



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPEREUR ET DE
LA RECHERCHE MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT
SUPEREUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

N° d'ordre : M...../GE/2023

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

Filière : MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

Spécialité : énergies renouvelables en électrotechnique

Par

BRAHMI Awda & ROUIFA Chahira

Simulation des propriétés opto électrique des panneaux photovoltaïque tandem à base de cellules en pérovskite

Soutenu le / / 2023 devant jury composé de :

Président :	BEKKOUCHE Benaissa	Grade Pr	Université de Mostaganem
Examineur :	BENTOUNES Hadj Adda	Grade Pr	Université de Mostaganem
Rapporteur :	HADRI Baghdad	Grade Pr	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2022/2023

Remerciement

Al ḥamdulillah, c'est par la grâce d'Allah le tout puissant et miséricordieux que ce travail est achevé.

Nous tenons à présenter nos sincères remerciements et notre Profonde reconnaissance à notre aimable encadreur Pr. HADRI Baghdad pour son encadrement, pour sa contribution, sa patience et son aide tout au long de ce travail.

Nous adressons également nos remerciements aux enseignants qui nous ont fait l'honneur de participer, aux jurys de ce mémoire.

Enfin nous remercions toute personne ayant de près ou de loin contribué à l'élaboration de ce modeste travail et l'ensemble des enseignants qui ont assuré notre formation durant toutes ces années d'étude.

Dédicace

À mes parents,

À mes frères,

À mes amies,

À tous les êtres chers dont leur soutien m'a été indispensable et qui attendent avec
impatience ma réussite,

BRAHMI Awda

Dédicace

À mes parents,

À mes frères,

À mes amies,

À tous les êtres chers dont leur soutien m'a été indispensable et qui attendent avec
impatience ma réussite,

ROUIFA Chahira

Simulation des propriétés opto électrique des panneaux photovoltaïque tandem à base de cellules en pérovskite

Résumé

Ce projet de fin d'études se concentre sur les cellules solaires à base de pérovskites hybrides. Les pérovskites montrent un grand potentiel en tant qu'alternative efficace et économique dans la conversion photovoltaïque. Des recherches approfondies et des simulations ont montré que ces cellules peuvent atteindre des rendements élevés sans hystérésis, ce qui est prometteur pour leur intégration commerciale. L'étude a examiné en détail la structure, les mécanismes de conversion d'énergie et les performances de ces cellules. Malgré leurs avantages, les pérovskites présentent des défis de stabilité et de reproductibilité. Des avancées telles que l'ingénierie d'interfaces et l'optimisation des couches de transport de charges ont montré des résultats prometteurs pour améliorer leurs performances. Le projet a exploré divers paramètres physiques et a modélisé les cellules à l'aide de SILVACO et MATLAB Simulink. Des défis subsistent pour la commercialisation à grande échelle, notamment la stabilité à long terme et la réduction des coûts. Les perspectives incluent des variations de paramètres et une meilleure compréhension du phénomène d'hystérésis. En fin de compte, ce projet contribue à l'avancement des cellules solaires à pérovskites hybrides, ouvrant la voie à une source d'énergie propre et efficace pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux croissants. La cellule solaire structurée qui a fait l'objet d'études : Verre / Oxyde d'indium et d'étain (ITO) / Couche de transport d'électrons (couche N) / Couche active (la Pérovskite) / Couche de transport de trous (couche P) / Electrode métallique: Glass/ITO/TiO₂/Perovskite/Spiro-OMeTAd/Au, présente un rendement de conversion énergétique de 19.12 %, un facteur de remplissage de 80.53 %, une tension de circuit ouvert de 1.14V et une densité de courant en court-circuit de 20.88mA/cm² et une épaisseur de 0.25 μm pour la pérovskite CH₃NH₃PbI₃ et 0.02 μm pour TiO₂

Mots clés : cellules solaires -pérovskite -Tcad Silvaco-Matlab Simulink

Simulation of the optoelectronic properties of tandem photovoltaic panels based on perovskite cells

Abstract

This senior project focuses on hybrid perovskite solar cells. Perovskites exhibit significant potential as an effective and economical alternative in photovoltaic conversion. In-depth research and simulations have demonstrated that these cells can achieve high efficiencies without hysteresis, offering promise for their commercial integration. The study

meticulously examined the structure, energy conversion mechanisms, and performance of these cells. Despite their advantages, perovskites present stability and reproducibility challenges. Advances such as interface engineering and charge transport layer optimization have yielded promising outcomes in enhancing their performance. The project delved into various physical parameters and modeled the cells using SILVACO and MATLAB Simulink. Substantial challenges remain for large-scale commercialization, notably long-term stability and cost reduction. Future perspectives encompass parameter variations and a deeper understanding of the hysteresis phenomenon. Ultimately, this project contributes to the progression of hybrid perovskite solar cells, paving the way for a clean and efficient energy source to meet the escalating global energy demands. The structured solar cell that has been the subject of studies consists of the following layers: Glass / Indium Tin Oxide (ITO) / Electron Transport Layer (N-type layer) / Active Layer (Perovskite) / Hole Transport Layer (P-type layer) / Metal Electrode: Glass/ITO/TiO₂/Perovskite/Spiro-OMeTad/Au. This solar cell exhibits an energy conversion efficiency of 19.12%, a fill factor of 80.53%, an open-circuit voltage of 1.14V, a short-circuit current density of 20.88mA/cm², and a thickness of 0.25 µm for the CH₃NH₃PbI₃ perovskite layer and 0.02 µm for the TiO₂ layer.

Key words: solar cell -perovskite -Tcad Silvaco-Matlab Simulink.

محاكاة الخصائص الكهروضوئية لوحدات الخلايا الشمسية التناظرية المعتمدة على خلايا البيروفسكيت

ملخص:

هذا المشروع الختامي يركز على خلايا الطاقة الشمسية البيروفسكايتية الهجينة. البيروفسكايت تظهر إمكانيات كبيرة كبديل فعال واقتصادي في تحويل الطاقة الشمسية. أظهرت الأبحاث العميقة والمحاكاة أن هذه الخلايا يمكن أن تحقق كفاءات عالية بدون وجود اهتزازات، مما يعرض الوعد لدمجها تجارياً. تفحص الدراسة بدقة البنية وآليات تحويل الطاقة وأداء هذه الخلايا. على الرغم من مزاياها، تواجه البيروفسكايت تحديات في الاستقرار والتكرار. التقدمات مثل هندسة الواجهات وتحسين طبقات نقل الشحنات أثرت في نتائج مشجعة لتعزيز أدائها. استغرق المشروع في تنوع المعلمات الفيزيائية المختلفة ونمذجة الخلايا باستخدام SILVACO و MATLAB Simulink تبقى تحديات كبيرة للتسويق على نطاق واسع، وبخاصة فيما يتعلق بالاستقرار على المدى الطويل وتخفيض التكاليف. تشمل الآفاق المستقبلية تنوع المعلمات وفهم أعمق لظاهرة الاهتزاز. في النهاية، يسهم هذا المشروع في تقدم الخلايا الشمسية البيروفسكايتية الهجينة، ويمهد الطريق لمصدر نظيف وفعال للطاقة لتلبية الاحتياجات المتزايدة للطاقة على الصعيدين

العالمي الخلية الشمسية المهيكلة التي تمت دراستها: زجاج / أكسيد الإنديوم والقصدير / (ITO) طبقة نقل الإلكترونات (الطبقة النوعية) / الطبقة النشطة (البيروفسكيت) / طبقة نقل الفجوات (الطبقة النوعية) / الكهربائي المعدني: زجاج / TiO_2 / ITO / بيروفسكيت Spiro-OMeTAD // ذهب. تعرض هذه الخلية الشمسية كفاءة تحويل الطاقة بنسبة 19.12٪، وعامل ملء بنسبة 80.53٪، وجهد دائرة مفتوحة بقيمة 1.14 فولت، وكثافة تيار في دائرة قصر الدائرة بقيمة 20.88 مللي أمبير / سم²، وسمك يبلغ 0.25 ميكرومتر لطبقة البيروفسكيت $CH_3NH_3PbI_3$ و 0.02 ميكرومتر لطبقة TiO_2 .

الكلمات المفتاحية: Tcad Silvaco-Matlab Simulink - خلايا الطاقة الشمسية.

Sommaire

Remerciement	i
Dédicace	ii
Dédicace	ii
Résumé	iii
Abstract	iii
Liste des figures	v
Liste des tableaux	vii
Introduction générale	1

Chapitre I : Structure schématique générale d'une cellule solaire à pérovskite

Introduction	3
I. cellules solaires à pérovskite.....	3
I.2. Effet photovoltaïque.....	5
I.3. Matériau pérovskite	6
I.4. Fonctionnement des cellules solaires à pérovskite	7
I.5. Caractéristiques des cellules solaires	9
I.6. Principe de fonctionnement	13
Conclusion.....	15

Chapitre II : Structure d'une cellule solaire photovoltaïque à base de pérovskite

Introduction	16
II. Structure d'une cellule PV à base de pérovskite	16
II.1. Évolution annuelle de l'installation PV	16
II.2. Fonctionnement des cellules solaires	18
II.3. Cellule solaire pérovskite	19
II.5. Composants des PSC typiques	24
II.5.1. Électrode de travail	24
II.5.2. Matériau de transport d'électrons.....	24
II.5.3. Absorbeur de pérovskite.....	24
II.5.4. Matériau de transport des Trous	24
II.5.5. Contact arrière : Contre-électrode	25
Conclusion.....	25

Chapitre III : Résultats de la Simulation numérique sous SILVACO-ATLAS

Introduction :	27
III.1. Modèles utilisés pour la simulation sous SILVACO-ATLAS	27
III.1.1. La simulation électrique sous SILVACO-ATLAS :	27
III.1.2. Recombinaison :	29
III.1.3. Cas des semi-conducteurs inorganiques	29
III.2 Structure simulée, Paramètres, Maillage	31
III.2.1. Introduction :	31
III.3 Résultats de la simulation :	36
III.3.1. Région 1 : ETL	36
III.3.2. Région2 : Pérovskite	40
III.3.3. Région 3 : HTL	44
III.4. Paramètre épaisseur	46
III.4.1. Région 1 :TiO ₂	46
III.4.2. Région 2 : Pérovskite	49
III.4.3. Région3: Spiro OMED	52
III.5. Structure optimisée de notre cellule solaire photovoltaïque Tandem à base de pérovskite	54
III.6. Caractéristique I-V de la cellule optimisée	55
Conclusion	55

Chapitre IV : De la cellule solaire au panneau solaire photovoltaïque en utilisant Matlab Simulink

Introduction	57
IV.1. Les étapes de Modélisation :	57
IV.1.1. Modélisation de la cellule solaire :	57
IV.1.2. Connexion des cellules en série/parallèle :	57
IV.1.3. Interface de puissance :	57
IV.1.4. Système de gestion de la puissance :	57
IV.1.5. Modélisation du comportement environnemental :	58
IV.1.6. Analyse des performances :	58
IV.2. Schéma bloc du panneau solaire à base de pérovskite	59
Conclusion	60
Conclusion générale	61
Références bibliographiques	63

Liste des figures

Figure I. 1 : Structure schématique générale d'une cellule solaire à pérovskite, le soleil est la source d'éclairage.[15].....	4
Figure I. 2: La structure cristalline cubique générale de la pérovskite ABX ₃ , où A et B sont des cations et X est un anion. Les anions sont liés aux deux cations.....	7
Figure I. 3: Diagramme schématique des bandes d'énergie montrant le fonctionnement des cellules solaires à pérovskite	8
Figure I. 4: Schéma d'une cellule solaire idéale et d'une cellule solaire plus réaliste. Les résistances dans la parenthèse rouge sont ajoutées pour le modèle réaliste.....	9
Figure I. 5: Courbes I-V pour une cellule solaire avec une faible R_S et une haute R_{SH} avec le résultat d'une forme presque rectangulaire comme indiqué par la ligne bleue continue en (a) et (b). La fine ligne noire en (a) montre comment la courbe I-V change lorsque R_S change	11
Figure I. 6: FF est calculé à partir de la courbe IV en divisant la zone A par la zone B. La puissance de la cellule est le produit de J et V, le point de puissance maximum étant le produit de I_{mp} et V_{mp}	12
Figure I. 7: Cellule solaire pérovskite. Illustration du processus de génération de charge dans une cellule solaire à pérovskite et catalogue des matériaux utilisés pour la préparation des différentes couches composant la cellule	13
Figure I. 8: Principe de fonctionnement des cellules solaires en tandem. a) Réponse spectrale des sous-cellules génériques supérieures (bleues) et inférieures (rouges) comprenant un dispositif en tandem fonctionnant dans différentes régions du système solaire de référence irradiance spectrale AM1.5. b) Diagramme d'énergie canonique pour une cellule solaire tandem à double jonction. Schéma des trois configurations à double jonction les plus courantes : (c) deux terminaux, (d) quatre terminaux empilés mécaniquement et (e) quatre terminaux couplés optiquement. [A].....	14
Figure II. 1: Évolution annuelle de l'installation PV [1: International Energy Agency (IEA) https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/04/IEA_PVPS_Snapshot_2023.pdf]	17
Figure II. 2: meilleurs rendements de cellules solaires enregistrées selon NREL.....	17
Figure II. 3: Évolution du rendement de la cellule solaire pérovskite annuelle au cours des 10 dernières années.	18
Figure II. 4: Caractéristique I-V de la cellule solaire.	19

Figure II. 5: distribution de l'irradiance du spectre solaire en fonction de la longueur d'onde.	19
Figure II. 6: Structure d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'une couche active exemple une Pérovskite.....	20
Figure II. 7: Configurations d'une structure de cellule solaire de type n-i-p (typique) et p-i-n (inversée).....	20
Figure II. 8: Schémas de schémas pour les architectures de cellules solaires en pérovskite n-i- p : (a) structure planaire et (b) structure mésoscopique. HTL = couche de transport de trous ; ETL = couche de transport d'électrons ; FTO = oxyde d'étain dopé au fluor, SnO ₂ :F.....	22
Figure II. 9: Schéma du diagramme de niveau d'énergie des halogénures de plomb représentatifs pérovskite, TiO ₂ , spiro-OMeTAD et électodes.[7].....	23
Figure III. 1: Mécanisme de recombinaison Schokley-Read-Hall (SRH).....	30
Figure III. 2: Mécanisme de recombinaison en surface	30
Figure III. 3: L'architecture des cellules avec un empilement N-I-P.....	32
Figure III. 4: Structure de la cellule de référence.....	33
Figure III. 5: La géométrie de la structure de référence.....	33
Figure III. 6: structure de la cellule solaire montrant les 3 régions principales	34
Figure III. 7: le spectre solaire utilisé AM1.5	35
Figure III. 8: caractéristique I-V de la cellule solaire à base de pérovskite de référence.....	35
Figure III. 9: Facteur de forme en fonction de la concentration Na de la région1	38
Figure III. 10: Rendement en fonction de la concentration Na de la région 1	38
Figure III. 11: Puissance maximale en fonction de la concentration Na de la région 1	39
Figure III. 12: Voc en fonction de la concentration Na de la région 1	39
Figure III. 13: Voc en fonction de la concentration Nd de la région 2.....	42
Figure III. 14: Rendement fonction de la concentration Nd de la région 2.....	42
Figure III. 15: FF fonction de la concentration Nd de la région 2.....	43
Figure III. 16: Densité de courant Jsc fonction de la concentration Nd de la région 2	43
Figure III. 17: Rendement fonction de la concentration Nd de la région 3.....	44
Figure III. 18: FF fonction de la concentration Nd de la région 3.....	45
Figure III. 19: Jsc fonction de la concentration Nd de la région 3	45
Figure III. 20: FF fonction de l'épaisseur de la région 1	47
Figure III. 21: Jsc fonction de l'épaisseur de la région 1	47
Figure III. 22: Rendement fonction de l'épaisseur de la région 1.....	48

Figure III. 23: Voc fonction de l'épaisseur de la région 1	48
Figure III. 24: FF fonction de l'épaisseur de la région 2	50
Figure III. 25: Jsc fonction de l'épaisseur de la région 2	50
Figure III. 26: FF, Jsc, Rendement fonction de l'épaisseur de la région 2	51
Figure III. 27: FF fonction de l'épaisseur de la région 3	52
Figure III. 28: Jsc fonction de l'épaisseur de la région 3	53
Figure III. 29: FF, Rendement, Jsc fonction de l'épaisseur de la région 3	53
Figure III. 30: caractéristique de la cellule solaire tandem optimisée	55
Figure IV 1: Représentation du panneau solaire par Matlab simulink	59
Figure IV 2 : représentation des trois panneaux solaires en série I en fonction de l'irradiation à température constante	59
Figure IV 3 : Caractéristique I-V du panneau solaire à base de Pérovskite	60
Figure IV 4: Caractéristique P-V du panneau solaire à base de pérovskite.....	60

Liste des tableaux

Tableau III. 1: Paramètres de la cellule de référence	33
Tableau III. 2: les résultats obtenus de toutes les grandeurs électriques de la cellule de référence	35
Tableau III. 3: Résultats obtenus de la simulation sur la région ETL.....	37
Tableau III. 4: Résultats obtenus de la simulation sur la région 2 Pérovskite	41
Tableau III. 5: Résultats obtenus de la simulation sur la région 3: Spiro	44
Tableau III. 6: Résultats obtenus de la simulation sur la région 1: TiO2.....	46
Tableau III. 7: Résultats obtenus de la simulation sur la région 2:	49
Tableau III. 8: Résultats obtenus de la simulation sur la région 3	52
Tableau III. 9: Résultats obtenus de la cellule solaire optimisée	54

Introduction
Générale

Introduction générale

L'augmentation de la demande énergétique, les problèmes environnementaux et la disponibilité limitée des combustibles fossiles exigent la recherche sur les ressources énergétiques durables et renouvelables. Le soleil est la source ultime pour répondre à la demande d'énergie propre. La technologie des cellules solaires fournit une voie d'énergie renouvelable et respectueuse de l'environnement pour convertir directement l'énergie des photons en électricité.

les coûts des modules photovoltaïques ont fortement diminué au cours des dernières décennies [1,2,3,4,5]. En l'an 2020, 821 TWh (= 2,96 EJ) (1exra joule = 10^{18} J=277,8TWh) d'énergie ont été produits par les modules PV [6]. Actuellement, les modules photovoltaïques (PV) à base de silicium dominant le marché mondial car ils atteignent des rendements de conversion de puissance élevés (Si monocristallin 26,7 % à l'échelle du laboratoire) et ont des prix bas [7]

Cependant, la mise en place efficace de la technologie des cellules solaires à l'échelle mondiale nécessite un développement en termes de matériaux et de dispositifs pour réduire le coût de fabrication et augmenter l'efficacité (rendement) de conversion de puissance (PCE). Dans les cellules solaires de troisième génération: Les cellules solaires à pérovskite (PSC) ont montré sa capacité en mettant sa croissance de manière exponentielle en très peu de temps.[8]

De nos jours, le PCE le plus élevé rapporté d'une PSC a atteint plus de 33.7%. [9,10] Cependant, l'instabilité des matériaux pérovskites a limité leur mise à l'échelle et leur commercialisation.[11] Les travaux de recherche en cours sur Les PSC se concentrent principalement sur les moyens d'obtenir une efficacité (rendement) et une stabilité élevées via différentes méthodes de fabrication et l'ingénierie des matériaux. Le contrôle des réactions de recombinaison est un facteur clé pour atteindre des performances élevées dans les PSC. La dégradation environnementale du PCE est l'un des problèmes vitaux qui méritent une attention sérieuse

L'objectif de ce mémoire de Master en énergie renouvelable est de développer et de produire par simulation et sous Tcad Silvaco , une cellule solaire pérovskite à large bande interdite, d'optimiser la cellule contenant une pérovskite à simple cation et d'analyser la cellule solaire et les matériaux utilisés

Dans cette optique notre mémoire est structuré de la façon suivante :

Dans le premier chapitre nous allons aborder la Structure schématique générale d'une cellule solaire à pérovskite où nous allons discuter sur les matériaux qui constituent la cellule solaire à base de pérovskite

Le chapitre II sera consacré à la Structure d'une cellule solaire photovoltaïque à base de pérovskite en détail

Le chapitre III représente en détail les résultats de la Simulation numérique de notre cellule solaire choisie sous SILVACO-ATLAS dans lequel nous allons varier des paramètres géométriques et technologiques et voir quels sont leurs effets sur l'efficacité de cette cellule

Le chapitre IV sera consacré à une étude par simulation sous Matlab Simulink , d'un panneau solaire photovoltaïque à base de pérovskite

Nous terminons notre mémoire de PFE par une conclusion générale et quelques perspectives .

Chapitre I :

*Généralité sur les cellules solaire
photovoltaïque*

Introduction

Le chapitre I explore le domaine des cellules solaires à pérovskite, une avancée majeure dans la technologie photovoltaïque. Initialement présentées en 2009 avec un rendement faible et une stabilité précaire, ces cellules ont gagné en intérêt en 2012 lorsqu'elles ont atteint un rendement de conversion de puissance de 9,7% avec une stabilité accrue. La structure des couches dans ces cellules est décrite, comprenant une électrode transparente, une couche de transport d'électrons, la couche de pérovskite active, la couche de transport de trous et une électrode métallique. Des recherches intensives ont été menées sur chaque couche pour améliorer le rendement global. Le chapitre explique également le fonctionnement photovoltaïque de ces cellules, soulignant l'absorption des photons, la création de paires électron-trou, leur séparation et leur déplacement à travers les couches pour générer un courant. Il aborde également les caractéristiques importantes telles que l'efficacité quantique externe, le facteur de remplissage et l'efficacité de conversion de puissance. Le chapitre se termine en explorant le concept de cellules solaires en tandem, où différentes sous-cellules absorbent différentes parties du spectre solaire pour maximiser le rendement global

I. cellules solaires à pérovskite

Les cellules solaires à pérovskite ont été introduites pour la première fois dans la littérature en 2009, mais avec un faible rendement de conversion de puissance de seulement 3,8 % et une très faible stabilité, en raison de l'électrolyte liquide qui a dissous les électrodes et la couche de pérovskite pendant le fonctionnement [12,13]. Ce n'est qu'en 2012 que les intérêts pour le PSC ont été déclenchés lorsque Kim et al ont réussi à faire passer le PCE à 9,7 % avec une stabilité de 500 h.[14]

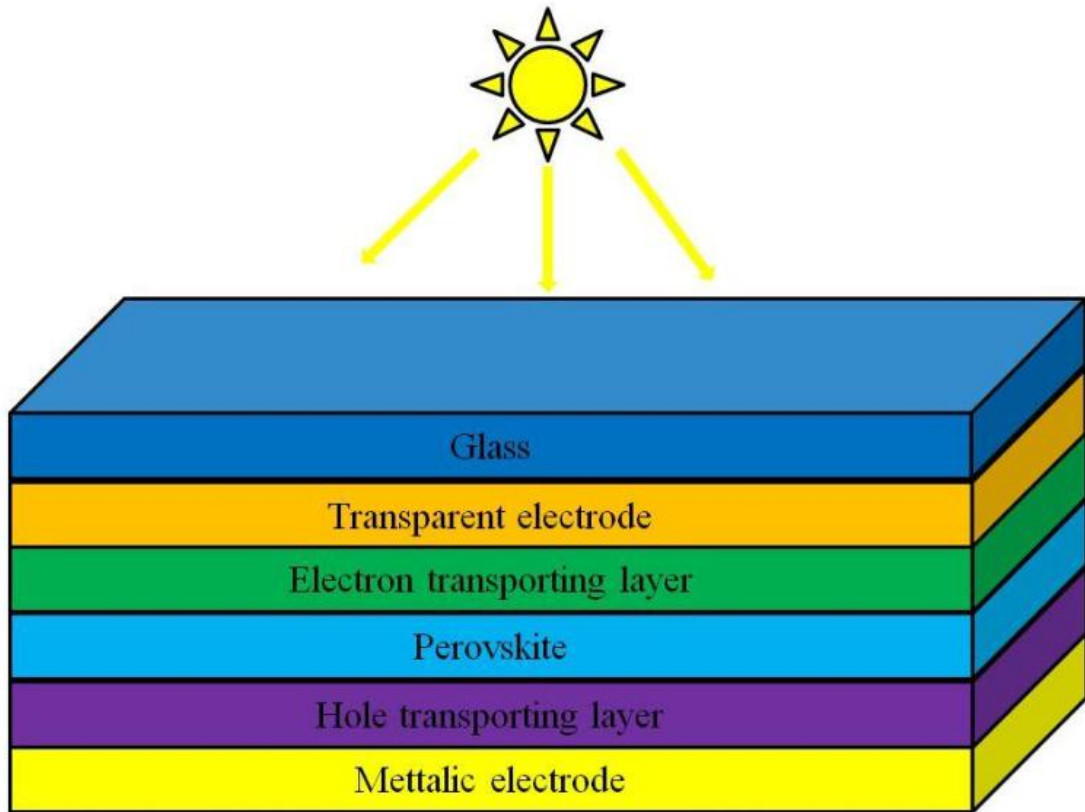


Figure I. 1 : Structure schématique générale d'une cellule solaire à pérovskite, le soleil est la source d'éclairage.[15]

La structure générale des couches pour PSC est illustrée à la figure 1 ci-dessus. Il se compose d'une électrode transparente, comme l'oxyde d'indium et d'étain (ITO) ou l'oxyde d'étain dopé au fluor (FTO), sur une surface de verre et sur l'ITO/FTO il y a une couche de transport d'électrons (ETL). Au-dessus de l'ETL se trouve la couche de pérovskite qui est la couche active où le photon lumineux est absorbé et une paire électron-trou (exciton) est excitée. Au dessus de la pérovskite est la couche de transport de trous (HTL) et enfin une électrode métallique. L'électrode transparente et l'électrode métallique sont connectées pour créer une cellule en circuit fermé.

La structure générale des couches pour PSC est illustrée à la figure I.1 ci-dessus. Il se compose d'une électrode transparente, comme l'oxyde d'indium et d'étain (ITO) ou l'oxyde d'étain dopé au fluor (FTO), sur une surface de verre et sur l'ITO/FTO [15] il y a une couche de transport d'électrons (ETL). Au-dessus de l'ETL se trouve la couche de pérovskite qui est la couche active où le photon lumineux est absorbé et une paire électron-trou (exciton) est excitée. Au dessus de la pérovskite est la couche de transport de trous (HTL) et enfin une électrode métallique. L'électrode transparente et l'électrode métallique sont connectées pour créer une cellule en circuit fermé.

Il y a eu de la recherche et du développement sur toutes les couches de la structure, car toutes les couches contribuent à augmenter le PCE de quelques pour cent. L'ETL a reçu beaucoup d'attention en raison de sa capacité à augmenter considérablement les performances de la cellule en collectant plus efficacement les électrons, ce qui empêche la recombinaison électron-trou. Des expériences ont été faites en utilisant une couche compacte de TiO_2 avant d'ajouter la couche mésoporeuse de TiO_2 dans le but de boucher les trous. Le résultat montre une résistance série plus faible et une résistance shunt plus élevée que sans la couche compacte de TiO_2 . Cela signifie qu'il empêche la recombinaison des électrons-trous et qu'il réduit la résistance dans l'ETL, ce qui entraîne une augmentation du PCE, car les électrons sont collectés sans trop de résistance. La couche ETL est soit réalisée par spin-coating, spray pyrolyse ou évaporation. Divers mélanges de pérovskite ont été étudiés (12) (13) pour augmenter la tension de circuit ouvert (V_{OC}) et diminuer l'écart d'énergie des cellules (12) avec pour résultat une plus grande région d'absorption. Avec une région d'absorption plus grande, plus de lumière est absorbée, ce qui excite les paires électron-trou et avec une augmentation du V_{OC} , la puissance de sortie de la cellule augmente. La différence d'énergie est la différence d'énergie entre la plus haute orbitale moléculaire occupée (HOMO) et la plus basse orbitale moléculaire inoccupée (LUMO). Différents HTL ont été recherchés dont le plus utilisé est le 2,2',7,7'-Tetrakis[N,N-di(4-methoxyphenyl)amino]-9,9'-spirobifluorene (spiro-OMeTAD) dopé par soit des sels soit de l'oxygène O_2 (14) (15). Cela est dû au fait que spiro-OMeTAD a une faible conductivité de charge par lui-même et lorsqu'il a été dopé, sa conductivité est augmentée. Avec un meilleur HTL conducteur, la densité de courant de court-circuit (J_{SC}) augmentera, en raison de la résistance plus faible dans cette couche et elle augmentera également ,empêcher la recombinaison électrons-trous. L'électrode métallique la plus efficace est l'or (Au) mais d'autres métaux sont également utilisés en fonction des structures cellulaires.

I.2. Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque était découvert par Becquerel en 1839 et est appelé « effet Becquerel». L'effet photovoltaïque se produit lorsqu'un matériau semi-conducteur est éclairé par de la lumière avec des photons d'énergie égale ou supérieure à la bande interdite des semi-conducteurs. Pour tous les matériaux semi-conducteurs, l'écart d'énergie est la différence d'énergie entre le haut de la bande de valence et le bas de la bande de conduction. La bande de valence est le niveau d'énergie des électrons les plus éloignés du noyau de l'atome. La bande de conduction est le niveau d'énergie auquel les électrons doivent être excités pour rendre le

matériau conducteur, ce niveau d'énergie n'est pas occupé par les électrons dans l'état fondamental des atomes. Il est également appelé espace HOMO-LUMO pour les semi-conducteurs organiques et est décrit comme la différence d'énergie entre la plus haute orbitale moléculaire occupée (HOMO) et la plus basse orbitale moléculaire inoccupée (LUMO).

Le principe est le même : exciter un électron de la bande de Valence/HOMO vers la bande de conduction/LUMO nécessite une énergie spécifique qui est déterminée par le matériau.

La lumière est un rayonnement électromagnétique constitué de photons et chaque photon transporte avec lui une énergie spécifique en fonction de sa longueur d'onde avec la relation suivante,

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

Où E est l'énergie du photon, h est la constante de Planck, c est la vitesse de la lumière et λ est la longueur d'onde du photon.

Les matériaux semi-conducteurs peuvent être excités par des photons de lumière. Si les photons contiennent une énergie supérieure à la bande d'énergie interdite, ils peuvent être absorbés pour exciter les électrons dans la bande de valence / HOMO vers la bande de conduction/LUMO, laissant des trous dans la bande de valence/HOMO. L'électron excité peut se recombiner avec le trou laissé derrière mais au lieu de recombinaison, les porteurs de charge peuvent être diffusés par le champ électrique intégré par les électrodes opposées.

I.3. Matériau pérovskite

La structure originale de la pérovskite provient de l'oxyde de titane et de calcium (CaTiO_3) avec la structure générale ABX_3 , qui est illustrée à la figure 2 ci-dessous.

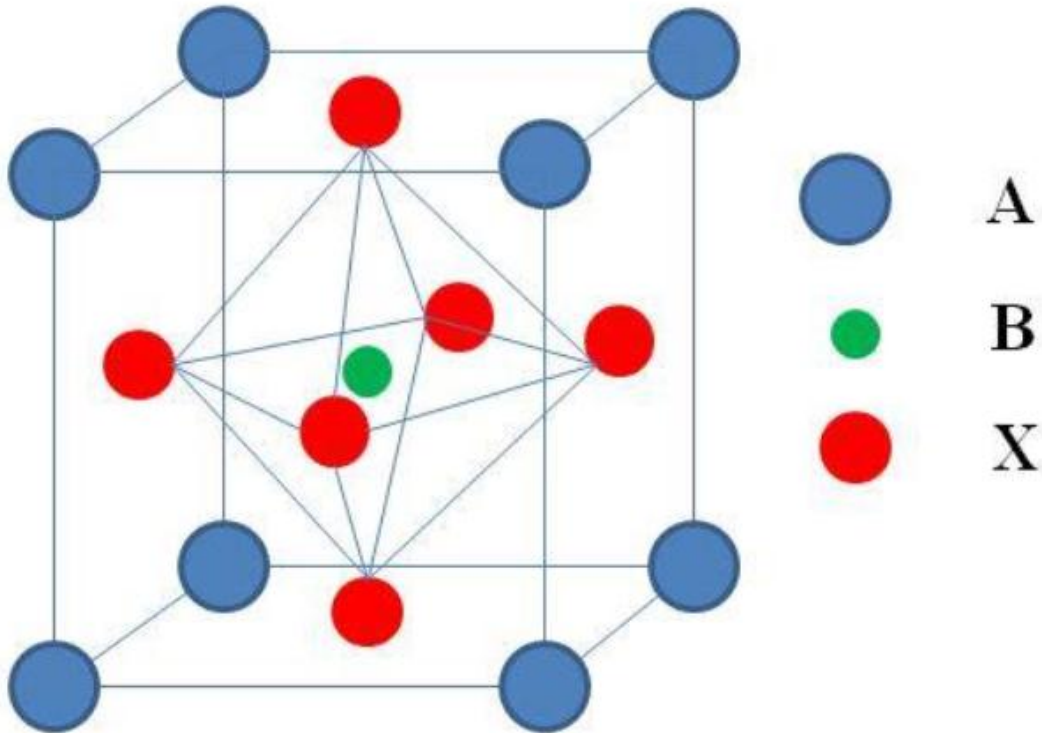


Figure I. 2: La structure cristalline cubique générale de la pérovskite ABX₃, où A et B sont des cations et X est un anion. Les anions sont liés aux deux cations.

Où A et B sont des cations avec une électronégativité et une taille différente, tandis que X est un anion lié à la fois à A et à B. Il est important que l'atome A ait une électronégativité plus faible et un rayon atomique plus grand que l'atome B, en raison des fins symétriques de la structure cristalline cubique. Tout matériau ayant la même structure cristalline est appelé matériau pérovskite. Selon les cations et les anions, ils présentent différentes propriétés telles que la superconductivité, la conductivité ionique, la puissance thermique élevée, etc. La composition spécifique du matériau de la pérovskite utilisée pour les cellules photovoltaïques est appelée halogénures organométalliques et a été découverte pour la première fois en 1978 par Weber (17). Il se compose de matières organiques comme le méthylammonium (MA) ou formamidinium (FA) comme (A), un métal comme le plomb (Pb) ou l'étain (Sn) comme (B) et un halogénure comme le bromure (Br₃), l'iodure (I₃) ou le chlorure (Cl₃) comme (X₃).

I.4. Fonctionnement des cellules solaires à pérovskite

Le fonctionnement du PSC est décrit dans le schéma de la figure I.3

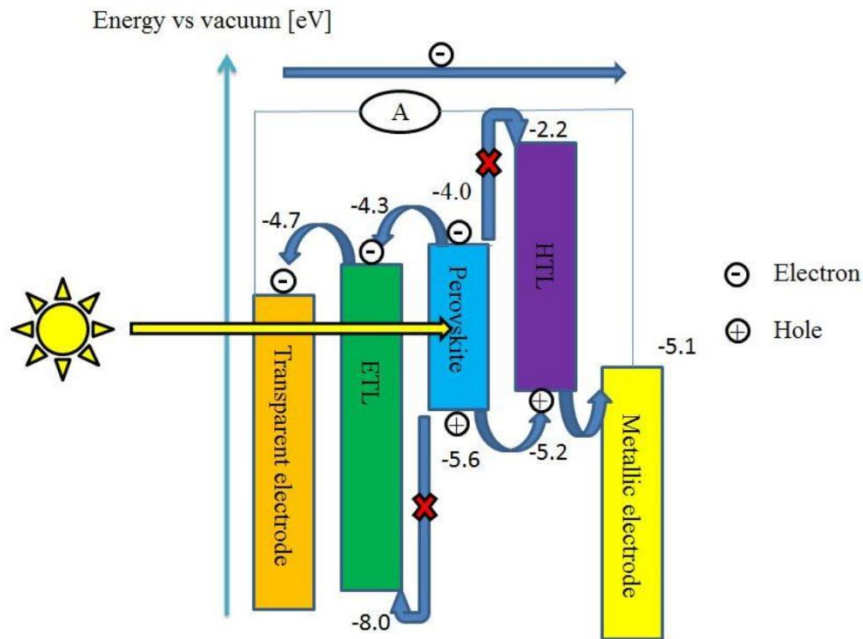


Figure I. 3: Diagramme schématique des bandes d'énergie montrant le fonctionnement des cellules solaires à pérovskite

Les flèches bleues indiquent comment les porteurs de charge se déplacent, les flèches avec une croix rouge indiquent un chemin bloqué.

Les photons d'une source lumineuse, représentée par un soleil avec une flèche jaune, atteignent la couche de pérovskite à travers le verre et l'électrode transparente. Dans la couche de pérovskite active, le photon est absorbé et excite un exciton si l'énergie des photons est supérieure à la bande interdite du matériau de pérovskite. L'exciton est séparé des porteurs de charge libres par le potentiel interne créé à partir de la différence de fonction de travail entre l'électrode transparente et l'électrode métallique. Les électrons sont transportés vers l'ETL tandis que les trous sont transportés vers le HTL. De là, les électrons sont transportés vers l'électrode transparente et le trou à l'électrode métallique. Ensuite, l'électron se déplace à travers le fil reliant les deux électrodes et un courant est produit par les électrons en mouvement. Dans l'électrode métallique, l'électron et le trou se recombinent.

Pour que le PSC fonctionne correctement, les niveaux d'énergie de chaque couche doivent être soigneusement planifiés.

Parce que les électrons et les trous excités veulent se recombiner afin de minimiser l'énergie totale. Mais les porteurs de charge sont également des conservateurs d'énergie, ce qui signifie qu'ils prendront toujours le chemin du minimum résistance. Avec une bonne structure de couche, une partie de la recombinaison dans la cellule sera bloquée en laissant les porteurs de charge emprunter un chemin différent.

I.5. Caractéristiques des cellules solaires

Le rayonnement solaire dans l'espace a une énergie différente de celle du rayonnement solaire qui atteint la surface de la terre, car il réagit avec les gaz de l'atmosphère terrestre et perd de l'énergie. Il varie également selon l'endroit sur terre où le rayonnement solaire est mesuré en raison des variations de hauteur, de l'angle zénithal solaire, de la teneur en humidité de l'air, etc. C'est pourquoi le coefficient de masse d'air universel utilisé pour mesurer les cellules solaires est AM 1,5 (18). C'est avec une épaisseur atmosphérique de 1,5 due à l'angle zénithal solaire de $48,2^\circ$ et donne la densité de puissance incidente de 1000 W/m^2 du soleil.

L'efficacité quantique externe (EQE) est définie comme le rapport entre l'électron extrait et les photons entrants. L'EQE d'une bonne cellule doit être le plus élevé possible, car il montre combien des photons entrants qui excite les électrons qui sont extraits pour créer un courant. À faible longueur d'onde, l'EQE est nul car les photons sont absorbés par le verre et l'électrode transparente, sans atteindre la couche active. À haute longueur d'onde, l'EQE est nul car l'énergie des photons est inférieure à la bande interdite et ne peut pas exciter un exciton.

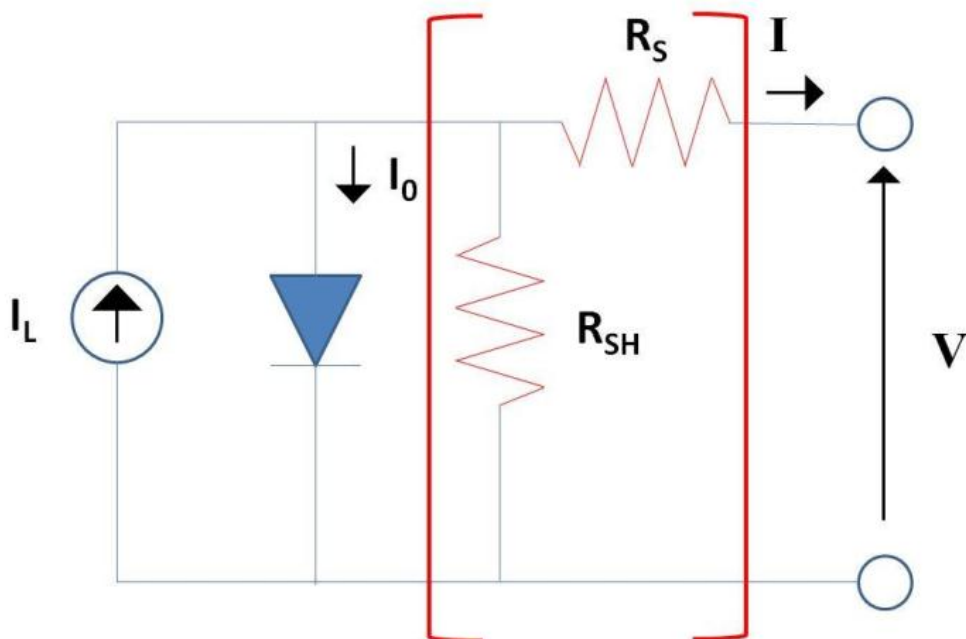


Figure I. 4: Schéma d'une cellule solaire idéale et d'une cellule solaire plus réaliste. Les résistances dans la parenthèse rouge sont ajoutées pour le modèle réaliste.

L'équation de courant caractéristique pour une cellule solaire idéale est le courant photovoltaïque produit soustrait du courant de diode avec la relation suivante,

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \quad (I.2)$$

Où I est le courant total dans la cellule, I_L est le courant photovoltaïque produit par l'illumination. I_0 est le courant de saturation de la diode interne, q est la charge élémentaire, V est la tension produite ou appliquée, n est le facteur idéal des cellules solaires, k est la constante de Boltzmann et T est la température des cellules. Le schéma de circuit schématique montre la figure(I.4) ci-dessus et n'inclut pas les résistances dans le support. une équation de courant réaliste comprend des résistances internes et a la relation suivante

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{SH}} \quad (I.3)$$

Où R_s est la résistance série des cellules et R_{SH} est la résistance shunt des cellules. Le schéma est illustré à la figure(I. 4) et inclut les résistances dans le support.

La tension de circuit ouvert (V_{OC}) est définie comme la tension de la cellule dans des conditions de circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le courant externe est nul. Le courant de court-circuit (I_{SC}) est défini comme le courant que la cellule a à court c'est-à-dire lorsque la tension externe est nulle. De plus, lorsque les mesures sont effectuées sur une cellule avec une surface connue, la densité de courant à court terme (J_{SC}) est utilisée et est définie comme

$$J_{SC} = I_{SC}/A \quad (I.4)$$

où A est la surface active de la cellule. V_{OC} et I_{SC} peuvent être vus dans la figure(I.5) ci-dessous.

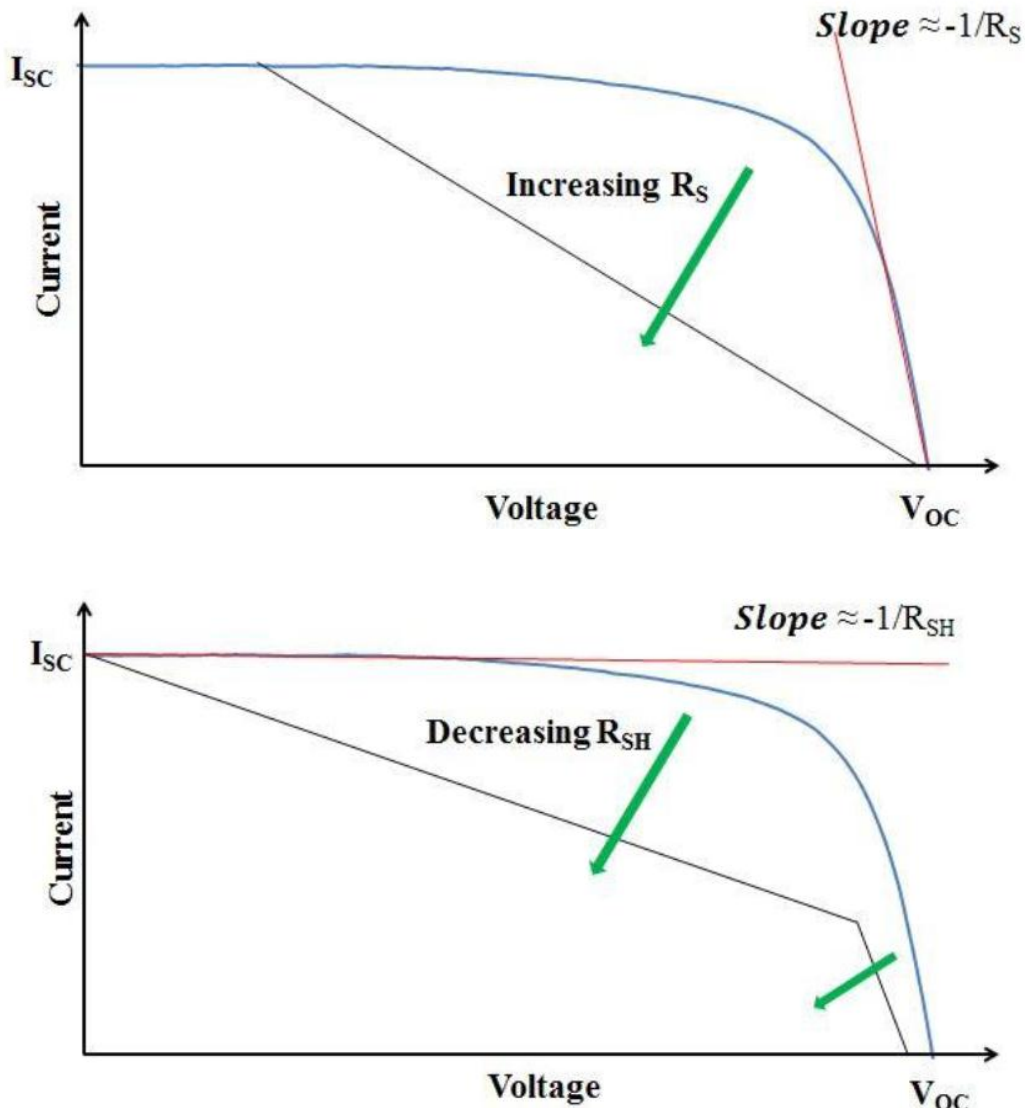


Figure I. 5: Courbes I-V pour une cellule solaire avec une faible R_S et une haute R_{SH} avec le résultat d'une forme presque rectangulaire comme indiqué par la ligne bleue continue en (a) et (b). La fine ligne noire en (a) montre comment la courbe I-V change lorsque R_S change

Une courbe I-V pour une bonne cellule solaire, avec un R_{SH} élevée et un R_S basse, doit avoir une forme rectangulaire, comme le montre la ligne bleue épaisse sur la figure (I.5) ci-dessus. La courbe I-V est le courant mesuré ,qui est produit pendant l'éclairage en changeant la tension appliquée.

La résistance série est causée par le mouvement des porteurs de charge à travers toutes les couches de la cellule. Au lieu d'avoir plusieurs résistances, elles sont toutes regroupées en une seule, ce qui rend le calcul plus facile mais plus difficile.

Pour des cellules optimales, la résistance série doit être aussi faible que possible pour permettre aux porteurs de charge de se déplacer sans entrave à travers la cellule.

La figure (I.5) ci-dessus montre comment la courbe I-V change lorsque R_S augmente et que R_S est défini par la pente de la courbe I-V au V_{OC} .

La résistance de shunt doit être aussi élevée que possible pour empêcher les chemins alternatifs pour les porteurs de charge dans la cellule. Si la résistance de shunt est trop faible, cela affecte gravement les performances de la cellule en raison de la charge des porteurs empruntant des chemins alternatifs et se recombinent avant de pouvoir être collectés. Une faible résistance de shunt est généralement causée par des défauts dans la cellule, comme des particules indésirables entre les couches ou une surface endommagée couches. La figure (I.5b) ci-dessus montre comment la courbe I-V change lorsque le R_{SH} diminue et le R_{SH} est défini par la pente de la courbe IV à I_{SC} .

Le facteur de remplissage (FF) est le rapport entre la puissance maximale de la cellule solaire et le produit de V_{OC} et I_{SC} . Il donne une indication si les résistances dans la cellule sont bonnes ou mauvaises et doivent être aussi élevées que possible. Avec la relation suivante,

$$FF = \frac{V_{mp} * I_{mp}}{V_{OC} * I_{SC}} = \frac{Area A}{Area B'} \quad (I.5)$$

où V_{mp} est la tension au point de puissance maximale et I_{mp} est le courant au point de puissance maximale. La puissance maximale de la cellule solaire est le produit de V_{mp} et I_{mp} , représenté par la zone A (rouge rectangle) dans la figure (I.6). Le FF est affecté par la résistance série et shunt comme on peut le voir sur la figure(I.6), avec une résistance série inférieure et une résistance shunt plus élevée, le FF est augmenté et vice versa.

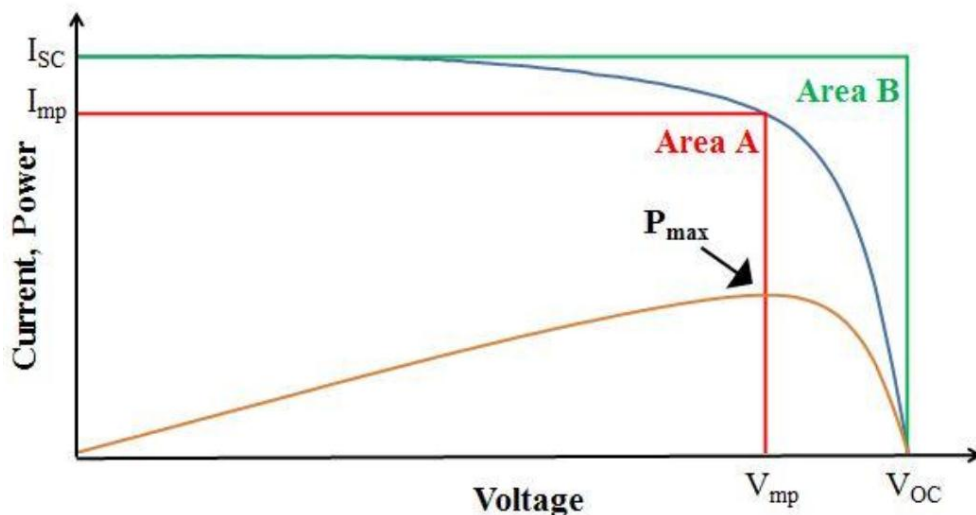


Figure I. 6: FF est calculé à partir de la courbe IV en divisant la zone A par la zone B. La puissance de la cellule est le produit de J et V, le point de puissance maximum étant le produit de I_{mp} et V_{mp} .

L'efficacité de conversion de puissance (PCE) a la relation suivante

$$PCE = \frac{FF * I_{SC} * V_{OC}}{P}, \quad (I.6)$$

où P est la puissance de la source lumineuse

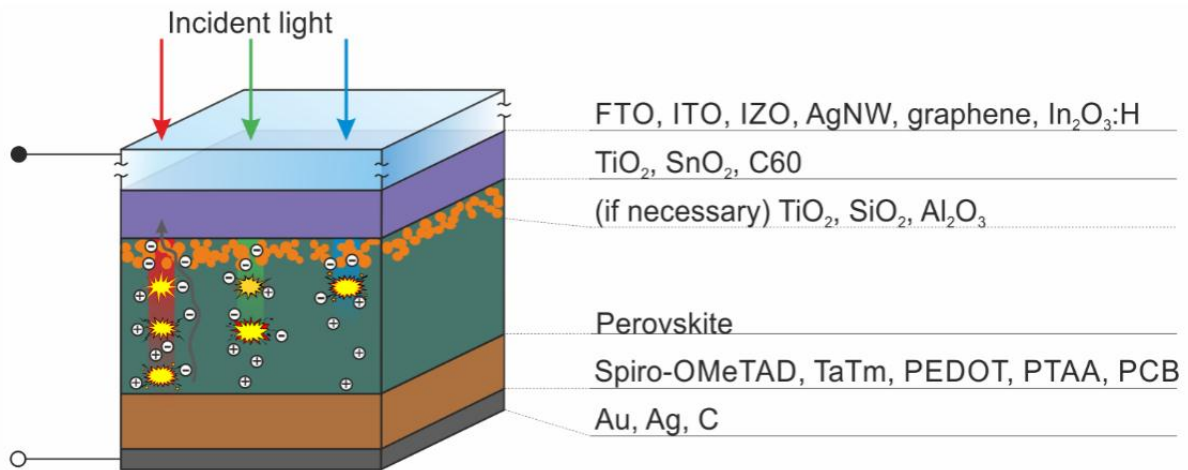


Figure I. 7: Cellule solaire pérovskite. Illustration du processus de génération de charge dans une cellule solaire à pérovskite et catalogue des matériaux utilisés pour la préparation des différentes couches composant la cellule .

I.6. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement des cellules solaires en tandem est basé sur la combinaison de différentes sous-cellules, chacune d'elles capable d'absorber une partie différente du spectre électromagnétique, ce qui permet de minimiser les pertes et atteindre des rendements PCE plus élevés. Dans une cellule solaire standard à simple jonction, les photons d'énergies inférieures à E_g du matériau actif ne peuvent pas être absorbés alors que ceux des énergies plus élevées conduisent à des porteurs qui finissent par se thermaliser aux bords de la bande d'où ils sont extraits vers leurs couches sélectives respectives. Ces effets indésirables entraînent des pertes potentielles, respectivement. En revanche, une configuration à double jonction combine des sous-cellules supérieures et inférieures basées sur des matériaux avec des débuts d'absorption relativement à des longueurs d'onde plus courts et plus longs, respectivement (voir Figure (I.8a)). Dans la figure (I.8b), nous présentons des diagrammes d'énergie canoniques pour une cellule tandem à double jonction. Les photons avec des énergies plus élevées sont récoltés dans la cellule avant tandis que ceux d'énergies plus faibles pénètrent plus profondément dans l'appareil et sont absorbés par l'arrière cellule.

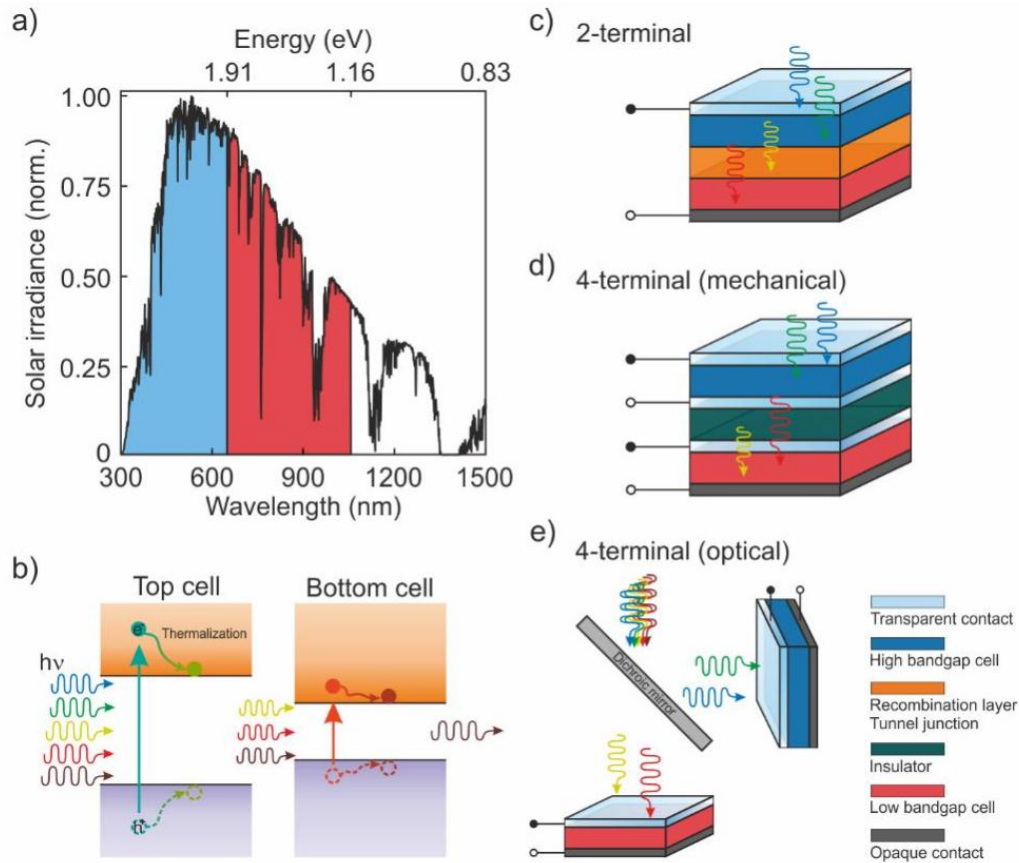


Figure I. 8: Principe de fonctionnement des cellules solaires en tandem. a) Réponse spectrale des sous-cellules génériques supérieures (bleues) et inférieures (rouges) comprenant un dispositif en tandem fonctionnant dans différentes régions du système solaire de référence irradiance spectrale AM1.5. b) Diagramme d'énergie canonique pour une cellule solaire tandem à double jonction. Schéma des trois configurations à double jonction les plus courantes : (c) deux terminaux, (d) quatre terminaux empilés mécaniquement et (e) quatre terminaux couplés optiquement. [A]

Il est possible de classer les cellules à double jonction en tant que dispositifs à deux ou quatre bornes en fonction de la connexion électrique entre les électrodes de sous-cellules. Dans un dispositif à deux terminaux, les sous-cellules sont empilées de manière monolithique nécessitant une couche de recombinaison ou une jonction tunnel afin d'atteindre la neutralité de charge (voir Figure I.8c). Dans ce schéma de connexion en série, les courants à travers les cellules supérieures et inférieures doivent être les mêmes, étant ainsi limités par la sous-cellule qui produit un photocourant inférieur. La tension aux bornes du dispositif est la somme des tensions aux bornes de chacune des cellules constitutives. Une cellule solaire en tandem à quatre bornes est composée de deux cellules autonomes qui sont connectées de manière externe en série ou en parallèle. Comme le montrent les figures I.8d et I.8e, ils peuvent être empilés mécaniquement ou couplés par des filtres optiques.

Conclusion

En conclusion, le chapitre examine en détail les cellules solaires à pérovskite, mettant en évidence leur évolution depuis leur introduction en 2009 jusqu'à leurs performances améliorées actuelles. Le chapitre explique la structure des cellules solaires à pérovskite, soulignant l'importance de chaque couche et de son rôle dans l'augmentation du rendement de conversion de puissance (PCE). Le fonctionnement des cellules solaires à pérovskite est expliqué en détail, en mettant en avant le rôle crucial de l'effet photovoltaïque dans la conversion de la lumière en électricité. De plus, le chapitre aborde les caractéristiques clés des cellules solaires, telles que l'efficacité quantique externe (EQE), le facteur de remplissage (FF), la résistance série et la résistance shunt. Enfin, le principe de fonctionnement des cellules solaires en tandem est discuté, montrant comment la combinaison de sous-cellules avec des capacités d'absorption de différentes longueurs d'onde permet d'améliorer le rendement global de la conversion solaire

Chapitre II :

*Structure d'une cellule solaire
photovoltaïque à base de pérovskite*

Introduction

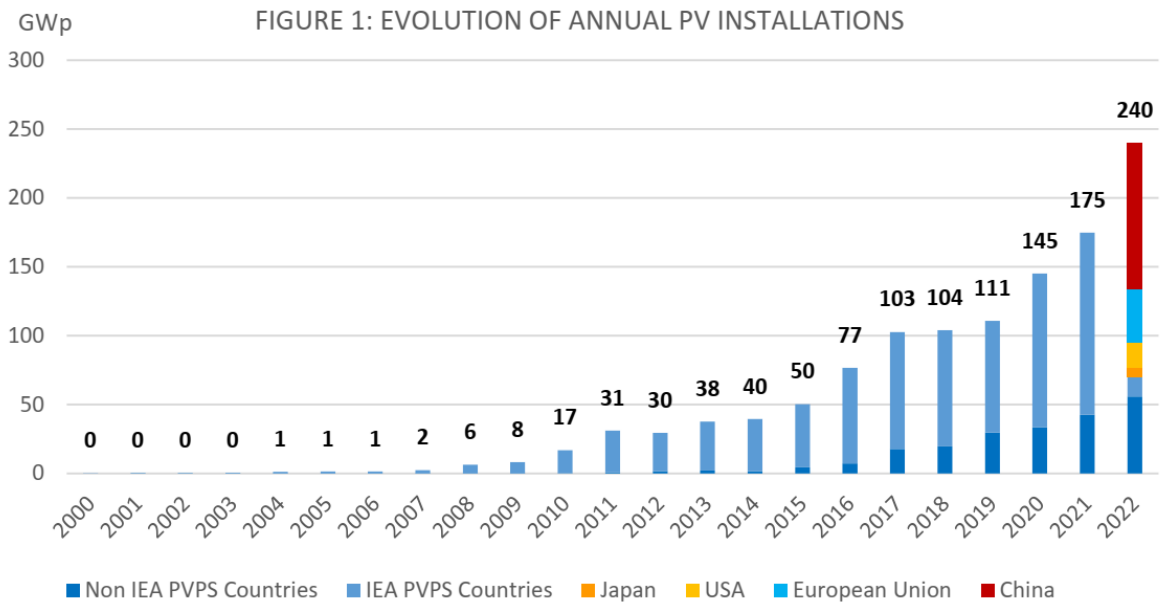
Le chapitre II intitulé "Structure d'une cellule PV à base de pérovskite" explore en profondeur l'évolution des technologies photovoltaïques et met en évidence l'importance croissante de l'énergie solaire en tant qu'alternative propre aux combustibles fossiles. L'introduction de différentes générations de cellules solaires pour optimiser l'efficacité énergétique et la rentabilité est examinée. L'accent est mis sur les cellules solaires à base de pérovskite, qui ont atteint un rendement remarquable de 33,7% en 2023, illustrant leur rapide développement. Le fonctionnement des cellules solaires est discuté en détail, mettant en lumière les paramètres qui influencent leur efficacité énergétique. La structure des cellules solaires à base de pérovskite est expliquée, avec une attention particulière portée aux mécanismes de transport de charges et aux processus de recombinaison. L'architecture et les composants clés des cellules solaires à base de pérovskite sont également présentés, en soulignant leur rôle dans la conversion efficace de la lumière en électricité.

II. Structure d'une cellule PV à base de pérovskite

II.1. Évolution annuelle de l'installation PV

Au cours des dernières années, il y avait une dépendance importante à l'égard de l'énergie solaire photovoltaïque en tant qu'alternative propre aux combustibles fossiles en décomposition et nocifs dans la production d'électricité, comme le montre la figure II.1.[28]

Ces technologies photovoltaïques ont évolué au cours des dernières décennies pour suivre le marché de l'énergie. Pour être à la fois économe en énergie et source d'électricité rentable, divers types et générations de cellules solaires ont été introduits pour atteindre cet équilibre.



Source: IEA PVPS

Figure II. 1: Évolution annuelle de l'installation PV [1: International Energy Agency (IEA) https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/04/IEA_PVPS_Snapshot_2023.pdf]

Les cellules solaires à base de silicium commercialement dominantes atteignent la forme d'un plateau aux rendements records des graphes des cellules solaires introduit par le NREL pour 2023 à un maximum de 26,1-27,6% ainsi que la plupart des autres technologies à couches minces comme dans la figure II.2.

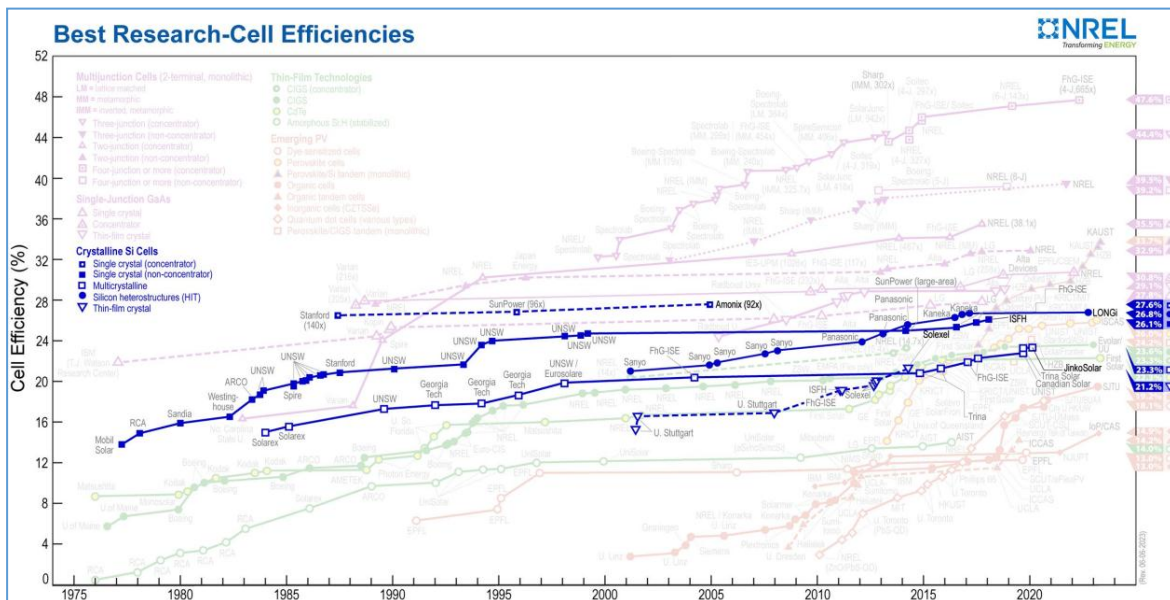


Figure II. 2: meilleurs rendements de cellules solaires enregistrées selon NREL.

Dans la figure II-2, nous pouvons observer que les technologies PV émergentes se développent rapidement. En 2023, les cellules solaires à base de pérovskite ont atteint 33,7%.

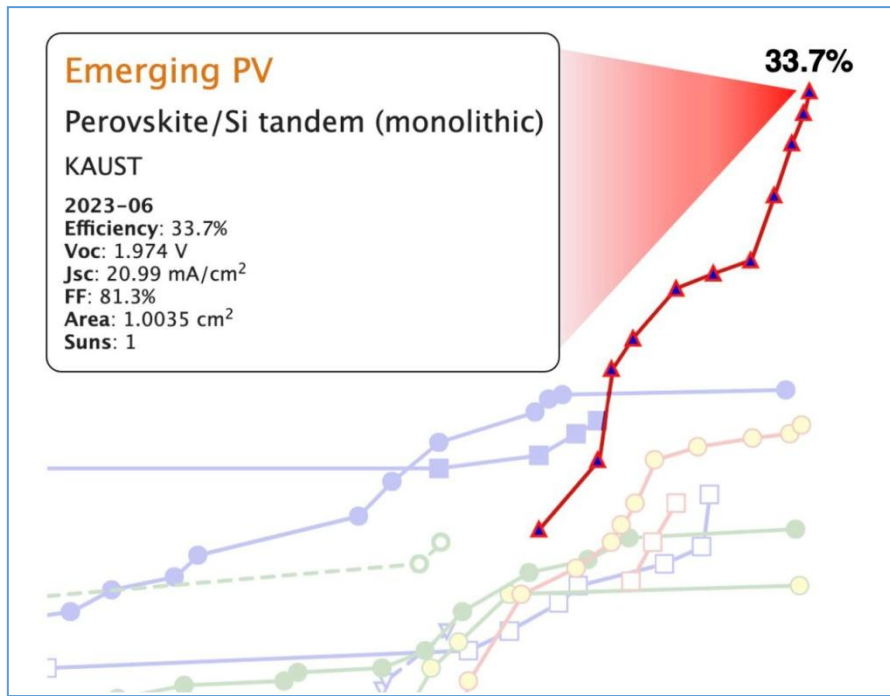


Figure II. 3: Évolution du rendement de la cellule solaire pérovskite annuelle au cours des 10 dernières années.

II.2. Fonctionnement des cellules solaires

Afin de maximiser le rendement énergétique d'une cellule solaire, nous avons besoin d'une couche absorbante qui peut absorber autant que possible du spectre solaire. Cependant, il existe d'autre paramètre qui régit ces performances globales et qui peut indiquer comment cette énergie doit être convertie efficacement, qui décrit par l'équation suivante. [32]

$$PCE = \frac{FF I_{sc} V_{oc}}{P_{in}} \quad (II.1)$$

Avec

$$FF = \frac{P_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (II.2)$$

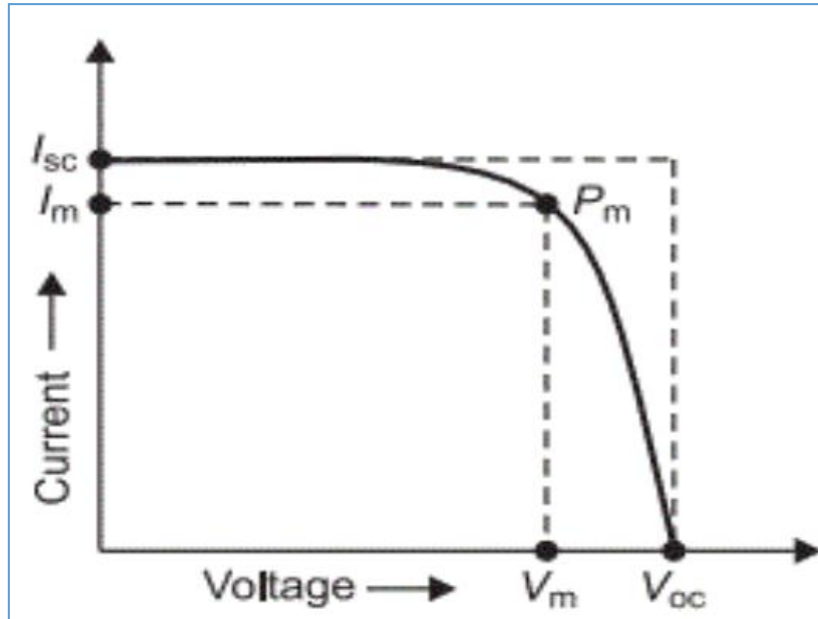


Figure II. 4: Caractéristique I-V de la cellule solaire.

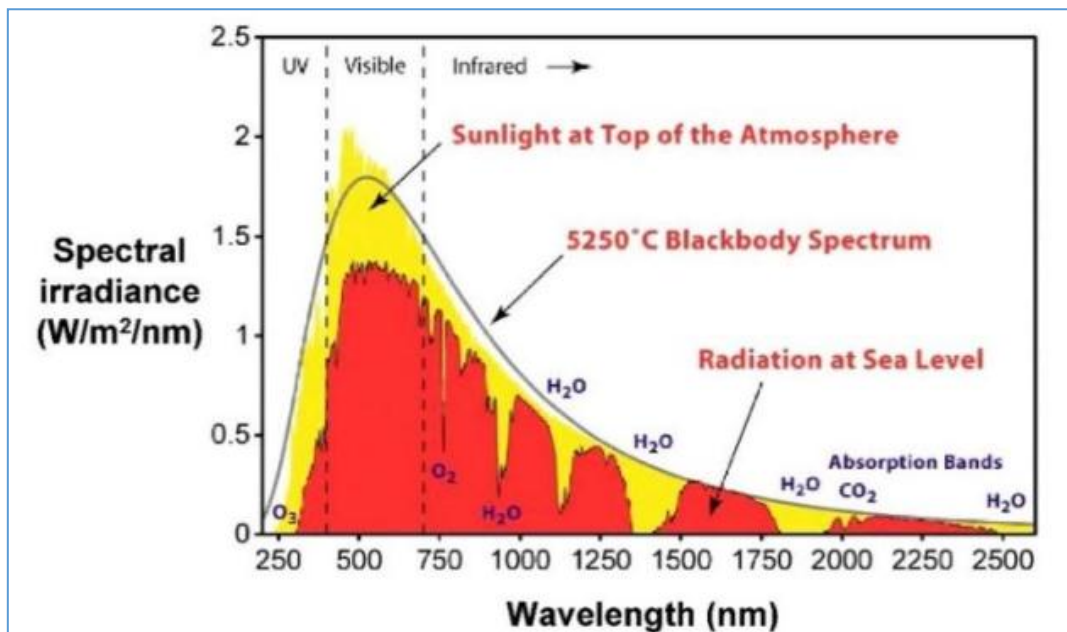


Figure II. 5: distribution de l'irradiance du spectre solaire en fonction de la longueur d'onde.

II.3. Cellule solaire pérovskite

La structure de la cellule pérovskite , se compose d'une couche active mise entre les couches du donneur (D) qui désigne la couche p et d'accepteur (A) qui représente la couche n, l'ensemble est mis entre deux électrodes

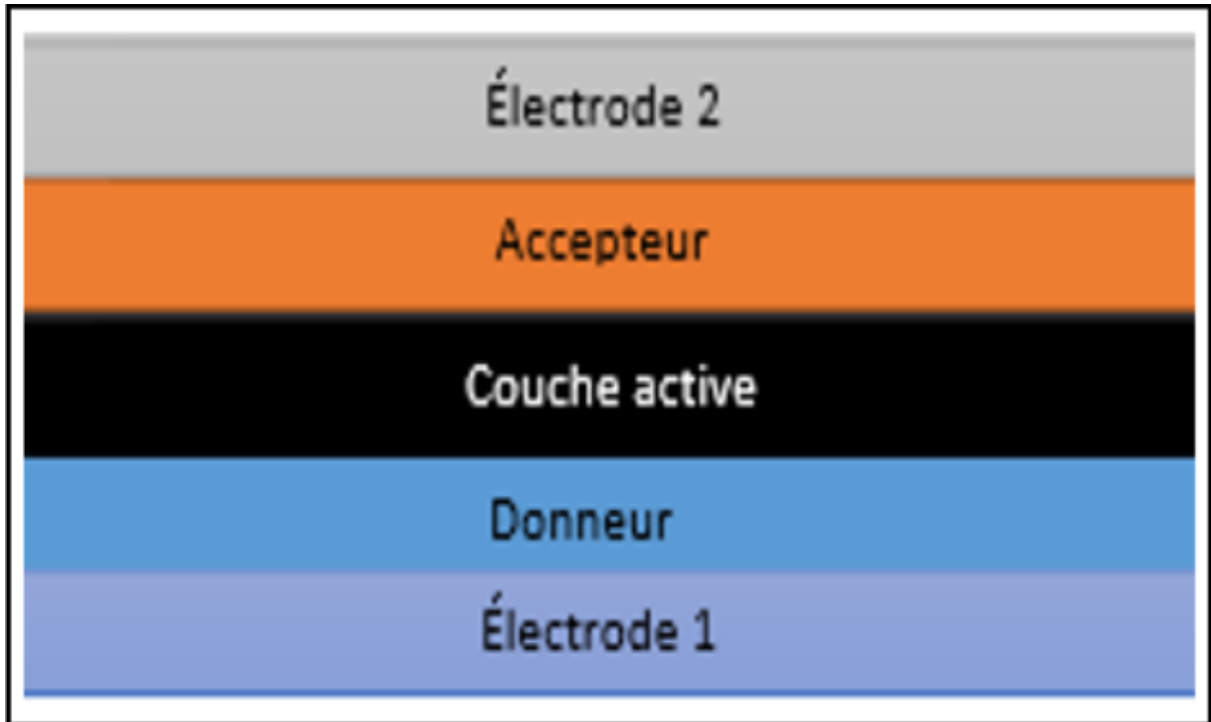


Figure II. 6: Structure d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'une couche active exemple une Pérovskite

l'ordre n ou p fait référence spécifiquement à l'ordre de dépôt des couches **ETL** et **HTL**

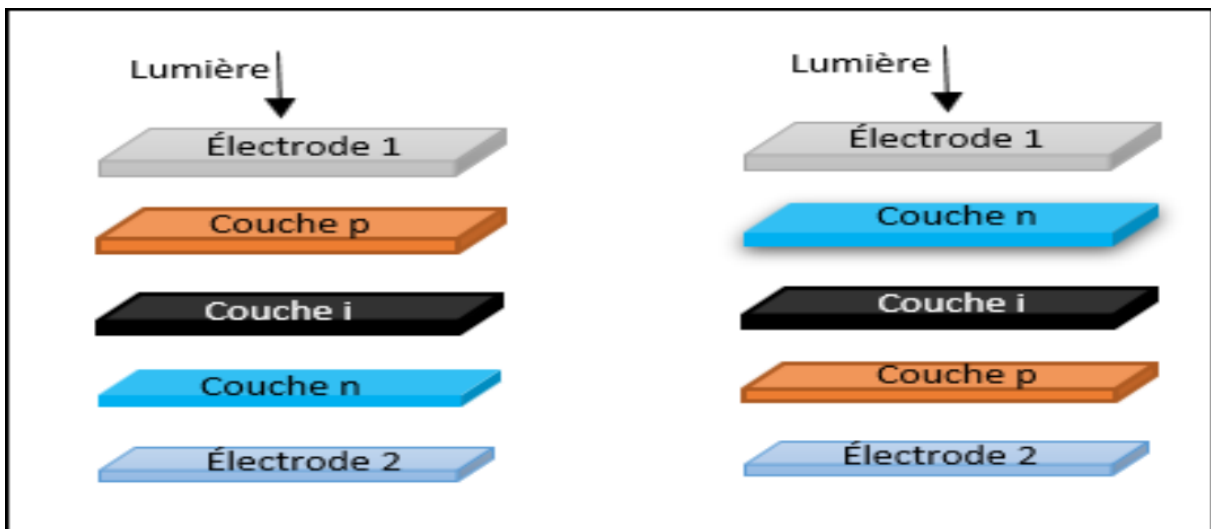


Figure II. 7: Configurations d'une structure de cellule solaire de type n-i-p (typique) et p-i-n (inversée)

En règle générale, une cellule solaire en pérovskite est constituée d'une couche absorbante en pérovskite prise en sandwich entre la couche de transport d'électrons (ETL) et la couche de transport de trous (HTL).

La lumière est absorbée dans la couche de pérovskite qui donne naissance à des électrons libres et à des trous.

Ces porteurs de charge libres diffusent alors et dérivent sous l'influence du champ électrique, les électrons se dirigeant vers l'ETL et les trous vers le HTL. L'ETL et le HTL sont responsables du transport des électrons et des trous vers les électrodes respectives pour une extraction efficace. Les électrons et les trous peuvent également se recombiner de manière radiative ou non radiative, ce qui entraîne une perte de performances de la cellule .

Une recombinaison radiative résulte de l'annihilation d'un électron dans la bande de conduction (BC) et d'un trou dans la bande de valence (BV) pour émettre un photon d'énergie égale à la bande interdite (E_{gap}) de la pérovskite.

D'autre part, la recombinaison non radiative a lieu via un intermédiaire, tel qu'un défaut ou un piège (un niveau d'énergie dans la bande interdite de la pérovskite), occupé soit par un électron, soit par un trou (selon le niveau d'énergie du piège) et une éventuelle annihilation avec un trou dans BV ou un électron dans BC respectivement.

La cellule solaire pérovskite est principalement constituée d'une couche active semi-conductrice pérovskite où l'exciton généré est pris en sandwich entre deux couches de transport de charge sélectives au-dessus d'une couche d'oxyde transparente sur le verre. Ensuite, un métal évaporé sous vide tel qu'une électrode d'argent à l'arrière de l'appareil pour collecter les électrons, comme illustré à la figure II.8. a.[9]

Une couche absorbante de pérovskite absorbe les photons et produit des excitons. Ensuite, les excitons se dissocient en électrons et en trous et se transportent vers HTL pour les trous et ETL pour les électrons. Après cela, ils sont collectés par les électrodes.[35]. Bien que ces électrodes aient montré une collecte efficace de photoélectrons, elles présentent l'une des instabilités communes de la cellule solaire pérovskite, qui est la migration des ions. En fait, il existe une certaine activité des ions à migrer à travers les interfaces formant des composés tels que l'iodure métallique et réduisant les performances de la cellule solaire.[36], [37]

II.4. Architecture d'une cellule solaire à base de pérovskite et principes de fonctionnement

L'architecture des cellules solaires en pérovskite pourrait impliquer une structure de type n-i-p (typique) et p-i-n (inversée), [8,9] où la pérovskite est un semi-conducteur intrinsèque et la lumière pénètre respectivement par la couche de type n ou de type p. [10–12] L'architecture typique du dispositif est composée de cinq couches (Figure 1.5), à savoir (1) une électrode transparente (généralement de l'oxyde d'étain dopé au fluor, $\text{SnO}_2:\text{F}$, FTO), (2)

un semi-conducteur de type n comme transporteur d'électrons (ETL), (3) une pérovskite photoactive, (4) un semi-conducteur de type p comme couche de transport de trous (HTL) et (5) l'électrode métallique.

Selon la couche de type n, les PSC peuvent être classées en plans (Figure II.8. a) ou mésoscopiques (Figure II.8. b).[11]. Pour les travaux présentés dans les chapitres 2 à 3, le SnO_2 a été adapté pour la couche sélective d'électrons introduite par la méthode de dépôt de couche atomique (ALD) et le TiO_2 mésoscopique a été utilisé pour une efficacité élevée des PSC dans les chapitres 4 à 5.

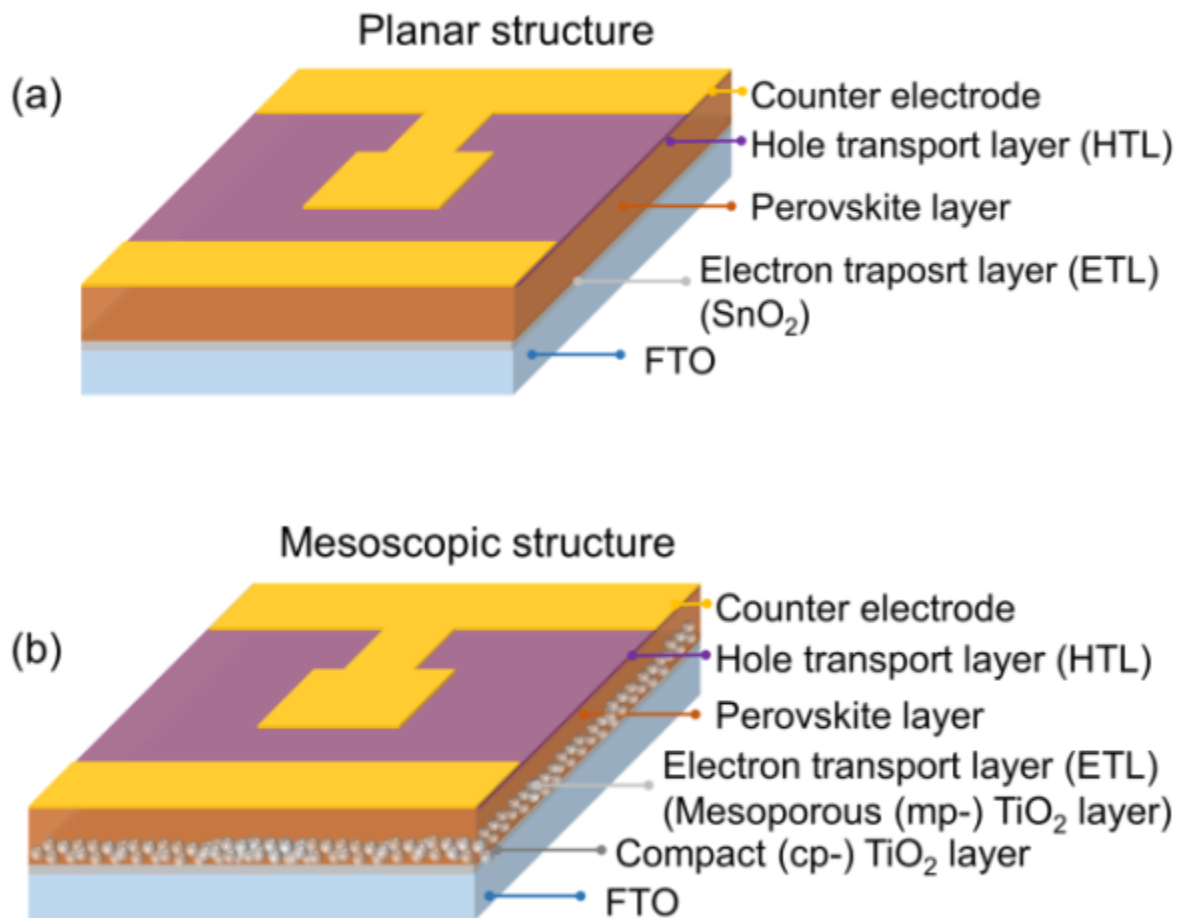


Figure II. 8: Schémas de structures pour les architectures de cellules solaires en pérovskite n-i-p : (a) structure planaire et (b) structure mésoscopique. HTL = couche de transport de trous ; ETL = couche de transport d'électrons ; FTO = oxyde d'étain dopé au fluor, $\text{SnO}_2:\text{F}$.

Les structures PSC planes et mésoscopiques fonctionnent par le même mécanisme de transfert de charge. Une fois que la lumière du soleil illumine le côté FTO du PSC, les photons incidents excitent les matériaux pérovskites, générant des électrons et des trous

(Figure II.8. a). Les électrons séparés des trous sont injectés dans la bande de conduction (CB) de la couche de transport d'électrons, avant de migrer vers l'anode.

Pendant ce temps, les trous générés lors de l'excitation de la pérovskite sont transférés au niveau HOMO de la couche de transport de trous, avant injection dans la cathode.

Les injections d'électrons et de trous se produisent assez efficacement dans les cellules solaires à pérovskite en raison des longueurs de diffusion élevées des porteurs de charge. Pour réduire la recombinaison des porteurs aux interfaces, qui est préjudiciable à la tension en circuit ouvert (V_{OC}), l'ETL et le HTL doivent être compacts et non fortement dopés. Lors de l'illumination, l'électron (E'_{Fn}) et les niveaux quasi-Fermi de trous (E'_{Fp}) dans la couche de pérovskite sont formés près du minimum de la bande de valence (VBM) et du minimum de la bande de conduction (CBM), respectivement, et la différence entre E'_{Fn} et E'_{Fp} détermine le V_{CO} des PSC. Le diagramme de niveau d'énergie d'un matériau représentatif pour HTL, pérovskite et ETL utilisé dans ces travaux sont présentés à la figure II.9. au cours du fonctionnement de la cellule solaire cependant, des processus de transfert de charge indésirables accompagnent le photovoltaïque, comme la recombinaison de charge, qui peut se produire à chaque interface entre les différentes couches de la cellule, ainsi qu'aux joints de grains.[13-15]

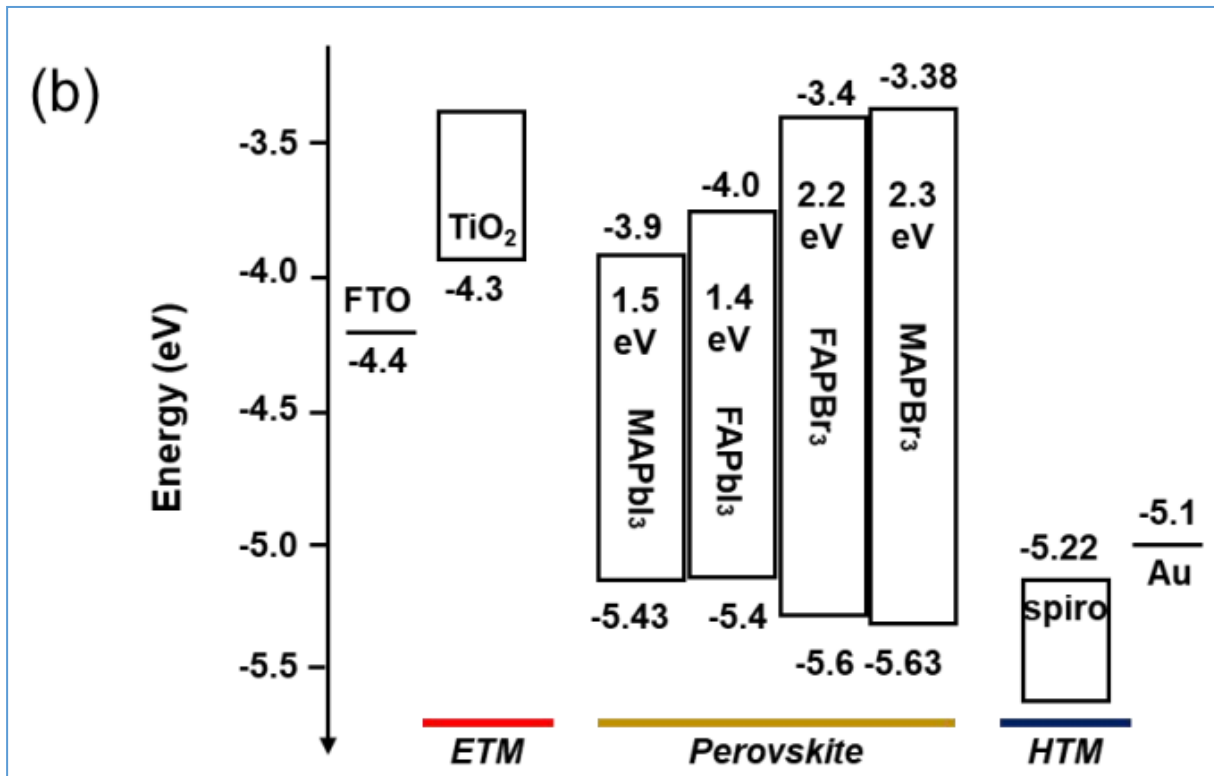


Figure II. 9: Schéma du diagramme de niveau d'énergie des halogénures de plomb représentatifs pérovskite, TiO₂, spiro-OMeTAD et électrodes.[7]

II.5. Composants des PSC typiques

II.5.1. Électrode de travail

Les cellules sont généralement constituées d'un oxyde conducteur transparent (TCO) en tant que substrat conducteur, tel que l'oxyde d'étain dopé au fluor SnO₂:F (FTO) ou l'oxyde d'indium dopé à l'étain (ITO), qui est appliqué sur un substrat en verre ou en plastique pour faciliter le passage du courant électrique produit lors de la conversion.

Le FTO a été reconnu comme un matériau très prometteur car il est relativement stable dans les conditions atmosphériques, ainsi que chimiquement inerte, mécaniquement dur et résistant aux hautes températures. De plus, il présente une tolérance élevée à l'abrasion physique, une transparence élevée, une faible réflexion et absorption, ainsi qu'une faible résistance, tout en étant moins cher que l'ITO.

II.5.2. Matériau de transport d'électrons

Le but des matériaux transporteurs d'électrons (ETM) est d'empêcher les électrons photoinjectés dans le substrat conducteur de se recombiner directement avec les trous. Il doit présenter une transmittance élevée dans la région UV-Vis pour que le photon puisse passer facilement et être absorbé par l'absorbeur pérovskite. La couche ETM, qui agit comme une couche de blocage des trous, est directement déposée sur le conducteursubstrat de verre pour former un contact compact et continu de type n afin de fournir une sélectivité électronique. Le TiO₂ a été utilisé principalement comme ETM dans les cellules solaires à pérovskite.

II.5.3. Absorbeur de pérovskite

La couche de pérovskite d'halogénure d'organo plomb est le composant clé dans toutes les configurations de dispositifs possibles et elle est cruciale pour l'absorption de la lumière et la photogénération de porteurs libres.

Elle a reçu une attention considérable pour les applications de cellules solaires, principalement en raison de ses propriétés optoélectroniques fascinantes, et de ses méthodes de fabrication simples basées sur le traitement en solution. En particulier, CH₃NH₃PbI₃ (MAPbI₃) a une large bande interdite de 1,54 eV, montrant une excellente force motrice pour l'injection d'électrons dans le TiO₂ et l'injection de trous dans le HTM.

II.5.4. Matériau de transport des Trous

En général, les HTM jouent un rôle important dans les performances de la cellule solaire à base de pérovskite et doivent répondre à plusieurs exigences pour fournir des PSC à

haute efficacité. Premièrement, ils doivent montrer une grande mobilité des trous, idéalement supérieure à $10^{-3} \text{ cm}^2 (\text{V}\cdot\text{s})^{-1}$. [27] De plus, ils doivent avoir peu d'absorption dans la région vis-IR pour éviter le chevauchement avec la couche de pérovskite. Ceci est particulièrement important pour les architectures tandem et semi-transparentes. Enfin, Les HTM doivent présenter une température de transition vitreuse (T_g) supérieure à $85 \text{ }^\circ\text{C}$ pour assurer la stabilité à long terme du PSC qui doit résister à des températures allant jusqu'à $85 \text{ }^\circ\text{C}$. Outre ces exigences clés, pour être compatibles avec la fabrication de dispositifs, les HTM doivent être facilement traités par des techniques basées sur des solutions, tandis que le niveau HOMO de HTM doit avoir une énergie plus élevée que la bande de valence de l'absorbeur de pérovskite pour assurer un fonctionnement efficace du dispositif [28]. Sur la base de ces critères, l'un des HTM les plus utilisés est le spiro-OMeTAD (2,2',7,7'-Tetrakis-(N,N'-diméthoxyphénylamine)-9,9'-spirobifluorene). Son noyau est constitué de deux fluorènes fusionnés résultant en une molécule avec une forme torsadée et une T_g relativement élevée de $125 \text{ }^\circ\text{C}$. [29] Ce HTM a donné lieu à certains rendements les plus élevés pour les PSC

II.5.5. Contact arrière : Contre-électrode

Une contre-électrode en tant que contact arrière de la cellule solaire pérovskite est nécessaire pour compléter le circuit interne et fonctionner comme une électrode, fournissant du courant et de la tension pour le travail électrique externe. Traditionnellement, le contact arrière du PSC est formé par évaporation thermique d'un métal noble à haut travail d'extraction, nécessaire pour atteindre une haute tension en circuit ouvert des cellules, qui est souvent de l'or ou de l'argent. Cependant, ces deux matériaux d'électrode ont des limites. Au est cher et migre à travers le HTM une fois exposé à des températures plus élevées, tandis que Ag est instable en raison de l'oxydation. Alternativement, dans le cas de PSC sans HTM, les composites de carbone se sont avérés être un remplacement prometteur pour les électrodes de contact arrière Au.

Conclusion

En conclusion, le chapitre II étudié met en évidence l'évolution significative de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque au cours des dernières années en tant qu'alternative propre aux combustibles fossiles pour la production d'électricité. Cette évolution est illustrée par la dépendance croissante envers les technologies photovoltaïques, telles que les cellules solaires à base de silicium et les technologies émergentes comme les cellules solaires à base de pérovskite. Les rendements des cellules solaires ont atteint des

niveaux records, avec des taux de conversion de plus de 33,7% pour les cellules pérovskites en 2023. Cependant, malgré ces avancées, le chapitre souligne également les défis persistants, notamment la recombinaison radiative et non radiative, ainsi que les problèmes de stabilité et de migration des ions dans les cellules pérovskites. Le fonctionnement des cellules solaires, leur architecture et les composants clés tels que les électrodes, les matériaux de transport d'électrons et de trous, ainsi que les contacts arrières, sont décrits en détail pour comprendre le mécanisme de conversion de l'énergie solaire en électricité.

CHAPITRE III :

Résultats de la Simulation numérique

sous SILVACO-ATLAS

Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude de la structure de la cellule solaire à base de Pérovskite à simple anion. Nous présenterons, dans un premier temps, les modèles utilisés pour la simulation, ensuite nous définissons la structure à simuler ainsi que les paramètres utilisés. Ces paramètres sont choisis selon les moyens technologiques utilisés dans la réalisation des cellules photovoltaïques. Nous présentons ensuite les résultats obtenus de la simulation numérique à deux dimensions, sous SILVACO/ATLAS, de la structure en question.

III.1. Modèles utilisés pour la simulation sous SILVACO-ATLAS

L'exactitude des simulations numériques dépend fortement du choix des modèles physiques utilisés pour décrire le fonctionnement de la cellule solaire. Dans le cas de la structure de la cellule solaire à base de Pérovskite , nous utilisons les modèles suivants :

- recombinaison Shockley Read Hall,
- recombinaison Auger,
- recombinaison en surface.
- mobilité en fonction de la concentration (conmob)
- effets *de* rétrécissement de la bande interdite (BGN)

Dans les paragraphes suivants, nous décrirons en détail quelques unes de ces modèles.

III.1.1. La simulation électrique sous SILVACO-ATLAS :

La simulation électrique par SILVACO-ATLAS est basée sur la résolution numérique des trois équations fondamentales de transport de charges dans les semi-conducteurs qui sont respectivement l'équation de Poisson et l'équation de continuité pour les électrons et les trous. La statistique de Boltzmann détermine la concentration des porteurs. Après le maillage de la structure étudiée, le simulateur évalue numériquement la résolution de ces équations à chaque nœud du maillage.

L'équation de Poisson s'exprime par :

$$\overrightarrow{\text{div}}(\epsilon. \varphi) = q(n - p + N_A^- - N_D^+) \quad (\text{III .1})$$

Avec :

ϵ : La permittivité électrique ($\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$, ϵ_0 est la permittivité du vide et ϵ_r est la permittivité relative du matériau)

φ : le potentiel électrostatique

q : La charge élémentaire ($q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

n, p : Les densités d'électrons et de trous libres.

N_D^+, N_A^- : Les densités d'atomes donneurs et accepteurs ionisés.

Les équations de continuité s'expriment par :

$$\text{Pour les électrons :} \quad \text{div } \vec{J}_n = qR_n + q \frac{\partial n}{\partial t} - qG_n \quad (\text{III.2})$$

$$\text{Pour les trous} \quad : \text{div } \vec{J}_p = qR_p + q \frac{\partial p}{\partial t} - qG_p \quad (\text{III.3})$$

Où R représente le taux de recombinaison électron-trou (G , le taux de génération) et J_n et J_p sont respectivement les densités de courant d'électrons et de trous. Les densités des porteurs sont calculées par le modèle de Dérive-Diffusion (modèle isothermique de transport). Ce modèle est basé sur l'expression des densités de courants suivantes :

$$\vec{J}_n = qn\mu_n \vec{E} + qD_n \text{grad} n \quad (\text{III.4})$$

$$\vec{J}_p = qp\mu_p \vec{E} - qD_p \text{grad} p$$

Si on considère le modèle de type linéaire, les deux équations deviennent :

$$J_n(x) = qn(x)\mu_n E(x) + qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad (\text{III.5})$$

$$J_p(x) = qp(x)\mu_p E(x) - qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

Où $E(x)$ est le champ électrostatique, $p(x)$ et $n(x)$ sont, respectivement les concentrations des trous et des électrons libres. μ_n , μ_p sont les mobilités respectives des électrons et des trous et D_n , D_p sont leurs coefficients de diffusion.

Pour un semi-conducteur non dégénéré, les mobilités de porteurs sont liées à leurs coefficients de diffusion par la relation d'Einstein

$$D = \frac{k_B T}{q} \mu$$

Les densités des électrons et des trous sont données par :

$$\text{Pour électrons :} \quad n(x) = N_C e^{-(E_C(x) - E_F)/k_B T}$$

$$\text{Pour trous :} \quad p(x) = N_V e^{-(E_V(x) - E_F)/k_B T}$$

Les quantités N_c et N_v sont les concentrations équivalentes des états de la bande de conduction et de valence.

III.1.2. Recombinaison :

Par définition, la recombinaison est le retour de l'électron de l'état excité à l'état initial ou de la bande de conduction vers la bande de valence, car il ne peut rester dans un état excité que pour un temps faible ($t < 10^{-8}$ s). Ce retour de l'électron de l'état excité vers l'état stable peut avoir lieu selon plusieurs façons :

III.1.3. Cas des semi-conducteurs inorganiques

a. Recombinaison SRH (Shockley-Read-Hall) volumique

Le processus de recombinaison Shockley-Read-Hall est schématisé sur la figure IV.1. Il fut pour la première fois explicité par Shockley, Read et Hall. Ce processus fait appel à des niveaux d'énergie voisins du milieu du gap (niveaux appelés pièges, dus à certains défauts cristallins ou à la présence de certaines impuretés dans le cristal) qui facilitent la recombinaison des porteurs par un mécanisme en deux étapes. Un électron de la bande de conduction va d'abord se relaxer sur un niveau d'énergie intermédiaire lié à un défaut. Ensuite, une deuxième relaxation va lui permettre de se recombiner avec un trou de la bande de valence. L'efficacité de ce processus dépend de la densité des niveaux profonds et par suite, de la qualité du matériau utilisé et de sa technologie d'élaboration. La recombinaison Shockley-Read-Hall est modélisée par :

$$R_{RSH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_n \left[p + n_i \exp \left(\frac{-(E_t - E_i)}{KT} \right) \right] + \tau_p \left[n + n_i \exp \left(\frac{(E_t - E_i)}{KT} \right) \right]} \quad (III.6)$$

Où E_t est la position énergétique des états de piège, E_i est le niveau de Fermi dans le semi-conducteur intrinsèque, τ_n, τ_p sont respectivement la durée de vie pour les électrons et les trous, n_i est la concentration intrinsèque, K est la constante de Boltzmann et T la température en Kelvin.

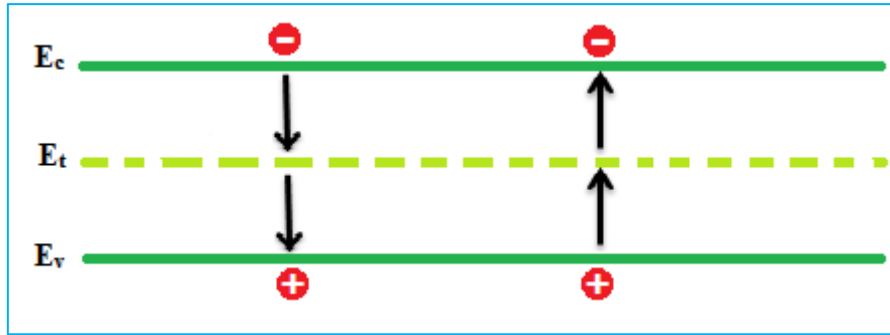


Figure III. 1: Mécanisme de recombinaison Schokley-Read-Hall (SRH).

b. Recombinaison en surface

Les mécanismes précédents constituent des recombinaisons ayant lieu dans le volume du matériau. Il faut également considérer les recombinaisons en surface dont le mécanisme est représenté sur la figure (IV.2). Dans ce cas, le formalisme du mécanisme de recombinaison SRH peut être reformulé avec des recombinaisons par unité de surface plutôt que par unité de volume. Le taux de recombinaison à la surface est donné par l'expression :

$$R_{surf} = \frac{np - n_i^2}{\tau_p^{eff} \left[p + n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{KT}\right) \right] + \tau_n^{eff} \left[n + n_i \exp\left(\frac{-(E_t - E_i)}{KT}\right) \right]} \quad (III.7)$$

Avec:

$$\frac{1}{\tau_n^{eff}} = \frac{1}{\tau_n^i} + \frac{d_i}{A_i} S_n$$

$$\frac{1}{\tau_p^{eff}} = \frac{1}{\tau_p^i} + \frac{d_i}{A_i} S_p$$

des équations dans lesquelles τ_n^{eff} est la durée de vie effective, d_i et A_i sont la longueur et l'épaisseur de l'interface, S_n et S_p sont respectivement la vitesse de recombinaison pour les électrons et les trous. Par défaut, $S_n = S_p = 0 \text{ cm/s}$.

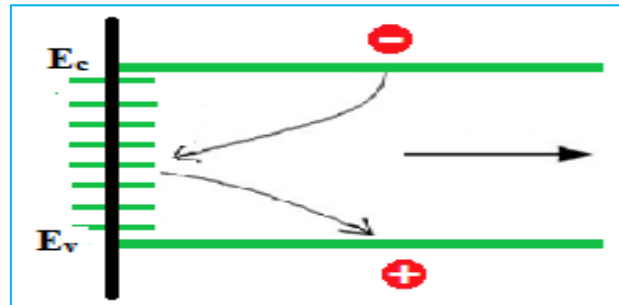


Figure III. 2: Mécanisme de recombinaison en surface

c. Recombinaison en volume de type Auger

Nous avons une recombinaison de type Auger, lorsque l'énergie de l'électron qui se recombine dans la bande de valence est transférée sous forme d'énergie cinétique à un autre électron libre. L'énergie transférée est libérée ensuite sous forme de phonons figure III.3. Ce mécanisme est prédominant pour les régions fortement dopées. Le taux de recombinaison est donné par la relation :

$$R = (C_n n + C_p p)(pn - n_i^2) \quad (\text{III.8})$$

Avec C_n et C_p sont des coefficients d'Auger. Leurs valeurs sont respectivement :

$$C_n = 2,2 \cdot 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s} / C_p = 9,9 \cdot 10^{-32} \text{ cm}^6/\text{s}$$

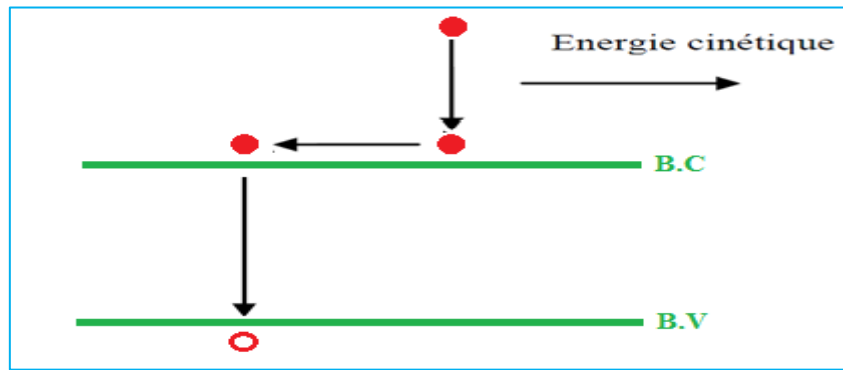


Figure (IV.3) : Schéma descriptif du processus de recombinaison de type Auger.

III.2 Structure simulée, Paramètres, Maillage

III.2.1. Introduction :

Afin d'augmenter la performance de cellule solaire à base de Pérovskite, nous avons simulé la cellule structurée Verre / Oxyde d'indium et d'étain (ITO) / Couche de transport d'électrons (couche N) / Couche active (la Pérovskite) / Couche de transport de trous (couche P) / Electrode métallique: Glass/ITO/TiO₂/Perovskite/Spiro-OMeTAd/Au figure III.4 .1 en faisant varier les différents paramètres.

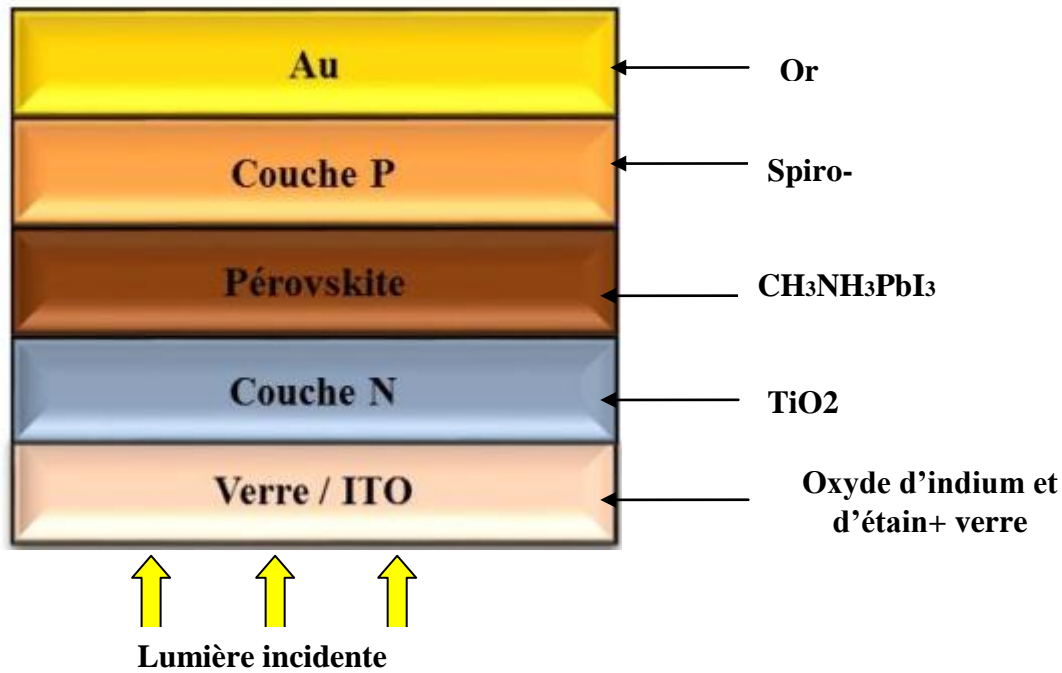


Figure III. 3: L'architecture des cellules avec un empilement N-I-P.

Nous allons présenter les résultats obtenus sous forme de graphes avec interprétations de ces résultats.

a. Structure simulée :

Pour simuler l'influence des différents paramètres, nous avons tout d'abord choisie une cellule de référence avec un ensemble des paramètres fixés, puis nous avons fait varier les paramètres un par un, tout en maintenant les autres fixes, afin d'analyser leur influence sur les caractéristiques de la cellule Tandem Pérovskite. La figure (III.4) représente la structure de la cellule de référence utilisée lors de la simulation.

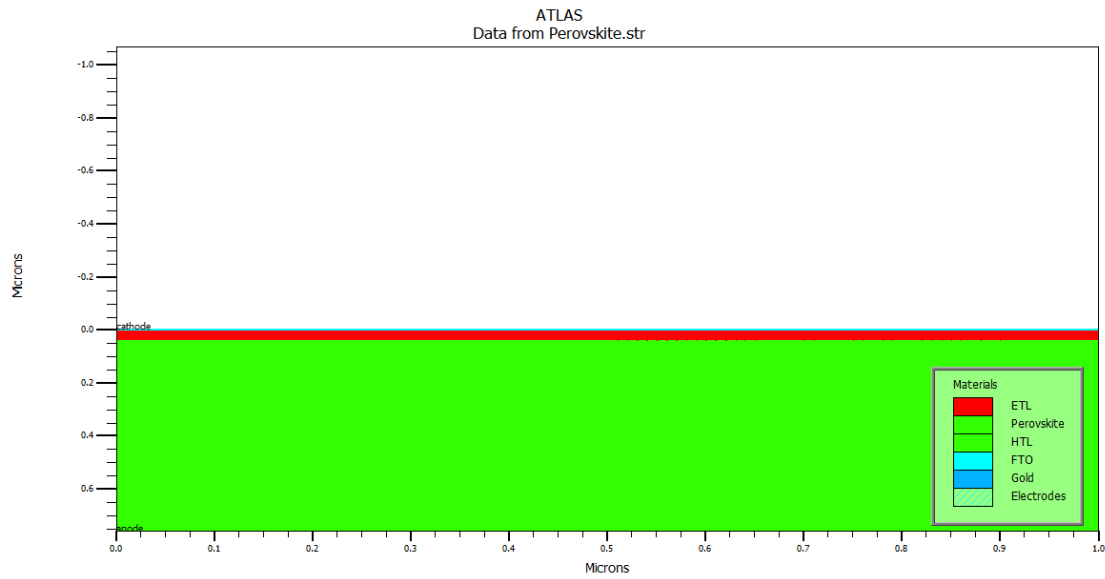


Figure III. 4: Structure de la cellule de référence.

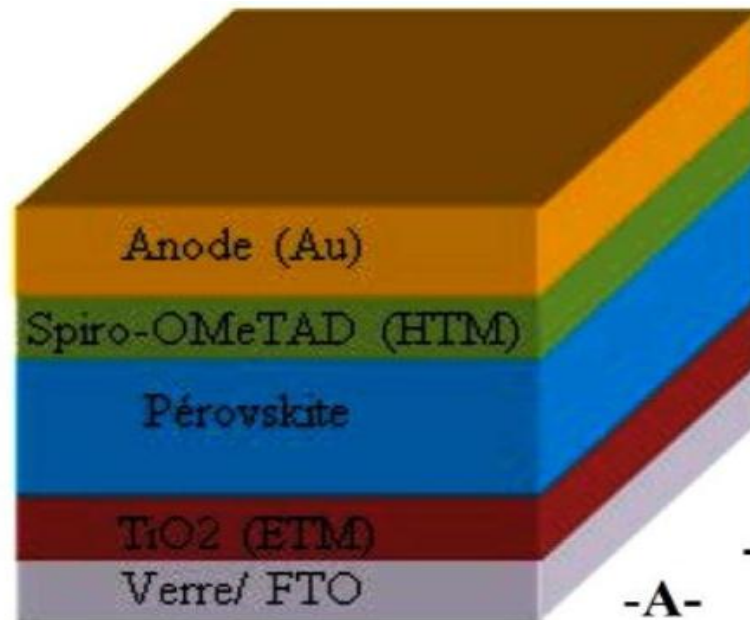


Figure III. 5: La géométrie de la structure de référence.

b. Paramètres de la structure simulée :

Les paramètres de la cellule de référence sont illustrés dans le tableau suivant

Tableau III. 1: Paramètres de la cellule de référence

	Epaisseur nm	Concentration /cm ³	Eg (eV)
TiO ₂	0.02	Na= 1.10 ¹⁹	3.20
Pérovskite	054	Nd=1.10 ¹⁵	1.60
Spiro	0.2	Nd=1.10 ¹⁹	2.6

c. Maillage :

Pour procéder à la simulation numérique, il est nécessaire de définir le maillage de la structure. L'outil **Deckbuild** permet de définir les dimensions de la structure simulée, les paramètres des zones dopées (l'emplacement, le type, le niveau et le profil de dopage), de placer les contacts électriques sur la structure et de définir le maillage. Le maillage divise la structure simulée en petites cellules pour pouvoir résoudre les équations 1, 2 et 3 numériquement (1 l'équation de la continuité, 2 l'équation de Poisson et 3 densités de courants). Pour assurer une bonne précision lors de la simulation, il faut avoir le maillage le plus fin possible. Par contre, si le maillage est très fin, le temps de calcul est très élevé, car il y a plus d'éléments à calculer. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre le temps et la précision de calcul. nous avons obtenus les résultats de tous les paramètres électriques de la cellule solaire de référence y compris le spectre solaire AM1.5 (figures III.6 et III.7):

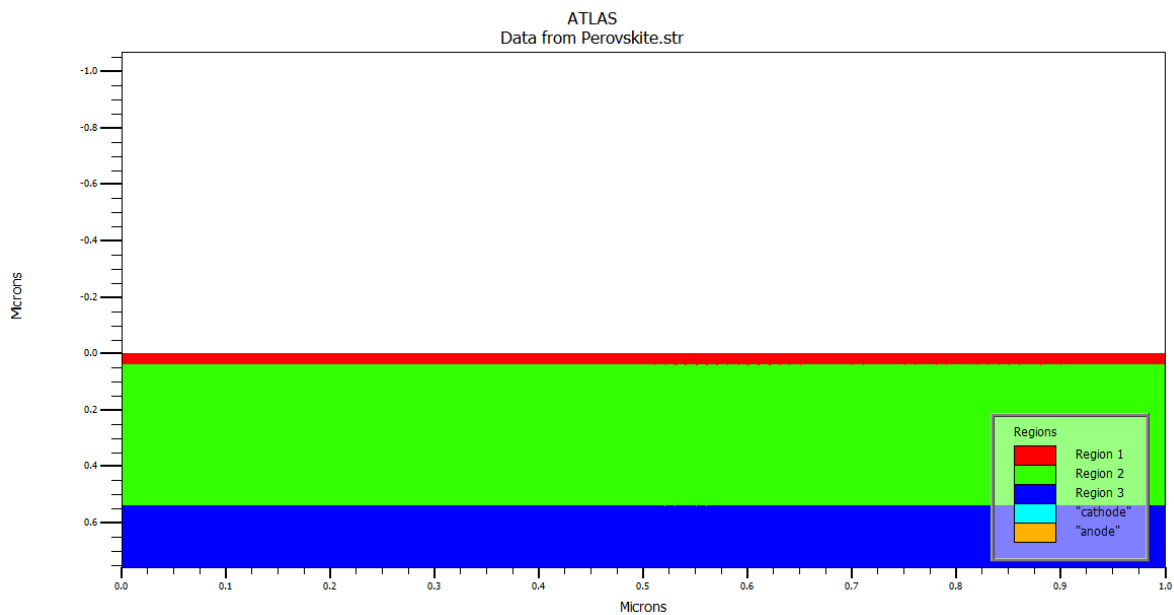


Figure III. 6: structure de la cellule solaire montrant les 3 régions principales

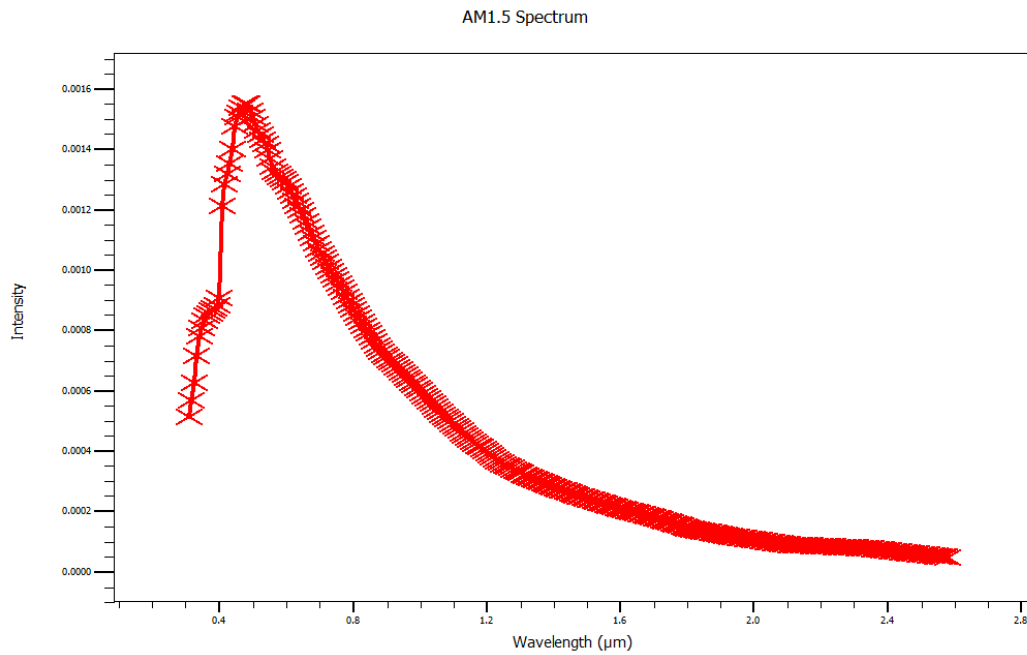


Figure III. 7: le spectre solaire utilisé AM1.5

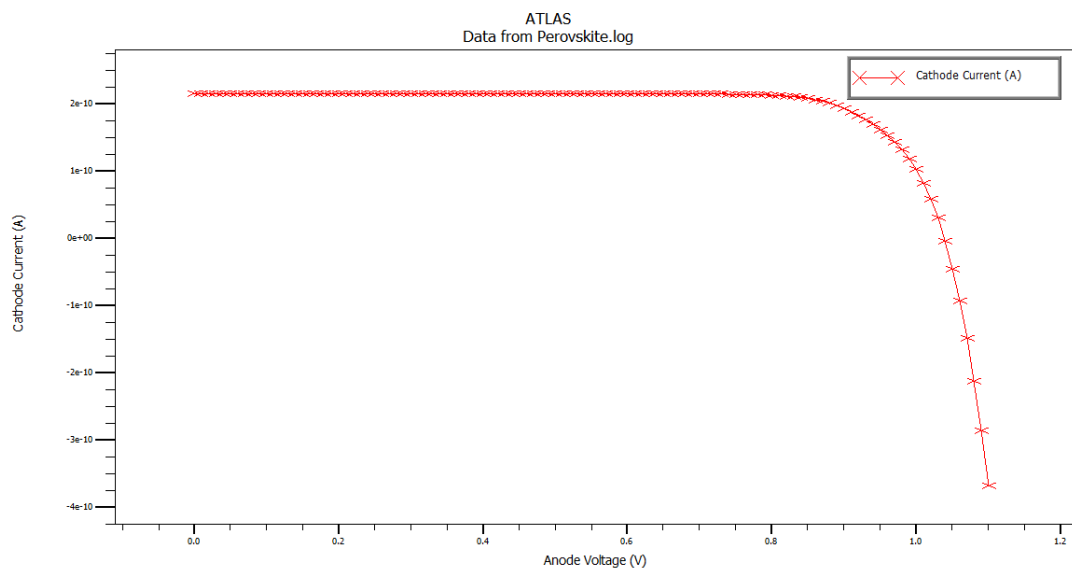


Figure III. 8: caractéristique I-V de la cellule solaire à base de pérovskite de référence

Tableau III. 2: les résultats obtenus de toutes les grandeurs électriques de la cellule de référence

Isc	JscmA/c m2	Voc	Pm	Vm	Im	FF%	Opt_ int	Eff %	QE	EQE
2.15e- 010	21.52	1.038	1.77e- 010	0.86	2.06e- 010	79.21	0.10	17.71	0.94	0.85

III.3 Résultats de la simulation :

Pour simuler et optimiser notre cellule solaire à base de pérovskite nous avons fait varier deux paramètres principaux à savoir l'épaisseur et la concentration des accepteurs et donneurs relatifs aux différentes régions.

III.3.1. Région 1 : ETL

Nous avons fait varier la concentration des accepteurs Na en gardant tous les autres paramètres constants , nous avons obtenu les résultats suivants résumés dans le tableau suivant :

Tableau III. 3: Résultats obtenus de la simulation sur la région ETL

Paramètre	Na=1e17	Na=1e16	Na=1e15	Na=1e14	Na=1e13	Na=3e18	Na=4e18	Na=6e18	Na=9e18	Na=2e19	Na=5e19	Na=10e19	Na=50e19
Isc	2.223e-010	2.227e-010	2.227e-010	2.227e-010	2.227e-010	2.210e-010	2.209e-010	2.208e-010	2.207e-010	2.205e-010	2.203e-010	2.201e-010	2.1691e-010
JscmA/cm2	22.238	22.272	22.275	22.276	22.276	22.1048	22.0977	22.0872	22.0789	22.0584	22.0369	22.0146	21.6991
Voc mV	1048.69	1054.15	1054.74	1054.88	1054.89	1082.76	1084.72	1087.39	1090.08	1095.23	1095.23	1095.23	1095.23
Pm	1.711e-010	1.708e-010	1.707e-010	1.707e-010	1.707e-010	1.793e-010	1.799e-010	1.808e-010	1.817e-010	1.833e-010	1.85e-010	1.872e-010	1.872e-010
Vm	0.829	0.830	0.829	0.829	0.830	0.889	0.890	0.899	0.90	0.91	0.92	0.93	0.93
Im	2.061e-010	2.057e-010	2.057e-010	2.057e-010	2.057e-010	2.015e-010	2.022e-010	2.009e-010	2.018e-010	2.014e-010	2.014e-010	2.012e-010	2.014e-010
FF	73.368	72.742	72.681	72.666	72.665	74.933	75.0794	75.3166	75.4981	75.881	76.7957	77.6407	78.8083
Opt_int	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
Eff	17.11	17.078	17.076	17.075	17.075	17.93	17.99	18.09	18.17	18.33	18.53	18.72	18.73
QE	0.943	0.9444	0.944	0.944	0.944	0.94	0.94	0.94	0.936	0.93	0.93	0.93	0.92
EQE	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.868	0.868	0.868	0.868	0.868	0.867	0.867	0.86

Nous avons traduit ce résultat obtenu sous forme de graphes.

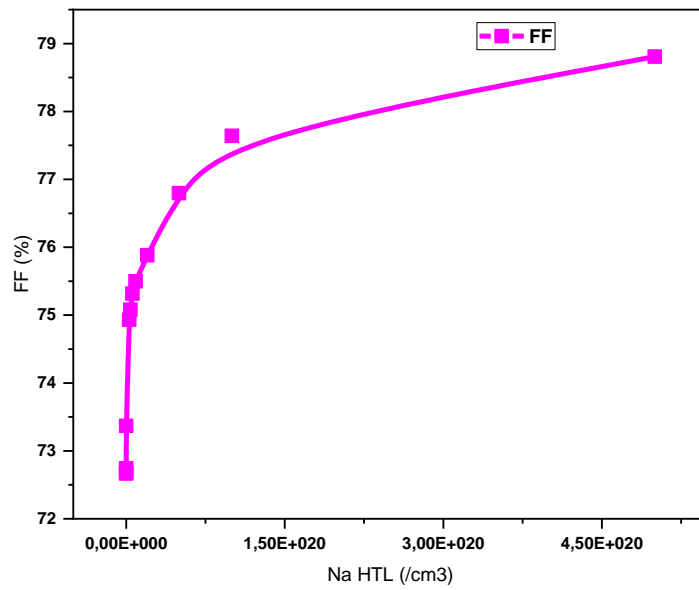


Figure III. 9: Facteur de forme en fonction de la concentration Na de la région I

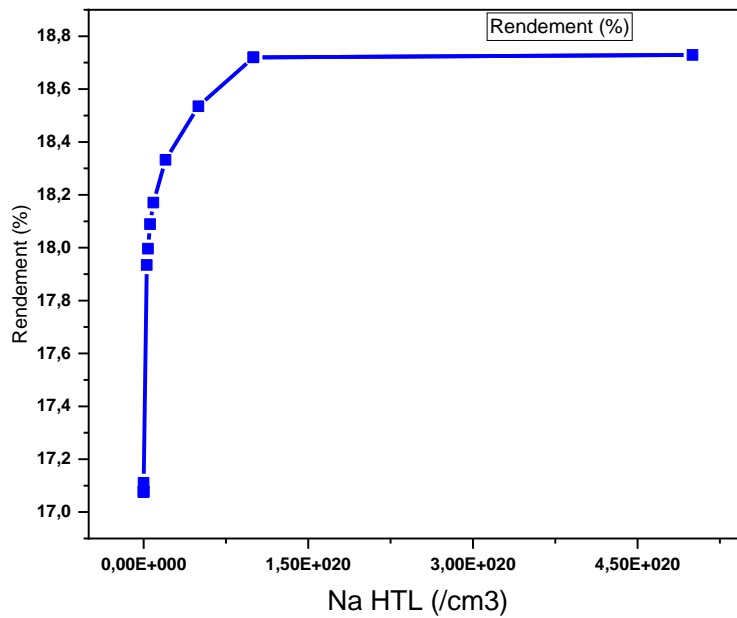


Figure III. 10: Rendement en fonction de la concentration Na de la région I

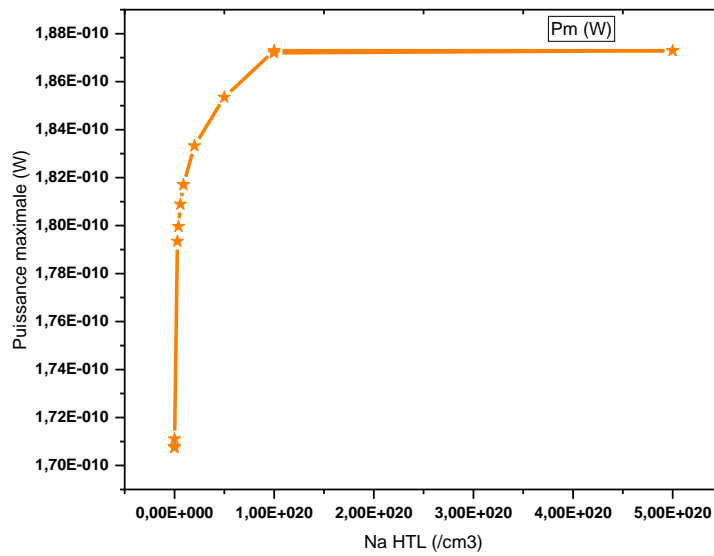


Figure III. 11: Puissance maximale en fonction de la concentration Na de la région 1

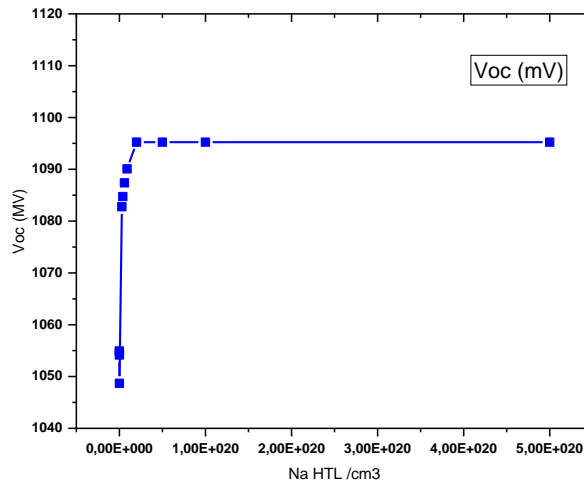


Figure III. 12: Voc en fonction de la concentration Na de la région 1

A partir du tableau précédent, nous avons constaté que la concentration Na qui correspond à un rendement élevé $\eta=18.73\%$, un facteur de forme élevé $FF=78.808\%$ et un courant de court circuit le plus fort $I_{sc}=1.87210^{-010}A$, est $Na=510^{20}/cm^3$

III.3.2. Région2 : Pérovskite

Nous avons fait varier la concentration des accepteurs Nd en gardant tous les autres paramètres constants , nous avons obtenu les résultats suivants résumés dans le tableau suivant

Tableau III. 4: Résultats obtenus de la simulation sur la région 2 Pérovskite

Paramètre Nd	1e8	3e9	6e9	1e10	1e9	0.5e9	1e11	1e12	1e13	1e14
Isc	2.21e-010	2.20e-010	2.20e-010	2.206e-010	2.20e-010	2.20e-010	2.21e-010	2.21e-010	2.21e-010	2.21e-010
JscmA/cm2	22.11	22.01	22.01	22.01	22.01	22.01	22.11	22.11	22.11	22.11
Voc mV	1079.91	1095.23	1095.23	1095.23	1095.23	1095.23	1079.91	1079.91	1079.91	1079.91
Pm	1.78e-010	1.87e-010	1.872e-010	1.872e-010	1.872e-010	1.872e-010	1.7826e-010	1.7826e-010	1.7826e-010	1.7826e-010
Vm	0.889983	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.889983	0.889983	0.889983	0.889983
Im	2.00296e-010	2.0129e-010	2.0129e-010	2.0129e-010	2.0129e-010	2.0129e-010	2.00296e-010	2.00296e-010	2.00296e-010	2.00296e-010
FF	74.6434	77.6407	77.6407	77.6407	77.6407	77.6407	74.6434	74.6434	74.6434	74.6434
Opt_int	0.100037	0.100037	0.100037	0.100037	0.100037	0.100037	0.100037	0.100037	0.100037	0.100037
Eff	17.826	18.72	18.72	18.72	18.72	18.72	17.826	17.826	17.826	17.826
QE	0.937694	0.933464	0.933464	0.933464	0.933464	0.933464	0.937694	0.937694	0.937694	0.937694

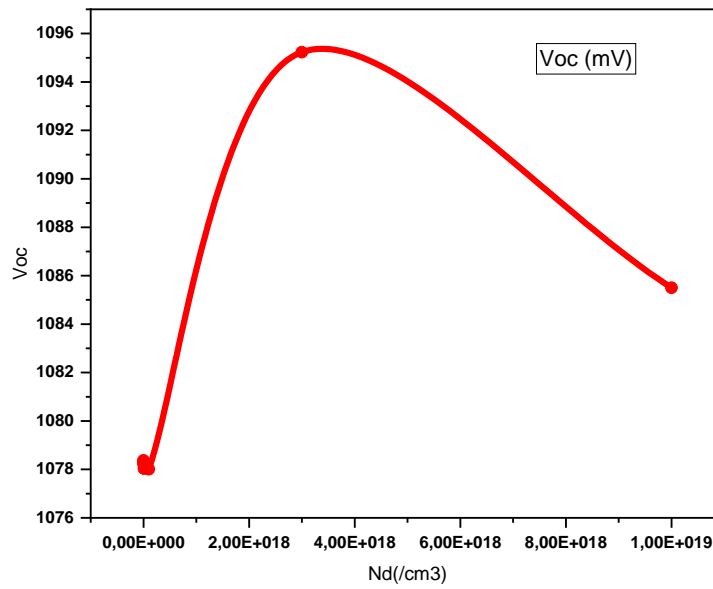


Figure III. 13: Voc en fonction de la concentration Nd de la région 2

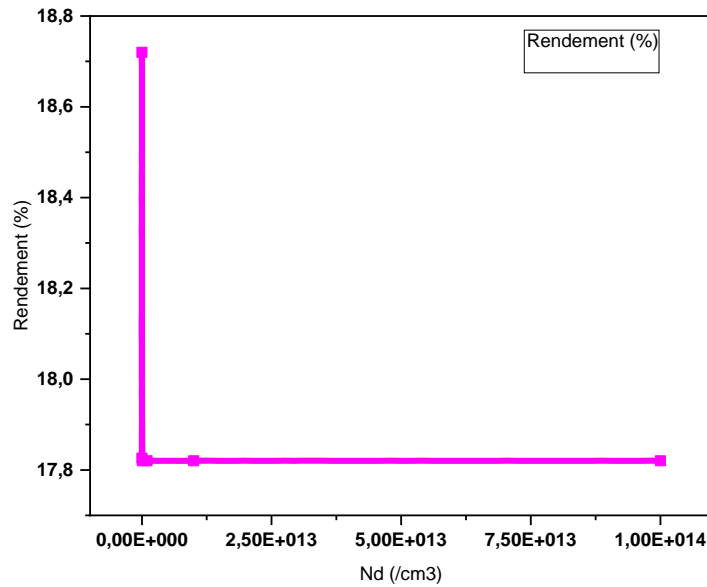


Figure III. 14: Rendement fonction de la concentration Nd de la région 2

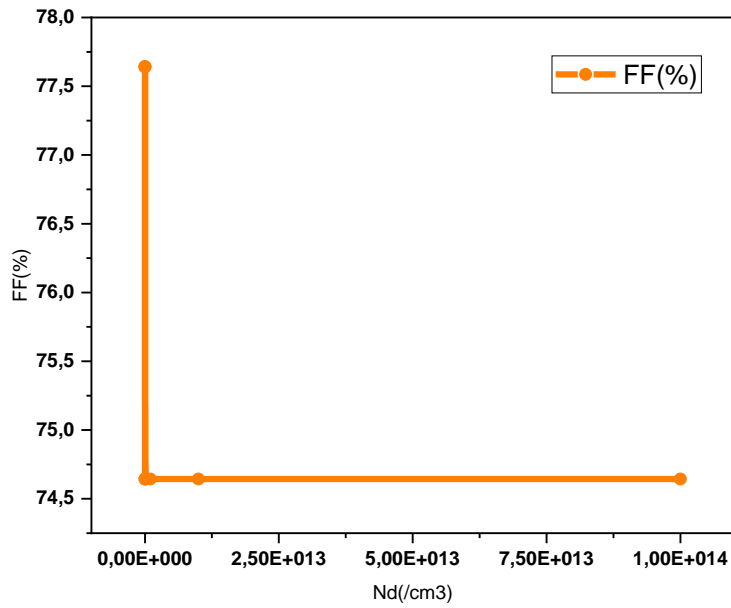


Figure III. 15: FF fonction de la concentration Nd de la région 2

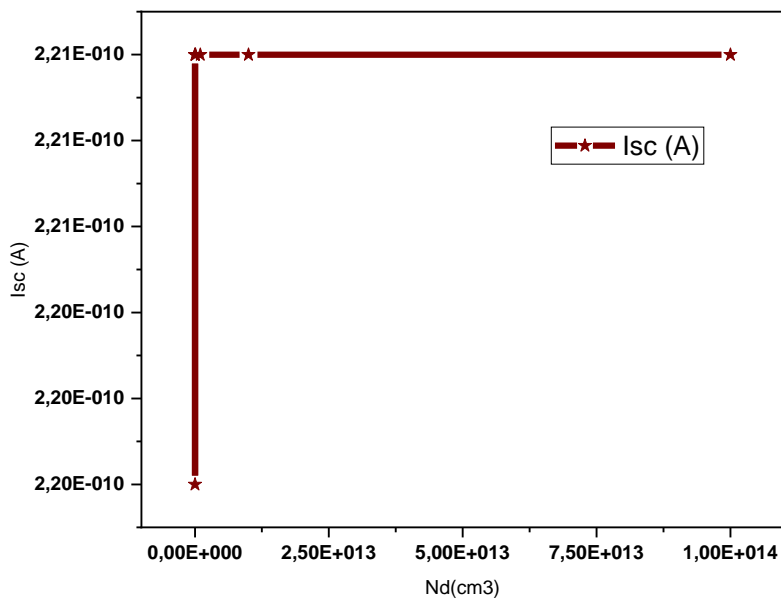


Figure III. 16: Densité de courant Jsc fonction de la concentration Nd de la région 2

Le tableau précédent ainsi que les graphes nous montrent que pour la concentration $Nd=1.10^{10}/cm^3$ de la pérovskite, permet d'avoir un rendement élevé $\eta=18.72\%$, un facteur de forme $FF=77.64\%$ et $Jsc = 2.20610^{-010} A$

III.3.3. Région 3 : HTL

Tableau III. 5: Résultats obtenus de la simulation sur la région 3: Spiro

Paramètre	3e18	1e19	1e17	1e16	1e15	1e14	1e13
Isc	2.2008 3e-010	2.2106e- 010	2.2627e- 010	2.321e- 010	2.30741e- 010	2.30246e- 010	2.30189e- 010
JscmA/cm2	22.008 3	22.106	22.627	23.21	23.0741	23.0246	23.0189
Voc mV	1095.2 3	1085.5	1078.01	1078.03	1078.22	1078.32	1078.37
Pm	1.8695 1e-010	1.53045e- 010	1.68336e- 010	1.58814e- 010	1.5386e- 010	1.53018e- 010	1.52969e- 010
Vm	0.93	0.739993	0.83998	0.809966	0.81	0.819552	0.819809
Im	2.0102 3e-010	2.0682e- 010	2.00405e- 010	1.96075e- 010	1.89951e- 010	1.86709e- 010	1.86591e- 010
FF	77.559 7	63.7792	69.0124	63.4721	61.8434	61.6315	61.6242
Opt_int	0.1000 37	0.100037	0.100037	0.100037	0.100037	0.100037	0.100037
Eff	18.695 1	15.3045	16.8336	15.8814	15.386	15.3018	15.2969
QE	0.9331 95	0.937337	0.959431	0.984148	0.978386	0.976288	0.976046
EQE			0.86899				

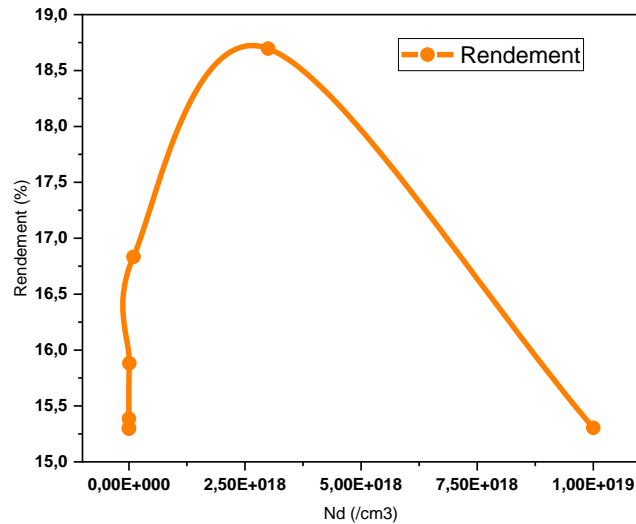


Figure III. 17: Rendement fonction de la concentration Nd de la région 3

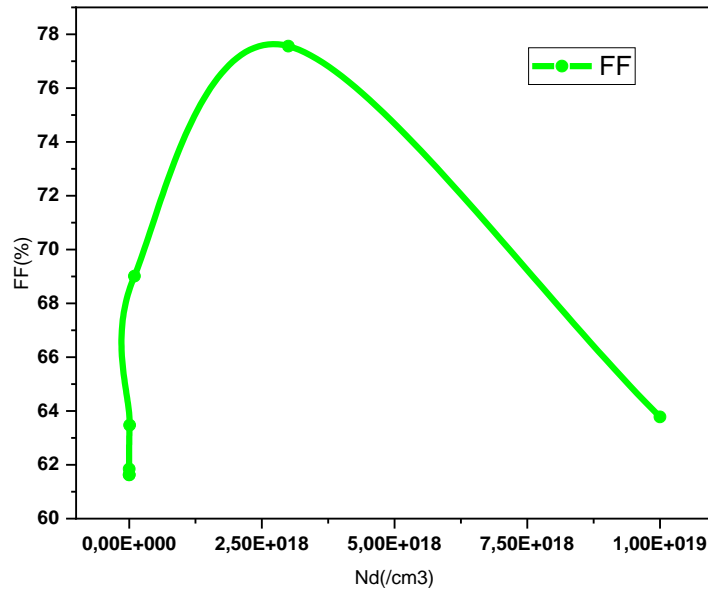


Figure III. 18: FF fonction de la concentration Nd de la région 3

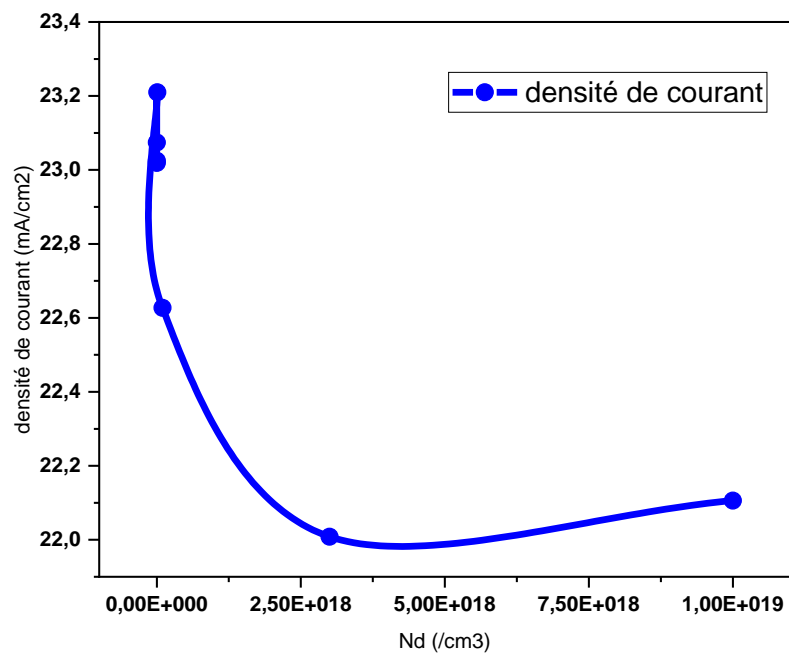


Figure III. 19: Jsc fonction de la concentration Nd de la région 3

III.4. Paramètre épaisseur

III.4.1. Région 1 :TiO₂

Nous avons fait varier l'épaisseur des accepteurs en gardant tous les autres paramètres constants , nous avons obtenu les résultats suivants résumés dans le tableau suivant :

Tableau III. 6: Résultats obtenus de la simulation sur la région 1: TiO₂

Paramètre Epaisseur μm	0.010	0.030	0.040	0.050	0.060	0.009	0.02	0.025
Isc	2.21889e-010	2.2061e-010	2.2021e-010	2.19916e-010	2.19694e-010	2.22026e-010	2.21144e-010	2.2086e-010
JscmA/cm ²	22.1889	22.061	22.021	21.9916	21.9694	22.2026	22.1144	22.086
Voc mV	1066.19	1079.89	1079.56	1079.25	1078.94	1059.09	1079.91	1080.02
Pm	1.72352e-010	1.77878e-010	1.77461e-010	1.77121e-010	1.76842e-010	1.70854e-010	1.7826e-010	1.78108e-010
Vm	0.849998	0.889915	0.89	0.889971	0.88	0.84	0.889983	0.89
Im	2.02768e-010	1.99882e-010	1.99394e-010	1.99019e-010	2.00957e-010	2.03398e-010	2.00296e-010	2.00121e-010
FF	72.8527	74.6651	74.6482	74.6262	74.6053	72.6588	74.6434	74.668
Opt_int	0.100037	0.100037	0.100037	0.100037	0.100037	0.100037	0.100037	0.100037
Eff	17.2352	17.7878	17.7461	17.7121	17.6842	17.0854	17.826	17.8108
QE	0.941811	0.93496	0.932976	0.931532	0.930449	0.942547	0.937694	0.936222

Traduisant ces résultats sous forme de graphes

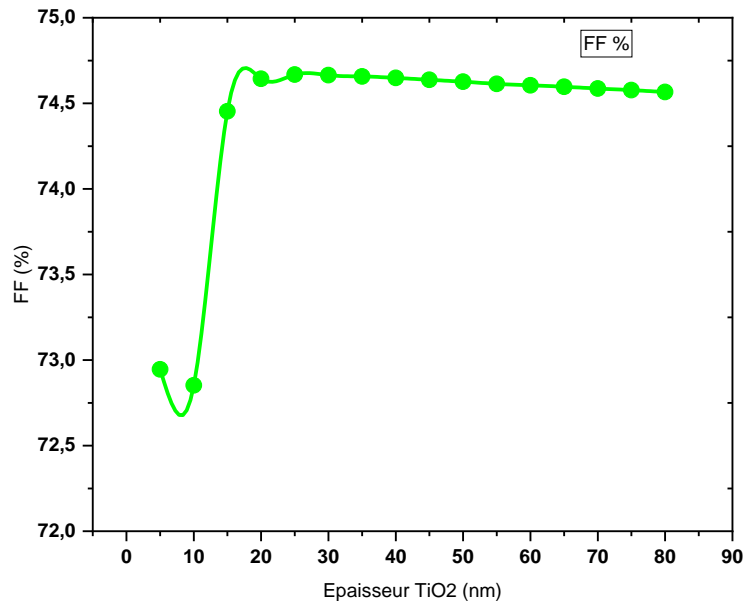


Figure III. 20: FF fonction de l'épaisseur de la région 1

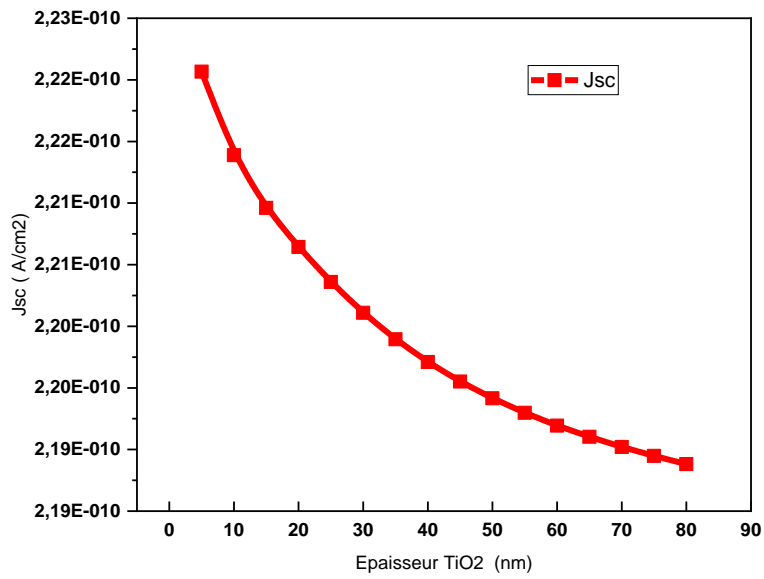


Figure III. 21: Jsc fonction de l'épaisseur de la région 1

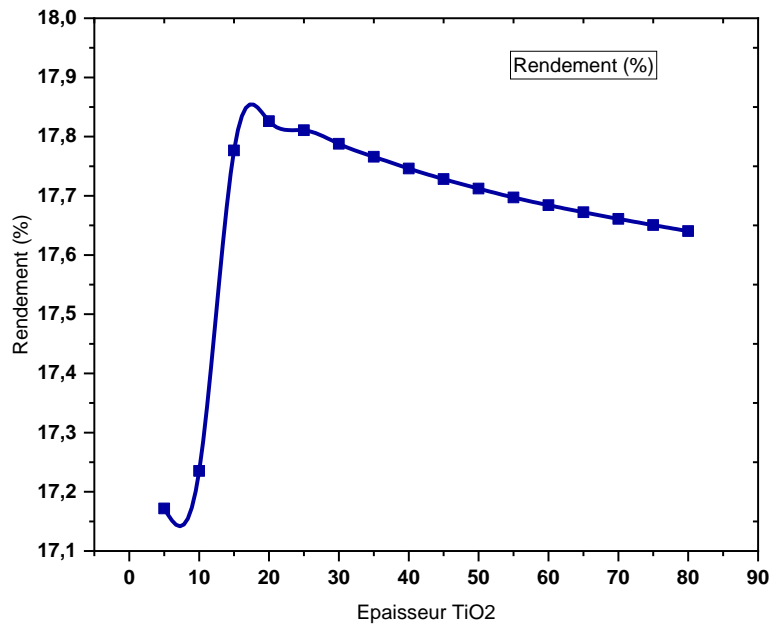


Figure III. 22:Rendement fonction de l'épaisseur de la région 1

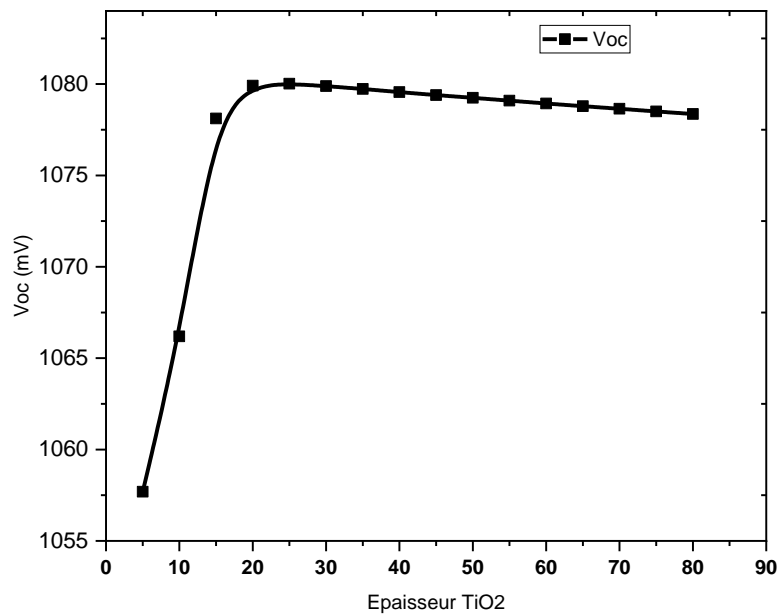


Figure III. 23:Voc fonction de l'épaisseur de la région 1

A partir du tableau et les graphes correspondants , nous constatons que pour une épaisseur $thick=0.02\mu m$, nous avons trouvé des paramètres électriques optimaux en

particulier un rendement $\eta=17.826\%$, un facteur de forme $FF=74.6434\%$, une densité de courant $J_{sc}=22.1144\text{mA/cm}^2$, $V_{oc}=1079.91\text{mV}$

III.4.2. Région 2 : Pérovskite

Nous avons fait varier l'épaisseur de la couche absorbeur Pérovskite en gardant tous les autres paramètres constants, nous avons obtenu les résultats suivants résumés dans le tableau suivant :

Tableau III. 7: Résultats obtenus de la simulation sur la région 2:

Paramètre Epaisseur	0.540	0.500	0.450	0.400	0.300	0.200	0.2500	0.10	0.350
Isc		2.20097 e-010	2.18566 e-010	2.16699 e-010	2.11246 e-010	2.00714 e-010	2.06968 e-010	1.72508 e-010	2.14343 e-010
JscmA/cm ²		22.0097	21.8566	21.6699	21.1246	20.0714	20.6968	17.2508	21.4343
Voc mV		1082.62	1086.11	1089.71	1096.58	1096.58	1099.82	1099.82	1093.17
Pm		1.79596 e-010	1.81022 e-010	1.82148 e-010	1.82891 e-010	1.78698 e-010	1.81761 e-010	1.57639 e-010	1.82885 e-010
Vm		0.88998 4	0.89996 7	0.9	0.92	0.94	0.93	0.95994 5	0.90998 5
Im		2.01797 e-010	2.01143 e-010	2.02387 e-010	1.98795 e-010	1.90104 e-010	1.95442 e-010	1.64217 e-010	2.00976 e-010
FF		75.3714	76.2562	77.1359	78.9521	81.1898	79.8502	83.087	78.0515
Opt_int		0.10003 7	0.10003 7	0.10003 7	0.10003 7	0.10003 7	0.10003 7	0.10003 7	0.10003 7
Eff		17.9596	18.1022	18.2148	18.2891	17.8698	18.1761	15.7639	18.2885
QE		0.93742 7	0.93700 3	0.93645 4	0.93480 9	0.93217 2	0.93361	0.92158	0.93574
EQE									

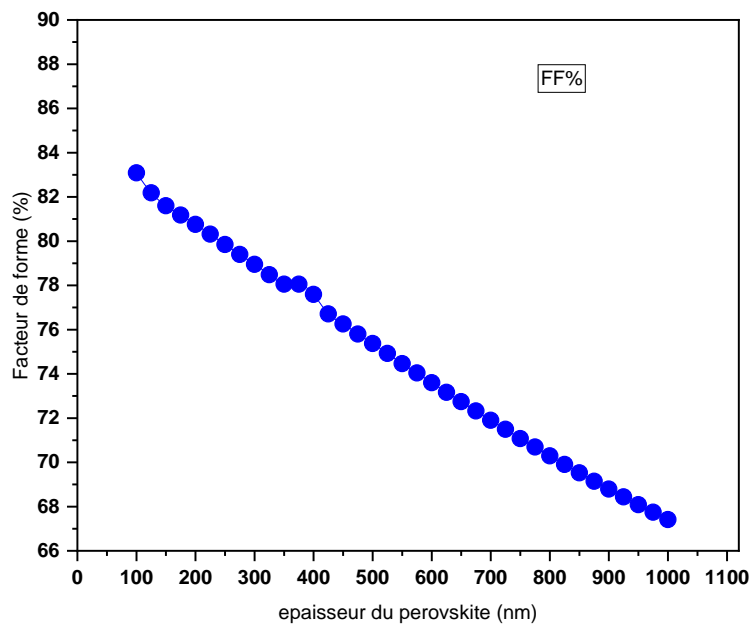


Figure III. 24: FF fonction de l'épaisseur de la région 2

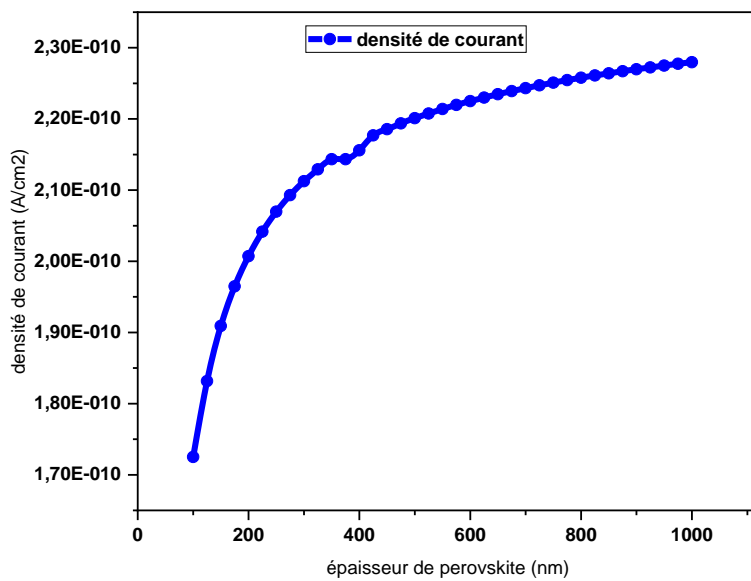


Figure III. 25: Jsc fonction de l'épaisseur de la région 2

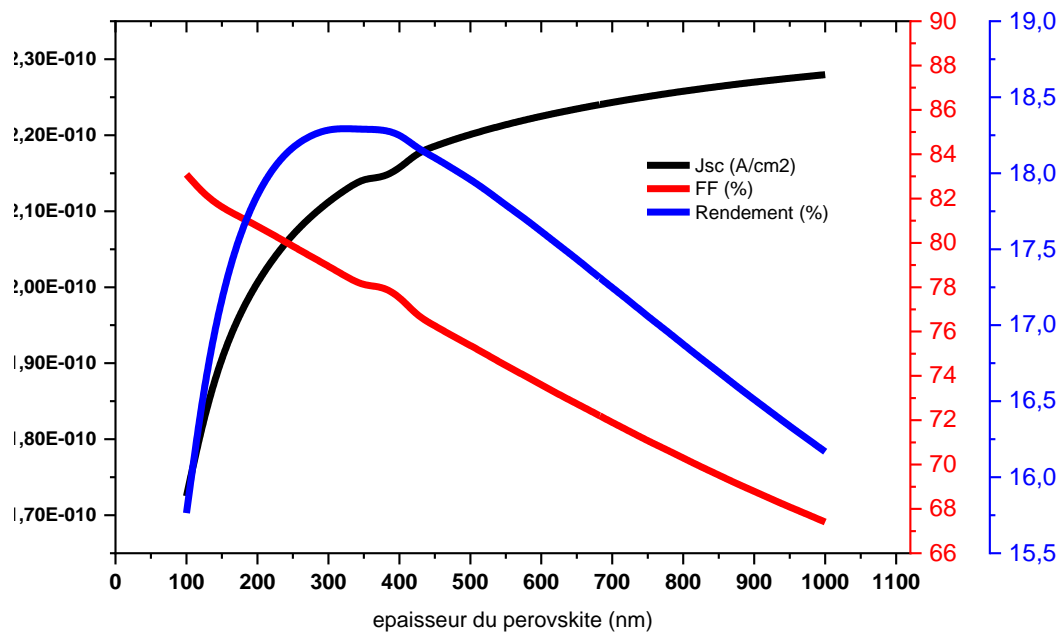


Figure III. 26: FF, Jsc, Rendement fonction de l'épaisseur de la région 2

L'épaisseur thick=0.3μm pour laquelle nous avons obtenu des paramètres électriques optimaux suivants : $\eta=18.2891\%$, $FF=78.9521\%$, $Jsc=21.1246 \text{ mA/cm}^2$, $Voc = 1096.58\text{mV}$,

III.4.3. Région3: Spiro OMED

Tableau III. 8: Résultats obtenus de la simulation sur la région 3

Paramètre	0.3	0.4	0.5	0.6	0.1	0.05	0.01	0.2
Isc	2.2093 5e-010	2.2074 1e-010	2.2074 1e-010	2.2074 1e-010	2.2137 7e-010	2.2137 7e-010	2.2114 4e-010	2.2114 4e-010
JscmA/cm²	22.093 5	22.074 1	22.074 1	22.074 1	22.137 7	22.137 7	22.114 4	22.114 4
Voc mV	1079.9 4	1079.9 5	1079.9 5	1079.9 5	1079.9 1	1079.9 1	1079.9 1	1079.9 1
Pm	1.7829 8e-010	1.7816 7e-010	1.7816 7e-010	1.7816 7e-010	1.7784 6e-010	1.7784 6e-010	1.7826 e-010	1.7826 e-010
Vm	0.8899 5	0.8899 82	0.8899 82	0.8899 82	0.88	0.88	0.8899 83	0.8899 83
Im	2.0034 6e-010	2.0019 2e-010	2.0019 2e-010	2.0019 2e-010	2.0209 8e-010	2.0209 8e-010	2.0029 6e-010	2.0029 6e-010
FF	74.727 8	74.737 9	74.737 9	74.737 9	74.391 6	74.391 6	74.643 4	74.643 4
Opt_int	0.1000 37	0.1000 37	0.1000 37	0.1000 37	0.1000 37		0.1000 37	0.1000 37
Eff	17.829 8	17.816 7	17.816 7	17.816 7	17.784 6	17.784 6	17.826	17.826
QE	0.9160 25	0.8962 7	0.8962 7	0.8962 7	0.9615 91	0.9615 91	0.9376 94	0.9376 94
EQE			0.4751 63	0.4751 63		0.4765 31	0.4765 31	

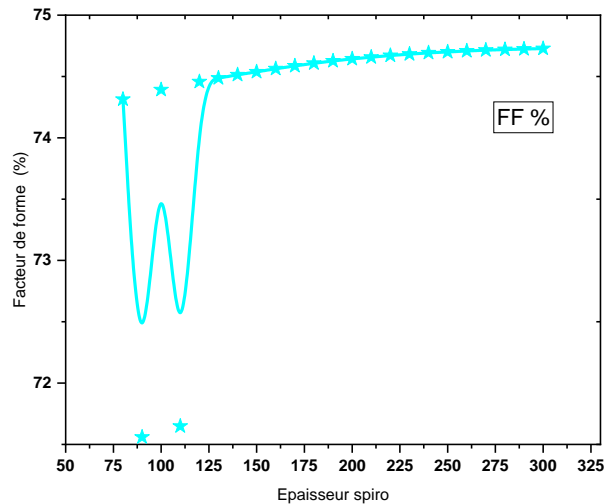


Figure III. 27: FF fonction de l'épaisseur de la région 3

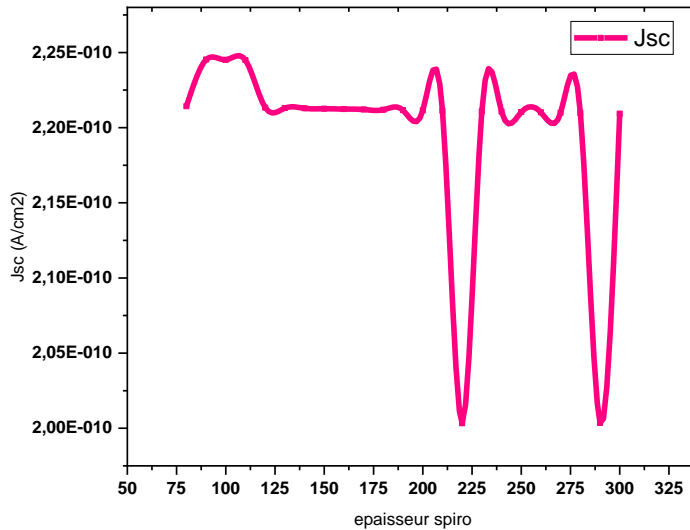


Figure III. 28: Jsc fonction de l'épaisseur de la région 3

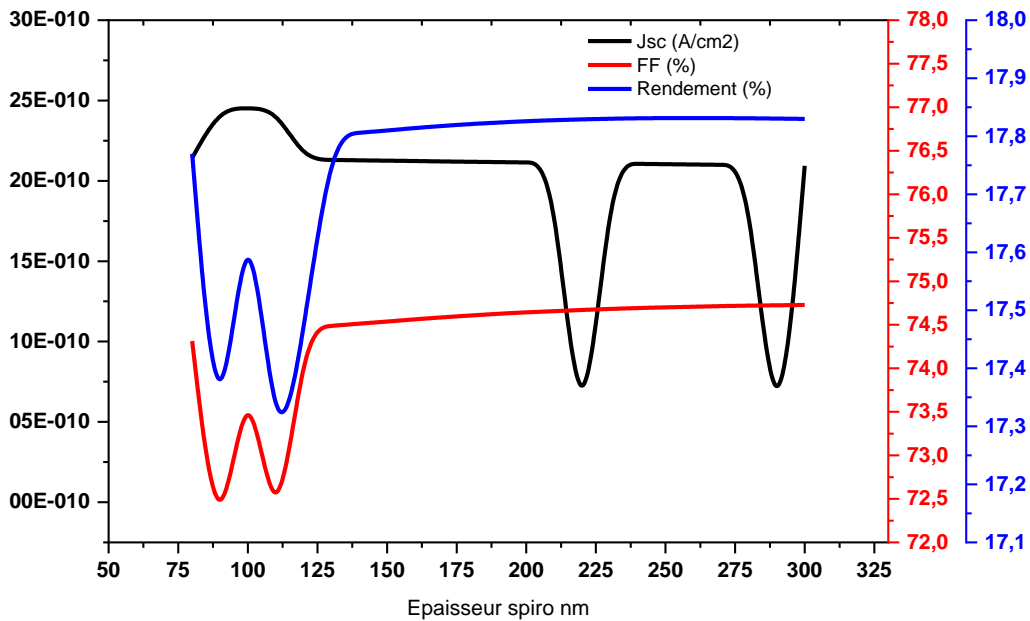


Figure III. 29: FF, Rendement, Jsc fonction de l'épaisseur de la région 3

Pour une épaisseur $thick=0.3\mu m$ de la couche de spiro, nous avons obtenu des paramètres électriques optimaux à savoir $\eta=17,8298\%$, $FF=74.7278\%$, $Jsc=22.0935mA/cm^2$, $Voc=1079.94mV$

Optimiser la cellule solaire à base de Pérovskite, revient à prendre les deux paramètres pour chaque couche pour lesquelles nous avons obtenu des grandeurs électriques optimales puis les injecter dans le programme de simulation pour obtenir une cellule solaire optimisée

III.5. Structure optimisée de notre cellule solaire photovoltaïque Tandem à base de pérovskite

Tableau III. 9: Résultats obtenus de la cellule solaire optimisée

Rendement quantique externe	EQE	0.840273
Courant de court circuit A	Isc	2.0883e-010
Tension de circuit ouvert V	Voc	1.13679
Puissance maximale W	Pm	1.91173e-010
Tension maximale V	Vm	0.969987
Courant maximale A	Im	1.97088e-010
Facteur de forme %	FF	80.5292
Intensité optique W/cm2	Opt_int	0.100037
Densité de courant	JscmAcm2	20.883
Tension de circuit ouvert en mV	VocmV	1136.79
Rendement %	Eff	19.1173

III.6. Caractéristique I-V de la cellule optimisée

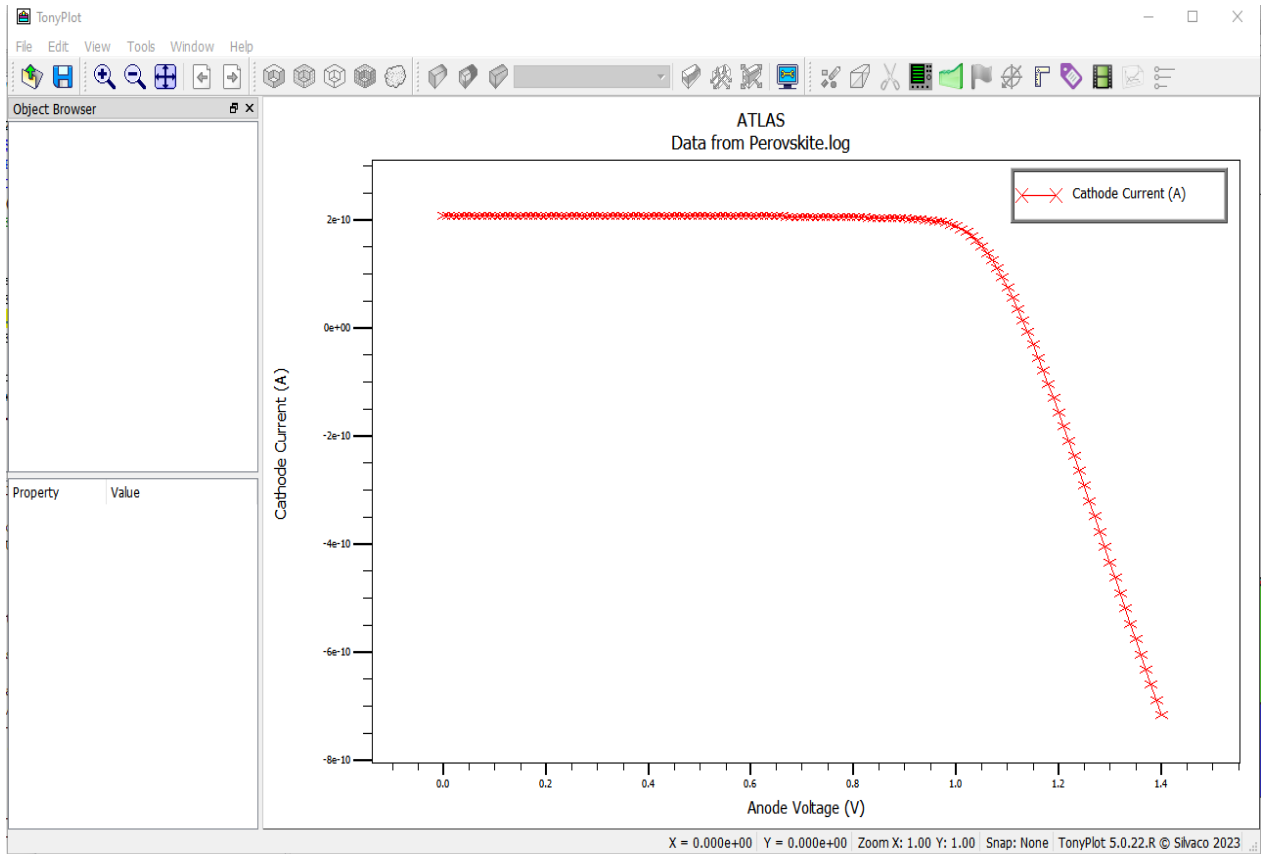


Figure III. 30: caractéristique de la cellule solaire tandem optimisée

Conclusion

Le chapitre III présente une étude sur la structure d'une cellule solaire à base de Pérovskite à simple anion. Les modèles de simulation utilisés sont expliqués, notamment la résolution numérique des équations de transport de charges dans les semi-conducteurs. Les modèles de recombinaison, y compris la recombinaison Shockley-Read-Hall et la recombinaison en surface, sont détaillés. La structure simulée, les paramètres et le maillage sont présentés. Les résultats de simulation pour différentes régions de la cellule sont analysés.

L'étude commence par la variation des concentrations des accepteurs dans la couche ETL (couche de transport d'électrons) de la cellule. Les résultats montrent qu'une concentration Na de $5 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ donne les meilleurs rendements et performances électriques.

Ensuite, la concentration des accepteurs dans la couche de Pérovskite est modifiée, montrant qu'une concentration Nd de $10^{10}/\text{cm}^3$ offre les meilleures performances.

La région HTL (couche de transport de trous) est ensuite examinée en variant la concentration des accepteurs. Les résultats indiquent que la concentration Nd de $10^{19}/\text{cm}^3$ conduit à de bons rendements.

Enfin, l'épaisseur des différentes couches de la cellule est ajustée. Dans la couche TiO_2 , une épaisseur de $0.02 \mu\text{m}$ produit les performances optimales, tandis que dans la couche Pérovskite, une épaisseur de $0.25 \mu\text{m}$ est idéale.

En conclusion, l'étude souligne les paramètres optimaux pour chaque région de la cellule solaire à base de Pérovskite, permettant d'obtenir les meilleurs rendements et performances.

Chapitre IV :

**De la cellule solaire au panneau solaire
photovoltaïque en utilisant Matlab
Simulink**

Introduction

La conversion d'une cellule solaire en un panneau solaire photovoltaïque implique plusieurs étapes, y compris la connexion en série ou en parallèle de plusieurs cellules pour former un panneau, l'ajout d'une interface de puissance, et la gestion des performances globales du panneau. Nous pouvons modéliser ces étapes en utilisant MATLAB Simulink, un outil de simulation et de modélisation largement utilisé pour les systèmes dynamiques.

IV.1. Les étapes de Modélisation :

Voici un aperçu des étapes que nous pourrions suivre pour modéliser ce processus dans Simulink :

IV.1.1. Modélisation de la cellule solaire :

Nous pouvons commencer par modéliser le comportement de la cellule solaire. Les cellules solaires peuvent être modélisées à l'aide d'équations électriques, telles que le modèle à un ou à deux diodes. Nous utilisons des blocs Simulink pour représenter les composants de la cellule solaire (résistance, diodes, courant de photo-génération, etc.).

IV.1.2. Connexion des cellules en série/parallèle :

Nous modélisons la connexion des cellules solaires en série ou en parallèle pour former un panneau solaire. Nous utilisons des blocs Simulink pour représenter ces connexions, en tenant compte des pertes potentielles et des comportements non linéaires.

IV.1.3. Interface de puissance :

Nous ajoutons un convertisseur DC-DC (comme un convertisseur abaisseur ou élévateur) pour modéliser l'interface de puissance entre le panneau solaire et le système de gestion de l'énergie. Nous pouvons utiliser les blocs Simulink associés pour simuler ce convertisseur.

IV.1.4. Système de gestion de la puissance :

Nous Intégrons un système de gestion de la puissance pour maximiser l'efficacité de conversion et suivre le point de puissance maximale (MPPT). Nous pouvons modéliser différentes techniques MPPT et intégrer des algorithmes de contrôle pour ajuster le point de fonctionnement du panneau solaire en fonction des conditions d'éclairage.

IV.1.5. Modélisation du comportement environnemental :

Nous Intégrons également un modèle simplifié de l'environnement solaire pour fournir des données d'irradiance et de température au modèle du panneau solaire. Cela permettra de simuler le comportement du panneau dans des conditions réelles.

IV.1.6. Analyse des performances :

Une fois que nous avons construit le modèle Simulink du panneau solaire photovoltaïque, nous pouvons exécuter des simulations pour analyser ses performances dans différentes conditions d'éclairage et de température. Nous pourrions ainsi observer les courbes I-V et P-V du panneau, ainsi que ses caractéristiques de fonctionnement.

Il est important de noter que la modélisation d'un système solaire photovoltaïque est un processus complexe qui peut nécessiter une compréhension approfondie de la physique des cellules solaires, des convertisseurs de puissance et des techniques de contrôle associées. Nous devons ajuster et valider notre modèle en fonction des données réelles pour obtenir des résultats précis

Dans notre cas, nous avons utilisé une cellule solaire photovoltaïque d'une surface $S=1\mu\text{m}^2$ dans la simulation par Tcad Silvaco

En général, la dimension d'un mini panneau solaire photovoltaïque classique est de 1.5cm x 5cm soit une surface de $S_{\text{panneau}}=7.5\text{cm}^2$ [44]

Nous allons prendre l'exemple d'un panneau solaire avec les caractéristiques suivantes :

- Tension en circuit ouvert : 22,3 V
- Courant de court-circuit : 1,13 A

Dans le chapitre III, nous avons obtenu les grandeurs électriques suivantes de la cellule solaire à base de pérovskite

Courant de court-circuit $I_{sc} = 2.088310^{-10}$ A

Tension de circuit ouvert $V_{oc}=1.13679$ V

Nous devrions avoir 20 cellules solaires en série pour atteindre une tension électrique $V_{oc} =22.3\text{V}$

Pour atteindre un courant $I_{sc}=1.13\text{A}$, nous devrions avoir $6 \cdot 10^9$ de circuits parallèles dont chacun contient 20 cellules solaires séries.

IV.2. Schéma bloc du panneau solaire à base de pérovskite

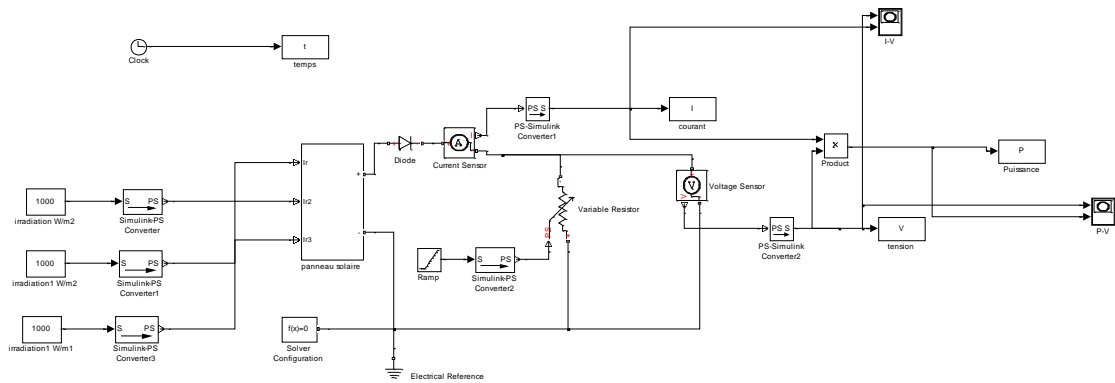


Figure IV 1: Représentation du panneau solaire par Matlab simulink

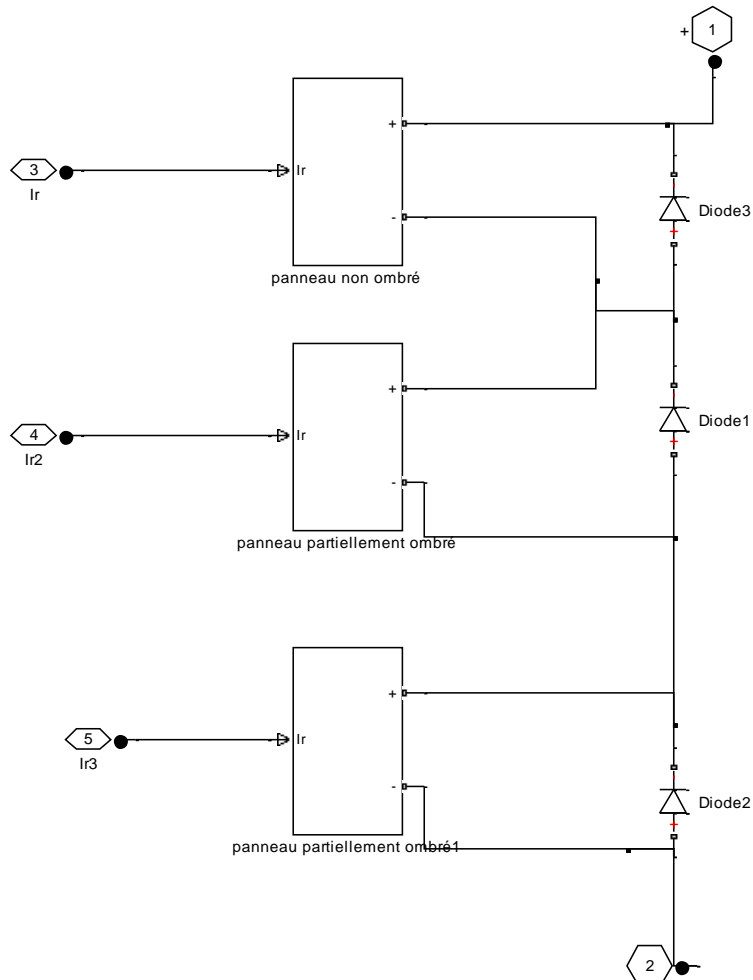


Figure IV 2 : représentation des trois panneaux solaires en série I en fonction de l'irradiation à température constante

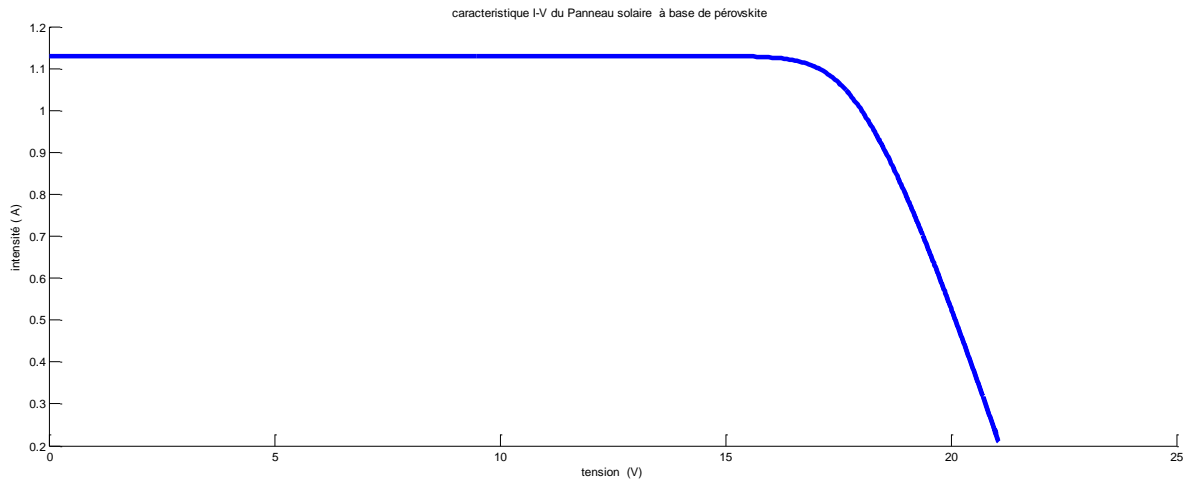


Figure IV 3 : Caractéristique I-V du panneau solaire à base de Pérovskite

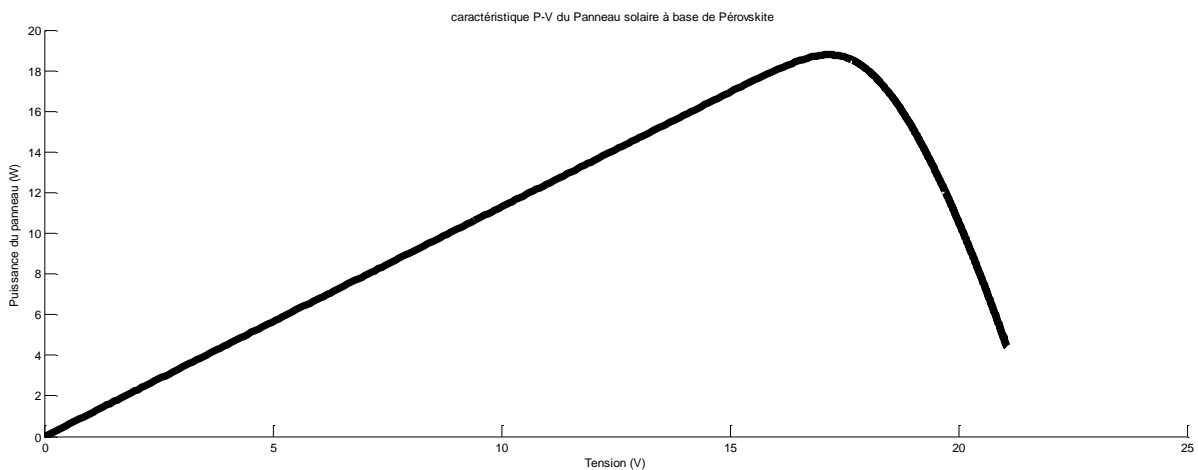


Figure IV 4: Caractéristique P-V du panneau solaire à base de pérovskite.

Conclusion

En somme, la conversion d'une cellule solaire en un panneau photovoltaïque est un processus complexe nécessitant une approche méthodique et une compréhension approfondie des principes physiques et des composants électriques. À travers l'utilisation de MATLAB Simulink, nous avons exploré les étapes de modélisation, de la cellule solaire aux panneaux en série ou en parallèle. La simulation réaliste incluant les conditions environnementales a été abordée, mais la validation avec des données réelles reste cruciale pour garantir la précision des résultats obtenus. En fin de compte, cette approche a été illustrée avec un exemple concret, démontrant l'application des caractéristiques électriques pour le dimensionnement du panneau et offrant une vision complète du processus de modélisation.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion de notre projet de fin d'études portant sur les cellules solaires à base de pérovskites hybrides, il est clair que ces matériaux présentent un potentiel prometteur en tant qu'alternative efficace et économique dans le domaine de la conversion photovoltaïque. Notre recherche approfondie et nos expérimentations de simulation ont montré que ces cellules solaires à base de pérovskites hybrides peuvent atteindre des rendements élevés sans présenter le phénomène d'hystérésis, ce qui constitue un pas significatif vers leur intégration commerciale.

Au cours de ce projet, nous avons examiné en détail les principaux aspects de ces cellules solaires, notamment leur structure, leurs mécanismes de conversion d'énergie et leurs performances.

Nous avons constaté que malgré leurs avantages potentiels, les cellules solaires à base de pérovskites hybrides présentent des défis liés à la stabilité, à la reproductibilité et à la réduction de l'hystérésis. Nous avons examiné les différentes stratégies et avancées récentes visant à atténuer ces problèmes, telles que l'ingénierie d'interfaces, la passivation de défauts, et l'optimisation des couches de transport de charges. Ces efforts ont montré des résultats prometteurs pour améliorer les performances et la fiabilité des cellules solaires à base de pérovskites hybrides.

Dans ce mémoire de fin d'études, nous avons étudié les effets des paramètres d'épaisseur et du dopage sur les grandeurs électriques de la cellule solaire à base de pérovskite de type Glass/FTO/ETL/pérovskite/HTL/ Au, sous le logiciel TCAD-Silvaco.

Nous avons présenté dans le premier chapitre la Structure schématique générale d'une cellule solaire à pérovskite qui constituaient la cellule solaire photovoltaïque à base de Pérovskite à savoir la couche de transport d'électron, la couche active qui est la pérovskite et la couche de transport de trous et une partie consacrée à la structure de la pérovskite à simple cation.

Dans le chapitre II, nous avons traité en détail la Structure d'une cellule solaire photovoltaïque à base de pérovskite où nous avons montré les architectures des deux types de configurations n.i.p et p.i.n En plus, Nous avons spécifié les matériaux utilisés dans les trois couches à savoir TIO_2 , Absorbeur pérovskite et le Spiro

Conclusion générale

Dans le chapitre III, nous avons présenté les résultats de la simulation numérique sous SILVACO-ATLAS. Nous avons varié un paramètre et fixé le second, ce qui nous a permis de dresser des tableaux où toutes les grandeurs électriques sont calculées. A partir des différents tableaux obtenus, nous avons relevé les valeurs optimales qui permettent d'avoir une nouvelle cellule solaire optimisée avec un rendement dépassant les 19%.

Dans le chapitre IV, nous avons utilisé MATLAB Simulink., Nous avons exploré les étapes de modélisation, de la cellule solaire aux panneaux en série ou en parallèle. La simulation réaliste incluant les conditions environnementales a été abordée, mais la validation avec des données réelles reste cruciale pour garantir la précision des résultats obtenus. En fin de compte, cette approche a été illustrée avec un exemple concret, démontrant l'application des caractéristiques électriques pour le dimensionnement du panneau et offrant une vision complète du processus de modélisation.

Cependant, il reste encore des défis à relever pour parvenir à une commercialisation et à une adoption à grande échelle de ces cellules solaires. Des recherches continues seront nécessaires pour améliorer leur stabilité à long terme, leur durabilité et leur performance dans des conditions variables. De plus, l'échelle de production et les coûts associés devront être optimisés pour rivaliser avec les technologies photovoltaïques établies.

Comme perspectives, nous pourrions varier d'autres paramètres physiques comme par exemple la densité d'état effective de conduction et de valence respectivement des différentes couches, varier les mobilités des électrons et trous, l'affinité, voir si la structure de la cellule solaire à base pérovskite présente le phénomène hystérésis

En définitive, notre projet de fin d'études a apporté des contributions précieuses à la compréhension et à l'avancement des cellules solaires à base de pérovskites hybrides. Nous espérons que nos résultats stimuleront davantage de recherches et de collaborations dans ce domaine passionnant, ouvrant la voie à une source d'énergie propre, efficace et durable pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux croissants.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). Renewable Power Generation Costs in 2019. Available at: <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-power-generation-costs-in-2019>
- [2] International Energy Agency (IEA). (2020). Renewables 2020 - Analysis and Forecast to 2025. Available at: <https://www.iea.org/reports/renewables-2020>
- [3] BloombergNEF. (2021). New Energy Outlook 2021. Available at: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/>
- [4] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2021). Current and Future Cost of Photovoltaics. Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-topics/photovoltaics/current-future-cost-of-photovoltaics.html>
- [5] Photovoltaics Report. (2021). A comprehensive analysis of PV costs and trends. Available at: <https://www.photovoltaic-report.com/>
- [6] <https://www.revolution-energetique.com/les-3-centrales-solaires-photovoltaïques-les-plus-puissantes-du-monde>
- [7] http://www.univ-usto.dz/theses_en_ligne/doc_num.php?explnum_id=3363 Le solaire photovoltaïque
- [8] <http://bib.univ-oeb.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/11378/1/m%20final%203.pdf>
Etude et Simulation D'une Cellule Photovoltaïque à Pérovskite mémoire de Master Université Larbi Bun M'Hidi O.E.B 2021
- [9] https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/04/IEA_PVPS_Snapshot_2023.pdf
International Energy Agency (IEA)
- [10] Best Research-cell Efficiencies Chart, <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.20230925.pdf> (accessed: juin 2023)
- [11] <http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/20551/MPHY119.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [12] NREL (National Renewable Energy Laboratory). (2021). Perovskite Photovoltaics. Available at: <https://www.nrel.gov/pv/perovskite.html>

Références bibliographiques

- [13] Yang, W. S., Noh, J. H., Jeon, N. J., Kim, Y. C., Ryu, S., Seo, J., & Seok, S. I. (2015). High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange. *Science*, 348(6240), 1234-1237.
- [14] Park, N. G. (2015). Perovskite solar cells: An emerging photovoltaic technology. *Materials Today*, 18(2), 65-72
- [15] O. Ourahmoun * Les cellules solaires à base de matériaux pérovskites - Structures et performances *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 21 N°4 (2018) 515 - 520
- [16] <https://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/effet-photovoltaque.html>
- [17] KHELIFI Tassadit Synthèse et caractérisation des nanoparticules à base de Bi_{1-x}Al_xFeO₃. Application : capteur d'humidité. mémoire de Master 2017 UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
- [18] Pia Dally Cellules Solaires à base de Pérovskites : De la caractérisation des matériaux à l'amélioration des rendements et de la stabilité thèse de doctorat Université de Grenoble Alpes 2019
- [19] MEKLIICHE Said Etude et Simulation des paramètres électriques d'une cellule solaire photovoltaïque à base de Silicium Mémoire de Master UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU 2017
- [20] Laxmi Nakka, Yuanhang Cheng,* Armin Gerhard Aberle, and Fen Lin* Analytical Review of Spiro-OMeTAD Hole Transport Materials: Paths Toward Stable and Efficient Perovskite Solar Cells *Adv. Energy Sustainability Res.* 2022, 3, 2200045
- [21] K. Aitola *et al.*, "Carbon nanotube-based hybrid hole-transporting material and selective contact for high efficiency perovskite solar cells," *Energy Environ. Sci.*, vol. 9, no. 2, pp. 461–466, 2016, doi: 10.1039/c5ee03394b
- [1] A. Detollenaere, "Snapshot of Global PV Markets - 2020," pp. 1–20, 2020
- [29] M. T, K. A, T. K, and S. Y, "Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 131, no. 17, pp. 6050–1, 2009.
- [30] N. Park, "Scalable fabrication and coating," *Nat. Rev. Mater.*, 2020, doi: 10.1038/s41578-019-0176-2
- [31] "National Renewable Energy Laboratory, Best Research-Cell Efficiency Chart, <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (accessed: August 2019).
- [4] R. F. Pierret and J. G. Copyeditor, "DEViCE ' I," 1996

Références bibliographiques

- [5] K. Seki, A. Furube, and Y. Yoshida, “Theoretical limit of power conversion efficiency for organic and hybrid halide perovskite photovoltaics.”
- 6, Aly Elakshar Single-walled carbon nanotubes in perovskite solar cell MASTER’S THESIS2020
- [34] K. Azizi and A. Ghaffari, “Parameter estimation of photovoltaic panels and a model-based maximum power point tracking algorithm,” vol. 043504, 2016, doi: 10.1063/1.4959975.
- [35] L. Perovski, “Perovskites-Based Solar Cells : A Review of Recent Progress , Materials and Processing Methods,” 2018, doi: 10.3390/ma11050729.
- [36] H. Lee *et al.*, “Effect of Halide Ion Migration on the Electrical Properties of Methylammonium Lead Tri-Iodide Perovskite Solar Cells,” *J. Phys. Chem. C*, vol. 123, no. 29, pp. 17728–17734, 2019, doi: 10.1021/acs.jpcc.9b04662.
- [37] D. Meggiolaro, E. Mosconi, and F. De Angelis, “Formation of Surface Defects Dominates Ion Migration in Lead-Halide Perovskites,” *ACS Energy Lett.*, vol. 4, no. 3, pp. 779–785, 2019, doi: 10.1021/acsenerylett.9b00247.
- [38] L. Zhou, Y. Zuo, T. K. Mallick, and S. Sundaram, “Enhanced Efficiency of Carbon-Based Mesoscopic Perovskite Solar Cells through a Tungsten Oxide Nanoparticle Additive in the Carbon Electrode,” *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–8, 2019, doi: 10.1038/s41598-019-45374-x.
- [39] S. Valastro *et al.*, “Full Efficiency Recovery in Hole-Transporting Layer-Free Perovskite Solar Cells With Free-Standing Dry-Carbon Top-Contacts,” *Front. Chem.*, vol. 8, no. April, pp. 1–8, 2020, doi: 10.3389/fchem.2020.00200.
- [40] J. Asad *et al.*, “Perovskite solar cells free of hole transport layer,” *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, vol. 90, no. 3, pp. 443–449, 2019, doi: 10.1007/s10971-019-04957-w.
- [41] A. F. Akbulatov *et al.*, “Light or Heat : What is Killing Lead Halide Perovskites under Solar Cell Operation Conditions?,” 2019, doi: 10.1021/acs.jpcelett.9b03308.
- [42] S. Aharon, B. El Cohen, and L. Etgar, “Hybrid lead halide iodide and lead halide bromide in efficient hole conductor free perovskite solar cell,” *J. Phys. Chem. C*, vol. 118, no. 30, pp. 17160–17165, 2014, doi: 10.1021/jp5023407.
- [43] G. Grancini *et al.*, “One-Year stable perovskite solar cells by 2D/3D interface engineering,” *Nat. Commun.*, vol. 8, pp. 1–8, 2017, doi: 10.1038/ncomms15684.
- [44] <https://beemenergy.fr/blogs/panneaux-solaires/dimension-panneau-solaire>.

Annexes

Annexe 1 :

Tcad silvaco

TCAD (Technology Computer-Aided Design) est une abréviation générale utilisée pour décrire les logiciels de conception assistée par ordinateur pour la technologie des semi-conducteurs. Dans le contexte de votre question, "TCAD Silvaco" fait référence à la suite logicielle de Silvaco qui est utilisée pour la simulation et la conception de dispositifs et de circuits électroniques.

TCAD Silvaco comprend généralement plusieurs outils, tels que :

1. **Atlas** : Comme mentionné précédemment, Atlas est un outil de simulation de dispositifs basé sur la méthode des éléments finis. Il est utilisé pour simuler le comportement des dispositifs électroniques à l'échelle microscopique, en prenant en compte les propriétés électroniques et physiques des matériaux utilisés dans la fabrication de semi-conducteurs.
2. **Athena** : Athena est un outil de simulation de procédés qui permet de modéliser et de simuler différentes étapes du processus de fabrication de semi-conducteurs, telles que la diffusion, l'implantation ionique, la croissance épitaxiale, etc.
3. **Victory Process** : Il s'agit d'un outil de simulation de procédés 2D et 3D pour la modélisation avancée des étapes de fabrication de semi-conducteurs.
4. **Victory Device** : Cet outil permet de simuler les dispositifs électroniques en utilisant une méthode de simulation à base de dispositifs.
5. **Expert** : Expert est un outil de simulation de circuits analogiques, numériques et RF (Radio Fréquence) qui prend en charge la conception et l'analyse des circuits électroniques.
6. **Utmost IV** : Utmost IV est un outil de caractérisation électrique pour l'extraction des paramètres des dispositifs à partir de mesures expérimentales.

En combinant ces différents outils TCAD, les concepteurs de semi-conducteurs peuvent simuler le comportement des dispositifs électroniques, optimiser leur conception, évaluer leur performance et valider leur fonctionnement avant de passer à la phase de fabrication réelle. Cela permet de réduire les coûts et le temps de développement, tout en améliorant la qualité et la fiabilité des produits électroniques. TCAD Silvaco est donc largement utilisé dans l'industrie des semi-conducteurs pour la conception et la fabrication de dispositifs électroniques avancés

Annexes

Application Atlas pour les cellules tandem

L'application d'Atlas dans le contexte des cellules tandem se réfère à l'utilisation du logiciel de simulation Atlas, développé par Silvaco, pour modéliser et étudier les dispositifs de cellules solaires tandem.

Les cellules solaires tandem sont des dispositifs photovoltaïques qui utilisent plusieurs couches de matériaux semi-conducteurs pour absorber différentes longueurs d'onde de la lumière solaire, augmentant ainsi leur efficacité de conversion d'énergie. En utilisant des couches de matériaux avec des bandes interdites (gaps) adaptés, les cellules tandem peuvent exploiter plus efficacement le spectre solaire pour produire de l'électricité.

Atlas permet de simuler ces dispositifs de cellules tandem en prenant en compte les propriétés électroniques, optiques et physiques des matériaux utilisés dans la structure des cellules. Voici quelques aspects clés de l'application d'Atlas pour les cellules tandem :

1. **Modélisation des matériaux** : Atlas permet de modéliser les propriétés électroniques et optiques des différents matériaux utilisés dans les cellules tandem, tels que les semi-conducteurs à gap variable. Cela permet d'analyser comment chaque couche absorbe la lumière à différentes longueurs d'onde et de déterminer les rendements quantiques pour chaque couche.
2. **Modélisation de la structure de la cellule** : Vous pouvez définir la structure de la cellule tandem dans Atlas en spécifiant les couches de matériaux, leurs épaisseurs et leurs propriétés. L'outil permet de concevoir différentes configurations de cellules tandem pour optimiser leur efficacité.
3. **Simulation électrique** : Atlas permet de simuler le comportement électrique des cellules tandem, y compris les caractéristiques courant-tension (I-V), les rendements quantiques, l'efficacité, et d'autres performances électriques.
4. **Optimisation de la conception** : En utilisant Atlas, les concepteurs peuvent évaluer différentes configurations de cellules tandem, expérimenter avec divers matériaux et paramètres de fabrication, et ainsi optimiser la conception pour obtenir les meilleures performances possibles.
5. **Analyse des mécanismes physiques** : L'un des avantages de l'utilisation d'Atlas est qu'il permet d'analyser les mécanismes physiques sous-jacents qui affectent les performances des cellules tandem, tels que les effets de recombinaison, la transmission, la réflexion et la diffusion de la lumière, etc.

Annexes

En résumé, l'application d'Atlas pour les cellules tandem permet aux chercheurs et aux concepteurs de simuler et d'analyser en détail ces dispositifs photovoltaïques complexes, en vue d'optimiser leur efficacité et leur performance globale dans la conversion de l'énergie solaire en électricité. Cela contribue à accélérer le développement des technologies solaires avancées et à favoriser l'adoption de solutions énergétiques plus durables.