeI3/CBTS/Ag à une température de 300 K, l'amélioration liée à la variation de température a abouti à une PCE de 21.53 %, avec une V_{CO} de 1.02 V, un J_{SC} de 25.32 mA/cm², et un FF de 84.01 %.
- Enfin, pour la même cellule solaire avec une résistance série de $0 \Omega.cm^2$ et une résistance shunt de $10^4 \Omega.cm^2$, les paramètres photovoltaïques étaient : une PCE de 20.75 %, une V_{CO} de 0.99 V, un J_{SC} de 25.06 mA/cm². Et un FF de 82.8 %.

Ces résultats mettent en lumière l'impact significatif des différents paramètres sur les performances de la cellule solaire, offrant des pistes précieuses pour l'optimisation continue de sa conception et de son rendement.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., & Gekas, V. (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy*, 33, 289-296.
- [2] Frost, J., Butler, K., Brivio, F., Hendon, C., Schilfgaarde, M., & Walsh, A. (2014). Atomistic Origins of High-Performance in Hybrid Halide Perovskite Solar Cells. *Nano Letters*, 14, 2584 – 2590.
- [3] Jiang, Q., Zhang, X., & You, J. (2018). SnO₂: A Wonderful Electron Transport Layer for Perovskite Solar Cells. *Small*, e1801154.
- [4] AISSAT Abdelkader « Simulation et optimisation d'une cellule solaire à base des matériaux pérovskite hybride (CH₃NH₃PbI₃-XCIX) », mémoire master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA. (2020).
- [5] <https://trustmyscience.com/differences-energie-solaire-photovoltaïque-et-thermique/>
- [6] OUSFANE chaima « L'effet de la température sur les caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire de silicium », mémoire master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj (2021).
- [7] GUERROUT Nouredine Et GOUAREH Abdelhamid, « Simulation d'une cellule solaire en couches minces à base de Sb₂(Se_{1-x}S_x)₃ », mémoire master, Université KASDI MERBAH OUARGLA (2021).
- [8] BOUZEGANE Mhenna GAOUAOUI Ferhat « Alimentation d'un moteur à courant continu par une Source photovoltaïque », mémoire master, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou
- [9] Bird, R., & Hulstrom, R. (1983). Additional solar spectral data sets. *Solar Cells*, 8, 85-95.
- [10] BENNIA Imen DERRADJ Sarra « Simulation numérique et optimisation des performances d'une cellule solaire à pérovskite » », mémoire master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj (2022).
- [11] <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/photovoltaic-effect>
- [12] M. Bakala et Z. Matallah, « Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction : a-Si: H(n)/c-Si(p) » Mémoire Master, Université Ouargla (2017).
- [13] Dangminhtrung, “Elaboration de cellules solaires photovoltaïques A base de Polymères conjugués, Etudes des systèmes restituables ». Thèse de doctorat de L'université bordeaux I. 2009.

Bibliographie

- [14] MEKLIICHE Said « Etude et Simulation des paramètres électriques d'une cellule solaire photovoltaïque à base de Silicium », mémoire master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (2017).
- [15] MERAOUAH Mustapha MIRA Ali « Application du contrôle intelligent d'un hacheur Boost dans un système de conversion d'énergie solaire », mémoire master, UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET (2020).
- [16] L'équipe R&D de LONGi Selon le laboratoire ESTI (European Solar Test Installation), LONGi Green Energy Technology Co., Ltd.
- [17] Roger H Mitchell, Mark DWelch, and Anton R Chakhmouradian. Nomenclature of the perovskite supergroup: A hierarchical system of classification based on crystal structure and composition. *Mineralogical Magazine*, 81(3) :411–462, 2017.
- [18] WALID ZIOUI et TRACHE MAZIGH « Etude et Simulation d'une cellule solaire à pérovskite hybride à base Tin Iodide de césium (CsSnI₃) par le simulateur GPVDM », mémoire master, UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ – BOUIRA 2022.
- [19] P. Edelman, W. Henley et J. Lagowski, « Imagerie de longueur de diffusion de photoluminescence et de porteurs minoritaires dans le silicium et le GaAs », *Semicond. Sci. Technol.*, Vol. 7, non. 1A, p. A22 – A26, janvier 1992.
- [20] P. Edelman, W. Henley et J. Lagowski, « Imagerie de longueur de diffusion de photoluminescence et de porteurs minoritaires dans le silicium et le GaAs », *Semicond. Sci. Technol.*, Vol. 7, non. 1A, p. A22 – A26, janvier 1992.
- [21] V. Sarritzu et al., « Bande interdite directe ou indirecte dans les pérovskites aux halogénures de plomb hybrides? », *Adv. Opter. Mater.*, Vol. 6, non. 10, p. 1701254, mai 2018.
- [22] BADJI Kenza et TAMSSAOUT Cylia : « Etude ab-initio des propriétés structurales, Optoélectroniques et magnétique des pérovskites XZnF₃ (X=Li, K, Rb) pour application photovoltaïque par SIESTA », mémoire master, UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ – BOUIRA (2022).
- [23] Pia Dally ,Cellules Solaires à base de Matériaux Pérovskites : De la caractérisation des matériaux à l'amélioration des rendements et de la stabilité - King Abdullah University of Science and Technology.

Bibliographie

- [24] <https://www.tomorrow.bio/fr/poste/duel-de-1%27%C3%A9nergie-solaire-perovskite-vs-silicium-polycristallin-efficacit%C3%A9-2023-10-5347950483-futurism>
- [25] <https://actu.epfl.ch/news/des-cellules-solaires-en-perovskite-plus-efficaces/>
- [26] BELHENNICHE Amine et MELLOUK Abdelhak « Étude et simulation d'une cellule solaire à base des matériaux pérovskite hybride (CH₃NH₃PbI₃-XCIX) », mémoire master, Université Saâd Dahleb, Blida-1(2022).
- [27] CHERIGUI Chahrazad et HADIDI Malika « Optimisation d'une cellule photovoltaïque TF-Si », mémoire master, UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET (2016).
- [28] ZITA Djihad « INFLUENCE DES COUCHES ANTIREFLETS SUR LES PERFORMANCES D'UNE CELLULE SOLAIRE AU SILICIUM MONOCRISTALLIN », mémoire master, Université de Ghardaïa (2018).
- [29] LABADI Ahmed « Etude et simulation d'une cellule solaire en CIGS par SCAPS », memoir master, Université Mohamed Khider Biskra.
- [30] BENNIA Imen DERRADJ Sarra « Simulation numérique et optimisation des performances d'une cellule solaire à pérovskite », mémoire master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj (2022).
- [31] Barka Soufiane Haouari et Boukhari Nouredine Benchaa « Modélisation et optimisation des performances des cellules solaires HIT à base de silicium », mémoire master, Université Amar Thelidji- Laghouat (2022).
- [32] ZOUAOUI Sabrina « Etude et Simulation numérique d'une cellule solaire en couche mince à base CZTS », mémoire master, Université Saad Dahleb de Blida-1 (2017).
- [33] DAHLAL Zoulikha « Etude par simulation de l'effet des défauts sur les performances des cellules solaires à hétérojonctions de silicium », mémoire doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed-Boudiaf Oran (2022).
- [34] Thiele, G., Rotter, H., & Schmidt, K. (1989). Die Kristallstrukturen und Phasentransformationen des tetramorphen RbGel₃. Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie, 571, 60-68.
- [35] Tutsch, L., Sai, H., Matsui, T., Bivour, M., Hermle, M., & Koida, T. (2021). The sputter deposition of broadband transparent and highly conductive cerium and hydrogen co-doped indium oxide and its transfer to silicon heterojunction solar cells. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 29, 835 - 845.

Bibliographie

- [36] Ling, Q., Lim, S., Song, Y., Zhu, C., Chan, D., Kang, E., & Neoh, K. (2007). Nonvolatile polymer memory device based on bistable electrical switching in a thin film of poly(N-vinylcarbazole) with covalently bonded C60. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, 23 1, 312-9.