



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et Technologies

Département : Génie Électrique

N° d'ordre : M...../GM/2024



UNIVERSITE
Abdelhamid Ibn Badis
MOSTAGANEM

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE DE MASTER ACADÉMIQUE

Filière : Énergie Renouvelable en électrotechnique

Thème :

*Performance des panneaux solaires
photovoltaïques à base de cellules solaires
Tandem pérovskite/CIGS*

Présenté par :

- ❖ BENGHERNAOUT Soltana Kaoute
- ❖ KHELIL Fatima Zohra

Soutenu le 25 / 06 / 2024 devant le jury composé de :

Président :	YAGOUBI Benabdellah	Professeur	UMAB
Examineur :	MISSOUM Ibrahim	MCB	UMAB
Encadreur :	BAGHDAD Hadri	Professeur	UMAB

Année Universitaire : 2023 / 2024



Remerciements

Nous tenons d'abord à remercier Allah de tout puissant et miséricordieux qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail qui a fait de ce jour une date inoubliablement gravée dans nos cœurs.

Nous adressons notre profonde gratitude à nos enseignants du département de génie électrique Université de Mostaganem pour les efforts qui ont déployé avec leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques afin d'arriver à ce stade.

Nous tenons aussi à exprimer nos plus grands sincères remerciements à l'égard de notre encadreur, notre guide Pr. Hadri BAGHDAD pour nous avoir assisté et orienté, aidé et conseillé avec passion tout au long de ce travail de recherche.

Nous aimerions également remercier le Pr. Benabdellah YAGOUBI d'avoir présidé notre jury.

Nous adressons nos remerciements au Docteur. Ibrahim MISSOUM MCB D'avoir accepté d'examiner notre modeste travail.

Nous tenons remercier La famille Benghernaout Et Khelil, pour le soutien continu qu'elle nous a apporté tout aux longs de ces années d'études.

Nous tenons aussi à remercier la Doctorante. Halima ZEBOUJ pour nous avoir aidé dans la réalisation de ce mémoire et pour ses conseils.

Je n'oublierai pas non plus tous ceux qui, de près ou de loin, par leur compétence, leur aide technique et leurs conseils ont contribué à la réalisation de ce travail.



Dédicaces

Je dédie ce modeste effort À mes chers ça représente le fruit de leur soutien et encouragement

À Mon Chère Papa

Tout l'encre du monde ne pourrait suffire pour exprimer mes sentiments envers un être très cher. Vous avez toujours été mon école de patience, de confiance et surtout d'espoir et d'amour. Vous êtes et vous resterez pour moi ma référence, la lumière qui illumine mon chemin. Ce travail est le résultat de l'esprit de sacrifice dont vous avez fait preuve, de l'encouragement et le soutien que vous ne cessez de manifester, j'espère que vous y trouverez les fruits de votre semence et le témoignage de ma grande fierté de vous avoir comme père. J'implore Dieu, tout puissant, de vous accorder une bonne santé, une longue vie et beaucoup de bonheur.

À Ma chère Maman

Aucune dédicace très chère maman, ne pourrait exprimer la profondeur des sentiments que j'éprouve pour vous, Vous avez guetté mes pas, et m'avez couvé de tendresse, ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Vous m'avez aidé et soutenu pendant de nombreuses années avec à chaque fois une attention renouvelée. Puisse Dieu, tout puissant vous combler de santé, de bonheur et vous procurer une longue vie.

À Mes chères Sœurs

Khadoudja Et ma petite ange Badia source de bonheur je Vous aime beaucoup Je vous souhaite beaucoup de succès, de prospérité et une vie pleine de joie et de bonheur.

À Ma binôme Fatima Zohra

Aucune dédicace ne peut exprimer ma gratitude de t'avoir comme amie et sœur, dans cette dernière ligne droite de nos études, tu as été bien plus qu'une simple partenaire académique. Chaque séance de révision, chaque projet, chaque moment de doute ou de succès, tu étais là, me soutenant de tout ton cœur et de toute ta persévérance. Ensemble, nous avons surmonté les obstacles, appris les uns des autres. Notre complicité a transformé ces années d'études en une aventure inoubliable, ponctuée de rires, de défis relevés et de souvenirs précieux. Je te souhaite beaucoup de succès, de prospérité et une vie pleine de joie et de bonheur.

À Mes amis

Mes collègues de classe En souvenir des moments heureux passés ensemble, avec mes vœux sincères de réussite, bonheur, santé et de prospérité.

Sul



Dédicaces

À mes chers parents, j'espère que Dieu aura pitié d'eux, pour tous leurs sacrifices, leur amour et leur tendresse, J'aurais aimé qu'ils soient avec moi dans ce jour spécial.

À mes chères sœurs pour leurs encouragements constants, leur soutien moral et leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

À ma copine pour m'avoir soutenu tout au long de mon parcours universitaire.

Tima

Résumé

Ce mémoire porte sur la modélisation, la simulation et l'optimisation des performances de cellules solaires à base de pérovskite, CIGS et de structures tandem pérovskite/CIGS.

Après avoir introduit les concepts théoriques de base, l'étude détaille les architectures, le fonctionnement et les caractéristiques clés de ces différentes technologies photovoltaïques émergentes, en soulignant les processus de recombinaison limitant les performances.

Des simulations numériques ont permis d'optimiser les paramètres physiques des cellules simples en pérovskite (rendement maximal de 31,93%) et CIGS (23,91%). Une structure tandem pérovskite/CIGS à 2 terminaux optimisée offre un rendement prometteur de 39,13%.

Un modèle MATLAB/Simulink explorant différentes configurations série/parallèle met en évidence le potentiel d'augmentation d'efficacité par la combinaison pérovskite/CIGS. Cette approche de modélisation permet d'optimiser la conception avant fabrication.

Cette étude apporte ainsi une compréhension approfondie de ces technologies à hautes performances, combinant théorie, simulations et optimisations. Les résultats ouvrent des perspectives prometteuses pour développer des cellules solaires plus efficaces, notamment grâce aux tandems innovants.

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

Abstract

This study focuses on the modeling, simulation, and performance optimization of perovskite, CIGS, and perovskite/CIGS tandem solar cells.

After introducing the fundamental theoretical concepts, the study details the architectures, operation, and key characteristics of these different emerging photovoltaic technologies, highlighting the recombination processes limiting their performance.

Numerical simulations enabled optimizing the physical parameters of single-junction perovskite cells (maximum efficiency of 31.93%) and CIGS cells (23.91%). An optimized two-terminal perovskite/CIGS tandem structure offers a promising efficiency of 39.13%.

A MATLAB/Simulink model exploring different series/parallel configurations highlights the potential for efficiency enhancement by combining perovskite and CIGS materials. This modeling approach allows optimizing the design before fabrication.

This study provides an in-depth understanding of these high-performance technologies, combining theory, simulations, and optimizations. The results open promising prospects for developing more efficient solar cells, particularly through innovative tandem architectures.

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

ملخص

تحتوي هذه الأطروحة على نمذجة ومحاكاة وتحسين أداء الخلايا الشمسية المعتمدة على البيروفسكايت وCIGS والهياكل الترادفية للبيروفسكايت/CIGS.

بعد تقديم المفاهيم النظرية الأساسية، تبين الدراسة تفاصيل الهيكل والتشغيل والخصائص الرئيسية لهذه التقنيات الكهروضوئية الناشئة المختلفة، مع تسليط الضوء على عمليات إعادة التركيب التي تحد من الأداء.

أتاحت عمليات المحاكاة العددية تحسين المعلمات الفيزيائية لخلايا البيروفسكايت البسيطة (أقصى إنتاجية تبلغ 31.93% وCIGS 23.91%). يوفر الهيكل الترادفي بيروفسكايت/CIGS المحسن ثنائي الطرف عائدًا واعدًا بنسبة 39.13%.

يسلط نموذج MATLAB/Simulink الذي يستكشف تكوينات متسلسلة/موازية مختلفة الضوء على إمكانية زيادة الكفاءة من خلال مجموعة البيروفسكايت/CIGS. يتيح نهج النمذجة هذا تحسين التصميم قبل التصنيع.

وبالتالي توفر هذه الدراسة فهمًا متعمقًا لهذه التقنيات عالية الأداء، وتجمع بين النظرية والمحاكاة والتحسينات. تفتح النتائج آفاقًا واعدة لتطوير خلايا شمسية أكثر كفاءة، ولا سيما بفضل الترادفات المبتكرة.

Sommaire :

Résumé	5
Liste des symboles et abréviations :.....	10
Liste des figures :.....	12
Liste des tableaux :.....	15
Introduction générale :	17
1 Chapitre I : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques	21
1.1 Introduction :.....	21
1.2 Jonctions PN :.....	21
1.3 Cellules solaires idéales :	22
1.3.1 Génération et recombinaison des charges :.....	23
1.3.2 Jonction PN illuminée :.....	23
1.3.3 Figures de mérite des cellules solaires :.....	25
1.4 Mécanismes de perte dans les cellules solaires :.....	25
1.4.1 Pertes externes :.....	25
1.4.2 Recombinaison SRH et défauts :.....	26
1.4.2.1 Les défauts volumiques et les défauts d'interface :	27
1.4.3 Pertes électriques :.....	28
1.4.3.1 Pertes externes :.....	28
1.4.3.2 Défauts volumiques et d'interface :.....	28
1.5 Conclusion :.....	29
2 Chapitre II : Propriétés des matériaux pérovskite et CIGS	31
2.1 Introduction :.....	31
2.2 Architectures des dispositifs des cellules solaires à pérovskite :	31
2.2.1 Structure d'une cellule solaire à base de pérovskite :.....	31
2.2.2 Architecture et fonctionnement d'une cellule solaire à base de pérovskite :.....	32
2.2.3 Caractérisation des cellules solaires à pérovskite :	33
2.2.4 Les processus de recombinaison à l'interface :	35

2.2.4.1	Recombinaison radiative :.....	35
2.2.4.2	Recombinaison Shockley-Read-Hall :.....	35
2.2.4.3	Recombinaison Auger :.....	36
2.2.4.4	Recombinaison aux joints de grains, en surface et aux interfaces :.....	37
2.3	Cellules solaires CIGS :.....	37
2.3.1	Structure et principe de fonctionnement des cellules solaires CIGS :.....	37
2.3.2	Hétérojonction CIGS/CdS :.....	39
2.3.2.1	Pertes électriques :.....	39
2.4	Cellules solaires multi-jonctions :.....	40
2.5	Conclusion :.....	42
3	Chapitre III : Cellules solaires tandem pérovskite/CIGS à deux terminaux	44
3.1	Introduction :.....	44
3.2	Structure de la cellule solaire tandem en pérovskite/CIGS :.....	44
3.3	Validation des paramètres physiques :.....	46
3.4	Optimisation des deux sous cellules solaires :.....	49
3.4.1	Optimisation de la sous-cellule supérieure :.....	49
3.4.2	Optimisation de la sous-cellule inferieure :.....	52
3.5	Résultats de la simulation de la cellule solaire optimisée en Pérovskite, et à base de CIGS :.....	54
3.6	Description de la structure tandem proposée :.....	55
3.6.1	Paramètres utilisés dans la simulation de la cellule solaire tandem :.....	55
3.6.2	Optimisation de la cellule solaire Tandem à base Pérovskite/CIGS :.....	56
3.6.3	Effet de la concentration sur les performances de la cellule solaire Tandem :.....	56
3.6.4	Effet de l'épaisseur sur les performances de la cellule solaire Tandem :.....	57
3.7	Conclusion :.....	59
4	Chapitre IV : Modélisation et simulation des cellules solaires tandem photovoltaïques par Matlab Simulink.....	61
4.1	Introduction :.....	61
4.2	Modélisation d'une cellule photovoltaïque :.....	61

4.2.1	Caractéristique d’une cellule photovoltaïque :.....	61
4.2.2	Les équations régissant la cellule PV :	63
4.3	Simulation d’une cellule photovoltaïque par MATLAB-Simulink :	64
4.3.1	Caractéristiques électriques de la cellule pérovskite :.....	65
4.3.2	Les résultats obtenus de la simulation des cellules pérovskite sous MATLAB-Simulink :.....	65
4.3.3	Caractéristiques électriques de la cellule CIGS :	66
4.3.4	Les résultats obtenus de la simulation des cellules CIGS sous MATLAB-Simulink :	67
4.3.5	Caractéristiques électriques de la cellule tandem (pérovskite/CIGS) :	68
4.3.6	Les résultats de la simulation des cellules solaires tandem sous MATLAB-Simulink :.....	68
4.4	Conclusion :.....	69
Conclusion générale :		71
Références bibliographiques :		73

Liste des symboles et abréviations :

Symbole	Signification	Unité
μ_n	Mobilité des 'électron	$\text{cm}^2/\text{V.S}$
μ_p	Mobilité de trou	$\text{cm}^2/\text{V.S}$
ϵ_r	Permittivité relative	$\text{F} \cdot \text{cm}^{-1}$
AM	Air Masse	
c	Vitesse de la lumière	m s^{-1}
CdS	Sulfure de Cadmium	
CIGS	Di-sélénium de galium d'indium de cuivre (Cu (In, Ga) Se ₂)	
d	Epaisseur d'une couche mince	
E	Champ électrique	V.m^{-1}
$e\chi$	Affinité électronique	eV
E_c	Energie du bas de la bande de conduction	J ou eV
E_F	L'énergie de Fermi	eV
E_g	L'énergie du gap	eV
E_p	Énergie du photon	eV
EQE	External Quantum Efficiency	%
ETL	Electron Transport Layer	
E_v	Energie du haut de la bande de valence	J ou eV
FF	Facteur de forme	%
FTO	L'oxyde d'étain dopé au fluor	
h	Constante de Planck	J.s
HTL	Hole Transport Layer	
I_0	L'intensité lumineuse incidente	A
I_{cc}	Courant de court-circuit	A
ID	Intensité reçue à la surface de la terre	kWm^{-2}
I_m	Courant maximal	A
IPh	Le photo-courant	A
I_s	Le courant de saturation	A
ITO	L'oxyde d'étain dopé à l'indium	
J_{cc}	La densité de courant de court-circuit	mA/cm^{-2}
J_n, J_p	Densités de courants des électrons et des trous	mA/cm^{-2}
k	La constante de Boltzmann	J k^{-1}

K	Indice imaginaire	
L	La longueur du dispositif	cm
Mo	Molybdène	
N	Densité d'état par unité de volume	cm ⁻³
N	Les densités d'électrons libres	cm ⁻³
NA	Densité des accepteurs	cm ⁻³
Nc	Densité d'états des électrons	cm ⁻³
ND	Densité des donneurs	cm ⁻³
Nv	Densité d'états des trous	cm ⁻³
P	Les densités de trous libres	cm ⁻³
PCE	Rendement de conversion de puissance	%
Pérovskite	MAPbI _{3-x} Cl _x	
Pm	Puissance maximale	W
q	La charge de l'électron	C
TCO	Un oxyde transparent conducteur	
TiO ₂	Dioxyde de titane	
VA	La densité de courant de saturation inverse	V
Vm	Tension maximale	V
Voc	Tension de circuit ouvert	V
VSATN	La vitesse de saturation d'électrons	
VSATP	La vitesse de saturation des trous	
ZnO	Oxyde de Zinc	
ZnO-Al	Oxyde de Zinc dopé à l'aluminium	
εo.εr	La permittivité du semi-conducteur	F/cm ⁻¹
η	Rendement photovoltaïque	%
θ	Angle diffraction	°
λ	Longueur d'onde	μm
ρ	La densité de charge d'espace	C/cm ⁻³
ν	Fréquence	Hz
Ψ	Potentiel électrostatique	V
Φ	Flux lumineux	lmw

Liste des figures :

Figure I.1 : Représentation schématique d'une jonction PN [3]	21
Figure I.2 : Représentation schématique du mécanisme de génération -recombinaison	23
Figure I.3 : Représentation schématique d'une jonction PN illuminée avec génération d'une paire e-/h+ [3].....	23
Figure I.4 : Modèle à une seule diode de la cellule solaire.....	24
Figure I.5 : Caractéristiques I-V et P-V d'une cellule solaire idéale [7].....	24
Figure I.6 : Modèle à 1 diode adapté pour les cellules solaires, prenant en compte l'effet de la résistance série et de la résistance shunt.....	25
Figure I.7 : Représentation schématique des mécanismes de recombinaison bande à bande et Shockley-Read-Hall (SRH).....	27
Figure II.1 : Schéma des différentes architectures de dispositifs : a) configuration planaire normale (n-i-p) b) configuration mésoscopique normale (n-i-p) c) configuration planaire inversée (p-i-n)	31
Figure II.2 : La structure et le principe de fonctionnement d'une cellule solaire à pérovskite. Schéma des niveaux d'énergie d'une cellule solaire à pérovskite et les rôles des différentes couches. Notamment la couche de transport de trous (HTL), la couche de transport d'électrons (ETL) et la couche active en pérovskite.....	33
Figure II.3 : Caractéristiques J-V des cellules solaires dans des conditions d'éclairement et d'obscurité.	34
Figure II.4 : Schéma de la recombinaison radiative	35
Figure II.5 : Schéma de la recombinaison assistée par défauts ou pièges a) piège de type donneur et b) piège de type accepteur, r_1 = capture d'électron de la BC, r_2 = émission d'électron de la BC, r_3 = capture de trou de la BV, r_4 = émission de trou de la BV.	35
Figure II.6 : Schéma de la recombinaison Auger a) impliquant deux électrons b) deux trous ...	36
Figure II.7 : Schéma de la recombinaison en surface.....	37
Figure II.8 : Structure classique des cellules solaires CIGS.....	38
Figure II.9 : Représentation schématique d'une cellule solaire tandem en configuration 2 et 4 terminaux.....	41

Figure III.1 : Schéma de la structure de la cellule solaire tandem simulée, avec la cellule supérieure en Pérovskite et la cellule inférieure en CIGS connectées entre elles par une couche d'interconnexion ITO.....	45
Figure III.2 : Les niveaux d'énergie de la cellule supérieure en pérovskite et la sous-cellule inférieure à base de CIGS.....	45
Figure III.3 : Courbes de la Caractéristique J-V de la cellule PSC expérimentale avec celle de la cellule PSC simulée.....	47
Figure III.4 : Courbes de la Caractéristique J-V de la cellule CIGS expérimentale avec celle de la cellule CIGS simulée.....	48
Figure III.5 : La variation du paramètre de sortie (rendement %) de la sous-cellule supérieure en fonction de : (a) la concentration du dopage (ND) du ETL (TiO ₂), (b) la concentration du dopage (ND) du matériau absorbeur pérovskite, (c) la concentration du dopage (NA) du HTL(Spiro-OMeTAD).	50
Figure III.6 : La variation du paramètre de sortie (rendement %) de la sous-cellule supérieure en fonction des épaisseurs : (a) la couche ETL (TiO ₂), (b) couche de l'absorbeur pérovskite, (c) couche HTL(Spiro-OMeTAD).....	51
Figure III.7 : La variation du paramètre de sortie (rendement %) de la sous-cellule inférieure en fonction de : (a) la concentration du dopage de ZnO-Al, (b) la concentration du dopage de ZnO, (c) la concentration du dopage CdS et de la concentration du dopage de CIGS.....	53
Figure III.8 : La variation du paramètre de sortie (rendement %) de la sous-cellule inférieure en fonction des épaisseurs : (a) la couche ZnO-Al, (b) couche de ZnO, (c) couche de CdS (d) couche de CIGS.....	54
Figure III.9 : La courbe I-V de cellule optimisée en Pérovskite.	55
Figure III.10 : La courbe I-V de cellule optimisée en CIGS.....	55
Figure III.11 : variation du rendement en fonction de la concentration du dopage de la couche pérovskite dans la structure Tandem.	56
Figure III.12 : Variation du rendement de la cellule tandem en fonction de la concentration du dopage de CIGS.	57
Figure III.13 : Variation du rendement de la cellule tandem en fonction de l'épaisseur de la couche de pérovskite.	57
Figure III.14 : Variation du rendement de la cellule tandem en fonction de l'épaisseur de la couche de CIGS.....	58

Figure III.15 : La caractéristique I-V de la cellule solaire tandem optimisé à base Pérovskite/CIGS.....	59
Figure IV.1 : Schéma équivalent complet d'une cellule photovoltaïque.	62
Figure IV.2 : a) représentation schématique de 9 cellules solaires. b) représentation sous simulink de quatre ensembles (09cellules) en série.	64
Figure IV.3 : Schéma complet du module constitué de 36 cellules solaires sous MATLAB-Simulink.	65
Figure IV.4 : Caractéristique I(V) du module de cellules solaires pérovskite.....	66
Figure IV.5 : Caractéristique P(V) du module de cellules solaires pérovskite.	66
Figure IV.6 : Caractéristique I(V) du module de cellules solaires CIGS.	67
Figure IV.7 : Caractéristique P(V) du module de cellules solaires CIGS.	67
Figure IV.8 : Caractéristique I(V) du module de cellules solaires tandem.....	68
Figure IV.9 : Caractéristique P(V) du module de cellules solaires tandem.....	69

Liste des tableaux :

Tableau III.1 : Paramètres physiques de la sous cellule supérieure à base de pérovskite utilisés dans la simulation [17].	46
Tableau III.2 : Paramètres physiques de la sous cellule inférieure à base de CIGS utilisés dans la simulation [17].	47
Tableau III.3 : Comparaison des paramètres électriques obtenus après calibrage de la cellule solaire supérieure en pérovskite et celle inférieure à base de CIGS avec des données expérimentales [18].	48
Tableau III.4 : Les facteurs de performance obtenus.	49
Tableau III.5 : Paramètres de sortie obtenues de la cellule à base de Pérovskite optimisée.	54
Tableau III.6 : Paramètres de sortie obtenues de la cellule à base de CIGS optimisée.	54
Tableau III.7 : Paramètres de matériaux de la cellule Tandem à base Pérovskite/CIGS utilisés dans la simulation.	56
Tableau III.8 : Paramètres photovoltaïques obtenues de la cellule tandem optimise à base Pérovskite/CIGS.	58
Tableau IV.1 : Paramètres d'entrés de la cellule pérovskite.	65
Tableau IV.2 : Paramètres d'entrés de la cellule CIGS.	66
Tableau IV.3 : Paramètres d'entrés de la cellule tandem.	68



Introduction Générale

Introduction générale :

Les technologies photovoltaïques (PV) se sont considérablement améliorées en termes d'efficacité au fil des années. Les cellules solaires de première génération, ou la technologie au silicium domine actuellement le marché des cellules solaires, mais il y a des concurrents. Deux d'entre eux sont les cellules solaires à base de pérovskites d'halogénure de plomb et de CIGS ($\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$), qui, si elles sont combinées dans une architecture tandem, pourraient surpasser les cellules au silicium à simple jonction standard. Cette technologie à base de pérovskites est une sérieuse candidate pour succéder aux cellules conventionnelles. Elles ont fait une entrée fracassante dans le monde des cellules solaires en 2009, d'abord comme une simple curiosité nanoparticulaire, et sont devenues un vaste champ de recherche incluant une variété de structures et de combinaisons de matériaux, et ont maintenant atteint plus de 25% de rendement certifié record.

Les cellules tandem à pérovskites sont par conséquent devenues un sujet brûlant, avec des travaux en cours sur les tandems CIGS-pérovskite.

Dans ce mémoire de fin d'études, nous nous sommes exclusivement concentrés sur les cellules solaires tandem pérovskite-CIGS. Le CIGS est une technologie de cellules solaires en couches minces bien établie, avec un rendement record de 23,35% et quelques pourcents du marché photovoltaïque commercial mondial. En dépit de ses avancées techniques, le CIGS a du mal à rivaliser avec la filière silicium bien établie. Pour le CIGS, une piste prometteuse serait d'ajouter quelques étapes de fabrication afin de greffer une couche supérieure de cellules à pérovskite, dans le but d'améliorer le rendement global et ainsi disposer d'un avantage concurrentiel face aux cellules en silicium classiques.

Un dispositif tandem est composé de deux technologies de cellules solaires distinctes placées l'une sur l'autre, se partageant le spectre solaire entre elles et réduisant ainsi les pertes globales par thermalisation.

Il existe un certain degré de liberté dans l'ingénierie des structures de contact et du flux de courant à travers un tel dispositif, la distinction la plus courante étant entre dispositifs à 4 et 2 terminaux (électrodes). Dans l'architecture à 4 terminaux, les deux cellules sont câblées de façon indépendante. Cela a l'avantage que les deux sous-cellules n'ont pas besoin d'être adaptées en courant et qu'elles seront moins sensibles aux variations spectrales.

Cependant les cellules tandem à 2 terminaux, sont des unités monolithiques avec des cellules interconnectées en série déposées les unes sur les autres. Cela conduit à un subtil changement dans la logique du système, où les considérations pratiques se résument à savoir si la

cellule tandem a de meilleures performances que la meilleure des cellules individuelles, en considérant à la fois les performances et le prix. La logique industrielle est également simple. Idéalement, le dépôt de la cellule supérieure à pérovskite ne nécessiterait que quelques étapes de production supplémentaires intégrées dans la ligne de production existante. La cellule supérieure à pérovskite devient ainsi un complément, ou un bonus, à quelque chose qui existe déjà, qu'il s'agisse de silicium ou de CIGS. Les cellules à 2 terminaux présentent également certains avantages optiques, par exemple une réduction du nombre de couches conductrices transparentes de trois à deux.

L'une des caractéristiques attractives des cellules tandem CIGS-pérovskite est la possibilité de modifier les bandes interdites. La bande interdite du CIGS à température ambiante varie de 1,03 eV pour CuInSe_2 à 1,68 eV pour CuGaSe_2 .

En raison des techniques de fabrication complexes des cellules tandem CIGS-pérovskite, l'invention d'outils de simulation dans ce domaine a été encouragée. Quelques logiciels de simulation de cellules solaires sont SCAPS-1D, AMPS-1D, Silvaco-TCAD, ASA. À l'aide de ces outils de simulation en particulier TCAD-Silvaco, nous avons étudié et simulé la cellule Pérovskite/CIGS en trois étapes. La première étape consiste à calibrer chacune des sous cellules avec celles mentionnées dans les articles de référence et la seconde consiste à optimiser ces deux sous cellules et la troisième consiste à la formation de la cellule tandem pérovskite -CIGS.

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

Dans le premier chapitre nous allons aborder des notions générales sur les cellules solaires photovoltaïques.

Le chapitre II sera consacré aux propriétés des matériaux CIGS et Pérovskite formant la structure tandem qui sera l'objet de notre travail dans ce mémoire.

Le chapitre III représente en détail les résultats de la simulation numérique de la cellule solaire tandem à base de pérovskite -CIGS sous SILVACO-ATLAS dans lequel nous allons, dans une première étape calibrer les deux sous cellules solaires pérovskite et CIGS séparément en se référant aux résultats expérimentaux obtenus par certains auteurs. Dans la seconde étape, les deux cellules seront optimisées et en troisième étape, nous allons optimiser la cellule solaire tandem en faisant varier les paramètres géométriques et technologiques des différentes couches et étudier leurs effets sur tous les paramètres électriques de la cellule solaire tandem en particulier l'efficacité.

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

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



Chapitre I

*Généralités sur les cellules
solaires photovoltaïques*

1 Chapitre I : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

1.1 Introduction :

Dans ce chapitre, une généralité aux cellules solaires est donnée. Tout d'abord, la théorie élémentaire derrière les jonctions PN standard est brièvement présentée. Ensuite, les cellules solaires idéales sont présentées, ainsi que leurs figures de mérite. Enfin, quelques détails sont donnés sur les principaux mécanismes de perte dans les cellules solaires réelles.

1.2 Jonctions PN :

La jonction PN est l'un des blocs de construction les plus basiques et les plus importants de la technologie moderne. Son principe de fonctionnement et ses caractéristiques sont détaillés de manière approfondie dans divers ouvrages de référence, dont deux sont largement utilisés dans ce chapitre [1, 2].

Une jonction PN est construite en mettant en contact un semi-conducteur de type n, dopé avec des atomes donneurs, avec un semi-conducteur de type p, dopé avec des atomes accepteurs. Ceci est représenté sur la figure I.1.

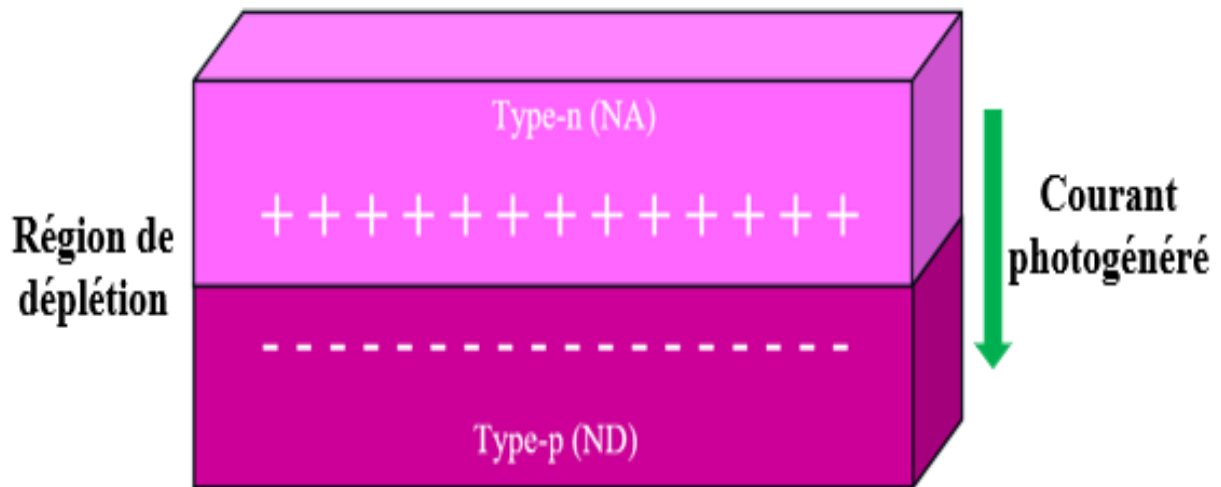


Figure I.1 : Représentation schématique d'une jonction PN [3]

Le dopage des deux semi-conducteurs est respectivement N_D [cm^{-3}] et N_A [cm^{-3}]. Un mécanisme de diffusion a lieu à la jonction, ne laissant que des atomes dopants ionisés au milieu. En première approximation, il est donc possible de considérer qu'il y a une absence de charges dans cette région. Pour cette raison, on l'appelle la région de déplétion. Les paramètres électriques d'une jonction PN abrupte idéale peuvent être calculés pour les côtés n et p à l'aide de l'équation de Poisson 1D :

$$\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon_s}(p - n + N_D - N_A) \quad (\text{I.1})$$

Où $\Phi(x)$ est le potentiel à la jonction et p et n sont les concentrations en trous et électrons dérivées des relations de Boltzmann. Cette équation est basée sur " l'approximation de déplétion" où tous les atomes dopants sont ionisés dans la région de déplétion [4]. À partir de cette équation, le potentiel de jonction à l'équilibre est calculé :

$$\phi_0 = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) \quad (I.2)$$

Lorsqu'une tension de polarisation V_a est appliquée à la jonction, le potentiel de jonction (également appelé potentiel interne) change et il est simplement égal à :

$$\phi = \phi_0 - V_A \quad (I.3)$$

Après avoir résolu l'équation de Poisson, et en suivant la loi de Gauss selon laquelle le champ électrique doit être continu à la jonction, il est possible de dériver la largeur de la région de déplétion :

$$w_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s (\phi_0 - V_a)}{q N_A}} \quad (I.4)$$

Cette équation est une approximation tenant compte du fait que $N_D \ll N_A$, ce qui est le cas dans les cellules solaires CIGS. Le résultat de cette équation est que la largeur de déplétion diminue pour une polarisation positive. De plus, la capacité de la couche de déplétion peut être dérivée :

$$C_D = \frac{dQ_D}{dV} = \frac{\varepsilon_s}{w_D} \quad (I.5)$$

L'analyse de cette capacité de déplétion est très utile pour la caractérisation des cellules solaires. Enfin, en combinant les résultats de l'équation de Poisson avec les équations de dérive et de diffusion des charges, il est possible d'écrire l'équation pour la densité de courant dans une jonction PN :

$$J = J_s \left(\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right) \quad (I.6)$$

Où J_s est la densité de courant de saturation inverse.

1.3 Cellules solaires idéales :

Une cellule solaire idéale est essentiellement une jonction PN qui est illuminée. Pour comprendre son principe de fonctionnement, il est d'abord nécessaire de présenter l'action de la lumière sur les semi-conducteurs. Ceci est lié au principe de génération/recombinaison des charges qui est présenté ci-après.

Une jonction PN sous illumination peut être représentée à l'aide du modèle à 1 diode de la figure I.4.

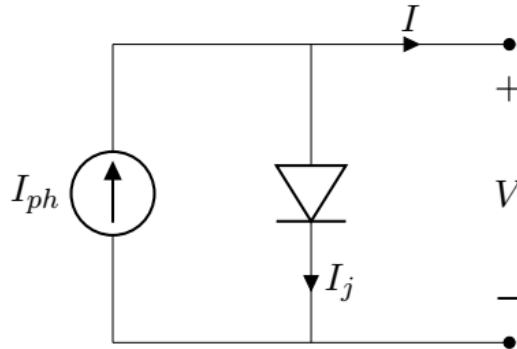


Figure I.4 : Modèle à une seule diode de la cellule solaire

Le courant photogénéré I_{ph} dépend de l'éclairement, de la surface de la cellule et de la capacité d'absorption du matériau de type p. Il induit une augmentation de la tension aux bornes de la jonction PN qui se traduit par une augmentation du courant de diffusion I_j . En utilisant le modèle et l'équation (I.6), le courant total dans la cellule s'écrit :

$$I = I_{ph} - I_j = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (I.7)$$

Le courant I dans une cellule solaire idéale est représenté à côté de la puissance P sur la figure I.5.

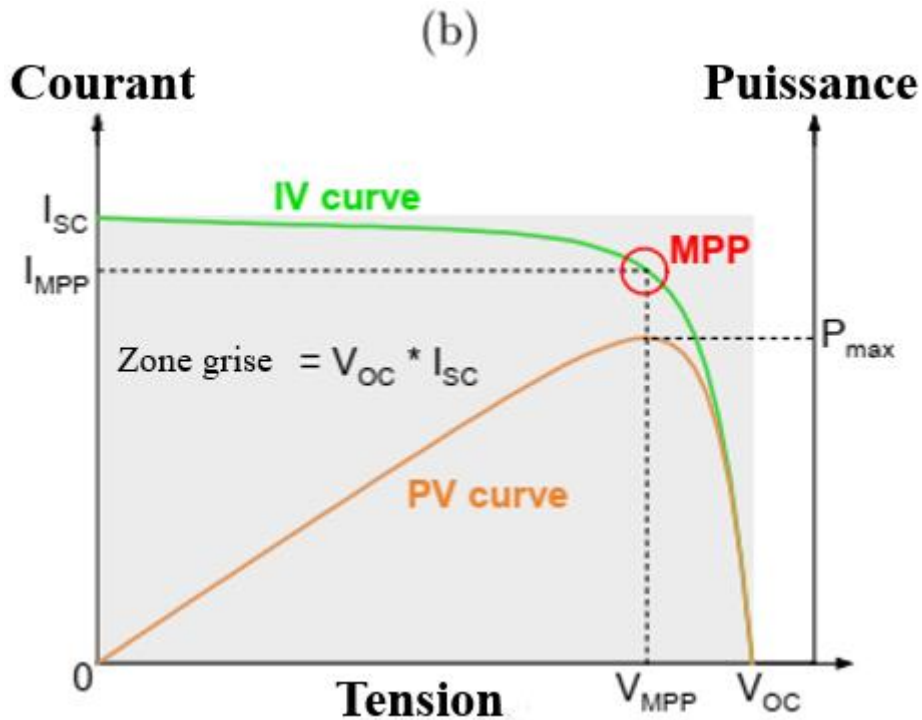


Figure I.5 : Caractéristiques I-V et P-V d'une cellule solaire idéale

1.3.3 Figures de mérite des cellules solaires :

Des figures de mérite importantes pour caractériser les performances de la cellule solaire sont extraites de la courbe I-V sous éclairage. Celles-ci sont représentées sur la figure I.5 et sont les suivantes :

- La tension de circuit ouvert **Voc**. C'est la tension à laquelle le courant est nul.
- Le courant (densité de courant) de court-circuit **Jsc**. C'est le courant à tension nulle.
- Le point de puissance maximale (**Vmpp**, **Jmpp**) qui est le point de puissance générée maximale.
- Le facteur de forme $FF = \frac{V_{mpp}J_{mpp}}{V_{oc}J_{sc}}$ C'est une mesure d'idéalité pour la cellule solaire.
- Le rendement de la cellule $\eta = \frac{V_{mpp}J_{mpp}}{G} = FF \frac{V_{oc}J_{sc}}{G}$ Il dépend de l'éclairement solaire G qui est connu de la procédure de test de la cellule solaire.

1.4 Mécanismes de perte dans les cellules solaires :

Premièrement, le modèle à 1 diode des cellules solaires est adapté, permettant de présenter l'action des pertes externes. Deuxièmement, la recombinaison SRH et les défauts sont introduits, ainsi que leur impact sur la recombinaison des charges.

1.4.1 Pertes externes :

Le modèle à 1 diode est très couramment utilisé pour la modélisation des cellules solaires [2]. Il donne une représentation simple des courants et tensions à l'intérieur, découplée des pertes électriques externes. Le modèle à 1 diode adapté, prenant en compte ces pertes, est représenté sur la figure I.6.

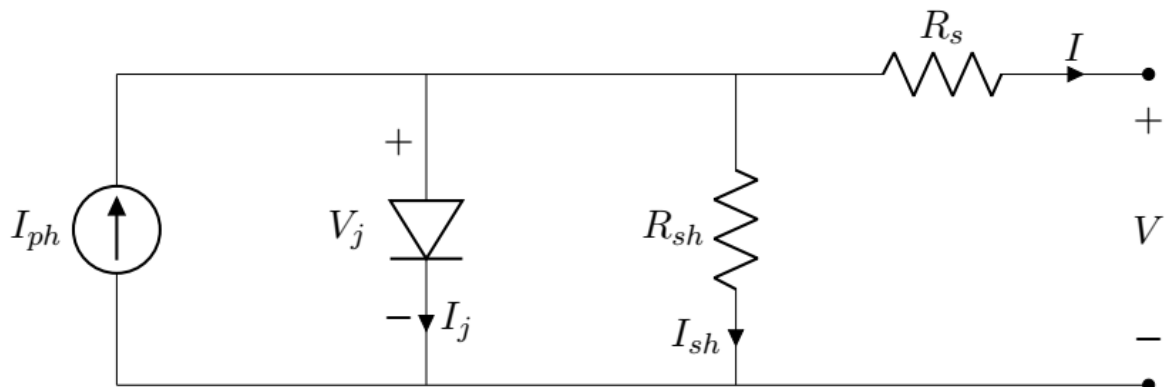


Figure I.6 : Modèle à 1 diode adapté pour les cellules solaires, prenant en compte l'effet de la résistance série et de la résistance shunt.

R_s est la résistance série, R_{sh} est la résistance shunt et V_j et I_j sont la tension et le courant de jonction.

En utilisant ce modèle, le courant mesuré externe peut être séparé dans ses différentes parties à l'aide des équations suivantes :

$$\begin{aligned} I &= I_{ph} - I_j - I_{sh} \\ V &= V_j - R_s I \\ I_j &= I_s \left(\exp\left(\frac{eV_j}{kT}\right) - 1 \right) \end{aligned} \quad (I.8)$$

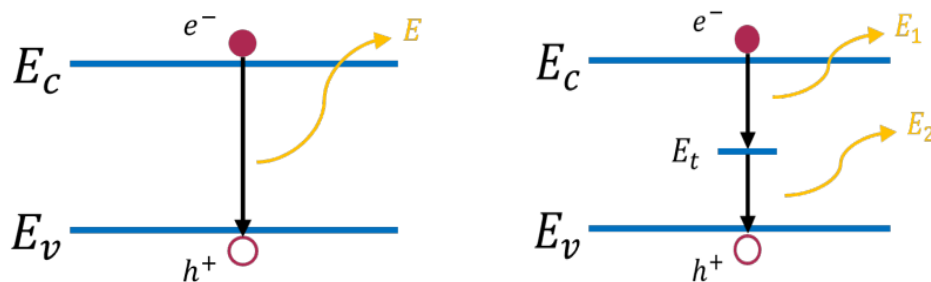
En rassemblant le tout, cela mène à :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{eV + IR_s}{kT}\right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (I.9)$$

Ce modèle à 1 diode met en lumière les deux principales sources de pertes électriques externes : la résistance série et la résistance shunt. La résistance série, comme pour de nombreux dispositifs électroniques, provient principalement des contacts électriques sur les côtés avant et arrière du dispositif. La résistance shunt, au contraire, a une origine très différente selon la technologie de cellule solaire utilisée.

1.4.2 Recombinaison SRH et défauts :

Il est mentionné que la recombinaison est l'action d'un électron revenant de la bande de conduction à la bande de valence, émettant un photon précédemment absorbé dans le processus. Parce que la recombinaison réduit la quantité de porteurs contribuant au courant photogénéré, son action est critique pour les performances de la cellule. Dans ce paragraphe, la recombinaison bande à bande est présentée, mais ce mécanisme peut être facilité dans un processus appelé recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH) [4]. Ce processus est le processus de recombinaison prédominant dans les cellules solaires. La situation est représentée avec le mécanisme de recombinaison bande à bande sur la figure I.7.



a) recombinaison bande à bande d'une paire e^-/h^+

b) recombinaison SRH d'une paire e^-/h^+

Figure I.7 : Représentation schématique des mécanismes de recombinaison bande à bande et Shockley-Read-Hall (SRH)

Pour que la recombinaison SRH ait lieu, l'état piège doit être capable de capturer et d'émettre des charges, interagissant avec les bandes de conduction et de valence. C'est le cas des défauts qui ont leur niveau d'énergie à l'intérieur de la bande interdite. Ils peuvent capturer et émettre des charges, agissant donc comme des états intermédiaires pour la recombinaison.

Deux types différents de défauts existent :

1.4.2.1 Les défauts volumiques et les défauts d'interface :

Les défauts volumiques sont présents à l'intérieur d'un matériau, cependant. Les défauts d'interface sont présents entre différentes couches, provenant du processus de fabrication et de l'incompatibilité potentielle des mailles cristallines entre les différentes couches. Dans les cellules solaires à base de CIGS par exemple, les défauts ont un impact particulièrement important sur les performances.

Mathématiquement, le taux de recombinaison SRH est exprimé comme [4] :

$$U = \frac{n p - n_i^2}{\tau_0(p+n) + 2n_i \cosh\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right)} \quad (\text{I.10})$$

Où τ_0 est la durée de vie des porteurs minoritaires donnée par :

$$\tau_0 = \frac{1}{\sigma_0 v_T N} \quad (\text{I.11})$$

Avec σ_0 [cm²] la section efficace de capture, qui est dans ce cas supposée être la même pour les électrons et les trous, v_T [cm/s] la vitesse thermique et N [cm⁻³] la densité totale d'états disponibles, parmi lesquels ceux des défauts. Qualitativement, il est logique que la durée de vie du porteur dépend de ces paramètres. La durée de vie d'un porteur serait élevée si :

- (a) σ_0 , est petite.
- (b) v_T , est petite.
- (c) N , le nombre d'états disponibles pour que la charge les occupe, est petit.

Dans l'équation (I.10), le taux de recombinaison est plus faible pour une durée de vie de porteur plus élevée. De plus, le taux de recombinaison dépend également de la position de l'état piège dans la bande interdite, et plus précisément de la différence ($E_t - E_i$). Plus le piège est proche du centre de la bande interdite, plus le taux de recombinaison est élevé.

Les défauts et la recombinaison non radiative en général ont également un impact sur la caractéristique I-V de la cellule solaire. L'introduction de la recombinaison SRH conduit à un courant modifié dans la cellule solaire. Toujours d'après [4], le courant de jonction de la cellule solaire devient :

$$I_s \left(\exp \left(\frac{qV}{m k T} \right) - 1 \right) \quad \text{I.12}$$

Avec m le facteur d'idéalité de la jonction. Lorsqu'aucune recombinaison SRH n'est considérée, $m = 1$. Lorsque les courants de recombinaison sont introduits, $m = 2$.

1.4.3 Pertes électriques :

1.4.3.1 Pertes externes :

Les résistances série et shunt sont également présentes dans les cellules solaires, et leur présence peut également impacter de manière significative les performances.

La résistance série est principalement liée aux contacts avant et arrière, comme dans d'autres technologies photovoltaïques.

La résistance shunt est liée à la rugosité inhérente des absorbeurs [5]. Parce qu'ils n'ont pas une surface plane, la couverture de l'absorbeur CIGS (pour une cellule solaire à base de CIGS voir chapitre suivant) lors du dépôt des fines couches de CdS et ZnO par-dessus n'est généralement pas uniforme. Lors du dépôt des contacts électriques avant par la suite, il peut y avoir des endroits où une connexion directe existe entre le contact avant et le CIGS. Cela entraîne des fuites de courant.

1.4.3.2 Défauts volumiques et d'interface :

Le principal défi et facteur limitant en termes de performances pour les cellules solaires modernes en couches minces, et plus spécifiquement les cellules solaires à base de CIGS, est la grande quantité de défauts dans le dispositif [1, 2]. En particulier, le nombre élevé d'états de défauts aux différentes interfaces ainsi qu'une forte concentration de défauts volumiques dans la couche absorbante entraînent une augmentation du taux de recombinaison et une réduction des performances de la cellule. [6].

Les pertes par recombinaison les plus importantes dans les cellules à multi jonctions par exemple, à haute efficacité se produisent aux différentes interfaces [7].

1.5 Conclusion :

Ce chapitre a d'abord introduit les notions de base sur les jonctions PN et leur description théorique, ainsi que le concept de cellule solaire idéale basée sur une jonction PN illuminée. Les principales figures de mérite comme la tension de circuit ouvert, le courant de court-circuit, le facteur de forme et le rendement ont été présentées.

Ensuite, les principaux mécanismes de perte dans les cellules solaires réelles ont été abordés, à savoir les pertes externes dues aux résistances série et shunt, et les pertes par recombinaison, en particulier la recombinaison Shockley-Read-Hall liée aux défauts volumiques et d'interface. Ce qui nous permis de faciliter la compréhension les chapitres suivants II et III.



Chapitre II

Propriétés des matériaux pérovskite et CIGS

2 Chapitre II : Propriétés des matériaux pérovskite et CIGS

2.1 Introduction :

Récemment, des avancées remarquables ont été obtenues sur autres type des matériaux autre que le silicium, comme Cu (In,Ga) Se₂ CIGS et la pérovskite qui feront l'objet du chapitre II.

2.2 Architectures des dispositifs des cellules solaires à pérovskite :

2.2.1 Structure d'une cellule solaire à base de pérovskite :

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).

Dans une cellule solaire à pérovskite (PSC), l'absorbant de pérovskite n'est pas dopé et est désigné comme un semi-conducteur intrinsèque. Il est placé entre des couches de type p et de type n (respectivement HTL pour la couche de transport de trous et ETL pour la couche de transport d'électrons).

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

Deux architectures principales peuvent être distinguées, selon la façon dont la pérovskite est en contact avec l'ETL ou la HTL [8].

1) Configuration normale (n-i-p)

2) Configuration inversée (p-i-n)

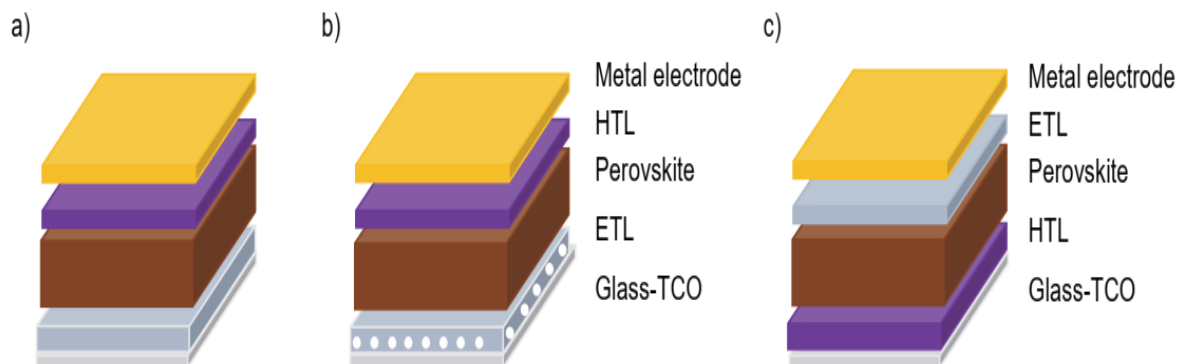


Figure II.1 : Schéma des différentes architectures de dispositifs : a) configuration planaire normale (n-i-p) b) configuration mésoscopique normale (n-i-p) c) configuration planaire inversée (p-i-n)

1) Configuration normale (n-i-p) :

La structure normale est définie par le contact de l'ETL avec l'oxyde conducteur transparent (TCO) avant, comme l'oxyde d'étain dopé au fluor (FTO) ou l'oxyde d'étain dopé à l'indium (ITO) (Figure II.1a). La pérovskite est prise en sandwich entre l'ETL et la HTL, où la HTL est en contact avec l'électrode métallique supérieure, comme l'argent (Ag) ou l'or (Au). La lumière doit d'abord passer à travers l'ETL dans la structure normale avant d'atteindre la couche de pérovskite. Il est donc nécessaire de choisir un semi-conducteur de type n transparent, communément utilisé comme SnO₂ ou TiO₂. L'architecture de dispositif la plus simple est la structure planaire.

L'architecture mésoscopique est dérivée de la structure de la cellule solaire sensibilisée par colorant (DSSC) (Figure II.1b). Une couche supplémentaire de nanoparticules, par exemple de TiO₂, est échafaudée sur l'ETL planaire, permettant d'améliorer la collection des électrons et de réduire l'effet d'hystérésis des cellules solaires à pérovskite.

2) Configuration inversée (p-i-n) :

La configuration inversée, inverse la structure en considérant la structure normale. Ici, la HTL est en contact avec l'électrode transparente avant, et l'ETL est en contact avec l'électrode métallique (Figure II.1c). Normalement, des couches semi-conductrices transparentes de type p sont employées dans cette configuration. La lumière doit d'abord traverser cette couche avant d'atteindre la couche de pérovskite, sans absorption parasite, ce qui pourrait entraîner des pertes. Les HTL typiques sont par exemple l'oxyde de nickel (NiO_x), le poly[bis(4-phényl) (13,16,17-triméthylphényl) amine] (PTAA), ou le poly(3,4-éthylènedioxythiophène) polystyrène sulfonate (PEDOT : PSS).

2.2.2 Architecture et fonctionnement d'une cellule solaire à base de pérovskite :

La HTL possède des bandes de conduction et de valence d'énergies supérieures à celles de la pérovskite, tandis que les bandes de conduction et de valence de l'ETL sont à des énergies inférieures à celles de la pérovskite. En conséquence, lorsque les photons sont absorbés et que des paires électron-trou sont créées dans le matériau pérovskite, les trous montent à des niveaux d'énergie plus élevés. En revanche, les électrons descendent à des niveaux d'énergie inférieurs. Ainsi, la HTL extrait les trous de la couche de pérovskite et bloque les électrons, tandis que l'ETL extrait les électrons photogénérés et bloque les trous.

Finalement, deux électrodes relient la HTL et l'ETL à un circuit externe. Sur le côté frontal de la cellule, des oxydes conducteurs transparents (TCO) sont utilisés, tels que l'oxyde d'étain dopé au

fluor (FTO) ou l'oxyde d'étain dopé à l'indium (ITO) (figure II.2). L'électrode arrière est généralement un métal conducteur, comme l'or ou l'argent, mais des TCO sont également utilisés dans les applications en tandem.

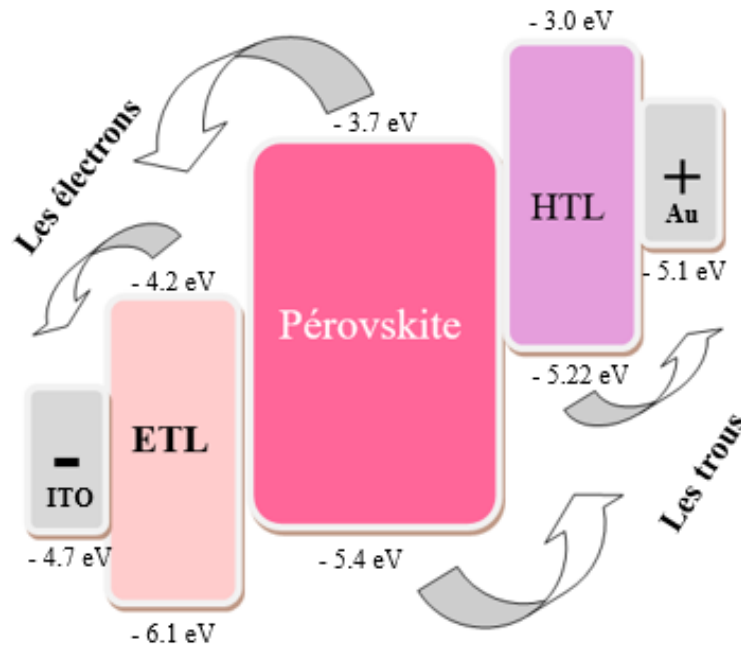


Figure II.2 : La structure et le principe de fonctionnement d'une cellule solaire à pérovskite.

Schéma des niveaux d'énergie d'une cellule solaire à pérovskite et les rôles des différentes couches. Notamment la couche de transport de trous (HTL), la couche de transport d'électrons (ETL) et la couche active en pérovskite.

2.2.3 Caractérisation des cellules solaires à pérovskite :

Les caractéristiques photovoltaïques sont déterminées par les paramètres des cellules solaires à pérovskite mesurés dans des conditions d'éclairement et d'obscurité. La condition préalable du montage de mesure sous éclairement est que le spectre de la source lumineuse correspond au spectre de masse d'air AM 1,5 et que la mesure soit effectuée dans les conditions d'essai normalisées (STC). Cela inclut l'étalonnage de la source lumineuse avant la mesure à 1000 W/cm² et le maintien de la cellule à température ambiante (25°C) pendant toute la durée de la mesure.[9]

Les principaux paramètres qui définissent les caractéristiques J-V sont la densité de courant de court-circuit (Jsc), la tension de circuit ouvert (Voc), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion de puissance (PCE) (Figure II.3).

Le Jsc est une mesure qui décrit la densité de courant circulant dans le circuit externe lorsque les électrodes sont court-circuitées. Le Voc est une mesure de la tension maximale que la cellule solaire peut atteindre, et elle est définie comme la tension lorsqu'aucun courant ne circule.

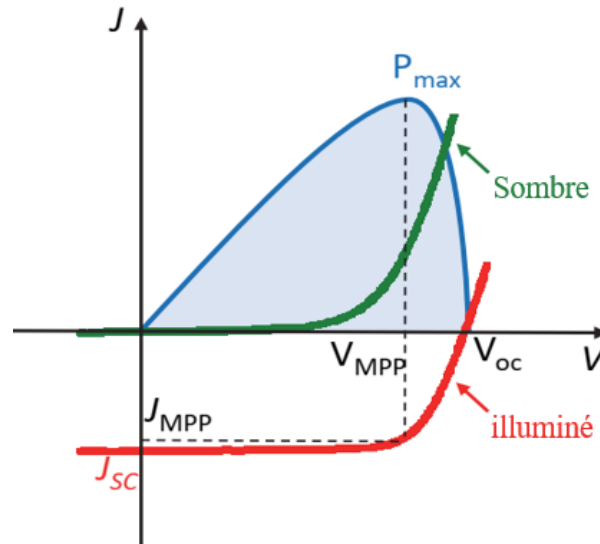


Figure II.3 : Caractéristiques J-V des cellules solaires dans des conditions d'éclairement et d'obscurité.

Le V_{oc} est lié à la densité de courant de saturation (J_0) et à la densité de courant photogénéré (J_{ph}). J_0 est affecté par les processus de recombinaison et peut changer d'amplitude, tandis que le J_{ph} ne montre généralement qu'une légère variation. Le V_{oc} est défini selon l'équation suivante :

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{J_{ph}}{J_0}\right) \quad (\text{II.1})$$

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} J_{sc}} = \frac{V_{MPP} J_{MPP}}{V_{oc} J_{sc}} \quad (\text{II.2})$$

Le PCE est défini comme étant le rapport entre la P_{max} générée par la puissance incidente (P_{in}) sur la cellule solaire, qui est la lumière incidente avec le spectre AM 1,5 tel que défini ci-dessus :

$$PCE = \frac{P_{max}}{I_{in}} = \frac{V_{oc} J_{sc} FF}{I_{in}} \quad (\text{II.3})$$

Rendement quantique externe (EQE) : Le rendement quantique externe est défini par le nombre de photons incidents convertis en paires électron-trou qui sont collectées aux électrodes. L'EQE est mesuré en illuminant la cellule solaire avec une lumière monochromatique à une longueur d'onde (λ) spécifique, tandis que le photocourant (I_{ph}) est enregistré et exprimé en fonction de la longueur d'onde (λ). L'EQE est également défini par

$$EQE(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{q \Psi_{ph,\lambda}} \quad (\text{II.4})$$

q , la charge élémentaire, $\Psi_{ph,\lambda}$ le flux de photons spectral, qui est obtenu en mesurant l'EQE d'une diode étalonnée sous la même source lumineuse. Le spectre EQE donne des informations sur les pertes optiques et électriques de la cellule solaire dues à l'absorption parasite et à la recombinaison. Il peut être utilisé pour calculer le J_{sc} de la cellule solaire.

2.2.4 Les processus de recombinaison à l'interface :

Différents types de processus de recombinaison peuvent se produire dans le capteur de lumière pendant le processus de génération de charges, affectant les performances de la cellule solaire. Ces quatre processus de recombinaison peuvent être distingués avec les explications suivantes :

2.2.4.1 Recombinaison radiative :

La recombinaison radiative (figure II.4), ou recombinaison bande à bande, est le principal processus de recombinaison des semi-conducteurs à bande interdite directe. Pendant le processus de recombinaison, l'électron excité dans la BC se combine avec le trou dans la bande de valence (BV), et un photon égal à l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur est libéré. Pour les semi-conducteurs de très haute qualité, ce processus de recombinaison fixe la limite du rendement de la cellule solaire. Cependant, dans les cellules solaires à pérovskite, les processus de recombinaison non radiative limitent également le rendement.

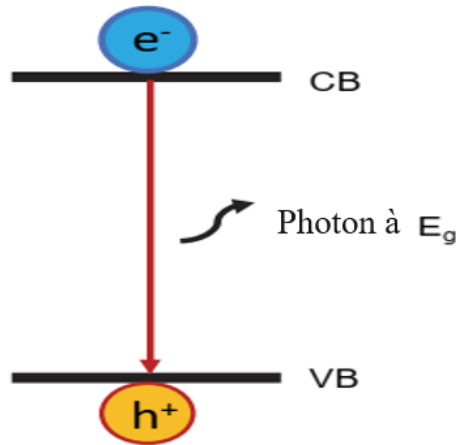


Figure II.4 : Schéma de la recombinaison radiative

2.2.4.2 Recombinaison Shockley-Read-Hall :

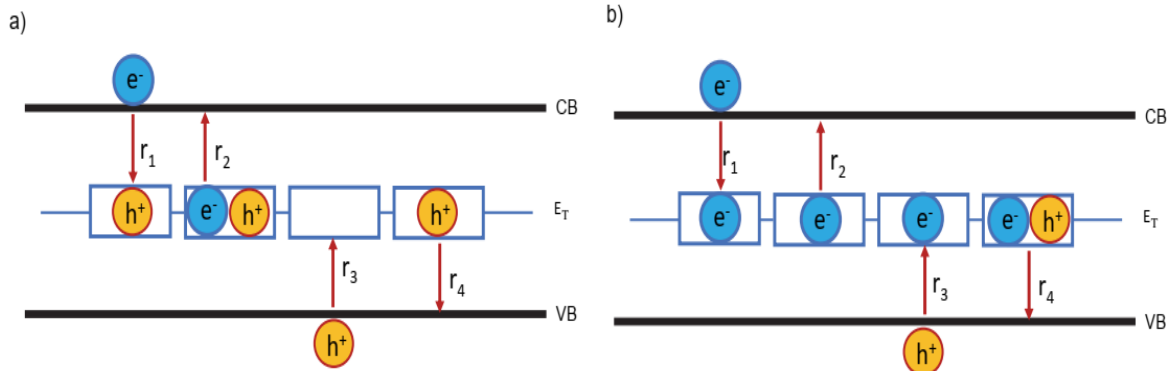


Figure II.5 : Schéma de la recombinaison assistée par défauts ou pièges a) piège de type donneur et b) piège de type accepteur, r_1 = capture d'électron de la BC, r_2 = émission d'électron de la BC, r_3 = capture de trou de la BV, r_4 = émission de trou de la BV.

La recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH), nommée d'après William B. Shockley, T. Read et Robert N. Hall, également connue sous le nom de recombinaison assistée par défauts ou pièges, a été découverte en 1952.[9] Dans ce cas, le processus non radiatif de la recombinaison des électrons et des trous ne se produit pas directement à partir de la bande interdite (figure II.5). Au lieu de cela, il est causé par des impuretés dans les défauts de réseau cristallin du semi-conducteur, conduisant à de nouveaux centres de recombinaison dans la bande interdite, appelés états pièges. Il existe deux types d'états pièges ou de centres de recombinaison : les pièges de type donneur et de type accepteur. Les états pièges de type donneur piègent un trou, suivi de la capture d'un électron de la BC, tandis que dans la recombinaison de type accepteur, l'électron est piégé, suivi de la capture d'un trou de la BV. Cette recombinaison non radiative libère l'excès d'énergie sous forme de phonons (vibrations du réseau).

2.2.4.3 Recombinaison Auger :

Dans la recombinaison Auger non radiative, l'énergie du trou et de l'électron se recombinant est transférée à un autre électron ou trou (Figure II.6). Supposons que l'énergie soit transférée à un électron. Dans ce cas, l'électron est excité vers un niveau supérieur de la BC, suivi d'un processus de relaxation vers la BC, en libérant son énergie sous forme de phonons et finalement en énergie thermique (Figure II.6a). Si la particule est un trou, elle sera excitée vers un niveau inférieur de la BV, suivie d'un transfert d'énergie en phonons (Figure II.6b).[9] La recombinaison Auger se produit généralement dans les semi-conducteurs à bande interdite indirecte, où la recombinaison directe bande à bande est limitée ou impossible.[9] La recombinaison Auger est le processus dominant dans les semi-conducteurs à bande interdite indirecte, limitant le rendement dans les cellules solaires de haute pureté, comme le silicium (Si) et le germanium (Ge).

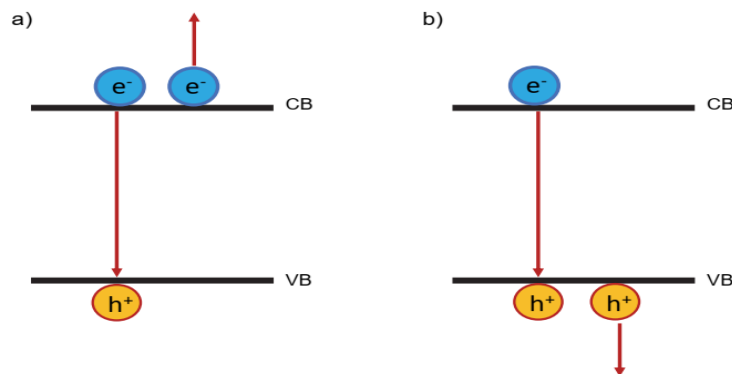


Figure II.6 : Schéma de la recombinaison Auger a) impliquant deux électrons b) deux trous

2.2.4.4 Recombinaison aux joints de grains, en surface et aux interfaces :

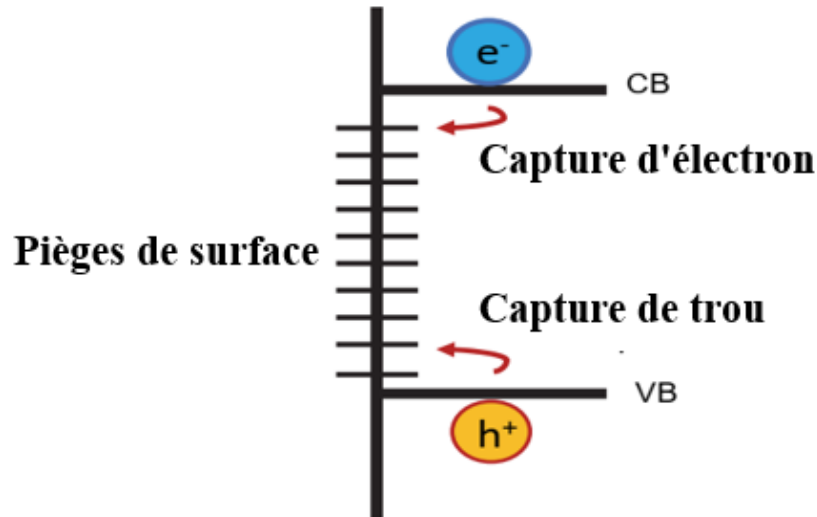


Figure II.7 : Schéma de la recombinaison en surface.

Les états pièges et la recombinaison se produisent non seulement dans le volume du semi-conducteur, mais aussi en raison des impuretés, des liaisons pendantes ou des défauts de surface sur la surface du matériau (Figure II.7). Ils se produisent également entre les interfaces de deux semi-conducteurs ou aux joints de grains à grand angle dans les matériaux polycristallins, conduisant à un processus de recombinaison similaire à celui de SRH décrit précédemment. [9]

2.3 Cellules solaires CIGS :

2.3.1 Structure et principe de fonctionnement des cellules solaires CIGS :

Une structure de dispositif classique de cellules solaires CIGS est présentée dans la figure II.8. La plupart des cellules solaires CIGS sont formées dans une configuration où le traitement commence à partir du substrat, en utilisant la procédure suivante :

- Le contact arrière couramment utilisé est le film de molybdène (Mo) pulvérisé en raison de sa bonne nature ohmique avec la couche absorbante CIGS, et il doit former un contact de porteur de charge non bloquant avec la couche absorbante CIGS. Mo a été choisi parce qu'il n'ajoute pas de dopant de type n pour compenser le CIGS dopé de type p [9]
- La couche absorbante CIGS de type p avec une épaisseur typique de 1 à 2 μm . L'énergie de la bande interdite de l'absorbeur CIGS est variable [10] : en faisant varier le rapport $\text{Ga}/(\text{Ga} + \text{In})$ de 0 à 1, il a été rapporté dans [11] que l'énergie de la bande interdite peut varier de 1,02 eV à 1,66 eV.
- La couche tampon de CdS de type n et la couche de fenêtre de ZnO sont successivement déposées sur le dessus de la couche absorbante CIGS en utilisant respectivement un dépôt

chimique en phase vapeur et une pulvérisation. La couche tampon de sulfure de cadmium (CdS) agit non seulement comme un partenaire d'hétérojonction pour la couche CIGS, mais empêche également l'oxydation de la couche CIGS [12].

Elle est également responsable de l'alignement des bandes d'énergie et de l'accord des mailles cristallines. Les couches de ZnO sont souvent réalisées dans une configuration bi-couche comprenant un oxyde transparent conducteur (TCO) intrinsèque (épais de 50 nm) et dopé Al (épais de 500 à 700 nm), qui joue le rôle d'électrode supérieure. Le rôle le plus important du ZnO intrinsèque en tant que couche tampon supplémentaire est considéré comme étant la réduction des chemins de court-circuit (trous d'épingle) entre les contacts arrière et avant dans les dispositifs CIGS. L'oxyde de zinc dopé à l'aluminium joue le rôle de couche avant et d'électrode TCO (oxyde transparent et conducteur).

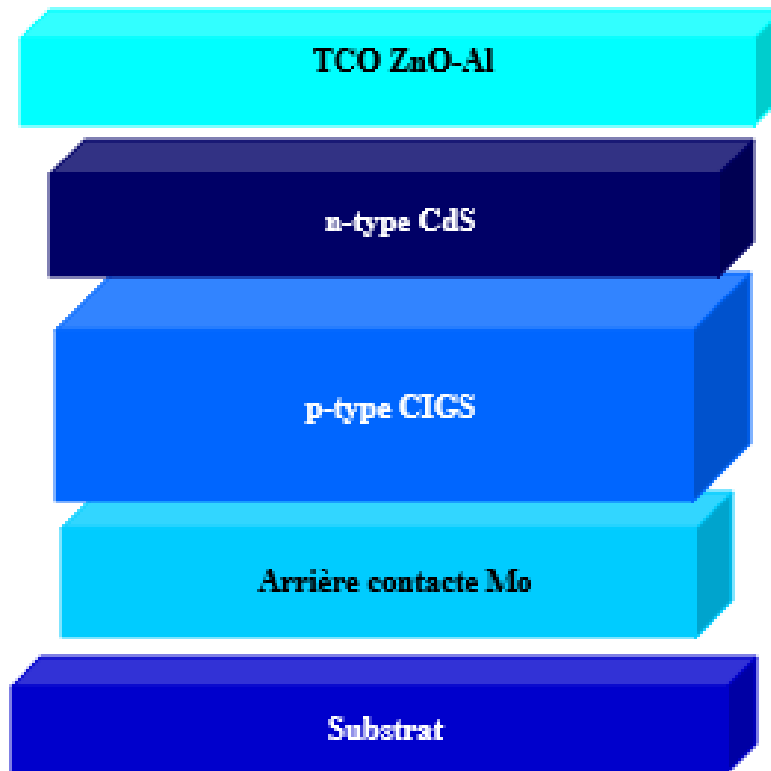


Figure II.8 : Structure classique des cellules solaires CIGS.

Les cellules photovoltaïques à base de CIGS convertissent la lumière du soleil (photon) en courant continu. Sous éclairage, les photons d'une énergie supérieure à la bande interdite de la couche absorbante CIGS sont absorbés, conduisant à la génération de paires électron-trou appelées excitons,

Naturellement, pour une collecte efficace des porteurs de charge, les matériaux d'électrode qui présentent une faible résistance de couche et forment un contact ohmique avec le semi-

conducteur correspondant sont préférés. En outre, le contact avant doit être aussi transparent que possible au rayonnement incident.

2.3.2 Hétérojonction CIGS/CdS :

La principale différence entre les cellules solaires CIGS et les cellules plus traditionnelles est que la jonction PN n'est pas une homojonction. Ces dernières sont composées de deux couches du même matériau, dopées avec différentes impuretés pour constituer une couche de type p et une couche de type n. Dans une hétérojonction, comme la jonction CIGS/CdS, deux matériaux différents sont utilisés.

La couche CIGS est un semi-conducteur de type p et est appelée l'absorbeur, car c'est la couche où les porteurs de charge sont générés. La couche CdS est un semi-conducteur de type n et est appelée couche tampon. Ensemble, ces deux couches créent une région de déplétion à leur interface, et donc également un champ électrique responsable de la séparation des charges. Le dopage de la couche de type n N_D est beaucoup plus grand que le dopage de la couche de type p N_A . Pour cette raison, les équations (I.4) et (I.5) du chapitre précédent sont également valables pour les cellules solaires CIGS.

2.3.2.1 Pertes électriques :

Les résistances série et shunt sont également présentes dans les cellules solaires CIGS, et leur présence peut également avoir un impact significatif sur les performances.

La résistance série est principalement liée aux contacts avant et arrière, comme dans d'autres technologies PV. À l'avant, le contact Schottky qui se forme à l'interface entre la grille métallique et la couche de ZnO est associé à une certaine résistance non négligeable [9]. Un métal ayant une fonction de travail adaptée à la couche de ZnO est donc essentiel pour abaisser cette résistance. À l'arrière, la couche CIGS et de molybdène forment ensemble un autre contact Schottky qui doit être correctement conçu. De plus, l'oxydation de la grille joue également un rôle et peut augmenter la contribution de la résistance série avec le temps.

La résistance shunt est liée à la rugosité inhérente des absorbeurs CIGS [13]. Comme ils n'ont pas de surface plate, la couverture de l'absorbeur lors du dépôt des couches minces de CdS et de ZnO par-dessus n'est généralement pas uniforme. Lors du dépôt des contacts électriques avant par la suite, il peut y avoir des endroits où une connexion directe entre le contact avant et le CIGS existe. Cela entraîne des fuites de courant. Défauts du volume et de l'interface

Le principal défi et facteur limitant en termes de performances pour les cellules solaires CIGS minces modernes, et plus spécifiquement, est la grande quantité de défauts dans le dispositif [14,

15]. En particulier, le nombre élevé d'états de défaut aux différentes interfaces ainsi qu'une concentration élevée de défauts du volume dans la couche absorbeur conduisent à un taux de recombinaison accru et à une réduction des performances de la cellule. Deux types différents de défauts peuvent être présents : des défauts du volume et de l'interface.

Les défauts du volume à l'intérieur de la couche CIGS peuvent causer une perte de performance très significative, car les charges sont capables de recombiner directement là où elles sont générées. La présence de ces défauts est en partie liée à la nature polycristalline du CIGS. Il est constitué de grains de formes, tailles et arrangements cristallographiques variés. En fonction du processus de croissance et des conditions utilisées, la structure globale peut varier considérablement, entraînant une concentration très différente en défauts du volume [15].

Les pertes de recombinaison les plus significatives dans les cellules CIGS à haute efficacité se produisent au niveau des différentes interfaces [14]. À l'interface avant (CIGS/CdS), les différentes constantes de réseau des matériaux ainsi que le processus de fabrication sont principalement responsables de l'augmentation de la densité de défauts [16]. À l'interface arrière (Mo/CIGS), le gradient de bande interdite dans le CIGS induit une contrainte dans le réseau conduisant à des défauts ponctuels, des dislocations et une qualité d'absorbeur plus faible dans l'ensemble, ce qui favorise la recombinaison [15].

2.4 Cellules solaires multi-jonctions :

Afin de réduire les pertes par thermalisation, deux ou plusieurs cellules solaires avec différentes bandes interdites peuvent être combinées pour atteindre une efficacité de conversion photovoltaïque plus élevée. Le concept a été étudié pendant de nombreuses années et la plus haute efficacité de conversion photovoltaïque démontrée jusqu'à présent, 46,0 %, a été atteinte avec une cellule à 4 jonctions à une concentration de 508 soleils³. Tous les dispositifs en couches minces à 2 jonctions (tandem) sont une telle alternative, promettant une efficacité améliorée par rapport aux cellules solaires à jonction unique à un coût modérément augmenté.

Les cellules dans un dispositif tandem peuvent être connectées indépendamment (configuration 4 terminaux) ou en série (configuration 2 terminaux) (Figure I.6).

Le concept à 2 terminaux présente les avantages d'une utilisation réduite de matériaux, de pertes parasites plus faibles en raison du nombre réduit d'oxyde transparent conducteur et de l'utilisation d'un seul circuit électrique. Le principal inconvénient est la nécessité d'un accord de courant entre les sous-cellules. Cela peut être réalisé en choisissant la bonne combinaison de bandes interdites, ou en réduisant artificiellement l'absorption dans la cellule supérieure (lorsqu'on utilise une bande interdite plus étroite que l'optimale) en limitant l'épaisseur de

l'absorbeur. Bien que cette approche ait été étudiée à maintes reprises, en particulier pour contourner le besoin de cellules supérieures à plus grande bande interdite en combinaison avec des cellules inférieures en silicium, elle réduit intrinsèquement la tension de circuit ouvert et le potentiel maximal du dispositif. Les dispositifs à 2 terminaux peuvent être réalisés par l'interconnexion monolithique des cellules ou par l'interconnexion de chaînes. La première impose des exigences en termes de stabilité et d'efficacité de la couche tunnel/recombinaison et la nécessité d'une cellule inférieure stable au processus de dépôt de la cellule supérieure. La seconde perd la plupart des avantages qu'un dispositif à 2 terminaux procure puisque les deux cellules doivent être terminées indépendamment et que le coût en matériaux et l'absorption parasite sont similaires au cas à 4 terminaux. Les dispositifs à 4 terminaux permettent de fabriquer les différentes cellules indépendamment, simplifiant considérablement le processus de croissance et sont intrinsèquement moins dépendants du spectre incident ou de la dégradation asymétrique des sous-cellules. Cependant, l'utilisation accrue de matériaux et les pertes optiques vont à leur encontre.

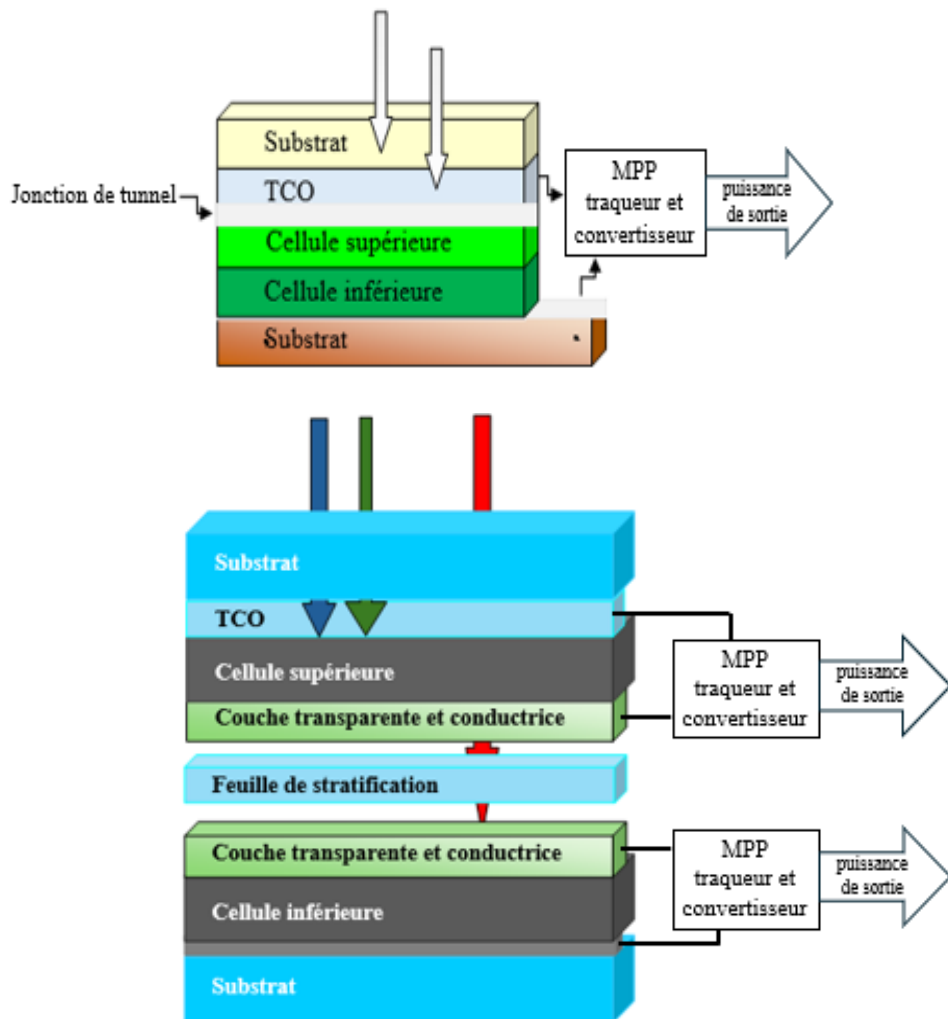


Figure II.9 : Représentation schématique d'une cellule solaire tandem en configuration 2 et 4 terminaux

2.5 Conclusion :

Ce chapitre décrit en détail la structure, le fonctionnement et les caractéristiques des différentes technologies de cellules solaires à base de pérovskite, CIGS et multi-jonctions.

Pour les cellules à pérovskite, le chapitre présente les deux architectures principales (normal et inversée), explique le rôle des différentes couches de transport de charges, et détaille les paramètres clés comme le Voc, Jsc, FF et rendement. Il décrit également les différents processus de recombinaison pouvant limiter les performances.

Concernant les cellules CIGS, le chapitre expose leur structure classique et l'hétérojonction CIGS/CdS. Il souligne l'importance des défauts de volume et d'interface qui causent des recombinaisons nuisibles aux performances.

Enfin, le concept des cellules tandem multi-jonctions est introduit comme moyen de réduire les pertes par thermalisation et augmenter l'efficacité. Les configurations à 2 et 4 terminaux sont présentées avec leurs avantages/inconvénients respectifs.

En résumé, ce chapitre fournit une compréhension approfondie des architectures, mécanismes et défis clés associées à ces différentes technologies photovoltaïques émergentes à hautes performances.



Chapitre III

Cellules solaires tandem
pérovskite/CIGS à deux
terminaux

3 Chapitre III : Cellules solaires tandem pérovskite/CIGS à deux terminaux

3.1 Introduction :

Ce chapitre porte sur le calibrage numérique de cellules solaires en pérovskite ($\text{MAPbI}_{3-x}\text{Cl}_x$, et à base de CIGS à jonction unique, dans le but d'obtenir des performances simulées conformes aux mesures expérimentales. Des simulations numériques avec Tcad Atlas seront réalisées en ajustant des paramètres physiques clés pour générer des courbes I-V. Le modèle calibré permettra ensuite de modéliser les performances sous différentes conditions d'éclairement et de température.

3.2 Structure de la cellule solaire tandem en pérovskite/CIGS :

Nous nous sommes intéressés au calibrage numérique de deux cellules solaires à jonction unique - une cellule en pérovskite de formule $\text{MAPbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ avec un gap $E_g=1,55$ eV pour $x=0$, et une cellule à base de CIGS avec un gap $E_g=1,15$ eV, dans le but d'obtenir des performances de simulation en adéquation avec les mesures expérimentales [17]. Pour cela, nous avons effectué des simulations numériques en utilisant le logiciel Tcad Atlas avec les paramètres initiaux des différentes couches constituant ces deux cellules solaires, générant ainsi des courbes caractéristiques courant-tension (I-V) et d'autres caractéristiques électriques de la cellule en pérovskite et de la cellule CIGS. Ce calibrage consiste à ajuster progressivement les paramètres clés, tels que les densités d'états électroniques (N_c , N_v), les permittivités diélectriques, et les mobilités des électrons et des trous, afin de minimiser l'écart entre les données simulées et les données expérimentales. Une fois les paramètres calibrés et validés, nous avons exploité le modèle ajusté pour modéliser les performances des deux cellules solaires dans les conditions d'éclairement et de température.

Les cellules solaires tandem (TSC) pérovskite-CIGS à deux terminaux combinent deux matériaux, une structure en pérovskite et une structure CIGS, dans un agencement tandem afin d'augmenter leur efficacité globale. De plus, le gap de la bande interdite de la pérovskite doit être ajusté pour permettre le couplage des deux absorbeurs pérovskite/CIGS et construire ces TSC.

Dans la cellule tandem proposée, la cellule solaire à pérovskite (PSC) sert de sous-cellule supérieure, et la cellule solaire CIGS de sous-cellule inférieure, comme illustré sur la Figure III.1. Les diagrammes d'énergie des deux sous-cellules sont représentés sur la Figure III.2. La sous-cellule supérieure est composée de la couche de pérovskite empilée entre le transporteur de trous Spiro-OMeTAD (HTL) et le transporteur d'électrons TiO_2 (ETL). Après avoir été calibrée par rapport à une cellule expérimentale, une cellule PSC sans ETL a également été proposée.

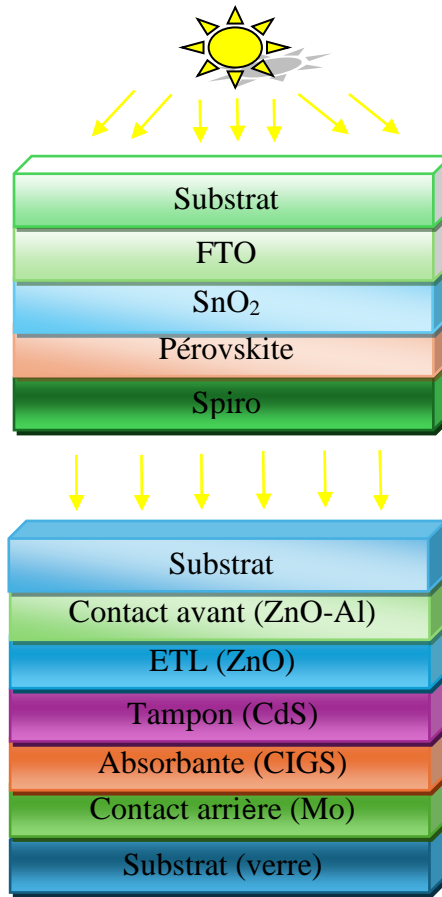


Figure III.1 : Schéma de la structure de la cellule solaire tandem simulée, avec la cellule supérieure en Pérovskite et la cellule inférieure en CIGS connectées entre elles par une couche d'interconnexion ITO.

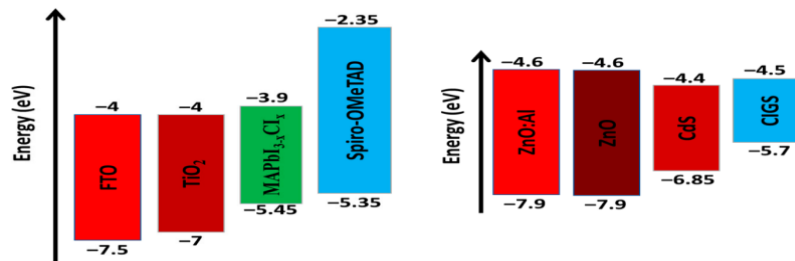


Figure III.2 : Les niveaux d'énergie de la cellule supérieure en pérovskite et la sous-cellule inférieure à base de CIGS.

L'oxyde d'étain dopé au fluor (FTO) est une cathode optiquement transparente, permettant à la lumière de traverser les couches et de transporter les électrons produits vers les contacts de la cellule. À l'avant du matériau absorbeur CIGS, il existe une couche fenêtre de type n constituée de deux couches d'oxyde de zinc (ZnO) et de sulfure de cadmium (CdS). Grâce à ses caractéristiques, principalement son gap accordable, le CIGS est un absorbeur efficace dans la sous-cellule inférieure. Le spectre transféré de la cellule supérieure vers la cellule inférieure, et le coefficient

D'absorption (α) sont donnés par les équations (III.1) et (III.2).

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) \prod_{x=1}^n e^{-\alpha_x d_x} \quad (\text{III.1})$$

$$\alpha(E) = A_\alpha \sqrt{h\nu - E_g} \quad (\text{III.2})$$

Où $S(\lambda)$ le spectre de lumière transmis,

$S_0(\lambda)$ est le spectre de la lumière incidente, α est le coefficient d'absorption du matériau, et d est son épaisseur.

λ est la longueur d'onde, $h\nu$ est l'énergie du photon, E_g est la largeur de la bande interdite (gap)

n est le nombre de couches constituant la sous-cellule.

Pour la sous cellule à base de CIGS, $n=4$

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) e^{-\alpha_{ZnO_Al} d_{ZnO_Al}} e^{-\alpha_{ZnO} d_{ZnO}} e^{-\alpha_{CdS} d_{CdS}} e^{-\alpha_{CIGS} d_{CIGS}} \quad (\text{III.3})$$

3.3 Validation des paramètres physiques :

Une cellule photovoltaïque à pérovskite (PSC) a été modélisée dans TCAD Atlas. Les résultats ont été validés avec la cellule PSC expérimentale publiée [18, 17]. La conception de la cellule fabriquée était un substrat en verre, FTO (fonction de travail = 4 eV), dioxyde de titane (TiO_2) comme ETL, $\text{MAPbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ comme couche absorbante, Spiro-OMeTAD comme couche de transport de trous (HTL), et enfin un contact métallique d'anode [18,17]. Une température de 300 K et une masse d'air globale de 1,5 (AM 1,5G) comme spectre incident ont été utilisées pour toutes les simulations.

Tableau III.1 : Paramètres physiques de la sous cellule supérieure à base de pérovskite utilisés dans la simulation [17].

Paramètre	TiO ₂	Pérovskite	Spiro-OMeTAD
E _g (eV)	3	1.55	3
e χ (eV)	4	3.8	2.55
ϵ_r (F .cm ⁻¹)	10	6.5	3
μ_n (cm ² /V. S)	20	2	2x10 ⁻⁴
μ_p (cm ² /V. S)	10	2	2x10 ⁻⁴
N _c (cm ⁻³)	2.2x10 ¹⁷	9.2x10 ²²	2.2x10 ²⁰
N _v (cm ⁻³)	18x10 ¹⁷	10x10 ¹⁶	18x10 ¹⁷
VSATN	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷
VSATP	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷

Tableau III.2 : Paramètres physiques de la sous cellule inférieure à base de CIGS utilisés dans la simulation [17].

Paramètres	ZnO-Al	ZnO	CdS	CIGS
E_g (eV)	3.3	3.3	2.45	1.17
$e\chi$ (eV)	4.4	4.6	100	4.88
ϵ_r (F .cm ⁻¹)	10	9	4.5	3
μ_n (cm ² /V. S)	100	100	100	100
μ_p (cm ² /V.S)	31	25	25	25
N_c (cm ⁻³)	2.2x10 ¹⁸	3x10 ¹⁸	2.2x10 ¹⁸	2.2x10 ¹⁸
N_v (cm ⁻³)	1.7x10 ¹⁹	1.8x10 ¹⁹	1.8x10 ¹⁹	1.8x10 ¹⁹
VSATN	2.4x10 ⁷	2.4x10 ⁷	3.1x10 ⁷	3.9x10 ⁷
VSATP	1.3x10 ⁷	1.3x10 ⁷	1.6x10 ⁷	1.4x10 ⁷

La Figure III.3 représente les courbes J-V de la cellule PSC expérimentale (en bleu) après calibrage par rapport à la cellule PSC simulée (rouge).

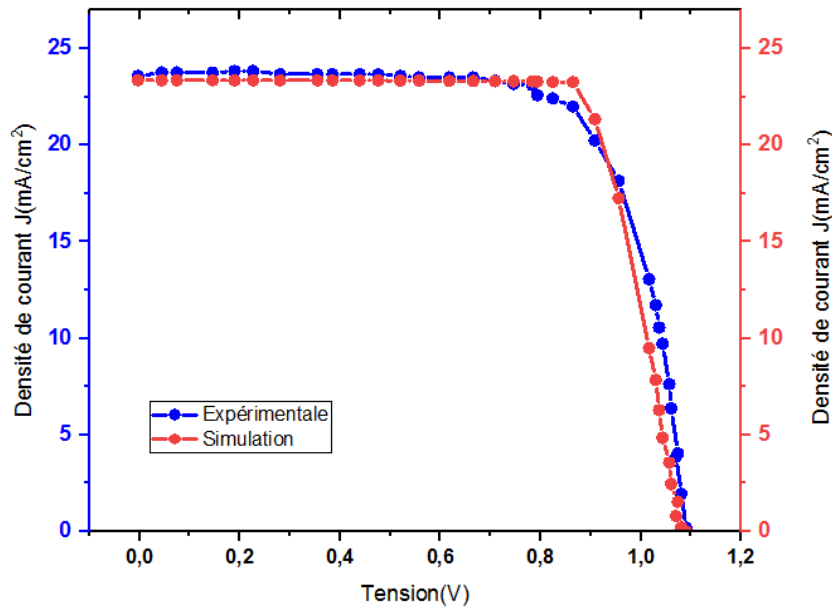


Figure III.3 : Courbes de la Caractéristique J-V de la cellule PSC expérimentale avec celle de la cellule PSC simulée.

Les résultats de simulation obtenus étaient cohérents avec ceux rapportés expérimentalement.

De plus, la cellule CIGS a été conçue comme une sous-cellule inférieure de cellules solaires multi-jonctions 2T. Donc, premièrement, le modèle de cellule CIGS a été calibré avec les

résultats expérimentaux rapportés. Les paramètres utilisés pour l'étalonnage sont donnés dans le Tableau III.2, tandis que la structure de la cellule est affichée sur la Figure III.1.

Les caractéristiques J-V de la cellule solaire à base de CIGS expérimentaux et simulés sont présentées dans la Figure III.4.

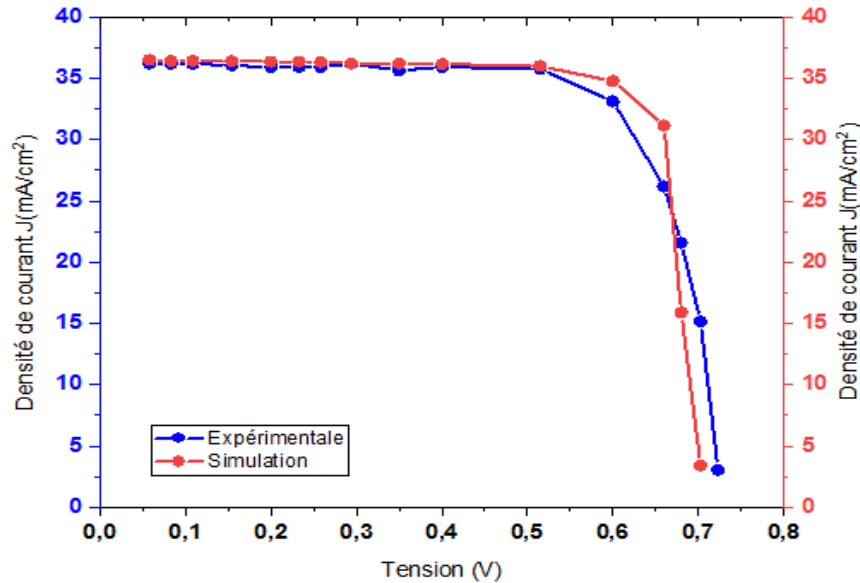


Figure III.4 : Courbes de la Caractéristique J-V de la cellule CIGS expérimentale avec celle de la cellule CIGS simulée.

Les paramètres de sortie des cellules étalonnées et expérimentales sont donnés dans le Tableau III.3. Les paramètres de sortie du dispositif étalonné étaient cohérents avec les caractéristiques et les paramètres de cellule rapportés expérimentalement. Cette bonne concordance valide les paramètres physiques utilisés dans la simulation pour les deux sous-cellules. Il y avait peu de différence entre les résultats simulés et expérimentaux pour la cellule PSC et CIGS. Ces différences pourraient résulter d'un léger écart dans l'épaisseur des couches et de certains paramètres physiques qui n'étaient pas donnés dans le travail expérimental.

Tableau III.3 : Comparaison des paramètres électriques obtenus après calibrage de la cellule solaire supérieure en pérovskite et celle inférieure à base de CIGS avec des données expérimentales [18].

Absorbeur	Type	J_{cc} (mA /cm ²)	V_{oc} (V)	E_{FF} (%)	FF(%)
Pérovskite	Expérimentale	23.80	1.09	19.41	75.16
	Simulation	23.36	1.08	19.41	76.59
CIGS	Expérimentale	36.30	0.72	20.10	76.80
	Simulation	36.51	0.66	20.10	82.67

3.4 Optimisation des deux sous cellules solaires :

Pour optimiser les performances des cellules solaires en Pérovskite, et à base de CIGS, deux paramètres essentiels doivent être variées : L'épaisseur et la concentration des différentes couches de sorte que nous varions la concentration du dopage tout en gardant l'épaisseur constante et vice versa.

3.4.1 Optimisation de la sous-cellule supérieure :

Dans cette partie, les principaux paramètres des couches constituant les sous-cellules supérieures et inférieures en tant que cellules à jonction simple sont optimisés.

Effet de la concentration et de l'épaisseur sur les performances de la cellule pérovskite :

Le dopage des matériaux dans les dispositifs solaires a un impact dramatique sur les performances de sortie. L'ETL a une influence plus forte sur la diffusion des porteurs que l'HTL [19]. La figure III.5a illustre l'impact de la concentration du dopage donneur (N_D) de l'ETL sur le rendement (PCE). Dans les cellules solaires à pérovskite (PSC), le dopage de l'ETL a une faible influence sur les performances de sortie lorsque le matériau absorbeur a été dopé [20]. La sous-cellule en pérovskite PSC sans ETL a été étudiée sans être mentionnée dans ce chapitre afin de remplacer la conception traditionnelle des PSC pour diminuer le nombre d'interfaces et de couches.

La figure III.3c représente l'effet de la N_A de l'HTL sur le PCE. Le PCE le plus élevé a été atteint lorsque la concentration du dopage N_A (Spiro) augmente de $10^{16} /\text{cm}^3$ à $10^{17} /\text{cm}^3$. Le rendement ainsi obtenu, prend la valeur maximale de 19,60 %, puis il diminue légèrement et prend une valeur de 19,41 % pour la concentration de $10^{19}/\text{cm}^3$. Il était préférable de garder N_A à un niveau bas pour éviter les effets de dopage élevé, comme le rétrécissement de la bande interdite, la génération de pièges coulombiens profonds et une réduction de la mobilité [21].

Les pérovskites peuvent être dopées de type P ou N. Dans notre cas elle est de type N. La figure III.5b montre l'impact de N_D du film absorbeur sur la sous cellule solaire supérieure en pérovskite PCE. La plage utilisée pour N_D est de 10^{12} au 10^{19} cm^{-3} . Entre 10^{12} et 10^{14} cm^{-3} . Les facteurs de performance de sortie, PCE, FF, V_{oc} et J_{sc} sont résumés dans le tableau III.4 suivant :

Tableau III.4 : Les facteurs de performance obtenus.

J_{sc} mA/cm ²	V_{oc} (V)	FF %	$E_{FF}\%$
23.36	1.08	76.59	19.41
36.51	0.66	82.67	20.10

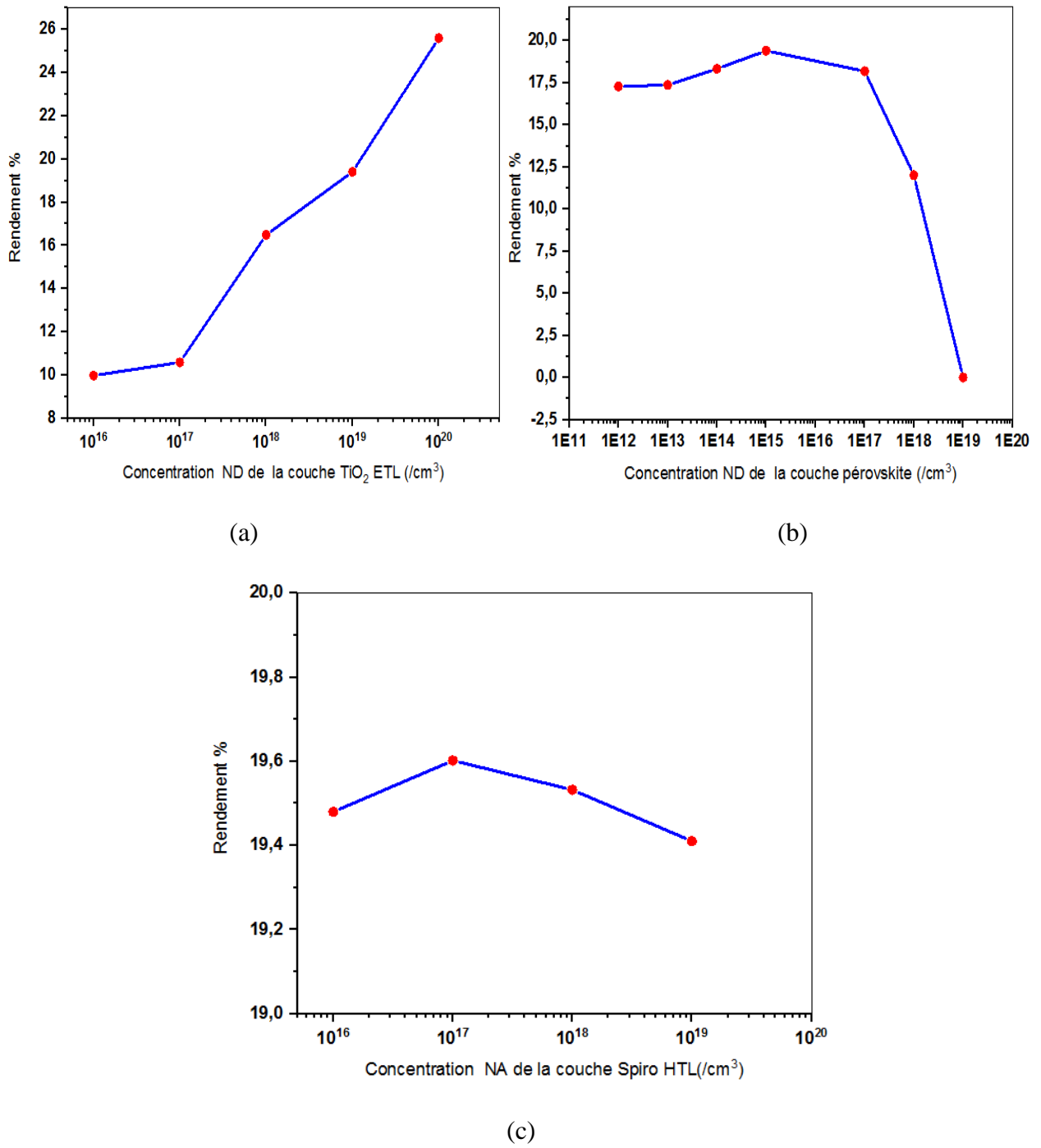


Figure III.5 : La variation du paramètre de sortie (rendement %) de la sous-cellule supérieure en fonction de : (a) la concentration du dopage (ND) du ETL (TiO₂), (b) la concentration du dopage (ND) du matériau absorbeur pérovskite, (c) la concentration du dopage (NA) du HTL(Spiro-OMeTAD).

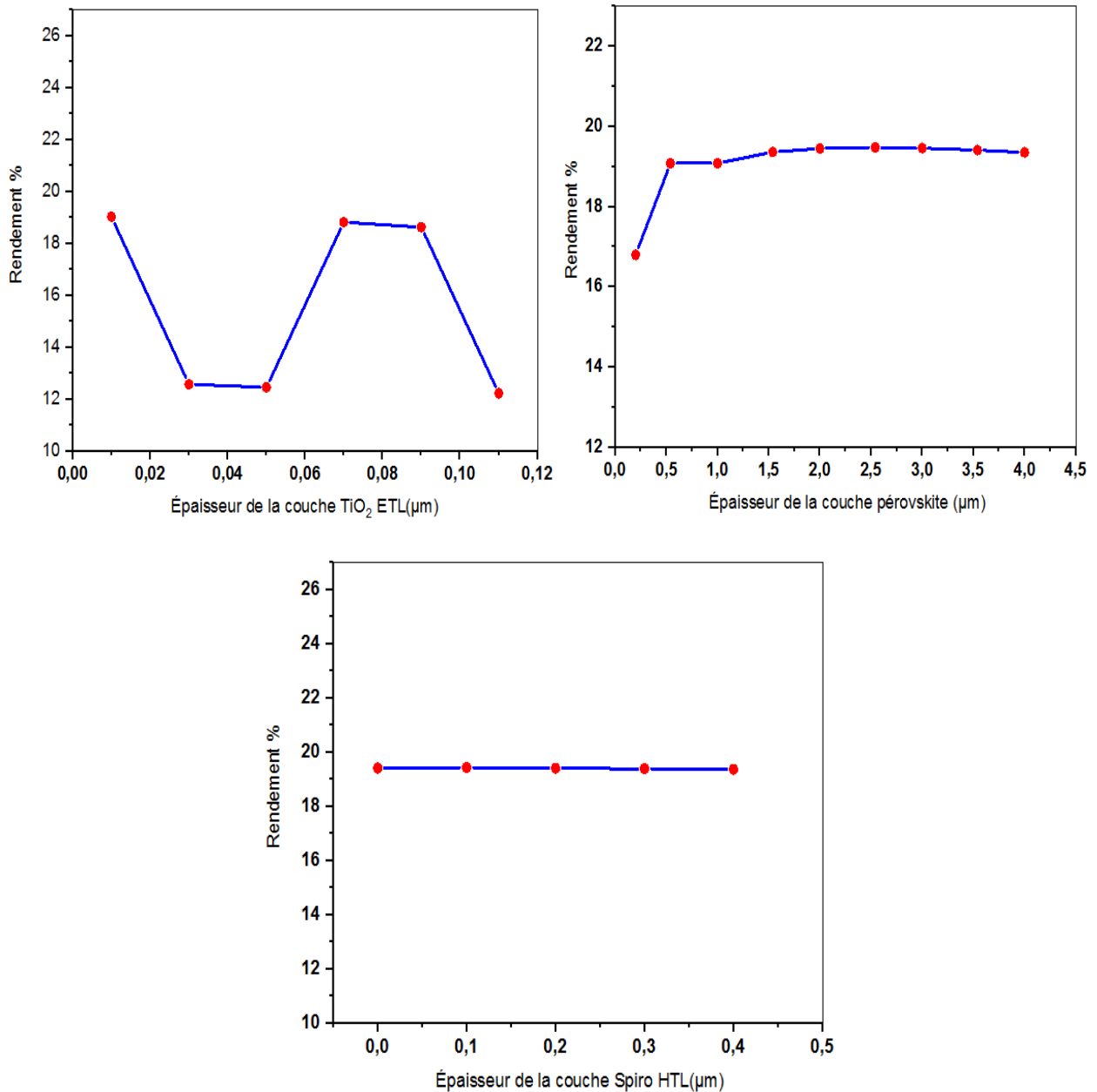


Figure III.6 : La variation du paramètre de sortie (rendement %) de la sous-cellule supérieure en fonction des épaisseurs : (a) la couche ETL (TiO₂), (b) couche de l'absorbeur pérovskite, (c) couche HTL(Spiro-OMeTAD).

La figure III.6 représente l'impact de l'épaisseur des couches de la sous cellule supérieure sur le rendement (PCE). L'épaisseur de l'HTL (Spiro-OMeTAD) a un effet mineur sur les paramètres de performance. On peut observer aussi que lorsque l'épaisseur de la couche de pérovskite varie de 0,2 μm et 0,2540 μm, le rendement augmente et prend une valeur maximale de 19,48 % puis il diminue légèrement à 19,35 % pour une épaisseur de 4 μm.

Quant à la couche ETL, Nous remarquons que lorsque l'épaisseur de la couche TiO₂ varie de 0.01 μm à 0.02 μm, le rendement augmente et atteint la valeur maximale de 19.41 % puis il chute jusqu'à 12.45 % pour une épaisseur de 0.05 μm et il augmente à nouveau pour atteindre la

valeur de 18.82 % pour une épaisseur de 0.07 μm et rechute à nouveau et prend une valeur minimale 12.22 % pour une valeur d'épaisseur de 0.110 μm .

3.4.2 Optimisation de la sous-cellule inférieure :

Effet de la concentration et de l'épaisseur sur les performances de la cellule CIGS :

La concentration de dopage de la couche de ZnO a été testée de 10^{13} à 10^{18} cm^{-3} . Dans la plage de 10^{13} à 10^{15} cm^{-3} , le PCE reste constant à la valeur de 20,44%, puis il chute jusqu'à la valeur de 20,05% pour une concentration de dopage de ZnO de 10^{18} cm^{-3} . La Figure III.7 a montré les résultats des tests du PCE de la sous-cellule inférieure en fonction du niveau de dopage de la couche de ZnO. Un dopage trop élevé de la couche de ZnO devrait être évité pour ne pas entraver le taux de recombinaison. D'autre part, une concentration de dopage trop faible pourrait entraîner une diminution du facteur de forme (FF) [22]. Par ailleurs, le PCE de la sous-cellule inférieure a été analysé avec une épaisseur de film de ZnO variant de 0,044 μm à 0,44 μm , comme illustré dans la Figure III.8a.

La concentration de dopage N_D du matériau CdS a été testée dans la plage de 10^{16} à 10^{20} cm^{-3} . Le PCE a légèrement augmenté et s'est stabilisé à la valeur de 19,90% pour les niveaux de dopage jusqu'à 10^{20} cm^{-3} , puis a légèrement diminué. De plus, l'épaisseur de la couche de CdS a été testée dans la plage de 40 nm à 440 nm. Les résultats ont montré que le PCE reste constant à une valeur d'environ 20%, comme illustré dans la Figure III.8c. Le PCE de la sous-cellule inférieure en fonction de la concentration de dopage du CdS est présenté dans la Figure III.7c.

Ensuite, la couche absorbante de CIGS de la sous-cellule inférieure a été évaluée dans la plage de 10^{15} à 10^{20} cm^{-3} . Le PCE de la sous-cellule inférieure en fonction de cette variation de la concentration de dopage est illustré dans la Figure III.7d. Le PCE a augmenté avec l'augmentation du niveau de dopage. Le PCE le plus élevé a été atteint avec la plus grande concentration d'accepteurs N_A , comme indiqué dans la Figure III.7d. Cependant, comme mentionné précédemment, il était préférable de maintenir N_A à un niveau relativement faible, car une grande concentration N_A crée des pièges coulombiens profonds et diminue donc la mobilité [21].

Les principaux facteurs de performance, PCE, FF, V_{oc} et J_{sc} , pour N_A de CIGS de 10^{17} cm^{-3} étaient respectivement de 22,13 %, 77,82 %, 0,76 V et 37,31 mA/cm^2 . De plus, l'épaisseur de la couche de CIGS de la sous-cellule inférieure a été testée jusqu'à 5 μm . Le PCE a augmenté jusqu'à environ 2,5 μm puis s'est presque saturé, comme indiqué dans la Figure III.8.d. Par conséquent, une épaisseur de 2,5 μm a été choisie, avec les mêmes paramètres de performance que l'étape précédente.

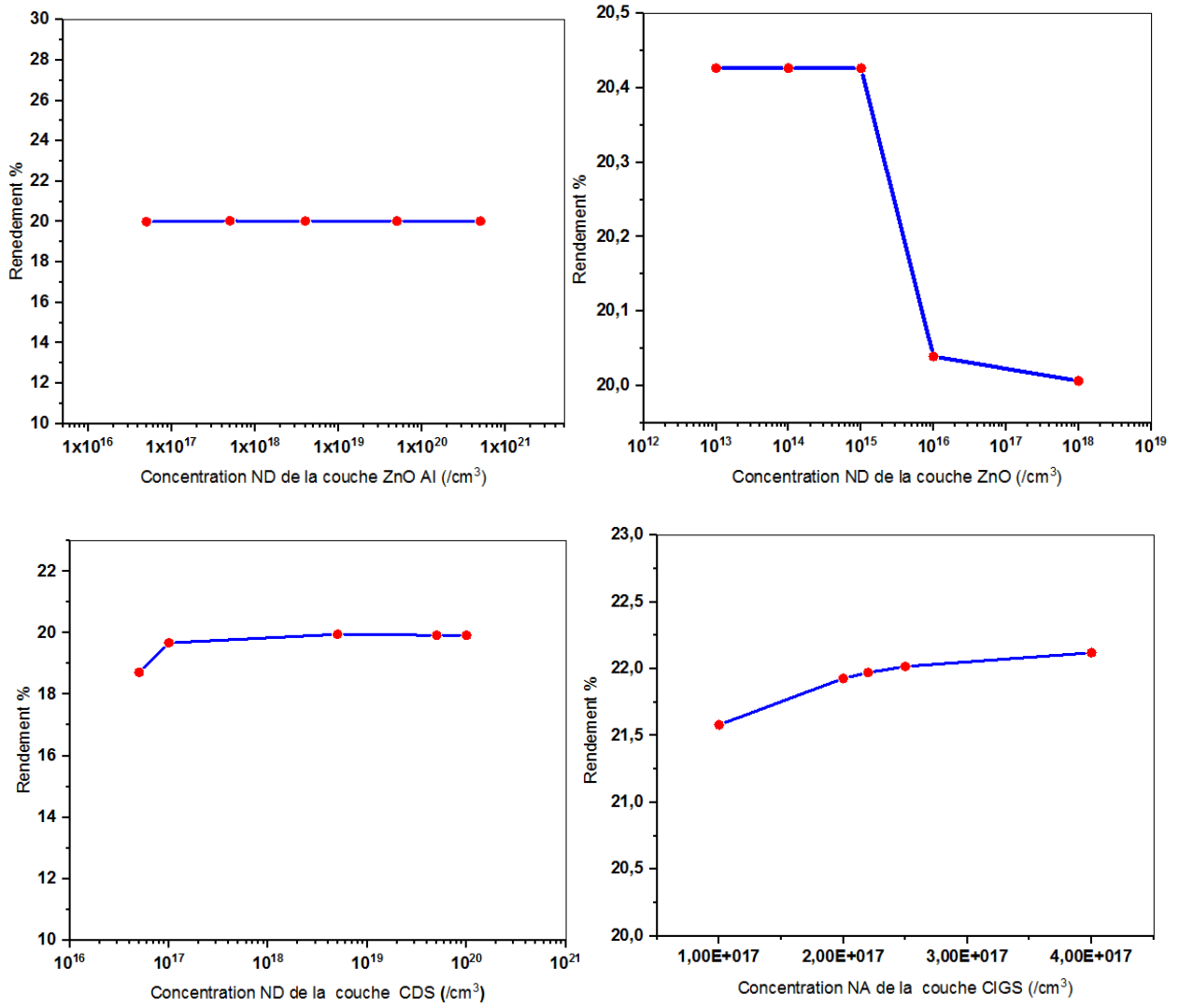
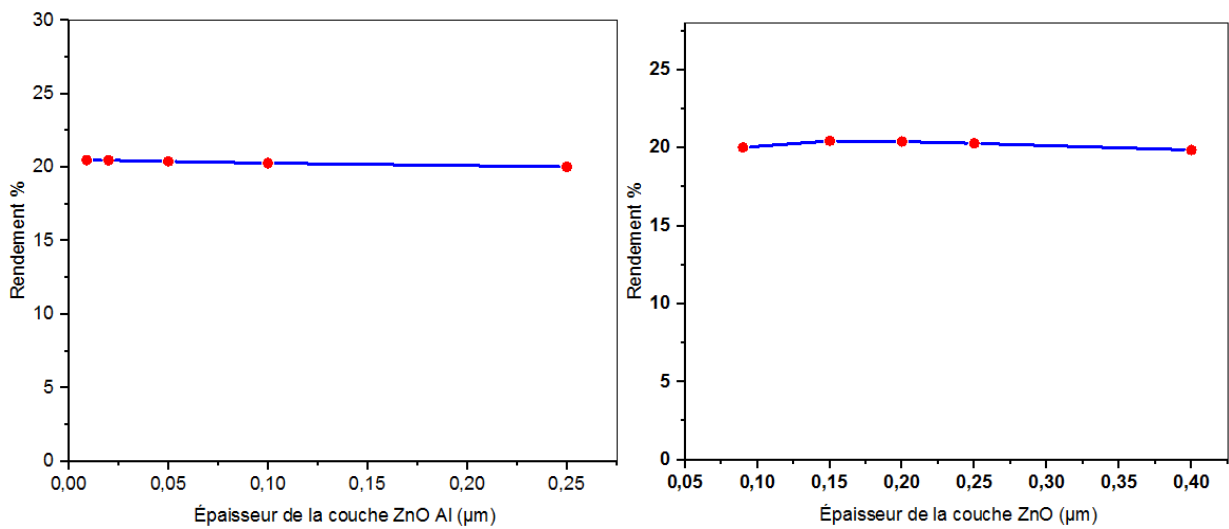


Figure III.7 : La variation du paramètre de sortie (rendement %) de la sous-cellule inférieure en fonction de : (a) la concentration du dopage de ZnO-Al, (b) la concentration du dopage de ZnO, (c) la concentration du dopage CdS et de la concentration du dopage de CIGS.



(a)

(b)

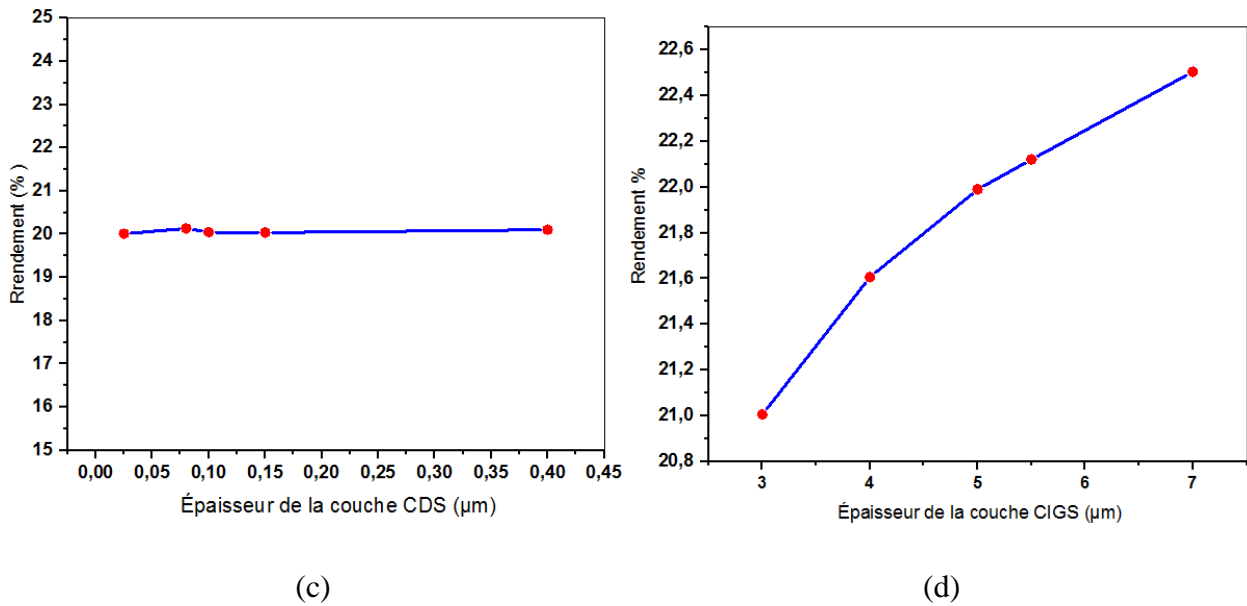


Figure III.8 : La variation du paramètre de sortie (rendement %) de la sous-cellule inférieure en fonction des épaisseurs : (a) la couche ZnO-Al, (b) couche de ZnO, (c) couche de CdS (d) couche de CIGS.

3.5 Résultats de la simulation de la cellule solaire optimisée en Pérovskite, et à base de CIGS :

Suite à l'étude précédente que nous avons menée, nous avons sélectionné les données permettant d'obtenir les meilleurs paramètres de sortie pour les deux cellules, en pérovskite et en CIGS. Après avoir simulé les effets de la concentration de dopage et de l'épaisseur des différentes couches des sous-cellules supérieure et inférieure, les résultats des paramètres de sortie optimisés sont résumés dans les tableaux III.5 et III.6 pour la sous-cellule en pérovskite et la sous-cellule à base de CIGS, respectivement.

Tableau III.5 : Paramètres de sortie obtenus de la cellule à base de Pérovskite optimisée.

Voc (V)	Jsc (mA /cm ²)	FF (%)	EFF (%)
1.08	23.44	83.1	31.93

Tableau III.6 : Paramètres de sortie obtenus de la cellule à base de CIGS optimisée.

Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	EFF (%)
0.74	37.92	84.46	23.91

La figure III.9 et la figure III.10 montrent les caractéristiques I-V des deux sous cellules supérieure et inférieure

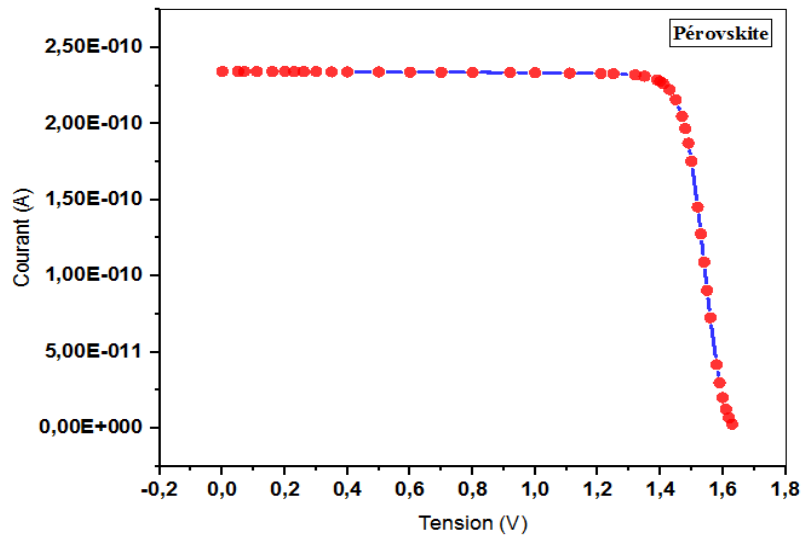


Figure III.9 : La courbe I-V de cellule optimisée en Pérovskite.

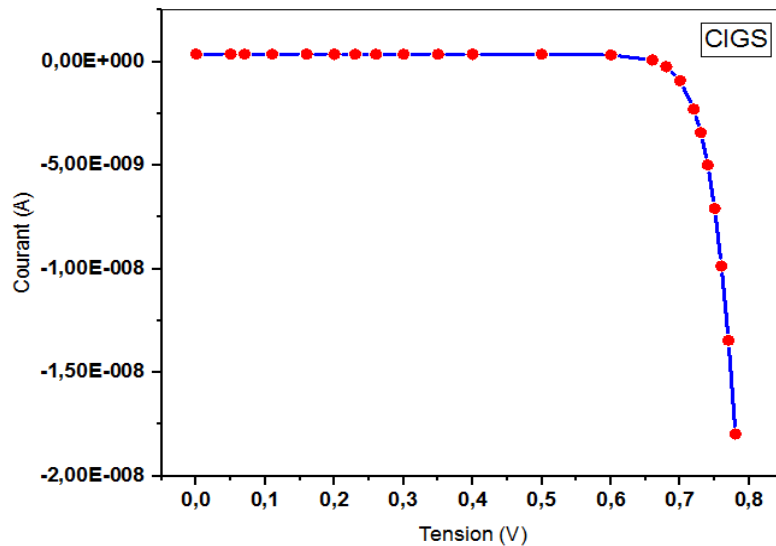


Figure III.10 : La courbe I-V de cellule optimisée en CIGS.

3.6 Description de la structure tandem proposée :

Une cellule photovoltaïque tandem est un empilement de deux cellules simples. En combinant deux cellules (une cellule individuelle à grand gap à base de Pérovskite et une autre cellule à base de petit gap à base de CIGS) absorbent dans des domaines spectraux différents, la première s'appelle cellule supérieure et la deuxième s'appelle cellule inférieure. Dans ce travail, on a utilisé la structure suivante : **SnO₂/Pérovskite/Spiro** comme une cellule supérieure et la structure **ZnO-Al/ZnO/CdS/CIGS** comme une cellule inférieure.

3.6.1 Paramètres utilisés dans la simulation de la cellule solaire tandem :

Le tableau III.7 ci-dessous représente les paramètres utilisés dans la simulation de la structure Tandem :

Tableau III.7 : Paramètres de matériaux de la cellule Tandem à base Pérovskite/CIGS utilisés dans la simulation.

Paramètres	SnO ₂	Pérovskite	Spiro	Zno-AL	Zno	Cds	CIGS
E _g (eV)	3.72	1.6	3	3.3	3.3	2.4	1.15
e _χ (eV)	4.3	3.9	2.55	4.55	4.55	4.45	4.5
ε _r (F .cm ⁻¹)	9	40	3	9	9	10	13.6
μ _n (cm ² /V. S)	20	30	2 10 ⁻⁴	100	100	72	100
μ _p (cm ² /V. S)	10	2	2 10 ⁻⁴	3	31	20	12.5
N _c (cm ⁻³)	10 ¹⁸	10 ¹⁸	2.2x10 ²⁰	3.1x10 ¹⁸	3.1x10 ¹⁸	10 ¹⁸	10 ¹⁸
N _v (cm ⁻³)	10 ¹⁸	10 ¹⁸	18x10 ¹⁷	1.8x10 ¹⁹	1.8x10 ¹⁹	9.1x10 ¹⁸	10 ¹⁹

3.6.2 Optimisation de la cellule solaire Tandem à base Pérovskite/CIGS :

Pour optimiser les performances de la cellule tandem à base de Pérovskite/CIGS, deux paramètres essentiels ont été variés : L'épaisseur et la concentration des différentes couches.

3.6.3 Effet de la concentration sur les performances de la cellule solaire Tandem :

a) La couche Pérovskite :

La figure III.11 présente l'impact de la concentration du dopage sur la couche Pérovskite.

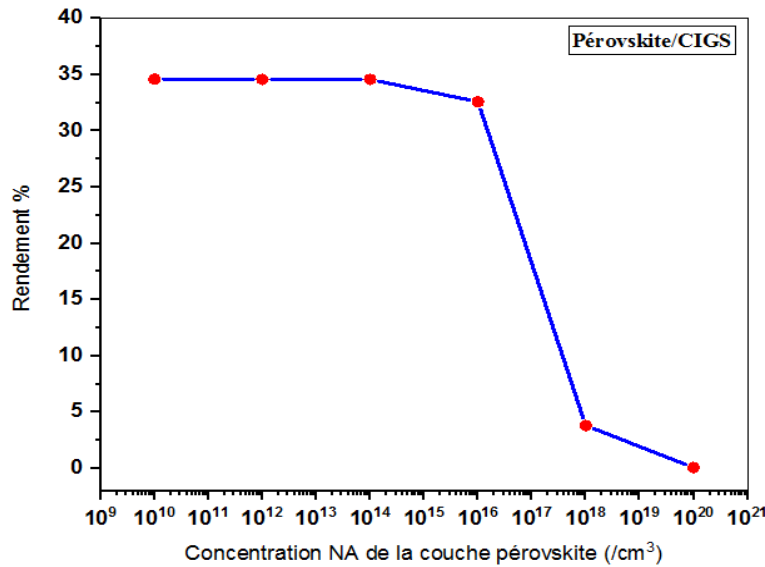


Figure III.11 : variation du rendement en fonction de la concentration du dopage de la couche pérovskite dans la structure Tandem.

Lorsque la concentration de la couche de pérovskite augmente de 10¹⁰ à 10¹⁵/cm³ le rendement reste constant et prend la valeur de 34,57 %, puis il chute jusqu'à 0,07 % pour la valeur de N_D = 10²⁰ /cm³.

b) La couche CIGS :

La figure III.12 illustre l'effet de la concentration de la couche CIGS sur le rendement.

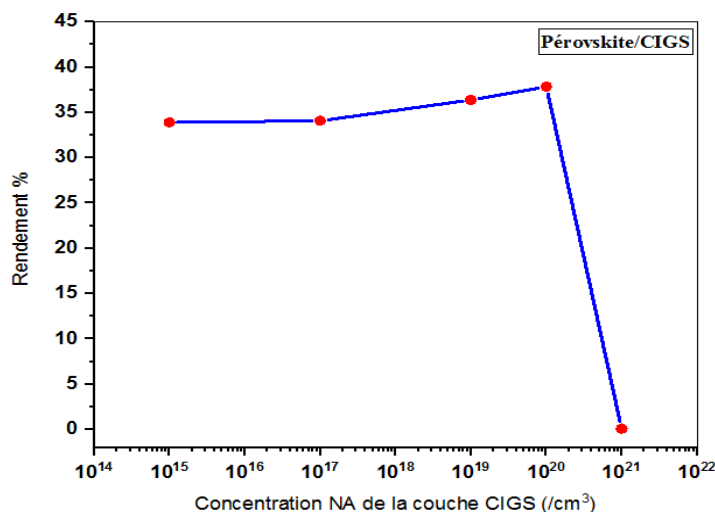


Figure III.12 : Variation du rendement de la cellule tandem en fonction de la concentration du dopage de CIGS.

Lorsque la concentration de dopage de la couche CIGS augmente de 10^{15} à 10^{20} cm^{-3} , le rendement de la cellule tandem augmente et atteint une valeur maximale de 37,86 %. Cependant, pour une concentration supérieure à 10^{21} cm^{-3} , le rendement chute drastiquement jusqu'à 0,07 %.

3.6.4 Effet de l'épaisseur sur les performances de la cellule solaire Tandem :

c) La couche Pérovskite :

La figure III.13 présente l'effet de l'épaisseur de la couche Pérovskite sur le rendement de la cellule solaire tandem.

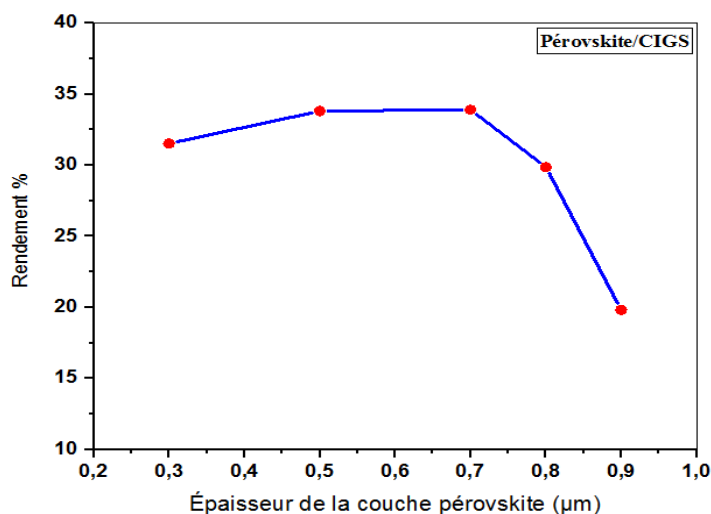


Figure III.13 : Variation du rendement de la cellule tandem en fonction de l'épaisseur de la couche de pérovskite.

Lorsque l'épaisseur de la couche de pérovskite augmente de 0,3 μm à 0,7 μm , le rendement de la cellule tandem augmente et atteint une valeur maximale de 33,91 %. Cependant, au-delà d'une épaisseur de 0,9 μm , le rendement diminue jusqu'à 19,81 %.

d) La couche CIGS :

La figure III.14 illustre l'effet de l'épaisseur de la couche CIGS sur les performances de la cellule solaire tandem.

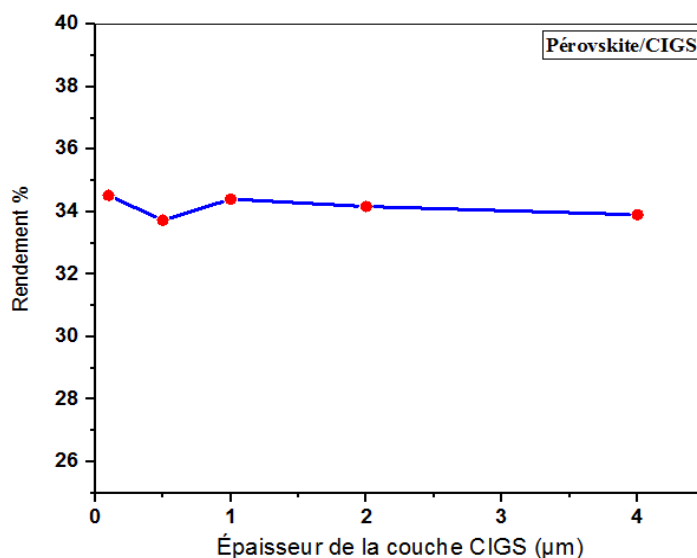


Figure III.14 : Variation du rendement de la cellule tandem en fonction de l'épaisseur de la couche de CIGS.

On observe que lorsque l'épaisseur de la couche CIGS augmente de 0,1 μm à 0,5 μm , le rendement diminue légèrement, puis il augmente et reste approximativement constant à une valeur d'environ 34% dans la plage allant de 1 μm à 4 μm .

Nous avons donc choisi les valeurs d'épaisseur et de concentration de dopage pour la cellule solaire tandem à base de pérovskite/CIGS donnant les meilleures performances.

Les résultats de la simulation obtenus pour la cellule solaire tandem optimisée sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau III.8 : Paramètres photovoltaïques obtenues de la cellule tandem optimisée à base Pérovskite/CIGS.

Voc (V)	Jsc (mA/cm^2)	FF (%)	EFF (%)
2.16	20.77	87.17	39.13

Le rendement de la cellule solaire tandem optimisée est passé de 31 %, à 39.13 %.

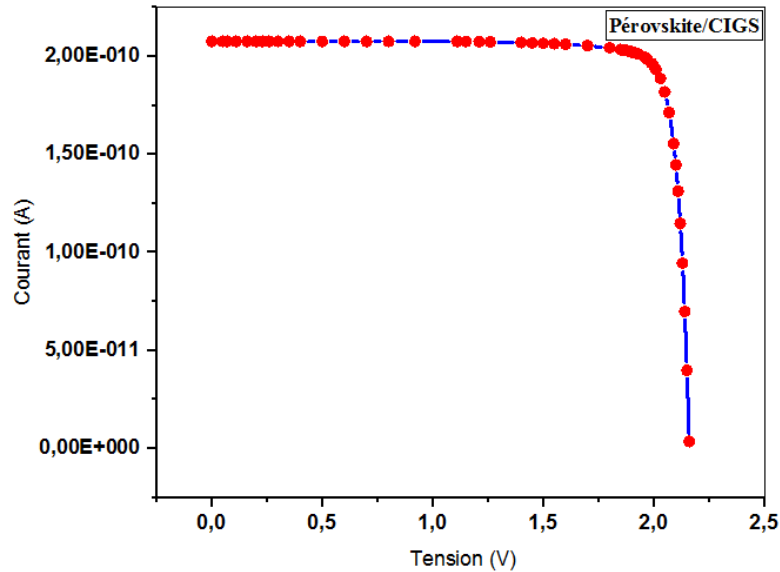


Figure III.15 : La caractéristique I-V de la cellule solaire tandem optimisée à base Pérovskite/CIGS.

3.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude de simulation numérique de cellules solaires à jonction unique en pérovskite et en CIGS, ainsi que d'une structure tandem pérovskite/CIGS à deux terminaux.

Dans un premier temps, les modèles de cellules individuelles ont été calibrés en ajustant les paramètres physiques clés afin de reproduire les données expérimentales disponibles. Une bonne concordance a été obtenue, validant ainsi les paramètres utilisés pour la suite des simulations.

Ensuite, une optimisation approfondie des performances a été réalisée en faisant varier les concentrations de dopage et les épaisseurs des différentes couches constitutives des deux types de cellules. Cela a permis d'identifier les gammes de valeurs optimales pour maximiser les paramètres de sortie tels que le rendement de conversion (PCE), la tension en circuit ouvert (Voc), la densité de courant de court-circuit (Jsc) et le facteur de forme (FF).

Les cellules optimisées séparément ont montré des rendements maximaux de 31,93% pour la pérovskite et 23,91% pour le CIGS.

Enfin, une structure tandem combinant ces deux absorbeurs a été proposée et optimisée de la même manière. Le rendement global obtenu pour cette cellule tandem pérovskite/CIGS s'élève à 39,13%, démontrant l'intérêt de coupler ces deux matériaux complémentaires pour augmenter l'efficacité de conversion photovoltaïque.



Chapitre IV

Modélisation et
simulation des cellules
solaires tandem
photovoltaïques par
Matlab Simulink

4 Chapitre IV : Modélisation et simulation des cellules solaires tandem photovoltaïques par Matlab Simulink

4.1 Introduction :

Si nous simulons un module solaire à partir d'un ensemble de cellules solaires tandem Pérovskite/CIGS, nous pouvons connecter ces cellules solaires de différentes manières. Premièrement, nous pouvons les connecter en série. Dans une connexion en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent. Cependant, le courant ne s'additionne pas mais est déterminé par le photocourant le plus faible généré dans chaque cellule solaire. Par conséquent, le courant total dans une chaîne de cellules solaires connectées en série est égal au courant généré par la cellule produisant le photocourant le plus faible.

Les modules solaires peuvent également être connectés en parallèle. Dans ce cas, les courants de chaque module s'additionnent, tandis que la tension du module parallèle est égale à la tension individuelle des modules. Cette configuration permet d'augmenter le courant total délivré, mais la tension reste inchangée.

Dans ce chapitre, nous étudierons comment modéliser une cellule photovoltaïque tandem Pérovskite/CIGS et présenterons les résultats de la simulation, à savoir les caractéristiques électriques d'une telle cellule photovoltaïque, à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink. La modélisation des cellules solaires tandem est cruciale car elles offrent un potentiel d'augmentation de l'efficacité de conversion en combinant deux matériaux absorbants avec des bandes d'absorption complémentaires.

Le modèle développé dans MATLAB/Simulink tiendra compte des paramètres clés tels que les propriétés optiques et électriques des matériaux, les recombinaisons de porteurs de charge, ainsi que les aspects liés à la conception de la cellule tandem. Les simulations permettront d'explorer l'influence de ces paramètres sur les performances de la cellule, notamment la courbe caractéristique courant-tension (I-V), l'efficacité de conversion, le facteur de forme.

Les résultats de la simulation seront analysés et comparés aux données de simulations faites sous Tcad Silvaco dans le chapitre III. Cette approche de modélisation et de simulation offre un moyen efficace d'optimiser la conception des cellules solaires tandem Pérovskite/CIGS avant leur fabrication réelle, réduisant ainsi les coûts et les efforts expérimentaux.

4.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

4.2.1 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque :

Le modèle d'un module photovoltaïque (PV) est basé sur celui d'une cellule solaire individuelle comprenant une source de courant photonique en parallèle avec une diode modélisant la jonction

PN. Des résistances série (R_s) et parallèle (R_p) sont ajoutées pour tenir compte des pertes internes. R_s représente la résistance au passage du courant, tandis que R_p modélise les fuites de courant parallèles. Ces résistances parasites impactent significativement les performances de la cellule. Le modèle décrit le comportement réel de la cellule et permet de déterminer ses paramètres clés comme le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, le facteur de forme et l'efficacité de conversion. L'analyse des caractéristiques I-V et P-V issues du modèle fournit des informations cruciales pour optimiser la conception du dispositif photovoltaïque.

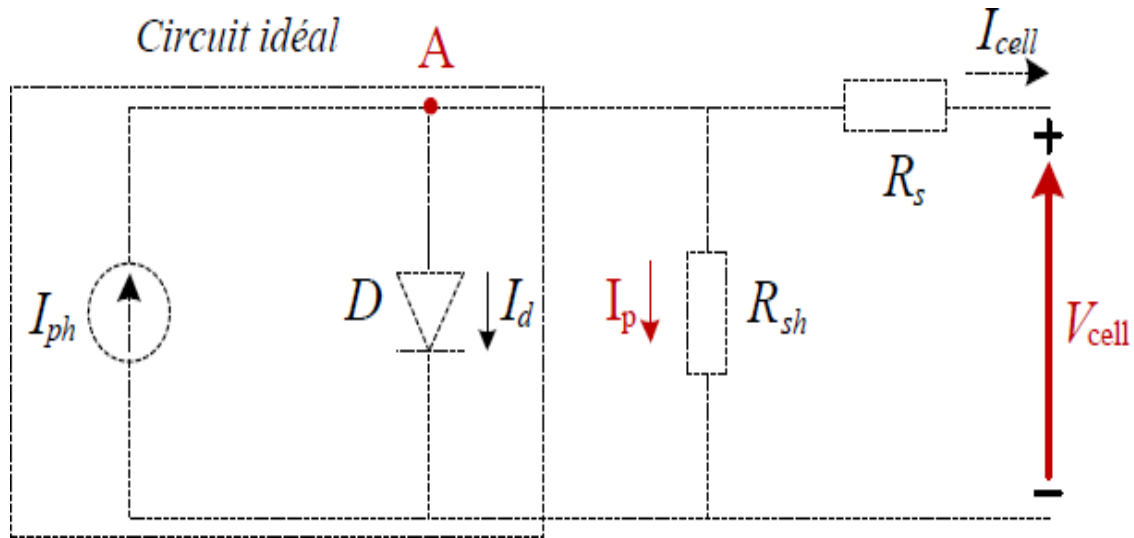


Figure IV.1 : Schéma équivalent complet d'une cellule photovoltaïque.

Ce modèle fait intervenir un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident, Une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes.

Le modèle représenté dans la figure IV.1 est dit à cinq paramètres qui sont :

Le photo-courant (I_{ph}), le courant de saturation (I_0), le facteur d'idéalité de la jonction (n), la Résistance série (R_s) et la résistance shunt (R_{sh})

L'équation de courant de la charge est :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d - I_{rs} \quad (IV.1)$$

Avec :

I_{cell} : Courant délivré par la cellule solaire photovoltaïque

I_{ph} : Photo courant.

I_d : Courant de la diode

I_{Rsh} : Courant shunt.

4.2.2 Les équations régissant la cellule PV :

a. Le photo-courant I_{ph} :

C'est le courant généré par une cellule, il est proportionnel à l'irradiation solaire et est légèrement influencé par la température selon l'équation suivante :

$$I_{ph} = I_{sc} + K_i(T - 298) \frac{G}{1000} \quad (IV.2)$$

Avec :

I_{sc} [A] : Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur).

K_i [A/K] : Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau.

T [K] : Température ambiante.

G [W/m²] : Irradiation sur la surface de la cellule.

T_{ref} [K] : Température de référence (25°C) =298.K

I_0 : Le courant de saturation :

Ce courant varie avec la température et est donné par :

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{q E_g \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)}{n K} \right] \quad (IV.3)$$

Avec :

E_g [eV] : Énergie de gap du semi-conducteur

I_{rs} : Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite)

Son expression est donnée par l'équation :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp \left(\frac{q V_{oc}}{n N_s K T} \right) - 1} \quad (IV.4)$$

Où :

V_{oc} [V] : Tension de circuit ouvert du module.

q [°C] : Charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C).

N_s : Nombre de cellules connectées en série.

n : Constante d'idéalité de la jonction ($1 < n < 2$).

K [J/K] : Constante de Boltzmann ($1.3805 \cdot 10^{-23}$ J/K)

d. Le courant de résistance shunt :

$$I_{sh} = \left(\frac{V + I R_s}{R_{sh}} \right) \quad (IV.5)$$

e. Le courant total I_{pv} :

Le courant total débité par le module est donné par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{q(V+I R_s)}{n K N_s T} \right) - 1 \right) - \frac{V+I R_s}{R_{sh}} \quad (IV.6)$$

Où :

N_s : Nombre de cellules connectées en série dans un module.

4.3 Simulation d'une cellule photovoltaïque par MATLAB-Simulink :

Nous modélisons la connexion des cellules solaires en série pour former un panneau solaire de 36 cellules en série. Nous utilisons des blocs Simulink pour représenter ces connexions, en tenant compte des pertes potentielles et des comportements non linéaires.

La figure suivante représente le schéma bloc des cellules PV en MATLAB-Simulink :

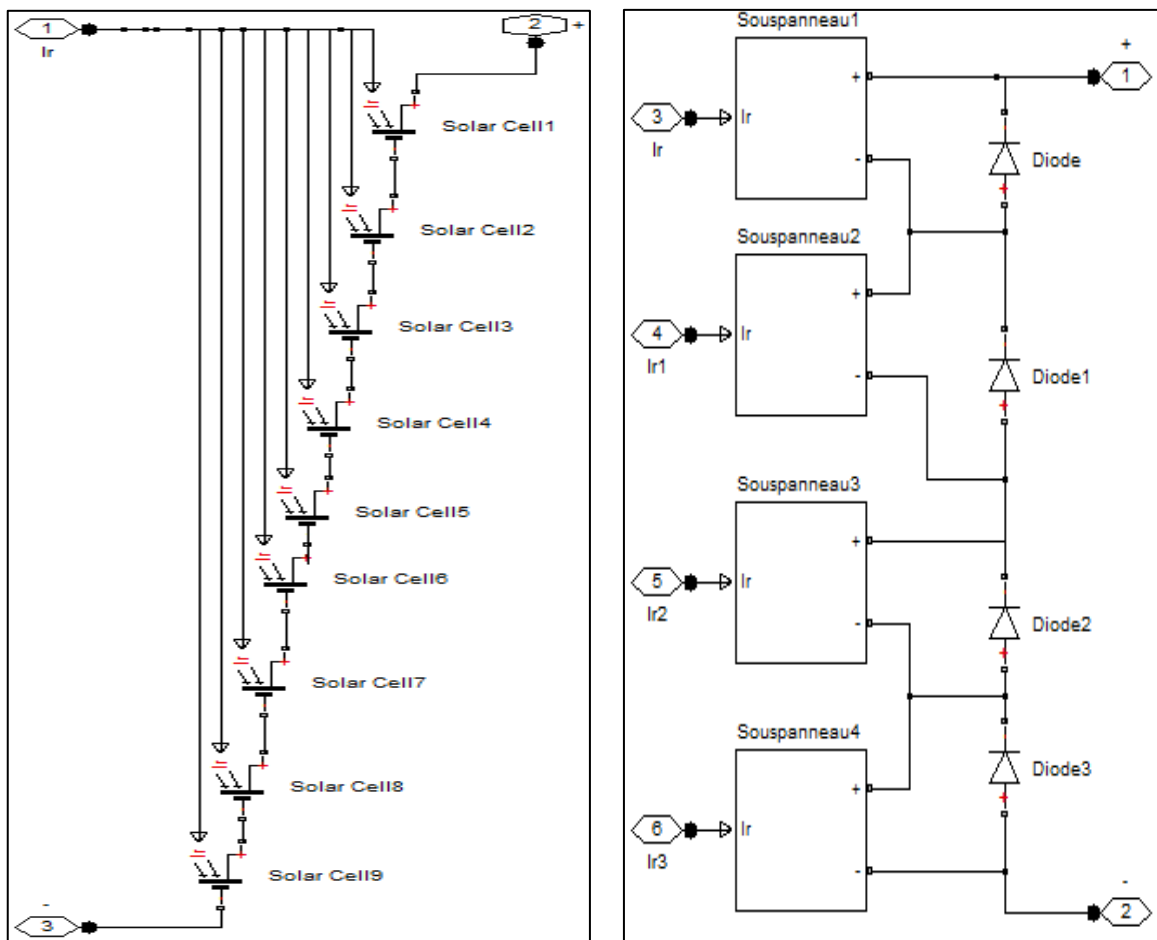


Figure IV.2 : a) représentation schématique de 9 cellules solaires. b) représentation sous simulink de quatre ensembles (09cellules) en série.

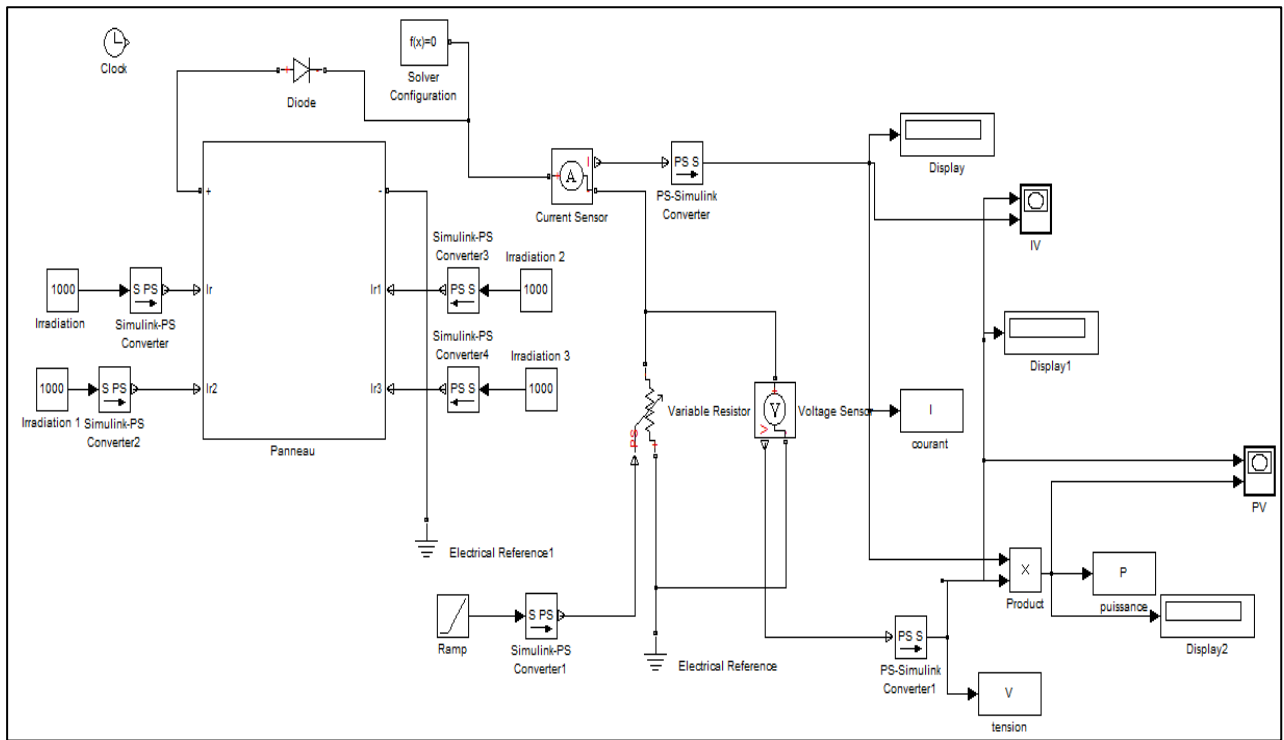


Figure IV.3 : Schéma complet du module constitué de 36 cellules solaires sous MATLAB-Simulink.

4.3.1 Caractéristiques électriques de la cellule pérovskite :

Données introduites dans Matlab simulink de la cellule supérieure en pérovskite :

Tableau IV.1 : Paramètres d'entrées de la cellule pérovskite.

Irradiation standard	$G=1000 \text{ W/m}^2$
Température standard	$T=25^\circ\text{C}$
Courant de court-circuit I_{sc}	2.34 A
Tension a circuit ouvert V_{oc}	1.63 V
Energie de la bande interdite	$E_g \approx 1.55\text{eV}$
Résistance	$R=0.2\Omega$

4.3.2 Les résultats obtenus de la simulation des cellules pérovskite sous MATLAB-Simulink :

Les caractéristiques I(V) et P(V) :

Les figures suivantes présentent les courbes caractéristiques I(V), P(V) obtenues d'un panneau solaire de 36 cellules pérovskite en série.

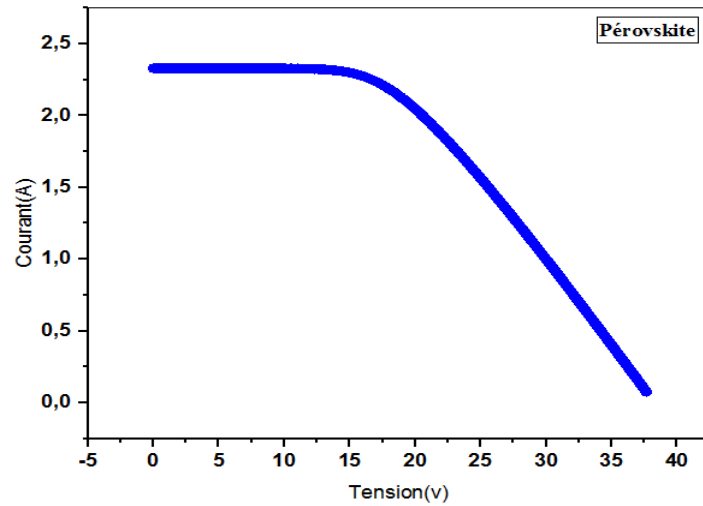


Figure IV.4 : Caractéristique $I(V)$ du module de cellules solaires pérovskite.

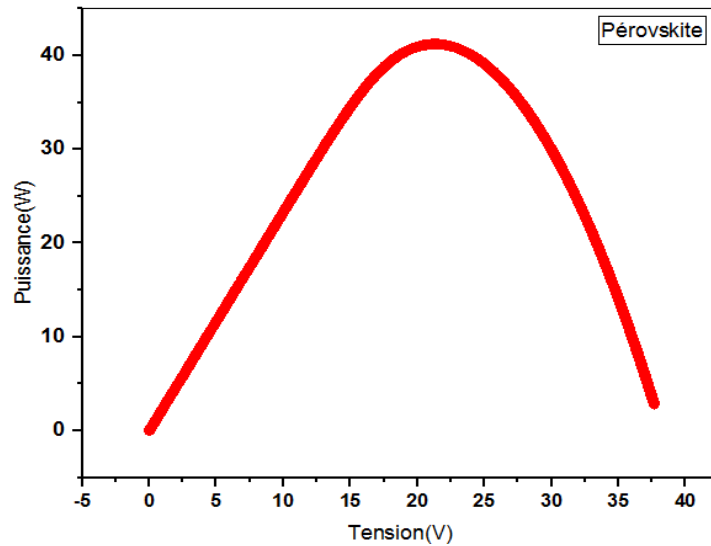


Figure IV.5 : Caractéristique $P(V)$ du module de cellules solaires pérovskite.

On remarque que lorsque l'intensité de la tension augmente la puissance augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale $P_{max} = 41.22W$ puis diminue.

4.3.3 Caractéristiques électriques de la cellule CIGS :

Les caractéristiques électriques de cellule CIGS sont données dans le tableau suivant :

Tableau IV.2: Paramètres d'entrées de la cellule CIGS.

Irradiation standard	$G=1000 \text{ W/m}^2$
Température standard	$T=25^\circ\text{C}$
Courant de court-circuit I_{cc}	3.79A
Tension a circuit ouvert V_{oc}	2.76V
Energie de la bande interdite	$E_g \approx 1.15\text{eV}$
Résistance	$R=0.2\Omega$

4.3.4 Les résultats obtenus de la simulation des cellules CIGS sous MATLAB-Simulink :

Les caractéristiques I(V) et P(V) :

Les figures suivantes présentent les courbes caractéristiques I(V), P(V) obtenues d'un panneau solaire de 36 cellules CIGS en série :

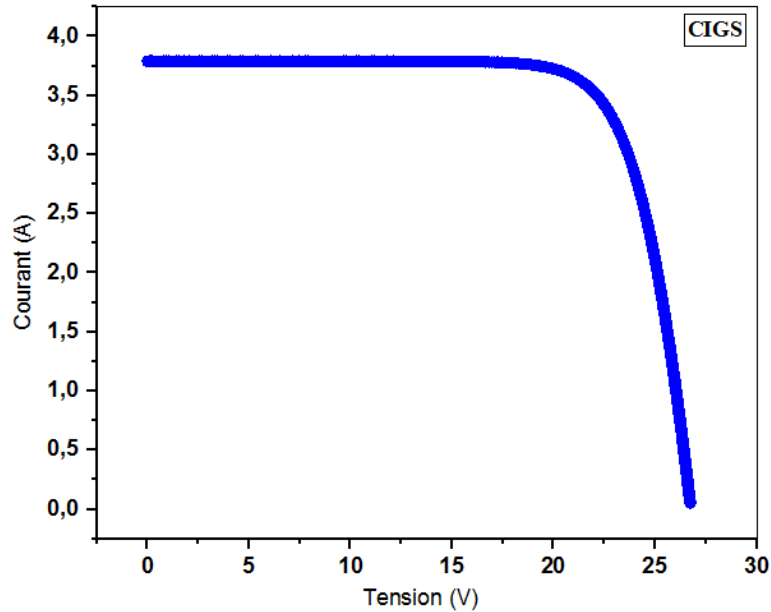


Figure IV.6 : Caractéristique I(V) du module de cellules solaires CIGS.

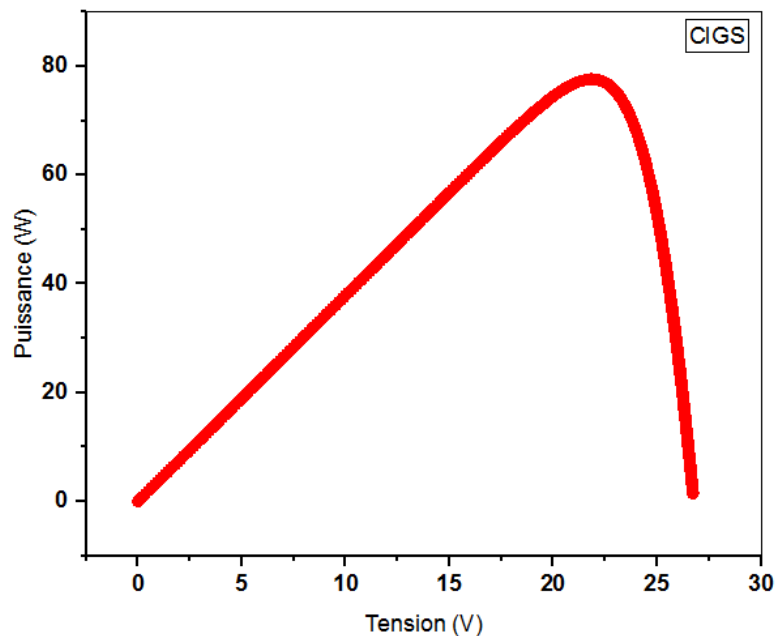


Figure IV.7 : Caractéristique P(V) du module de cellules solaires CIGS.

On remarque que la puissance maximale atteinte est $P_{max}=77.62W$.

4.3.5 Caractéristiques électriques de la cellule tandem (pérovskite/CIGS) :

Les caractéristiques électriques de cellule tandem sont données dans le tableau suivant :

Tableau IV.3 : Paramètres d'entrés de la cellule tandem.

Irradiation standard	$G=1000 \text{ W/m}^2$
Température standard	$T=25^\circ\text{C}$
Courant de court-circuit I_{cc}	2.07A
Tension a circuit ouvert V_{oc}	2.16V
Energie de la bande interdite	$E_g \approx 2.75 \text{ eV}$
Résistance	$R=0.2\Omega$

Pour l'énergie de la bande interdite de tandem nous avons pris la somme de E_g pérovskite « 1.6 eV » et E_g CIGS « 1.15 eV ».

4.3.6 Les résultats de la simulation des cellules solaires tandem sous MATLAB-Simulink :

Les caractéristiques I(V) et P(V) :

Les figures suivantes présentent les caractéristiques I(V), P(V) d'un panneau solaire de 36 cellules tandem en série :

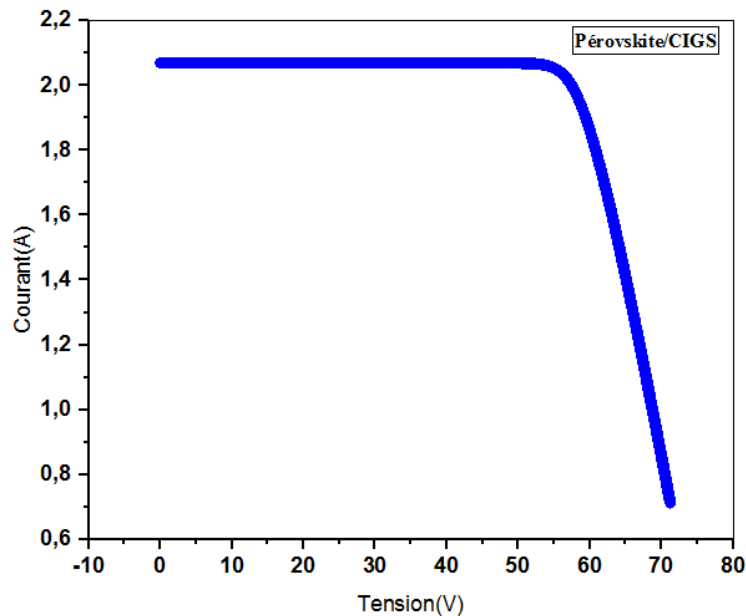


Figure IV.8 : Caractéristique I(V) du module de cellules solaires tandem.

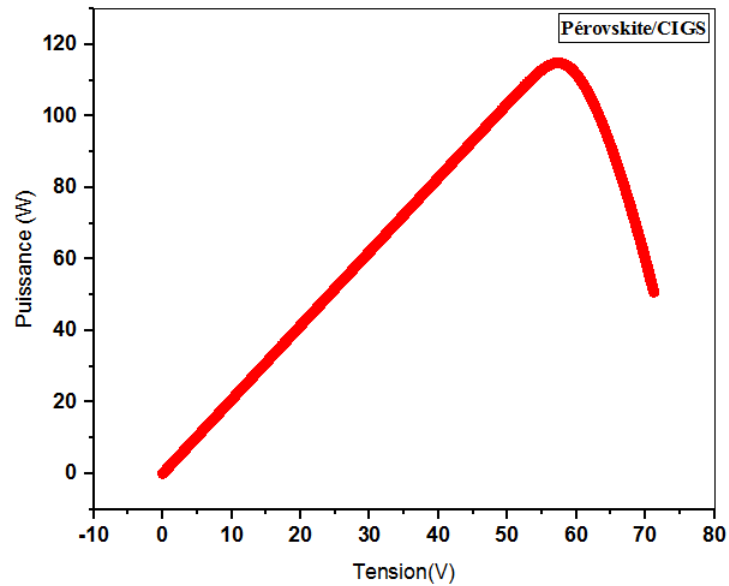


Figure IV.9 : Caractéristique P(V) du module de cellules solaires tandem.

On remarque que la puissance maximale atteinte est $P_{max}=114.40W$.

4.4 Conclusion :

Ce chapitre se concentre sur la modélisation et la simulation de cellules solaires tandem Pérovskite/CIGS dans le but d'optimiser leurs performances. Différentes configurations de connexions en série et en parallèle sont explorées, montrant leurs impacts sur les tensions et les courants. Un modèle développé sous MATLAB/Simulink permet de simuler les caractéristiques électriques de ces cellules, en prenant en compte les propriétés optiques et électriques des matériaux, les recombinaisons de porteurs de charge et les aspects de conception des cellules tandem. Les résultats des simulations révèlent les performances des cellules individuelles et des modules complets, identifiant les limitations et les opportunités d'optimisation. Les caractéristiques I(V) et P(V) soulignent le potentiel d'augmentation de l'efficacité de conversion des cellules tandem grâce à la combinaison des matériaux Pérovskite et CIGS. Cette approche de modélisation et de simulation via MATLAB/Simulink fournit un outil précieux pour optimiser la conception des cellules solaires tandem avant leur fabrication, réduisant ainsi les coûts et les efforts expérimentaux. Les comparaisons avec les simulations effectuées sous Tcad Silvaco renforcent la robustesse des résultats et ouvrent des perspectives prometteuses pour le développement de cellules solaires plus performantes.



Conclusion Générale

Conclusion générale :

Ce mémoire de fin d'études a abordé de manière approfondie la modélisation, la simulation et l'optimisation des performances des cellules solaires à base de pérovskite, CIGS et des structures tandem pérovskite/CIGS. Dans un premier temps, les concepts théoriques fondamentaux des jonctions PN, des cellules solaires idéales et des principaux mécanismes de pertes ont été introduits pour faciliter la compréhension des chapitres suivants.

Ensuite, les architectures, le fonctionnement et les caractéristiques clés des technologies de cellules solaires émergentes en pérovskite, CIGS et multi-jonctions ont été détaillés. Les processus de recombinaison et les défauts limitant les performances de ces dispositifs ont été soulignés.

Par la suite, une étude de simulation numérique approfondie a permis de calibrer et d'optimiser les paramètres physiques des cellules simples en pérovskite et en CIGS, atteignant des rendements maximaux respectifs de 31,93% et 23,91%. Une structure tandem pérovskite/CIGS à deux terminaux a été proposée et optimisée, offrant un rendement prometteur de 39,13%.

Enfin, différentes configurations de connexions série et parallèle pour les cellules tandem ont été explorées via un modèle MATLAB/Simulink. Les résultats ont mis en évidence le potentiel d'augmentation de l'efficacité de conversion grâce à la combinaison des matériaux pérovskite et CIGS. Cette approche de modélisation et de simulation fournit un outil précieux pour optimiser la conception des cellules solaires tandem avant leur fabrication.

En résumé, cette étude apporte une compréhension approfondie des technologies photovoltaïques émergentes à hautes performances, en combinant des aspects théoriques, des modélisations numériques et des simulations d'optimisation. Les résultats obtenus ouvrent des perspectives prometteuses pour le développement de cellules solaires plus efficaces, en particulier grâce aux structures tandem innovantes. Voici quelques perspectives qui pourraient être envisagées sur le plan de la modélisation et simulation :

- On pourrait envisager d'explorer des configurations tandem avec 3 jonctions ou plus, en combinant d'autres matériaux adaptés, afin de capturer une plus grande partie du spectre solaire et repousser les limites d'efficacité.
- Il sera crucial d'étudier l'intégration des cellules tandem optimisées dans des modules et des systèmes photovoltaïques complets, en prenant en compte les aspects thermiques, électriques et d'encapsulation pour une performance maximale.

Sur le plan de l'expérimentation :

- Les modèles et simulations développés dans cette étude doivent être validés par la fabrication et la caractérisation expérimentale de cellules solaires réelles en pérovskite, CIGS et tandem pérovskite/CIGS dans des laboratoires d'expérimentation
- Un effort important devra être consacré à l'optimisation des procédés de fabrication pour réaliser ces structures de manière reproductible et à grande échelle, tout en minimisant les défauts et en améliorant les rendements de production.
- Des études approfondies sur les mécanismes de dégradation et le vieillissement accéléré de ces dispositifs sont nécessaires pour garantir leur viabilité commerciale.
- Une évaluation approfondie du coût de fabrication, du cycle de vie et de l'impact environnemental de ces nouvelles technologies photovoltaïques devra être réalisée afin d'assurer leur viabilité économique et leur durabilité par rapport aux solutions existantes.

Références bibliographiques :

- [1]. S. M. Sze and K. N. Kwok, *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley & sons, Inc, 2007
- [2]. M. Theristis, V. Venizelou, G. Makrides, and G. E. Georghiou, Energy yield in photovoltaic systems, in *Handbook of Photovoltaics*. Elsevier, 2018, pp. 671 713.
- [3]. Parion, Jonathan Master in Electrical Engineering Opto-electrical characterization and modelling of defects in thin-film Cu(In,Ga)Se₂ solar cells oxide passivation layers at the front and window interface. Ecole polytechnique de Louvain 2021-2022
- [4]. J.-P. Colinge and C. A. Colinge, *Physics of Semiconductor Devices*, Springer-Verlag New York Inc., Ed. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [5]. Y.-K. Liao, S.-Y. Kuo, M.-Y. Hsieh, F.-I. Lai, M.-H. Kao, S.-J. Cheng, D.-W. Chiou, T.-P. Hsieh, and H.-C. Kuo, A look into the origin of shunt leakage current of Cu(In,Ga)Se₂ solar cells via experimental and simulation methods, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 117, pp. 145 151, oct 2013
- [6]. M. Ochoa, S. Buecheler, A. N. Tiwari, and R. Carron, Challenges and opportunities for an efficiency boost of next generation Cu(In,Ga)Se₂ solar cells: prospects for a paradigm shift, *Energy and Environmental Science*, vol. 13, no. 7, pp. 2047 2055, 2020.
- [7] T. D. Lee and A. U. Ebong, A review of thin lm solar cell technologies and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 12861297, apr 2017
- [8]. E. Q. Macabebe and E. E. Van Dyk, Parameter extraction from dark current-voltage characteristics of solar cells, *South African Journal of Science*, vol. 104, no. 9, pp. 401404, 2008.
- [9]. J.-P. Colinge and C. A. Colinge, *Physics of Semiconductor Devices*, Springer-Verlag New York Inc., Ed. Kluwer Academic Publishers, 2002. [26]. T. Cox, Searching to distinguish defects and the presence of negative capacitance, 2016.
- [10]. S. M. Sze and K. N. Kwok, *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley & sons, Inc, 2007.
- [11]. M. Theristis, V. Venizelou, G. Makrides, and G. E. Georghiou, Energy yield in photovoltaic systems, in *Handbook of Photovoltaics*. Elsevier, 2018, pp. 671713.
- [12]. U. Rau and H. Schock, Electronic properties of Cu(In,Ga)Se₂ heterojunction solar cells- recent achievements, current understanding, and future challenges, *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, vol. 69, no. 2, pp. 131147, aug 1999.

- [13]. Y.-K. Liao, S.-Y. Kuo, M.-Y. Hsieh, F.-I. Lai, M.-H. Kao, S.-J. Cheng, D.-W. Chiou, T.-P. Hsieh, and H.-C. Kuo, A look into the origin of shunt leakage current of Cu(In,Ga)Se₂ solar cells via experimental and simulation methods, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 117, pp. 145151, oct 2013.
- [14]. T. D. Lee and A. U. Ebong, A review of thin lm solar cell technologies and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 12861297, apr 2017.
- [15]. M. Ochoa, S. Buecheler, A. N. Tiwari, and R. Carron, Challenges and opportunities for an efficiency boost of next generation Cu(In,Ga)Se₂ solar cells: prospects for a paradigm shift, *Energy and Environmental Science*, vol. 13, no. 7, pp. 20472055, 2020.
- [16]. C. P. Muzzillo, Review of grain interior, grain boundary, and interface eects of K in CIGS solar cells: Mechanisms for performance enhancement, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 172, pp. 1824, dec 2017.
- [17]. Mostafa M. Salah, Abdelhalim Zekry , Ahmed Shaker, Mohamed Abouelatta , Mohamed Mousa and Ahmed Saeed Investigation of Electron Transport Material-Free Perovskite/CIGS Tandem Solar Cell *Energies* **2022**, 15, 6326. <https://doi.org/10.3390/en15176326>
<https://www.mdpi.com/journal/energies>
- [18]. Ding, Y.; Shi, B.; Yao, X.; Fan, L.; Luo, J.; Wei, C.; Zhang, D.; Wang, G.; Sheng, Y.; Chen, Y.; et al. Elucidating the role of chlorine in perovskite solar cells. *J. Mater. Chem. A* **2017**, 5, 7423–7432
- [19]. Mahon, N.S.; Korolik, O.V.; Khenkin, M.V.; Arnaoutakis, G.E.; Galagan, Y.; Soriut ⁻ e, V.; Litvinas, D.; Šćajev, P.; Katz, E.A.; Mazanik, A.V. Photoluminescence kinetics for monitoring photoinduced processes in perovskite solar cells. *Sol. Energy* **2020**, 195, 114–120
- [20]. Salah, M.M.; Zekry, A.; Abouelatta, M.; Shaker, A.; Mousa, M.; Amer, F.Z.; Mubarak, R.I.; Saeed, A. High-Efficiency Electron Transport Layer-Free Perovskite/GeTe Tandem Solar Cell: Numerical Simulation. *Crystals* **2022**, 12, 878
- [21]. Tan, K.; Lin, P.; Wang, G.; Liu, Y.; Xu, Z.; Lin, Y. Controllable design of solid-state perovskite solar cells by SCAPS device simulation. *Solid-State Electron.* **2016**, 126, 75–80.
- [22]. Salem, M.S.; Zekry, A.; Shaker, A.; Abouelatta, M.; Abdolkader, T.M. Performance enhancement of a proposed solar cell microstructure based on heavily doped silicon wafers. *Semicond. Sci. Technol.* **2019**, 34, 035012.