

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électronique
Spécialité Traitement de l'Information et Systèmes Électroniques

présenté par

Ameur Chaima

&

Dahmani Basma

Etude d'une cellule solaire double jonction Pérovskite/CIGS à deux électrodes

Proposé par : AISSAT Abdelkader & BOUBKER Manel

Année Universitaire 2022-2023

REMERCIEMENTS

« Au nom d'Allah le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux »

Nous remercions Allah, le tout puissant de nous avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce mémoire. Symbole de notre accomplissement scientifique.

Nous adressons nos sincères remerciements à Monsieur AISSAT Abdelkader professeur à l'université Saad Dahlab Blida 1, notre encadreur, pour ses conseils et ses recommandations tous le long de la rédaction et des recherches de ce manuscrit.

Nous sommes très reconnaissantes aux membres du jury, le professeur Mr. NACER Said, et Mr. BOUNEMRI Ammar.

Nos plus sincères remerciements à tous nos enseignants de la spécialité micro-électronique chacun par son nom.

Nous adressons nos sincères remerciements à toutes les personnes avec qui nous avons eu la chance de travailler ou que nous avons eu l'honneur de côtoyer avant et pendant la préparation de ce mémoire et à tous nos professeurs de l'Université de Saad DAHLEB Blida 1.

Dédicace

Je dédie ce travail :

A ta mémoire ma chère mère, pour te rendre hommage. Je me souviendrai toujours de tout ce que tu as sacrifié pour me donner les chances que j'ai aujourd'hui, tes encouragements incessants, ta confiance et ta fierté. Tu seras toujours mon guide mon modèle de force et mon inspiration, aucun mot ne peut décrire ma gratitude envers toi, tu resteras à jamais gravée dans mon cœur mon ange gardien.

A mon cher père, mon doux frère et ma seule et unique sœur adorable.

A mes grands-parents qui m'ont donné de l'affection, de l'amour et beaucoup de câlins chaleureux que Dieu de leur accorder une longue vie et le bien-être et à toute ma famille qui me soutient.

A mes amies, mes sœurs de cœur que j'ai apprécié chaque jour que nous avons passé ensemble.

A mes professeurs et collègues tout au long de mon parcours académique.

Dahmani Basma.

Dédicace

*Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU
De m'avoir donné la force et le courage de mener
à bien ce modeste travail.*

Je tiens à dédier cet humble travail à :

A ma tendre mère et mon très cher père

A mes précieuses sœurs DOUAA et IKRAM

A mon frère : Abd Elslam

A Toute ma famille AMEUR et KABEHA

*A Tous mes amis d'enfance et du long parcours scolaire et
universitaire.*

A tous Mes professeurs

A tous ceux que je connais et qui me sont chers

Tous ceux qui m'aiment et que j'aime

Ameur Chaima

ملخص

تعد الخلايا الشمسية الترادفية Pérovskite/CIGS الآن واحدة من أكثر التكوينات جاذبية لتحقيق كفاءة فائقة، باستخدام Matlab قمنا بدراسة بعض الخصائص البصرية و قمنا بمحاكاة الخصائص الكهربائية بواسطة SCAPS-1D والتي تركز على تأثير السماكة و درجة الحرارة على خلية CIGS الشمسية عن طريق زيادة تركيز الطبقة النشطة للغاليوم أيضا فعلنا الشيء نفسه لخلية Perovskite الشمسية عن طريق زيادة محتو الكلور للطبقة النشطة $CH_3NH_3PbI_{1-x}Cl_x$ من أجل زيادة تحسين كفاءة الخليتين الشمسيين السابقين لتحقيق الخلية الشمسية الترادفية ثنائية القطب.

كلمات مفتاحية: الترادفية Pérovskite، CIGS، Matlab، SCAPS-1D، الطبقة النشطة، الغاليوم، الكلور، $CH_3NH_3PbI_{1-x}Cl_x$

Résumé

Les cellules solaires tandem Pérovskite/Cuivre Indium Gallium Selenide à deux électrodes sont désormais l'une des configurations les plus performantes et les plus attrayantes pour obtenir un rendement très élevé. Nous avons fait à l'aide du MATLAB une étude sur quelques propriétés optiques et les simulations des propriétés électriques par SCAPS-1D qui se concentrent sur l'effet de l'épaisseur et de la température sur la cellule solaire CIGS en augmentant la concentration du gallium de la couche active. En outre, nous avons fait la même chose pour la cellule solaire à Pérovskite en augmentant la teneur en Cl du $CH_3NH_3PbI_{1-x}Cl_x$ de la couche active. Afin d'améliorer encore l'efficacité des deux cellules solaires précédentes pour réaliser la cellule solaire tandem optimale actuelle à deux électrodes en pérovskite/CIGS.

Mots clé : cellules solaires, tandem, pérovskite, Cuivre, Indium, Gallium, Selenide, électrodes, MATLAB, SCAPS-1D, couche active, $CH_3NH_3PbI_{1-x}Cl_x$.

Abstract

Two-terminal Perovskite/Copper Indium Gallium Selenide tandem solar cells are now one of the best performing and most attractive configurations for achieving very high efficiency. By using MATLAB, we have carried out a study of some optical properties and SCAPS-1D simulations of the electrical properties, focusing on the effect of thickness and temperature on the CIGS solar cell by increasing the gallium concentration of the active layer. In addition, we did the same for the Perovskite solar cell by increasing the Cl content of the $CH_3NH_3PbI_{1-x}Cl_x$ in the active layer. In order to further improve the efficiency of the two previous solar cells to make the current optimal two terminal perovskite/CIGS tandem solar cell.

Keywords: Two-terminal, perovskite, Copper, Indium, Gallium, Selenide, tandem, solar cells, MATLAB, SCAPS-1D, active layer, $CH_3NH_3PbI_{1-x}Cl_x$.

Listes des acronymes et abréviations

a Le facteur de Qualité de Diode

c La Vitesse de la Lumière

CdS Soufre de Cadmium

CdTe Tellure de Cadmium

CIGS Séléniure de Cuivre, d'indium et de Gallium

d L' épaisseur

DDP Différence de Potentiel

DSSC Dye Sensitized Solar Cell

E_g Énergie de Bande Interdite

EQE Rendement Quantique Externe

eta Rendement

εs La permittivité

FF Facture de Forme

FTO l'oxyde d'étain dopé au Fluor

h La Constante de Planck

I₀ Courant Inverse de Saturation

I_{cc} Courant de Court-Circuit

I_{max} Courant Maximal

I_{ph} Photonique Courant

IQE Rendement Quantique Interne

J_{sc} Densité de Courant de Court-Circuit

k La constante de Boltzmann

MI Multiple Junction Cell

n,p Les Densités des Porteurs

N_A La Concentration des Accepteurs

N_D La Concentration des Donneurs

OPSC Organic and Polymer Solar Cell

P_{max} La Puissance Maximale

PV Photovoltaïque

PVC Perovskite Cell

q Charge Élémentaire de l'électron

QDS Quantum Dot Cell

QE Rendement Quantique

R_s La Résistance en Série

R_{sh} La Résistance Shunt

T La Température

TiO₂ Le Dioxyde de Titane

V_{max} Tension Maximal

Voc Tension en Circuit Ouvert

X Concentration

ZCE Zone de charge d'espace

ZnO L'oxyde de Zinc

η Rendement de Convention

λ La longueur d'onde

μ_pμ_n Mobilités des Electrons et des Trous

ν La Fréquence

E_b Énergie de Reliure

Table des matières

Chapitre 01

Notions Générales sur les cellules solaires photovoltaïques

1.1	Introduction	1
1.2	Spectre solaire	1
1.3	Historique du photovoltaïque	2
1.4	Principe de la convention photovoltaïque	2
1.5	Cellules photovoltaïques	3
1.5.1	Définition d'une Cellules photovoltaïque.....	3
1.5.2	Principe de fonctionnement de la cellule PV.....	3
1.5.3	Caractéristique courant tensions I-V.....	4
1.5.4	Courant de fonctionnement maximal (I_{max}).....	6
1.5.5	Tension de fonctionnement maximale (V_{max}).....	6
1.5.6	Paramètres électriques de photovoltaïque	6
1.5.6.1	Courant de court-circuit (I_{cc})	6
1.5.6.2	Tension en circuit ouvert (V_{co}).....	6
1.5.6.3	L'absorption	7
1.5.6.4	Rendement de convention(η).....	7
1.5.6.5	Rendement quantique (QE).....	8
1.6	Filière de photovoltaïque.....	8
1.6.1	Première génération : Silicium cristallin (mono et poly)	9
1.6.2	Deuxième génération : CdTe, CIS/ CIGS, silicium amorphe et microcristallin.....	11
1.6.3	Troisième génération.....	11
1.6.4	Quatrième génération	12
1.7	Les applications de l'énergie solaire photovoltaïque	12
1.8	Avantages et inconvénients des cellules photovoltaïques	12
1.8.1	Avantages	13
1.8.2	Inconvénients.....	13
1.9	Conclusion.....	13

Chapitre 02

Simulation et optimisation des cellules solaires à base de CIGS et à base de pérovskite

2.1	Introduction	15
2.2	La cellule solaire à base de matériau CIGS	15
2.2.1	Structure cristalline.....	15
2.2.2	La cellule solaire étudiée	16

2.3 Optimisation de la cellule à base de CIGS avec une augmentation de concentration du gallium	17
2.3.1 Les paramètres de mailles	17
2.3.2 Énergie de bande interdite	18
2.3.3 L'influence d'épaisseur de la couche CIGS	19
2.3.4 L'influence de la température de la couche CIGS	23
2.4 La cellule solaire à base d'un matériau pérovskite	25
2.4.1 Structure cristalline	25
2.4.2 La cellule solaire étudiée	26
2.4.3 Optimisation de la cellule pérovskite à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{I}_{1-x}\text{Cl}_x$ avec une augmentation de concentration de chlore (Cl)	27
2.4.4 L'influence d'épaisseur de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{I}_{1-x}\text{Cl}_x$	29
2.5 L'influence de la température sur la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{I}_{1-x}\text{Cl}_x$	33
2.6 Conclusion	34

Chapitre 03

Simulation et optimisation de la cellule solaire tandem à base de CIGS/Pérovskite

3.1 Introduction	36
3.2 Description de la structure tandem proposée	36
3.3 Paramètres de la cellule Pérovskite individuelle	37
3.4 Paramètres de la cellule individuelle à base de CIGS	37
3.5 Résultats de simulation de la cellule tandem Pérovskite/CIGS	39
3.6 Conclusion	40

Table des figures

Figure 1.1 Spectre solaire.[6]	2
Figure 1.2 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.[11].....	4
Figure 1.3 Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire [12]	4
Figure 1.4 Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque [15].	5
Figure 1.5 Évolution temporelle des rendements selon le NREL pour les différentes technologies.[11]	9
Figure 1.6 Etape de fabrication des cellules (1) minerai de silicium(2)raffinage(pour augmenter la pureté) (3)silicium en fusion donnant des lingot (4) après solidification (5) wafer obtenu par sciage du lingot(6) traitement de surface par procédés physico chimique(7) et cellule finie avec électrodes. [11]	10
Figure 1.7 Cellule mono cristalline et poly cristalline [11]	10
Figure 2.1 (a) Structure de la maille élémentaire du zinc-blende, (b) Structure de la maille élémentaire de la chalcopyrite du CuInSe ₂ [28]	15
Figure 2.2 Le schéma de la cellule typique introduit au simulateur à base de CIGS.	16
Figure 2.3 La variation de paramètres de mailles a en fonction de la concentration.....	17
Figure 2.4 La variation de paramètres de mailles C en fonction de la concentration.....	18
Figure 2.5 La variation de l'énergie de bande interdite en fonction de la concentration.	18
Figure 2.6 La variation du rendement quantique externe en fonction de lambda pour différents épaisseurs (μm) et E _g =1.15 eV.	19
Figure 2.7 La variation de la densité J en fonction de V pour plusieurs épaisseurs (μm).	19
Figure 2.8 La variation de la puissance en fonction de V pour différentes épaisseurs de la couche absorbant.	20
Figure 2.9 La variation de courant de court-circuit J _{cc} et la tension de circuit ouvert V _{co} en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS.	20
Figure 2.10 La variation de La capacité pour différentes épaisseurs de la couche CIGS T=300K.	21
Figure 2.11 La variation de La facteur de forme FF % et eta % pour différentes épaisseurs de la couche CIGS T=300K.....	21
Figure 2.12 La variation du rendement en fonction de l'énergie de bande interdite.	22
Figure 2.13 Les résultats de différentes épaisseurs.	23
Figure 2.14 La variation de courant de court-circuit J _{sc} et eta % pour différentes Températures.	23
Figure 2.15 La variation de La facteur de forme FF % et eta % pour différentes Température.....	24
Figure 2.16 Les résultats de différentes Températures.	24
Figure 2.17 Représentation de la structure pérovskite ABX ₃ . [32]	26
Figure 2.18 La structure cristalline de MAPbX ₃ pseudo-cubique [32].....	26
Figure 2.19 Le schéma de la cellule typique introduit au simulateur à base deCH ₃ NH ₃ PbI ₃ 1-xClx. 26	
Figure 2.20 La variation de paramètres de mailles en fonction de la concentration.	27
Figure 2.21 La variation de permittivité en fonction de la concentration.....	27
Figure 2.22 La variation de l'énergie de liaison en fonction de la concentration.....	28
Figure 2.23 La variation de l'énergie de bande interdite en fonction de la concentration.	28
Figure 2.24 La variation du rendement quantique externe en fonction de lambda pour différents épaisseurs (μm) et E _g = 1.52 Ev.	29
Figure 2.25 La variation de la densité de courant J en fonction de V pour différentes valeurs de E _g . 29	
Figure 2.26 L'effet de variation de la puissance en fonction de V pour différentes valeurs de l'épaisseur.....	30

Figure 2.27 La variation de courant de court-circuit J_{cc} et la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de couche absorbante.	30
Figure 2.28 La variation de la capacité pour différentes épaisseurs de la couche absorbante.	31
Figure 2.29 La variation du facteur de forme FF % et η % en fonction de l'épaisseur de couche absorbante.	31
Figure 2.30 La variation du rendement en fonction de l'énergie de bande interdite.	32
Figure 2.31 Les résultats de déférente épaisseur.	32
Figure 2.32 La variation de courant de court-circuit J_{cc} et η % pour différentes valeurs de températures.	33
Figure 2.33 La variation du facteur de forme FF et η % pour différentes valeurs de températures. .	33
Figure 2.34 Les résultats de déférentes températures.	34
Figure 3.1 Structure schématique du dispositif pérovskite/CIGS cellule solaire tandem à deux électrodes.	36
Figure 3.2 La variation de la densité de courant J en fonction de V de la cellule à base de CIGS, Pérovskite et tandem.	39
Figure 3.3 La variation de la Puissance en fonction de V de la cellule à base de CIGS, Pérovskite et tandem.	40

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Propriétés physiques de matériau CIGS.	22
Tableau 2.2 Propriétés physiques de matériau CIGS a déférentes valeurs de Températures.	24
Tableau 2.3 Propriétés physique de matériau CH ₃ NH ₃ PbI ₃ I _{1-x} Cl _x	32
Tableau 2.4 Propriétés physiques de matériau CH ₃ NH ₃ PbI ₃ I _{1-x} Cl _x a différentes valeurs de températures.	34
Tableau 3.1 Paramètres électriques des différentes couches de la cellule individuelle à base de Pérovskite. [32]	37
Tableau 3.2 Paramètres électriques des différentes couches de la cellule individuelle à base de CIGS. [32]	37
Tableau 3.3 Performances des dispositifs des cellules solaires CIGS.	38
Tableau 3.4 Performances des dispositifs des cellules solaires Pérovskite.	38

L'approvisionnement abondant en énergie abordable est un élément fondamental de notre civilisation, et si nous voulons que le développement et la prospérité continuent à être des caractéristiques de notre existence collective, nous ferions mieux de nous tourner vers des solutions énergétiques durables à plus long terme. Le photovoltaïque pourrait être un élément important de cette évolution. La technologie du silicium domine actuellement le marché des cellules solaires, mais il y a des concurrents. Deux entre eux, qui font l'objet du présent document, sont les cellules solaires basées sur les pérovskites d'halogénure mixte et le CIGS ($\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}$) tandem, pourraient potentiellement surpasser les performances du silicium standard à jonction unique [1].

Les cellules solaires tandem pérovskite/CIGS à deux électrodes sont un type de cellule solaire qui combine une sous-cellule supérieure en pérovskite à bande interdite étroite et une sous-cellule inférieure en CIGS (séléniure de cuivre, d'indium et de gallium) à large bande interdite [2]. Le matériau pérovskite possède une bande interdite accordable et des techniques à faible coût de traitement, ce qui en fait un matériau prometteur pour la technologie PV tandem. La cellule solaire tandem qui en résulte a un rendement plus élevé qu'une cellule solaire à jonction unique, car elle peut capter une gamme plus large du spectre solaire [3].

Les cellules solaires tandem pérovskite/CIGS à deux électrodes présentent plusieurs avantages par rapport aux cellules solaires à jonction unique. Rendement plus élevé, les cellules solaires tandem peuvent capter une plus grande partie du spectre solaire, ce qui se traduit par un rendement supérieur à celui d'une cellule solaire à jonction unique. Rentabilité, le matériau pérovskite possède des techniques de traitement à faible coût, ce qui en fait un matériau prometteur pour la technologie photovoltaïque en tandem. Bande interdite accordable, le matériau pérovskite possède une bande interdite accordable, ce qui permet d'optimiser l'efficacité de la cellule solaire tandem. Sensibilité réduite à l'oxygène, Les absorbeurs pérovskites à cations multiples qui permettent d'obtenir des rendements élevés en tandem sont remarquablement moins sensibles à l'exposition à l'oxygène que d'autres matériaux [4].

Une cellule solaire photovoltaïque doit être optimisée par simulation afin d'améliorer ses performances. L'avantage de l'optimisation par simulation est qu'elle suit un modèle mathématique du système réel et que nous pouvons prédire les paramètres optimaux qui contribuent à la fabrication d'une cellule avec les meilleures performances

Pour simuler les caractéristiques physiques (densité de courant de court-circuit J_{cc} , tension de circuit ouvert V_{oc} , Facteur de forme FF, le rendement (η) de conversion de la cellule solaire étudiée.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres, le premier chapitre est consacré sur l'état de l'art des cellules solaires. Le deuxième chapitre traite de principe de fonctionnement de deux types des cellules solaires simple à base de CIGS et Pérovskite. Les propriétés physiques et optiques qui influent sur les performances de deux cellules solaires étudiées ont été prises en considérations. La simulation et l'optimisation de la cellule solaire tandem ont été présentées dans le chapitre 3.

Enfin, on termine notre projet de fin d'étude par la conclusion générale et les perspectives.

Chapitre 01

Notions Générales sur les cellules solaires photovoltaïques

1.1 Introduction

Ce chapitre parle sur cellules photovoltaïques, sont des innovations technologiques qui exploitent la puissance de la lumière. Elles sont un élément essentiel des systèmes d'énergie solaire, qui constituent un substitut durable et renouvelable à de nombreuses sources d'énergie non renouvelables. Depuis leur création dans les années 1950, les cellules solaires ont beaucoup évolué et on les trouve aujourd'hui dans toute une série de produits, des petits appareils portables aux grandes centrales électriques. Les cellules solaires sont de plus en plus considérées comme une étape cruciale dans la transition vers un avenir de production d'énergie plus durable, alors que le changement climatique et les problèmes environnementaux ne cessent de s'aggraver.

1.2 Spectre solaire

Le spectre solaire fait référence à la gamme d'ondes électromagnétiques émises par le soleil, y compris divers rayonnements. Cette énergie électromagnétique se compose de différentes couleurs et longueurs d'onde de lumière visible, ainsi que de rayons infrarouges et ultraviolets qui ne sont pas visibles à l'œil nu. La relation suivante décrit comment les photons qui composent ce rayonnement électromagnétique sont considérés comme des porteurs d'énergie liés à leur longueur d'onde :

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.1)$$

avec

h : la constante de Planck.

ν : la fréquence.

c : la vitesse de la lumière.

λ : la longueur d'onde.

Les variations du spectre solaire entraînent des changements dans la performance et l'efficacité des cellules solaires, qui ne peuvent fonctionner de manière optimale que sur une bande spectrale relativement étroite. Le spectre solaire peut également avoir un impact sur la réponse spectrale et l'efficacité des cellules photovoltaïques [5].

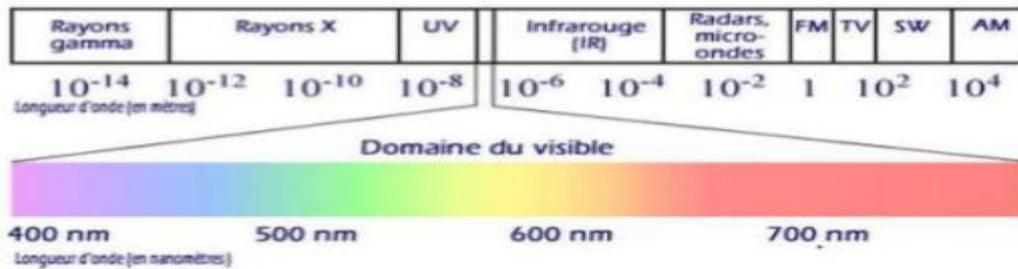


Figure 1.1 Spectre solaire.[6]

1.3 Historique du photovoltaïque

Le physicien français Edmond Becquerel a décrit pour la première fois l'effet photovoltaïque en 1839 et Einstein a expliqué son mécanisme en 1912, mais cela reste une curiosité scientifique de laboratoire jusqu'aux années 1950. Becquerel a découvert que certains matériaux pouvaient fournir une petite quantité de courant électrique est générée lorsqu'elle est exposée à la lumière. Heinrich Hertz (Heinrich Hertz) au début de la En 1870, le rendement en sélénium était d'environ 1 %, et il fut rapidement adopté comme photomètre.

Des chercheurs américains (Chapin, Fuller, Pearson et Prince) travaillant aux laboratoires Bell, en 1955 Téléphone (maintenant Alcatel-Lucent Bell Laboratoires) développent des cellules photovoltaïques à haut rendement de 6 %. Les Américains ont lancé le satellite Vanguard en 1959, composé de cellules photovoltaïques. Le rendement est de 9%.

La première maison avec un système photovoltaïque a été construite en 1973 à l'Université de Delaware aux États-Unis d'Amérique. En 1983, la première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque est sortie. Elle a parcouru 4000 km en Australie. Aujourd'hui l'énergie photovoltaïque est accessible aux entreprises et aux particuliers, panneaux. Le rendement du photovoltaïque est d'environ 20% [7].

1.4 Principe de la convention photovoltaïque

Le principe de la convention photovoltaïque désigne la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique à l'aide de matériaux semi-conducteurs. Ce processus est basé sur l'effet photovoltaïque, qui se produit lorsque les photons de la lumière du soleil frappent la surface d'une cellule solaire et détachent des électrons, générant ainsi un flux d'électricité [8].

Chapitre01 Notions Générales sur les cellules solaires photovoltaïques

Il repose sur l'effet photoélectrique, qui est la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est éclairé par un rayonnement de la bonne énergie, l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques de la bande de valence à la bande de conduction du semi-conducteur, ce qui génère des paires électron-trou. Si l'appareil est isolé, une différence de potentiel apparaît aux bornes de la jonction (photo tension) ; si l'appareil est connecté à une charge électrique externe, le courant circule alors qu'aucune tension n'est appliquée. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque [9].

1.5 Cellules photovoltaïques

1.5.1 Définition d'une Cellules photovoltaïque

Les cellules solaires sont des pièces d'équipement qui peuvent transformer l'énergie du soleil en électricité. Ils sont fabriqués à partir de matériaux comme le silicium et utilisent un procédé appelé effet photovoltaïque.

1.5.2 Principe de fonctionnement de la cellule PV

Une cellule solaire est une jonction PN éclairée. Lorsque la première partie N entre en contact avec la seconde partie P du même monocristal, les électrons majoritaires du côté N diffusent vers le côté P, où ils sont minoritaires, laissant derrière eux des atomes donneurs ionisés positivement. Les trous majoritaires de la face P diffusent vers la face N, où ils sont minoritaires et où ils laissent derrière eux des atomes accepteurs négativement ionisés. Création d'une zone de charge dépourvue de porteurs majoritaires libres au niveau de la jonction. Cette zone de charge d'espace (ZCE) génère un champ électrique interne qui oppose la migration des porteurs majoritaires et l'équilibre thermodynamique est atteint. Une diode est formée en connectant des contacts métalliques sur les zones N et P. Ces connexions métalliques doivent maintenir une connexion ohmique avec le semi-conducteur. Lorsque la jonction est éclairée, des photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite transmettent leur énergie aux atomes. Chaque photon déplace un électron de la bande de valence vers la bande de conduction, laissant un trou qui peut se déplacer et générer une paire électron-trou. Une paire d'électrons et de trous. Lorsque cette paire se forme à la jonction ou à proximité, elle est séparée par le champ électrique interne.

Lorsqu'une charge est appliquée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion externe, ce qui entraîne une différence de potentiel (ddp) et la circulation d'un courant électrique.[10]

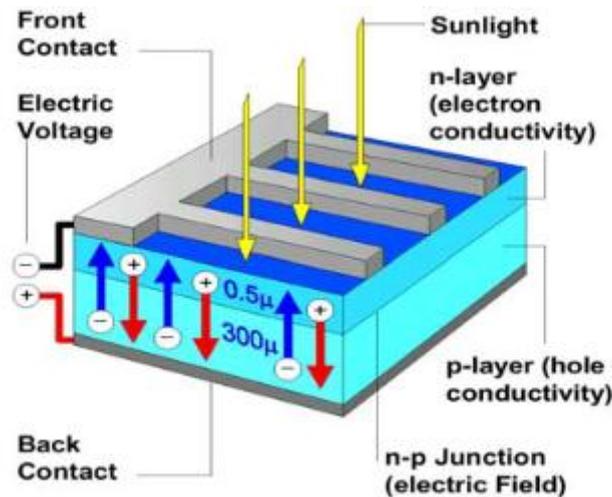


Figure 1.2 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.[11]

1.5.3 Caractéristique courant tensions I-V

La puissance d'une cellule solaire est le produit de la tension et du courant générés par la cellule solaire. Ces deux grandeurs, le courant et la tension, dépendent à la fois des propriétés électriques de la cellule et de la charge à ses bornes. Les propriétés électriques d'une cellule sont résumées dans un graphique appelé caractéristique courant-tension. Un dipôle électrique est entièrement défini par sa caractéristique courant-tension, qui lui est propre. Les cellules solaires, qui sont des dipôles électriques, ont leur propre caractéristique courant-tension, comme le montre le schéma ci-dessous :

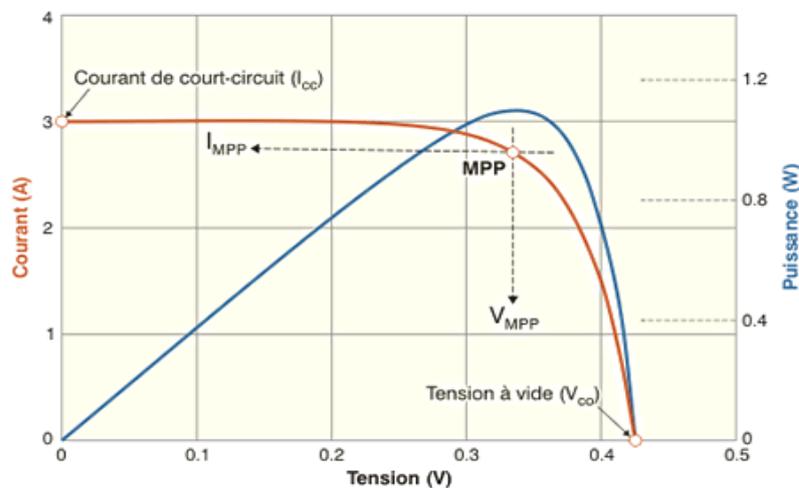


Figure 1.3 Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire [12]

Chapitre01 Notions Générales sur les cellules solaires photovoltaïques

Cette caractéristique courant-tension est la relation entre la tension et le courant fourni par la cellule solaire [13]

Pour écrire l'équation de la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque en utilisant le circuit équivalent représenté sur la figure 1.4 et l'équation de la diode [14] :

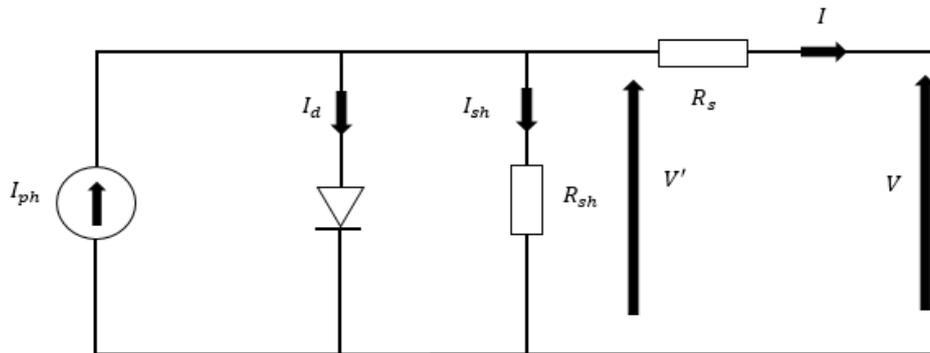


Figure 1.4 Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque [15].

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV}{akT}} - 1 \right) \quad (1.2)$$

Suivant la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (1.3)$$

La loi de tension de Kirchhoff et la loi d'ohm donnent :

$$V' = V + I \cdot R_s \quad (1.4)$$

Les équations (1.3) et (1.4) donnent :

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV}{akT}} - 1 \right) = I_0 \left(e^{\frac{q(V-I \cdot R_s)}{akT}} - 1 \right) \quad (1.5)$$

La loi d'ohm et l'équation (1.4)

$$I_{sh} = \frac{V'}{R_{sh}} = \frac{V - I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (1.6)$$

La substitution de (1.5) et (1.6) dans (1.3) donne l'équation de la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V-I \cdot R_s)}{akT}} - 1 \right) - \frac{V - I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (1.7)$$

avec :

I_{ph} : photonique courant

I_0 : courant inverse de saturation

Chapitre01 Notions Générales sur les cellules solaires photovoltaïques

q : charge élémentaire de l'électron

A : le facteur de qualité de diode

K : la constante de Boltzmann

T : la Température

R_s : La résistance en série

R_{sh} : La résistance shunt

1.5.4 Courant de fonctionnement maximal (I_{max})

Le courant maximal qu'une cellule peut produire lorsqu'elle est exposée à la lumière à une température spécifique et avec une charge attachée à ses bornes.

1.5.5 Tension de fonctionnement maximale (V_{max})

Il s'agit de la tension la plus élevée que la cellule est capable de générer après avoir été exposée à la lumière à une température spécifique et avec une charge attachée à ses bornes.

1.5.6 Paramètres électriques de photovoltaïque

A partir de la caractéristique $I(V)$ de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment :

1.5.6.1 Courant de court-circuit (I_{cc})

Le courant de court-circuit d'une cellule photovoltaïque, noté I_{cc} , est le courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est court-circuitée, c'est-à-dire lorsque le pôle positif est relié au pôle négatif et que la tension à ses bornes est nulle. Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule photovoltaïque est nulle. Le courant de court-circuit est une valeur caractéristique propre à chaque cellule photovoltaïque. La caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque suit une loi bien particulière, qui dépend de nombreux facteurs, tels que la résistance liée à la cellule solaire, la puissance lumineuse incidente et le rendement de la cellule. Le courant de court-circuit est important pour évaluer la performance et la sécurité des installations photovoltaïques.[16]

1.5.6.2 Tension en circuit ouvert (V_{co})

La tension en circuit ouvert (V_{co}) d'une cellule solaire est la tension produite par la cellule lorsqu'aucune charge n'est reliée à ses bornes et qu'elle est exposée à la lumière. En d'autres termes, aucun courant ne traverse la cellule. La tension en circuit ouvert est essentielle car elle indique la capacité d'une cellule solaire à créer de l'énergie électrique. Lorsqu'elle est connectée à une charge, plus la tension du circuit ouvert est élevée, plus la capacité de la cellule à générer de l'énergie électrique est importante.

Chapitre01 Notions Générales sur les cellules solaires photovoltaïques

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \right) \approx \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} \right) \quad (1.8)$$

Avec K : constante de Boltzmann ($8.62 \cdot 10^5$ Ev. K^{-1}), T : température en kelvin, q : charge élémentaire, I_s : courant de saturation.

1.5.6.3 L'absorption

La lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme. L'expression du coefficient d'absorption est donnée par [17] :

$$\alpha_{Absorbeur}(E) = B(E - E_{Absorbeur})^{\frac{1}{2}} \quad (1.9)$$

avec :

B : est une constante qui dépend de la densité d'état associée aux photons absorbés.

E : l'énergie d'irradiation.

$E_{Absorbeur}$: L'énergie de bande interdite.

1.5.6.4 Facteur de forme (FF)

Le facteur de forme (FF) d'une cellule photovoltaïque est une grandeur sans dimension qui permet de caractériser la qualité de la courbe courant-tension de la cellule photovoltaïque. Le facteur de forme est défini comme le rapport entre la puissance maximale de la cellule photovoltaïque et le produit du courant de court-circuit (I_{cc}) et de la tension de circuit ouvert (V_{co}) de la cellule photovoltaïque. Le facteur de forme est une mesure de l'efficacité de la cellule photovoltaïque à convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique. Le facteur de forme dépend de nombreux facteurs, tels que la qualité des matériaux utilisés, la géométrie de la cellule photovoltaïque et les conditions d'irradiation solaire.

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} I_{cc}} = \frac{V_{max} I_{max}}{V_{co} I_{cc}} \quad (1.10)$$

1.5.6.5 Rendement de conversion (η)

Le rendement de conversion d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre l'énergie électrique produite par la cellule et l'énergie lumineuse incidente. En d'autres termes, il s'agit de la quantité d'énergie lumineuse transformée par la cellule en énergie électrique. Le rendement de conversion est exprimé en pourcentage (%).

$$\eta = \frac{V_{max} I_{max}}{P_i S} = \frac{FF V_{co} I_{cc}}{P_i S} \quad (1.11)$$

avec

P_i : puissance incidente reçue par unité de surface en $W \cdot cm^2$.

S : surface de la cellule m^2 .

1.5.6.6 Rendement quantique (QE)

Le rendement quantique de la cellule solaire photovoltaïque $QE(\lambda)$, est défini par le quotient du nombre de paires électrons-trous photo générées et effectivement collectées sur le nombre de photons incidents. L'énergie d'un photon étant liée à sa longueur d'onde, le rendement quantique est généralement représenté sous la forme d'un spectre en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident. Il existe deux types de rendement quantique pour une cellule solaire photovoltaïque, à une longueur d'onde donnée, qui se différencient de la manière par laquelle le nombre de photons incidents est considéré :

- Le rendement quantique externe, External Quantum Efficiency (EQE), est le rapport du nombre de paires électrons-trous collectées sur le nombre total de photons incidents sur la cellule, qu'ils soient ensuite réfléchis, absorbés ou transmis au niveau de la cellule.
- Le rendement quantique interne, Internal Quantum Efficiency (IQE), est le rapport du nombre de paires électrons-trous collectées sur le nombre de photons incident absorbés. L'IQE est un paramètre permettant de s'affranchir des pertes par réflexion de la cellule. Elle est toujours supérieure à l'EQE et vaut l'unité si chaque photon crée une paire électron-trou. [18]

Les expressions de ces rendements sont données par :

$$EQE(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda) hc}{\phi_0(\lambda) \cdot q \cdot \lambda} \quad (1.12)$$

$$IQE(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda) hc}{\phi_0(\lambda) \cdot q \cdot \lambda [1-R(\lambda)][1-\exp(-\alpha(\lambda)x)]} = \frac{EQE(\lambda)}{[1-R(\lambda)][1-\exp(-\alpha(\lambda)x)]} \quad (1.13)$$

Avec $\phi_0(\lambda)$ est le flux lumineux incident, q la charge élémentaire, hc/λ l'énergie du photon (h étant la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde), $\alpha(\lambda)$ le coefficient d'absorption et x l'épaisseur de couche de matière traversée.

1.6 Filière de photovoltaïque

La fonction principale d'une cellule photovoltaïque est d'accepter le rayonnement solaire sous forme de lumière pure et de le convertir en énergie électrique par un processus de conversion connu sous le nom d'effet photovoltaïque. Plusieurs technologies sont utilisées dans le processus de production des cellules solaires, y compris la modification des matériaux avec des efficacités de conversion photoélectrique variables dans les composants de la cellule. La

Chapitre01 Notions Générales sur les cellules solaires photovoltaïques

technologie photovoltaïque peut être divisée en quatre générations principales en raison de l'introduction de plusieurs méthodes de fabrication non conventionnelles pour produire des cellules solaires fonctionnelles [19].

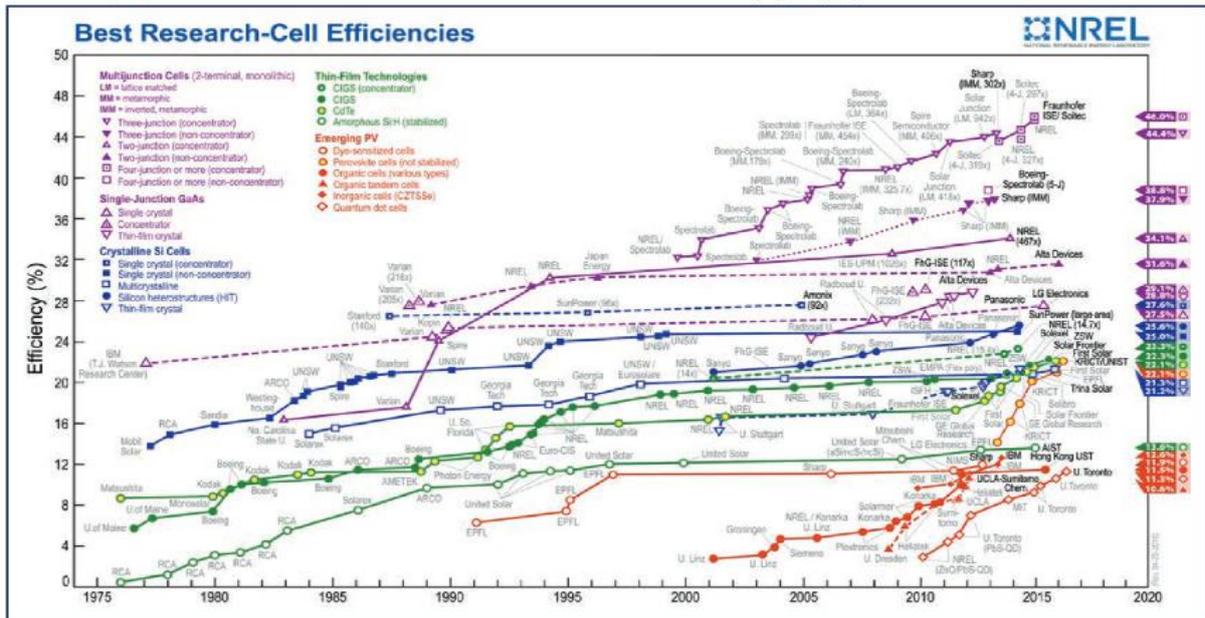


Figure 1.5 Évolution temporelle des rendements selon le NREL pour les différentes technologies.[11]

1.6.1 Première génération : Silicium cristallin (mono et poly)

Cette génération de batteries est basée sur des tranches de silicium cristallin (tranches minces). Ces plaquettes sont transformées en lingots de silicium. Ces lingots sont le résultat des processus suivants un processus de raffinage pour obtenir un matériau contenant 99,99% de silicium. Les systèmes cristallins peuvent être divisés en monocristaux et poly cristaux selon le type de structure.

La structure monocristalline et la structure poly cristalline. Ces deux types de cellules résultent de processus d'affinage et de solidification différents procédés de solidification (procédé Cz (Cz) et procédé Siemens). Procédé Cz et procédé Siemens Les procédés de purification Cz et Siemens ont des structures d'alimentation différentes et sont généralement mis en œuvre de manière différente. et sont généralement mis en œuvre par des industries différentes.

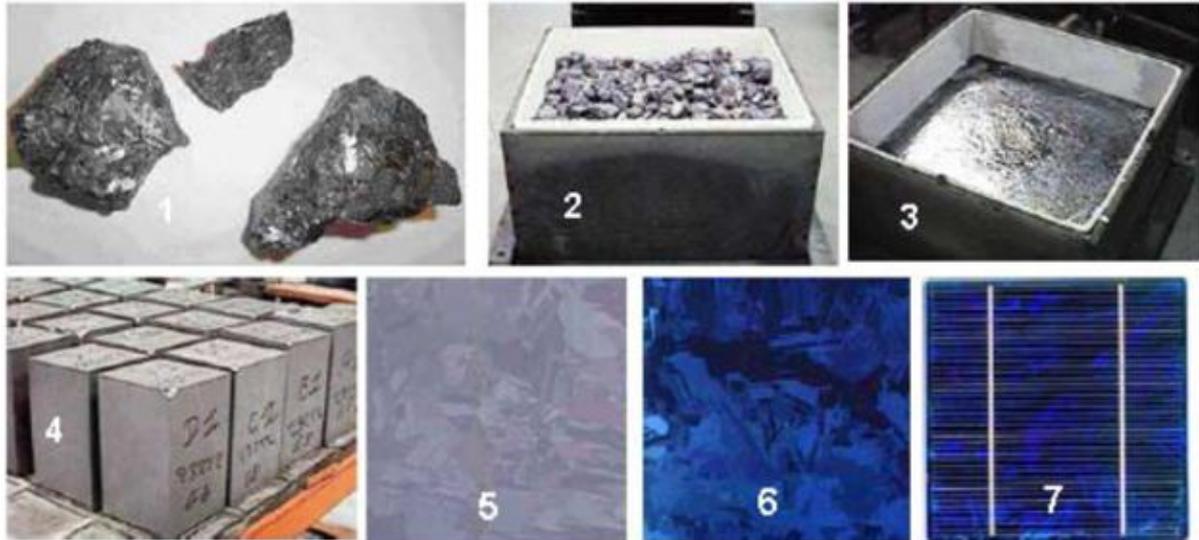


Figure 1.6 Etape de fabrication des cellules (1) minerais de silicium(2)raffinage(pour augmenter la pureté) (3)silicium en fusion donnant des lingot (4) après solidification (5) wafer obtenu par sciage du lingot(6) traitement de surface par procédés physico chimique(7) et cellule finie avec électrodes. [11]

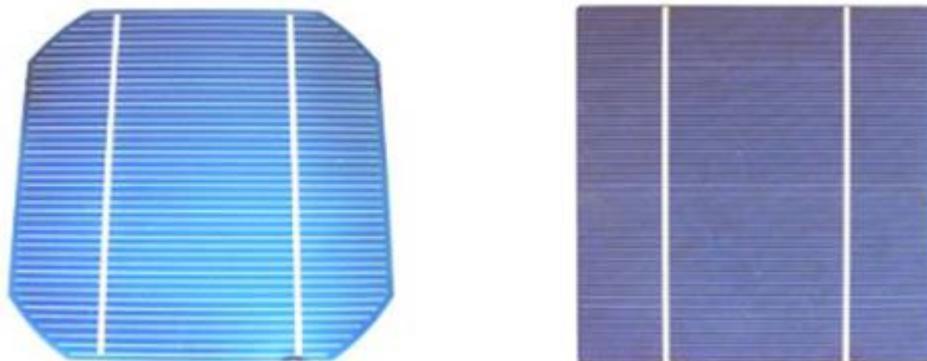


Figure 1.7 Cellule mono cristalline et poly cristalline [11]

Les cellules monocristallines se distinguent par leurs coins repliés et leur aspect uniforme. En fonction de l'orientation des cristaux. Les cellules poly cristallines ont un aspect plus irisé en raison de l'orientation des différents réseaux cristallins par rapport au plan de coupe. Ces technologies se caractérisent par un rendement élevé de conversion de la lumière en électricité. 12%-14% (poly cristallin), 13%-19% (monocristallin), au niveau des produits commerciaux les plus répandus. Niveaux des modules commerciaux les plus utilisés [11].

1.6.2 Deuxième génération : CdTe, CIS/ CIGS, silicium amorphe et microcristallin

Cette génération de batteries est obtenue par le dépôt de matériaux semi-conducteurs en couches minces. Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que le PE-CVD (dépôt chimique en phase vapeur amélioré par plasma) sur le substrat. L'épaisseur des couches varie entre quelques nanomètres à quelques dizaines de micromètres. Ces technologies, initialement coûteuses, et (en raison de leur faible poids par watt crête) ont été réservées aux applications spatiales et les technologies d'enrichissement. Au fur et à mesure de l'augmentation de la production, le coût de ces technologies a augmenté. Avec l'augmentation de la production, le coût de ces technologies a baissé et est devenu compétitif par rapport aux technologies cristallines de première génération. Les technologies cristallines. Parmi les technologies à couches minces utilisées industriellement (en production de masse), on distingue : les technologies cristallines de première génération, les technologies à couches minces de deuxième génération et les technologies à couches minces de troisième génération.

On distingue les technologies à couches minces suivantes :

CdTe : tellure de cadmium

CIS / CIGS : sélénure de cuivre, d'indium et de gallium

Silicium en couche mince : alpha Si amorphe, silicium microcristallin.

Ces technologies se caractérisent par leur efficacité dans la conversion de l'énergie lumineuse. Les taux de conversion de l'énergie en énergie électrique varient de 6 % (α Si) à 5-11 % (CdTe) (efficacité des cellules, pour les modules). (Les modules ont un rendement légèrement inférieur en raison de l'espace entre les cellules).[11] Elles présentent des qualités mécaniques supérieures qui conviennent aux applications flexibles, mais au prix d'une efficacité réduite. Alors que la première génération de cellules solaires était un exemple de microélectronique, les progrès des couches minces ont nécessité de nouveaux modes de croissance, ouvrant l'industrie à d'autres domaines tels que l'électrochimie [20].

1.6.3 Troisième génération

La troisième génération est issue du concept d'amélioration de l'efficacité des cellules photovoltaïques par l'utilisation de nouveaux matériaux appelés nanomatériaux DSSC (dye-sensitized solar cell), QDS (quantum dot cell), OPSC (organic and polymer solar cell), PVS (perovskite cell), MI (multiple junction cell).

Les nanomatériaux sont de nouveaux matériaux qui gagnent en popularité en raison de leurs propriétés uniques. Voici quelques-unes de ces caractéristiques :

Chapitre01 Notions Générales sur les cellules solaires photovoltaïques

En ajustant la taille des nanoparticules, la bande interdite des différentes couches peut être ajustée à la valeur appropriée. Cela permet une plus grande liberté de conception de l'absorbeur de la cellule solaire. Les électrons et les trous générés par la lumière doivent parcourir une distance nettement plus courte, ce qui réduit considérablement les pertes par recombinaison. Dans la zone ultraviolette du spectre, l'application d'une couche de nanoparticules de silicium de haute qualité sur une cellule solaire au silicium augmente l'efficacité de la conversion de 50 à 60 %.

L'utilisation d'une quantité moindre de matériaux permet de réduire les coûts [21].

Les cellules solaires organiques sont des cellules photovoltaïques qui présentent au moins les caractéristiques suivantes Il y a une couche active composée de molécules organiques. Il existe deux types principaux :

- Cellules photovoltaïques moléculaires organiques.
- Cellules photovoltaïques à polymère organique [22].

1.6.4 Quatrième génération

Les cellules photovoltaïques de quatrième génération, ou cellules inorganiques hybrides, combinent la rentabilité et la flexibilité des films minces en polymère avec la stabilité des nanostructures organiques telles que les nanoparticules et oxydes métalliques, les nanotubes de carbone, le graphène et ses dérivés. Ces gadgets, connus sous le nom de "nano-photovoltaïques", pourraient représenter l'avenir enthousiaste de la photovoltaïque [23].

1.7 Les applications de l'énergie solaire photovoltaïque

Les applications de l'énergie solaire sont nombreuses et peuvent être divisées en deux catégories principales :

- Les applications autonomes non connectées au réseau électrique, telles que les satellites, les appareils mobiles, les relais de communication, les balises maritimes et l'électrification de zones isolées.
- Les applications connectées au réseau électrique : systèmes attachés aux bâtiments des consommateurs, parcs photovoltaïques au sol (centrales électriques), etc. [24].

1.8 Avantages et inconvénients des cellules photovoltaïques

Il convient de noter que certains de ces avantages et inconvénients peuvent varier en fonction de facteurs tels que la situation géographique, la taille du système et les réglementations locales.

Chapitre01 Notions Générales sur les cellules solaires photovoltaïques

1.8.1 Avantages

L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable et inépuisable. Lorsque les panneaux solaires produisent de l'électricité, ils n'émettent aucun polluant. Les panneaux solaires peuvent être installés sur des locaux ou des terrains qui ne sont pas utilisés à d'autres fins. Les coûts de l'énergie solaire ont considérablement diminué ces dernières années, ce qui la rend plus accessible. Sachant que l'énergie solaire est une source d'énergie décentralisée, les propriétaires comme les entreprises sont en mesure de produire leur propre électricité.

Les systèmes photovoltaïques nécessitent peu d'entretien et restent efficaces pendant un temps considérable. Les systèmes photovoltaïques sont fiables et n'utilisent pas de pièces mobiles. Les matériaux utilisés (silicium, verre et aluminium) sont résistants aux conditions climatiques extrêmes. Dans les régions isolées, le photovoltaïque peut être une solution pratique pour obtenir de l'électricité à faible coût [25].

1.8.2 Inconvénients

Cycle de vie en question : la durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle, mais de l'ordre de 20 à 30 ans. La production d'énergie solaire est intermittente, ce qui signifie qu'elle dépend de l'ensoleillement et peut fluctuer en fonction des conditions météorologiques. Pour la production d'électricité à grande échelle, l'énergie solaire nécessite souvent une grande superficie de terrain. Dans les endroits où l'ensoleillement est faible, les panneaux solaires peuvent être moins efficaces. Le rendement des panneaux solaires est encore faible, de l'ordre de 20 % (au mieux). L'énergie solaire photovoltaïque est donc mieux adaptée aux projets à faibles besoins, comme les maisons individuelles. Les maisons individuelles, par exemple.

Le rendement des cellules solaires diminue avec le temps. Il est généralement admis que Les panneaux solaires présentent une baisse d'efficacité de 1 % par an.

Les panneaux solaires nécessitent des minéraux rares et dangereux tels que le cuivre, le chrome, le silicium, le cadmium et le tellure, dont l'extraction et le traitement peuvent avoir des effets considérables sur l'environnement. Le recyclage des panneaux solaires à la fin de leur vie utile peut potentiellement poser des problèmes de gestion des déchets [25].

1.9 Conclusion

En conclusion, ce chapitre présente des notions générales sur les cellules solaires photovoltaïques et donne un aperçu sur la technologie qui sous-tend cette source d'énergie renouvelable. Nous avons également exploré le principe de fonctionnement, les caractéristiques électriques, les générations et certains des avantages et inconvénients des cellules solaires.

Chapitre 02

**Simulation et optimisation
des cellules solaires à base de
CIGS et à base de pérovskite**

Chapitre 02 Simulation et optimisation des cellules solaires à base de CIGS et à base de pérovskite

2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de la simulation numérique par le logiciel SCAPS-1D des cellules solaires à base de CIGS et à base de pérovskite l'interprétation des résultats trouvés. Nous commençons ce chapitre par la définition de la structure de la cellule solaire étudiée, et les paramètres des matériaux employés dans la simulation numérique. Après cela, nous allons étudier l'effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbeur. Ensuite, nous montrons l'effet de variation de température sur les cellules solaires à base de CIGS et à base de pérovskite.

2.2 La cellule solaire à base de matériau CIGS

Le matériau CIGS est un matériau semi-conducteur utilisé dans la fabrication de cellules solaires à couche mince. CIGS fait référence aux éléments qui le composent, à savoir le cuivre (Cu), l'indium (In), le gallium (Ga) et le sélénium (Se). Les cellules solaires à base de CIGS ont une efficacité de conversion élevée, c'est-à-dire qu'elles peuvent convertir une grande partie de l'énergie lumineuse en électricité [26].

2.2.1 Structure cristalline

Le CuInSe_2 et CuGaSe_2 sont des matériaux qui forment des alliages Cu (In, Ga) Se_2 , appartient au groupe I-III-VI₂ et présente une structure de chalcopyrite tétragonale. Cette chalcopyrite à base de CuInSe_2 a une structure cubique de diorite de zinc, également connue sous le nom de sphalérite ZnO [27], qui est une sphalérite.

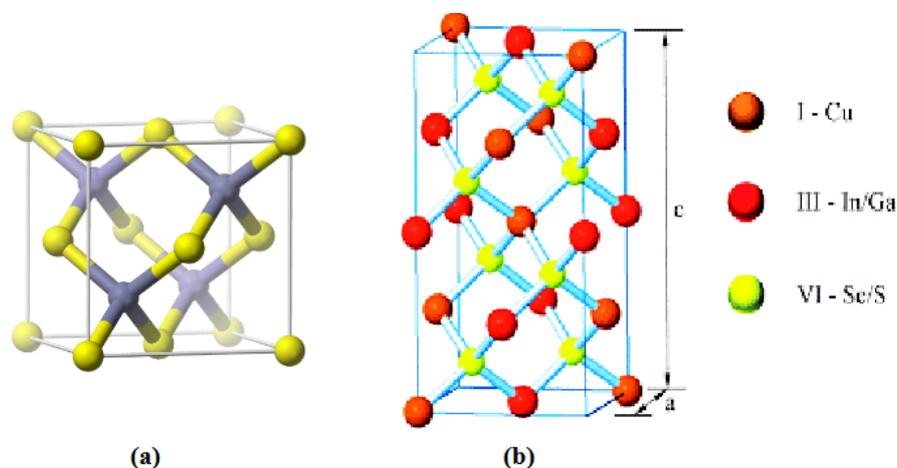


Figure 2.1 (a) Structure de la maille élémentaire du zinc-blende, (b) Structure de la maille élémentaire de la chalcopyrite du CuInSe_2 [28]

Chapitre 02 Simulation et optimisation des cellules solaires à base de CIGS et à base de pérovskite

Chaque atome de Se est lié de manière tétraédrique à deux atomes, chaque atome de Cu ou In étant entouré de quatre atomes de Se. Dans le cas du CIGS, les sites des atomes du groupe III présentent une distorsion tétragonale en raison de la longueur des liaisons Cu-Se et de la longueur des liaisons In-Se [28]. Les sites des atomes du groupe III sont occupés par des atomes d'In ou de Ga dans des proportions qui dépendent de la composition de l'alliage (figure 2.1).

2.2.2 La cellule solaire étudiée

La cellule simulée est de type ZnO /n) CdS/(p) CIGS. Elle contient respectivement les couches suivantes : La couche fenêtre ZnO de conductivité de type n suivie par la couche tampon CdS de type n et l'absorbeur CIGS de type p ensuite une couche Molybdène Mo qui a été utilisé comme un contact arrière métallique. L'absorbeur CIGS avec une énergie de gap 1.15 eV constitue un absorbeur presque idéal. Il ne nécessite pas beaucoup d'épaisseur pour absorber la quasi-totalité du spectre solaire (figure 2.2) .

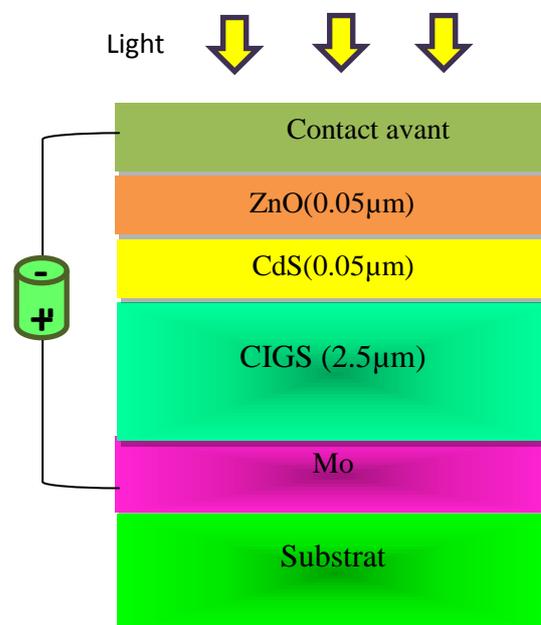


Figure 2.2 Le schéma de la cellule typique introduit au simulateur à base de CIGS.

2.3 Optimisation de la cellule à base de CIGS avec une augmentation de concentration du gallium

2.3.1 Les paramètres de mailles

La figure 2.3 montre la variation de paramètre de maille de la structure CuInGaSe₂ en fonction de la concentration du gallium à T=300K. On constate que l'augmentation de la concentration du gallium provoque une diminution de paramètre de maille. Lorsque la concentration du gallium x varie de 0 à 1 le paramètre de maille varie de 5.95Å à 5.78Å, c'est-à-dire on a une diminution de $\Delta a=0.17 \text{ \AA}$. Cette simulation nous permet d'étudier la stabilité de la structure proposée. Pour la détermination de paramètre de maille nous avons utilisés la loi de Végard :

$$a(x) = 5.78 + 0.17x(\text{\AA}) \quad (2.1)$$

$$c(x) = 11.61 - 0.57x(\text{\AA}) \quad (2.2)$$

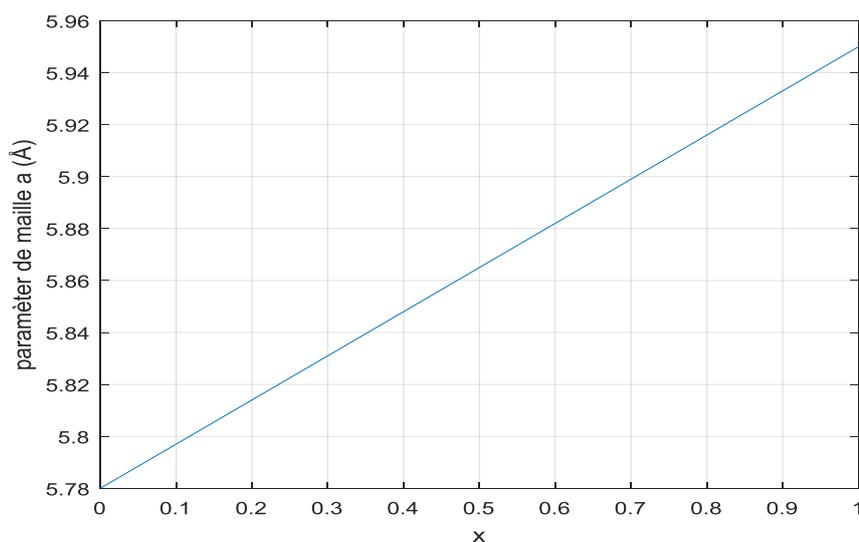


Figure 2.3 La variation de paramètres de mailles a en fonction de la concentration.

La figure 2.4 montre la variation de paramètre de maille de la structure CuInGaSe₂ en fonction de la concentration du gallium à T=300K. On constate que l'augmentation de la concentration du gallium provoque une diminution de paramètre de maille. Lorsque la concentration du gallium x varie de 0 à 1 le paramètre de maille varie de 12.18Å à 11.61 Å, c'est-à-dire on a une diminution de $\Delta a=0.57 \text{ \AA}$. Cette simulation nous permet d'étudier la stabilité de la structure proposée.

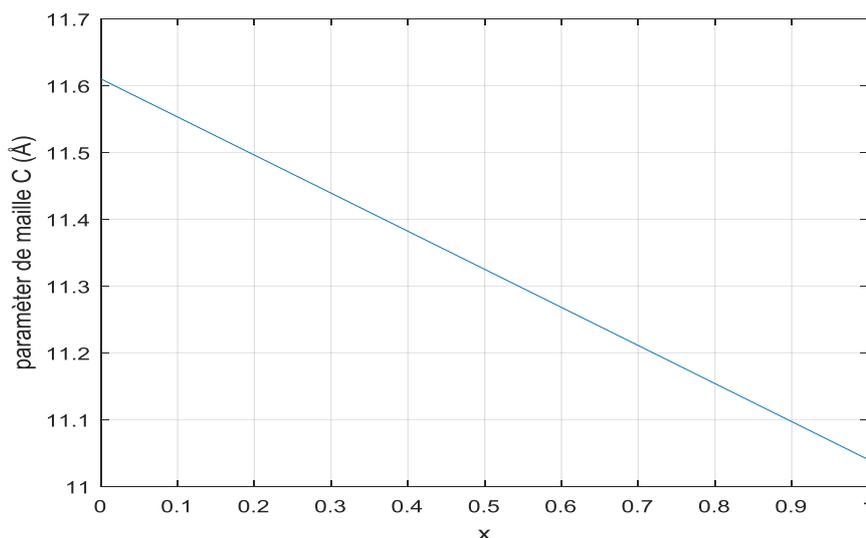


Figure 2.4 La variation de paramètres de mailles C en fonction de la concentration

2.3.2. Énergie de bande interdite

La figure 2.5 illustre la variation de l'énergie de la bande interdite en fonction de la concentration du gallium à T=300K. Dans cette partie on a négligé l'effet de la contrainte sur l'énergie de la bande interdite. On remarque que l'accroissement de la concentration du gallium provoque une augmentation de l'énergie de la bande interdite de la couche absorbante. Lorsqu'on varie la concentration du gallium x de 0 à 1, l'énergie de la bande interdite change de 1.01 à 1.64eV respectivement. Cette étude nous permet de simuler et d'optimiser le coefficient d'absorption de la couche absorbante par l'équation quadratique :

$$E_g(x) = 1.01 + 0.626x - 0.167x(1 - x) \quad (2.4)$$

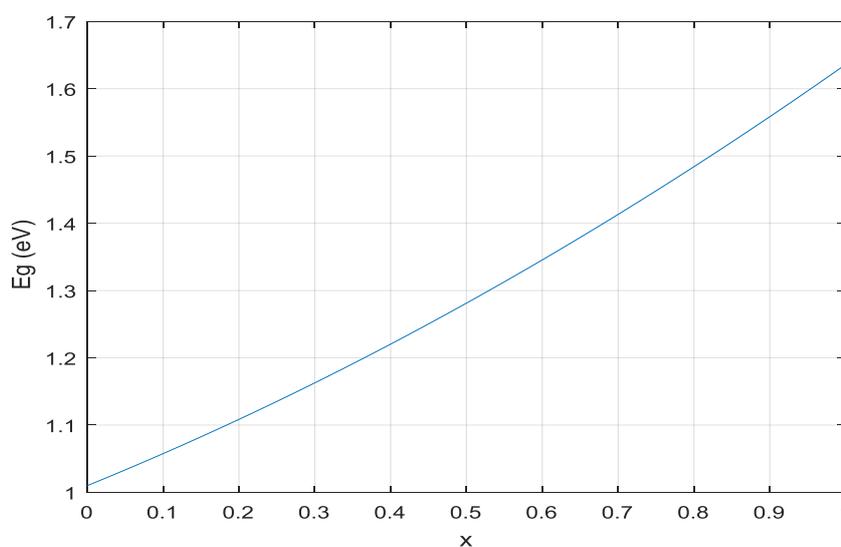


Figure 2.5 La variation de l'énergie de bande interdite en fonction de la concentration.

Chapitre 02 Simulation et optimisation des cellules solaires à base de CIGS et à base de pérovskite

2.3.3 L'influence d'épaisseur de la couche CIGS

La figure 2.6 ci-dessous montre la variation de rendement extérieur suivant la longueur d'onde en différentes épaisseurs de la couche absorbante, ce qui montre que ce paramètre de sortie performe à chaque augmentation au niveau de l'épaisseur (μm).

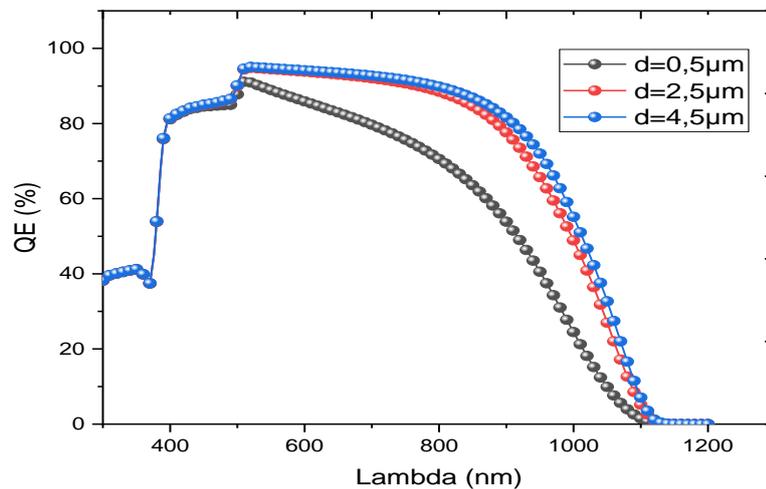


Figure 2.6 La variation du rendement quantique externe en fonction de lambda pour différents épaisseurs (μm) et $E_g=1.15\text{ eV}$.

En traçant le graphe 2.7 de paramètres de sorties J(V) par l'augmentation d'épaisseur interdites de $0.1\mu\text{m}$ jusqu'à $7\mu\text{m}$.

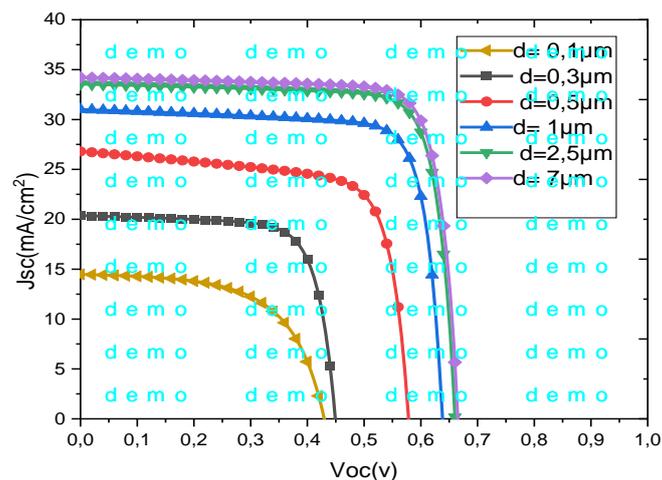


Figure 2.7 La variation de la densité J en fonction de V pour plusieurs épaisseurs (μm).

Chapitre 02 Simulation et optimisation des cellules solaires à base de CIGS et à base de pérovskite

La figure 2.8 montre la variation de la puissance par rapport à la tension de sortie en variant l'épaisseur de la couche absorbante, la puissance augmente à chaque fois que l'épaisseur augmente.

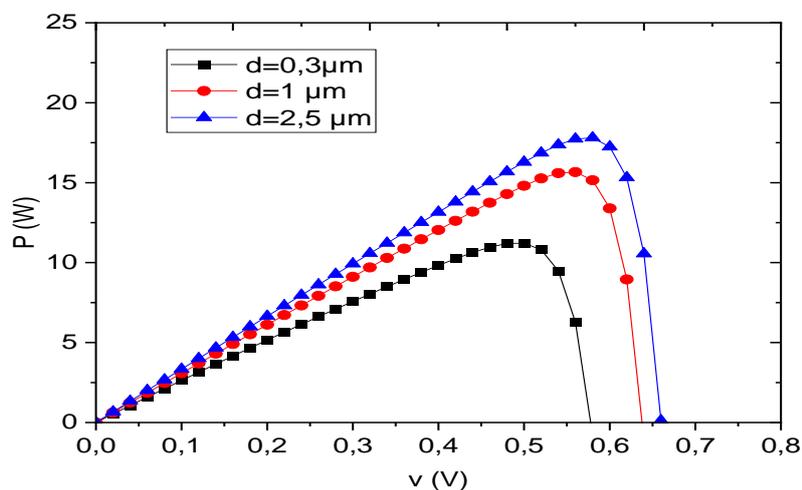


Figure 2.8 La variation de la puissance en fonction de V pour différentes épaisseurs de la couche absorbante.

En même temps ou l'épaisseur augmente, on remarque une augmentation de la tension de circuit-ouvert et une augmentation de la densité de courant de court-circuit. Ce qui est montré dans de la figue 2.9.

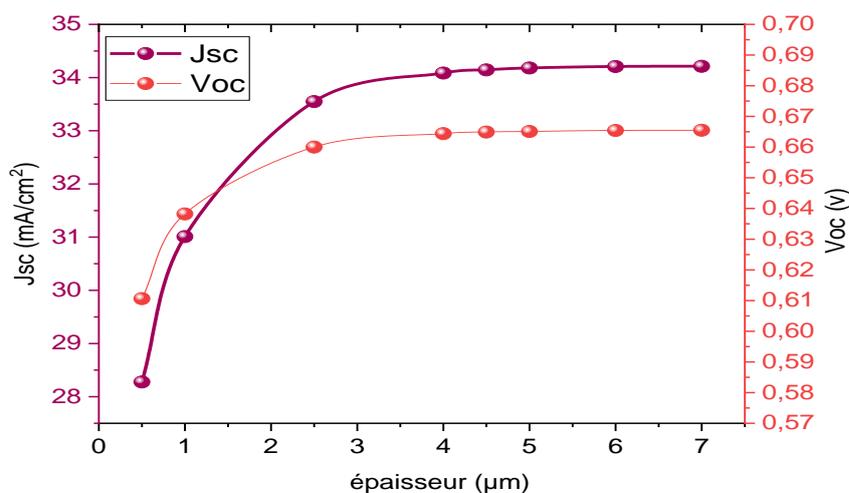


Figure 2.9 La variation de courant de court-circuit J_{cc} et la tension de circuit ouvert V_{co} en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS.

Chapitre 02 Simulation et optimisation des cellules solaires à base de CIGS et à base de pérovskite

La figure 2.10 illustre la variation de la capacité en fonction de l'épaisseur de l'absorbeur. On L'augmentation de l'épaisseur de 'absorbeur provoque une augmentation de la capacité. Lorsque l'épaisseur varie de 0.5 à 4 μ m la capacité varie de 75 à 350nF. Dans la structure proposée le changement de l'épaisseur impose une augmentation importante de l'effet capacitif.

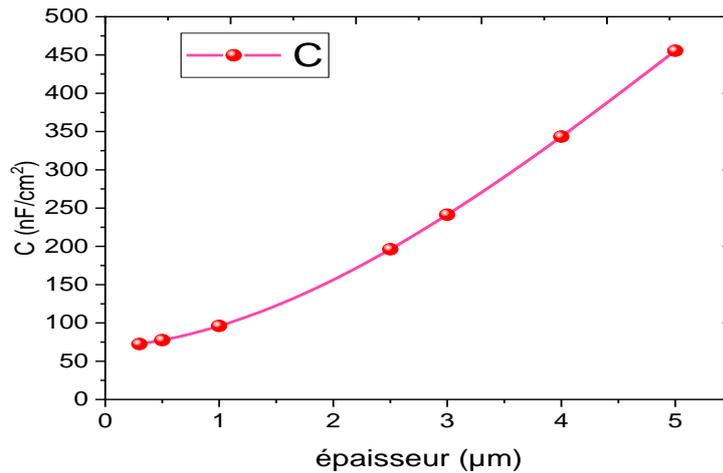


Figure 2.10 La variation de La capacité pour différentes épaisseurs de la couche CIGS T=300K.

L'effet de l'épaisseur de la couche absorbante sur le rendement et le facteur de forme est très important car en augmentant l'épaisseur de 0.5 μ m jusqu'à 6 μ m, on remarque une augmentation très intéressante au rendement jusqu'à la saturation, puis il commence à stabiliser. Le facteur de forme augmenté par augmentation de l'épaisseur (figure 2.11).

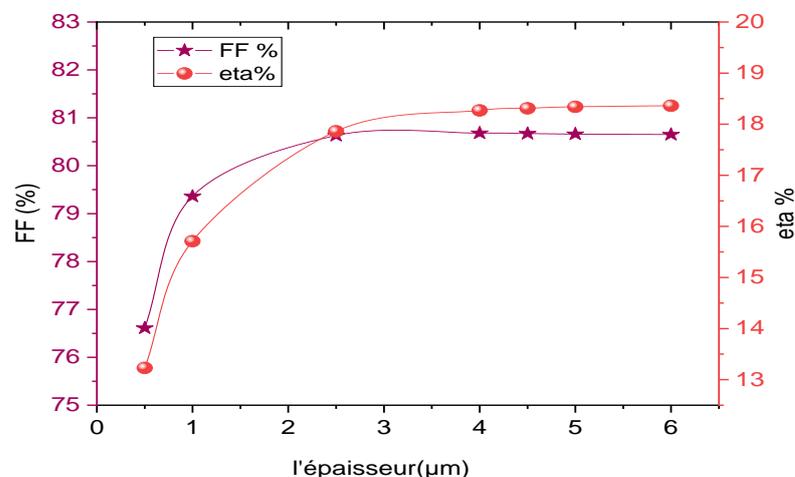


Figure 2.11 La variation de La factor de forme FF % et eta % pour différentes épaisseurs de la couche CIGS T=300K.

Chapitre 02 Simulation et optimisation des cellules solaires à base de CIGS et à base de pérovskite

La figure 2.12 illustre l'influence de l'énergie de la bande interdite sur le rendement de la cellule solaire proposée à $T=300K$. Pour une énergie de bande interdite $E_g=1.15eV$ et $T=300K$ on a les résultats suivants pour une simulation à différentes épaisseurs : Un résultat optimal est obtenu dans l'épaisseur $2.5 \mu m$.

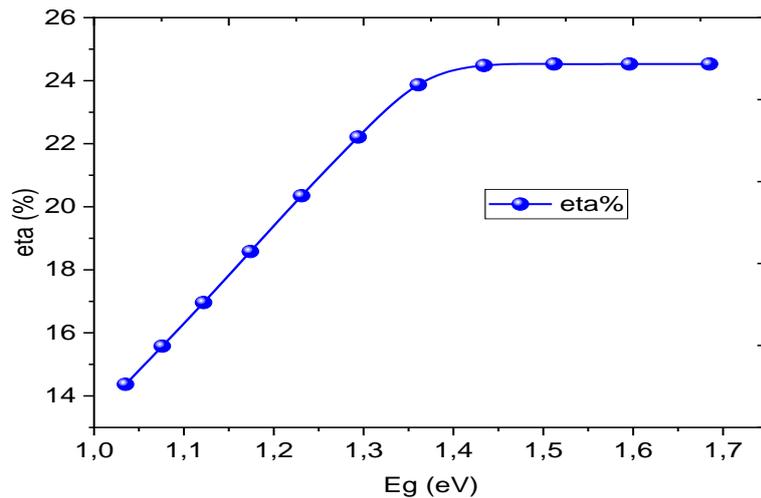


Figure 2.12 La variation du rendement en fonction de l'énergie de bande interdite.

Tableau 1 Propriétés physiques de matériau CIGS.

Épaisseurs (μm)	$J_{sc}(mA/cm^2)$	$V_{oc}(V)$	FF (%)	η (%)
0.05	14.48	0.4296	59.79	3.72
0.1	20.369226	0.4488	74.40	6.80
0.3	26.80	0.5782	72.67	11.26
0.5	28.276792	0.6106	76.61	13.23
1	31.01	0.6382	79.36	15.71
2.5	33.546469	0.66	80.63	17.86
4	34.083557	0.6644	80.68	18.27
4.5	34.143650	0.6649	80.67	18.31
5	34.178337	0.6651	80.66	18.34
6	34.206893	0.6654	80.65	18.36
7	34.211809	0.6655	80.65	18.36

D'après ce tableau (1) et la figure 2.14, on peut avoir un meilleur résultat pour épaisseur $d=2.5\mu m$; $T=300K$; $E_g=1.15eV$ $V_{oc}=0.66V$; $J_{sc}=33.54 mA/cm^2$; $FF=80.63\%$; $\eta=17.68\%$ (figure 2.13) .

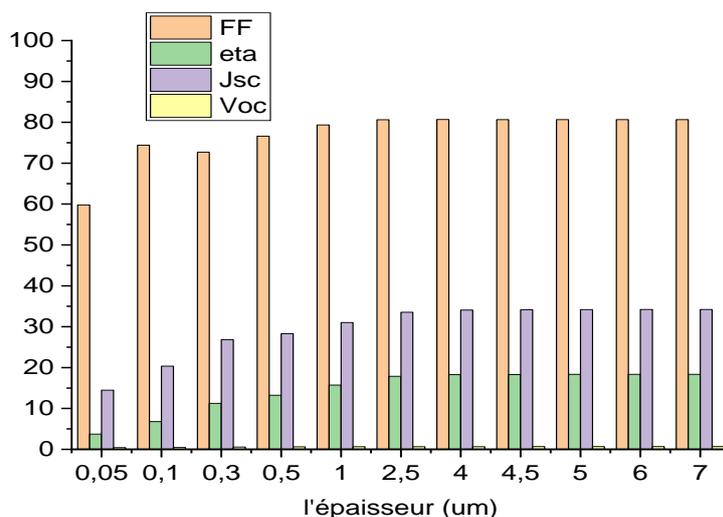


Figure 2.13 Les résultats de différentes épaisseurs.

2.3.4 L'influence de la température de la couche CIGS

La température ne faut pas qu'elle dépasse 350K car elle influe négativement sur le rendement de la cellule mais l'effet de cette dernière est négligeable sur la densité J_{cc} (Figure 2.14). On constate aussi que la température un impact sur le facteur de forme. Lorsque la température augmente de 300 à 350K le FF décroît de 80 à 76% (Figure 2.15).

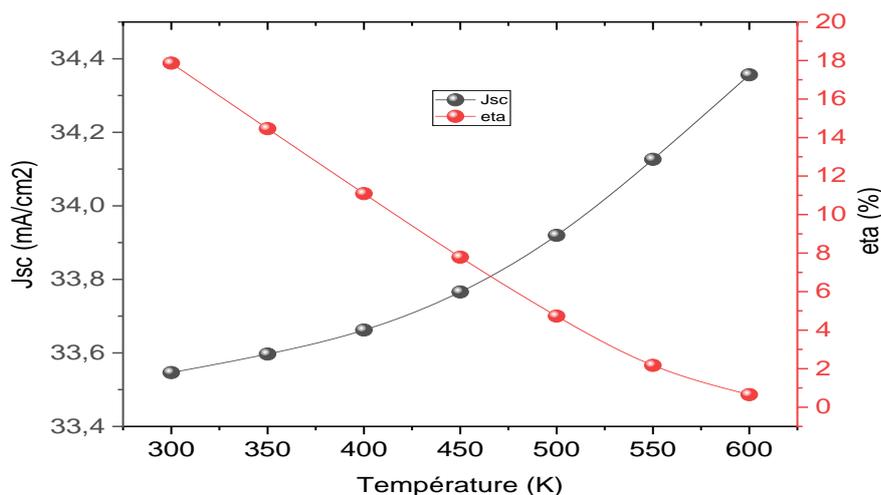


Figure 2.14 La variation de courant de court-circuit J_{sc} et η % pour différentes Températures.

Chapitre 02 Simulation et optimisation des cellules solaires à base de CIGS et à base de pérovskite

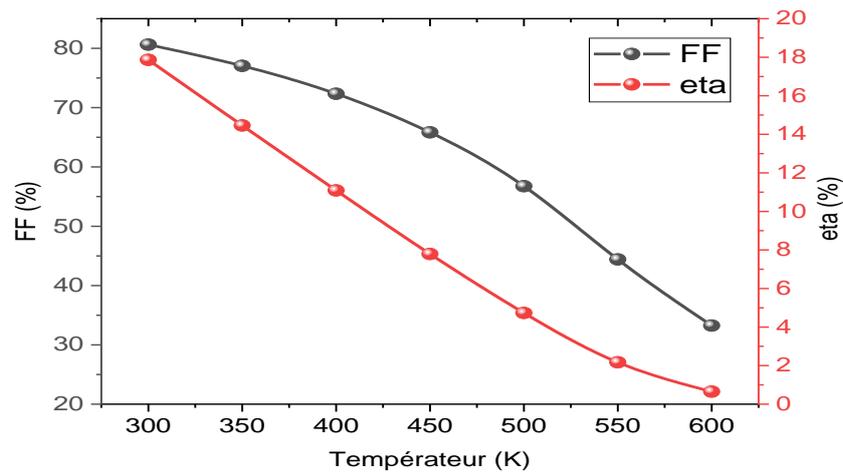


Figure 2.15 La variation de La facteur de forme FF % et eta % pour différentes Température.

Tableau 2.1 Propriétés physiques de matériau CIGS a déférentes valeurs de Températures.

T (K)	Jsc (mA/cm ²)	Voc (V)	FF (%)	eta (%)
300	33.546469	0.66	80.63	17.86
350	33.596794	0.5588	77.04	14.46
400	33.662277	0.4552	72.34	11.09
450	33.765675	0.3505	65.83	7.79
500	33.919721	0.2456	56.76	4.73
550	34.126409	0.1430	44.40	2.17
600	34.356288	0.0567	33.25	0.65

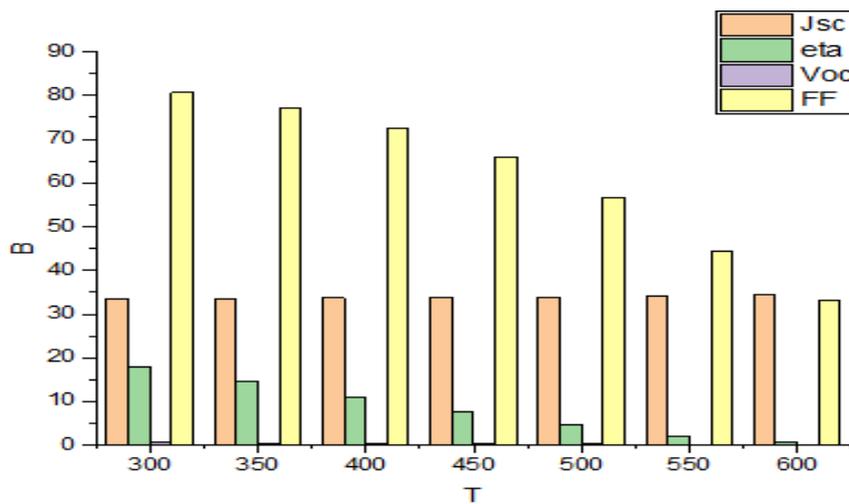


Figure 2.16 Les résultats de différentes Températures.

Chapitre 02 Simulation et optimisation des cellules solaires à base de CIGS et à base de pérovskite

D'après ce tableau (2) et la figure 2.17, on peut avoir un meilleur résultat pour $T=300K$; $d=2.5$; $E_g=1.15eV$ $V_{oc}=0.66V$; $J_{sc}=33.54 \text{ mA/cm}^2$; $FF=80.63\%$; $\eta=17.68\%$ (figure 2.16).

2.4 La cellule solaire à base d'un matériau pérovskite

Une cellule solaire à pérovskite est un type de cellule solaire dont la couche active qui capte la lumière est un composé à structure pérovskite. Les matériaux pérovskites sont peu coûteux à produire et relativement simples à fabriquer, et ils peuvent être réglés pour correspondre idéalement au spectre du soleil. Les cellules solaires à pérovskite sont des dispositifs à couche mince construits avec des couches de matériaux, soit imprimés ou enduits d'encre liquide, soit déposés sous vide. Elles ont fait des progrès remarquables ces dernières années, avec une augmentation rapide de leur efficacité, d'environ 3 % en 2009 à plus de 25 % aujourd'hui, grâce au trihalide organique [29]. Les pérovskites à halogénures mixtes sont un type de matériau pérovskite qui contient deux ou plusieurs ions halogénures, tels que le chlore, le brome et l'iode, dans la structure cristalline $MAPbX_3$ ($MA=CH_3NH_3$, $X=Cl, Br, I$) qui est le composant clé de la PSC. Ils présentent un grand intérêt pour les applications photovoltaïques et optoélectroniques, car ils permettent d'accorder la bande interdite, ce qui est essentiel pour les cellules solaires multi jonctions [30]. Dans ce travail, nous présentons une étude sur les pérovskites mixtes iodure-chlorure $MAPbX_3(I_{1-x}Cl_x)_3$.

2.4.1 Structure cristalline

Cette structure pérovskite ABX_3 idéale correspondant à la formule ABX_3 qui est formée d'un empilement de cubes construits avec 3 types d'atomes A, B et X où :

A est typiquement un alcalino-terreux ou cation de terre rare.

B typiquement un cation de métal de transition.

X un anion qui peut être oxyde ou fluorure, et dans d'autres cas, chlorure, bromure, iodure, sulfure ou hydrure [31].

La figure 2.17 décrit schématiquement la structure cristalline ABX_3 . Elle montre clairement que les cations B sont situés dans les sites octaédriques créés par les anions X des couches adjacentes (figure 2.18) [32].

Chapitre 02 Simulation et optimisation des cellules solaires à base de CIGS et à base de pérovskite

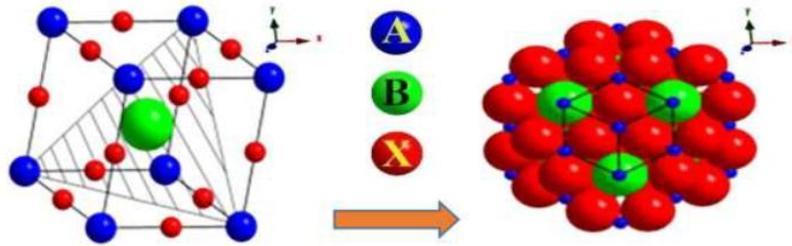


Figure 2.17 Représentation de la structure pérovskite ABX_3 . [32]

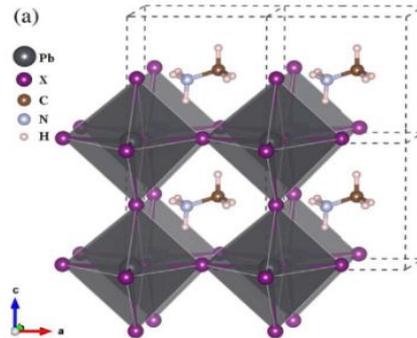


Figure 2.18 La structure cristalline de $MAPbX_3$ pseudo-cubique [32].

2.4.2 La cellule solaire étudiée

La cellule simulée est de type (n) TiO_2 / (p) $CH_3NH_3PbI_3I_{1-x}Cl_x$ / Spiro-OMeTAD. L'absorbeur $CH_3NH_3PbI_3I_{1-x}Cl_x$ avec une énergie de gap 1.52 eV constitue un absorbeur presque idéal. Il ne nécessite pas beaucoup d'épaisseur pour absorber la quasi-totalité du spectre solaire (figure 2.19).

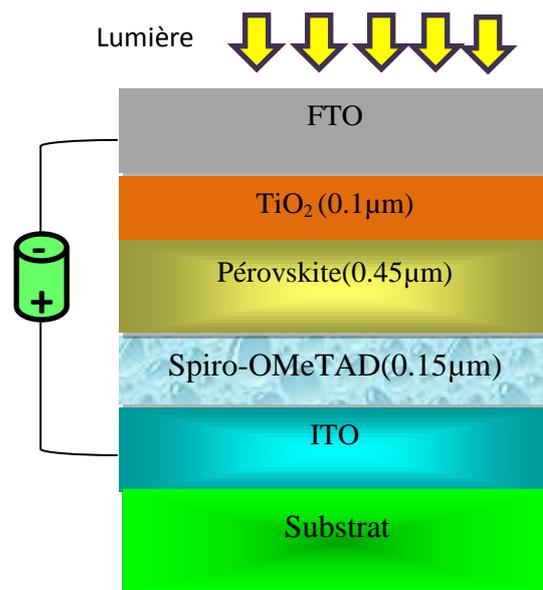


Figure 2.19 Le schéma de la cellule typique introduit au simulateur à base de $CH_3NH_3PbI_3I_{1-x}Cl_x$.

2.4.3 Optimisation de la cellule pérovskite à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{I}_{1-x}\text{Cl}_x$ avec une augmentation de concentration de chlore (Cl)

La variation de la concentration du chlore dans la couche absorbante est liée aux paramètres structurels par des fonctions bien étudiés comme suit : La figure 2.20 montre l'augmentation de paramètres de mailles de la structure proposée suivant l'augmentation de la teneur de chlore à $T=25^\circ\text{C}$, cette simulation nous permet d'étudier la stabilité de la structure par l'équation linéaire :

$$a(x) = 6.31 - 0.716x(\text{Å}) \tag{2.5}$$

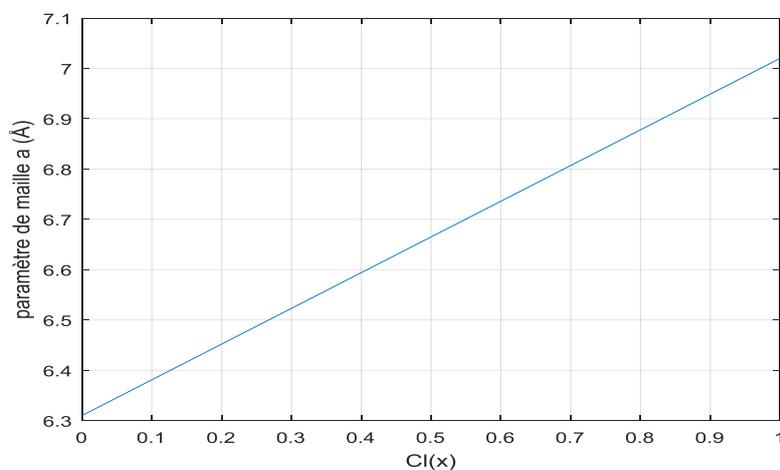


Figure 2.20 La variation de paramètres de mailles en fonction de la concentration.

La figure 2.21 illustre la diminution de la permittivité suivant l'augmentation de la teneur de chlore à $T=25^\circ\text{C}$ par l'équation linéaire :

$$\epsilon_s(x) = 5.698 - 2.593x \tag{2.6}$$

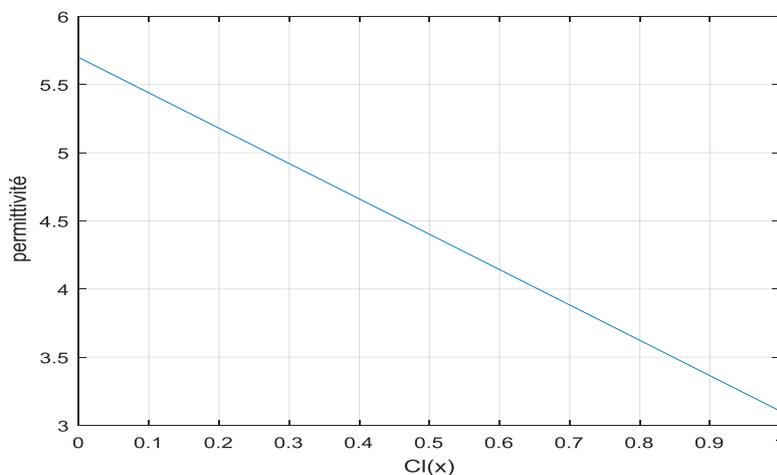


Figure 2.21 La variation de permittivité en fonction de la concentration.

Chapitre 02 Simulation et optimisation des cellules solaires à base de CIGS et à base de pérovskite

La figure 2.22 montre l'augmentation d'énergie de liaisons entre les électrons et les trous suivant l'augmentation de la teneur de chlore par l'équation :

$$E_a(x) = 0.055 - 0.036x + 0.253x^2 \quad (2.7)$$

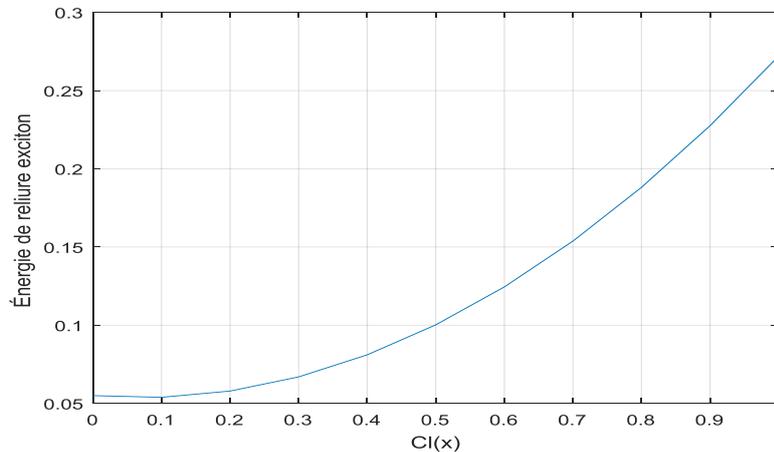


Figure 2.22 La variation de l'énergie de liaison en fonction de la concentration.

La figure 2.23 représente la variation de l'énergie de bande interdite en fonction de la concentration du gallium. L'augmentation de la composition de chlore induit une augmentation de E_g . Cette étude nous permet de choisir la concentration de chlore afin de réaliser une cellule solaire performante et à bas coût.

$$E_g = 1.521 + 0.269x + 0.873x^2 \quad (2.9)$$

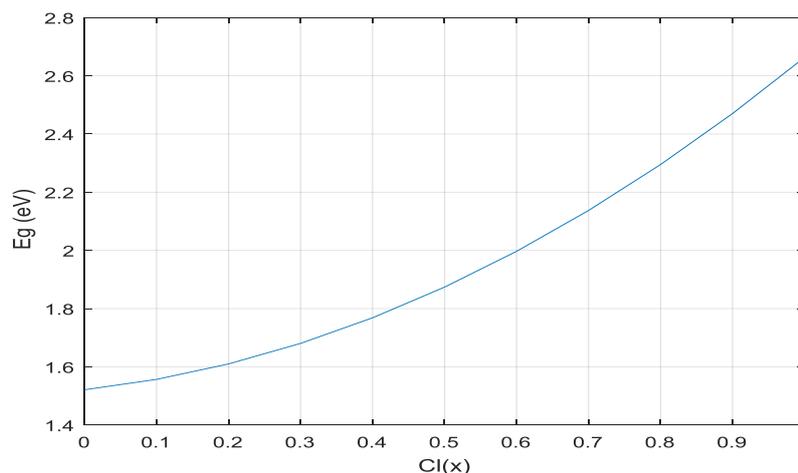


Figure 2.23 La variation de l'énergie de bande interdite en fonction de la concentration.

Chapitre 02 Simulation et optimisation des cellules solaires à base de CIGS et à base de pérovskite

2.4.4 L'influence d'épaisseur de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{I}_{1-x}\text{Cl}_x$

La figure 2.24 représente le rendement quantique externe en fonction de lambda de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{I}_{1-x}\text{Cl}_x$ pour $x=10\%$ à la température ambiante. Cette figure décrit l'effet d'épaisseur de cette couche sur le rendement quantique externe.

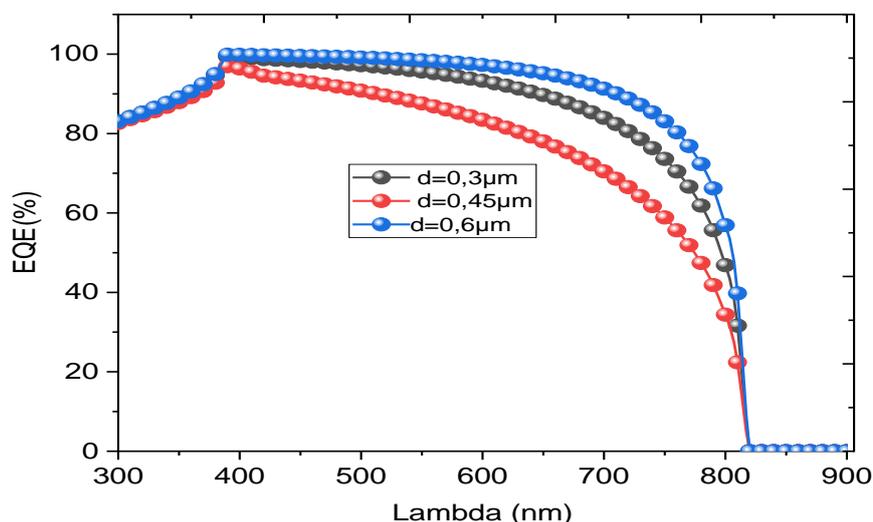
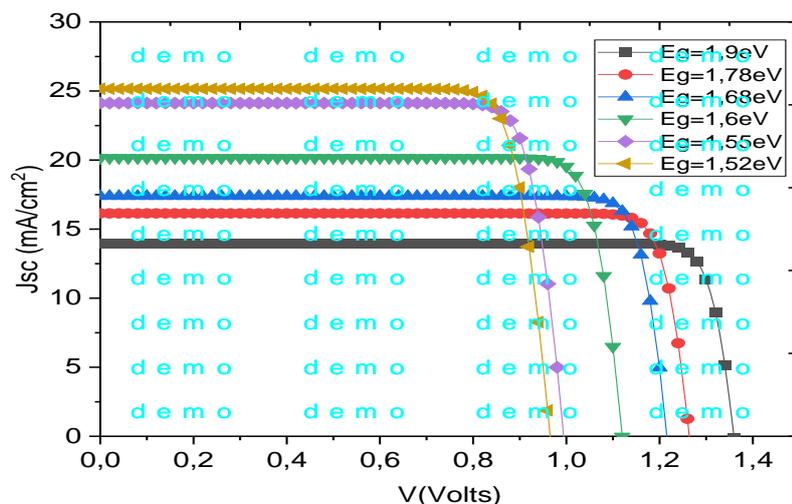


Figure 2.24 La variation du rendement quantique externe en fonction de lambda pour différents épaisseurs (μm et $E_g = 1.52 \text{ eV}$).

La figure 2.25 représente la caractéristique $J(V)$ de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{I}_{1-x}\text{Cl}_x$ à $T=25^\circ\text{C}$ et une épaisseur de $0.45\mu\text{m}$ en variant les valeurs de l'énergie de la bande interdite. On observe qu'avec l'augmentation de l'énergie de la bande interdite de la couche absorbante la tension augmente aussi mais la densité de courant diminue.



Chapitre 02 Simulation et optimisation des cellules solaires à base de CIGS et à base de pérovskite

Figure 2.25 La variation de la densité de courant J en fonction de V pour différentes valeurs de E_g .

La figure 2.26 montre la variation de la puissance en fonction de la tension de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{I}_{1-x}\text{Cl}_x$ pour $x=10\%$ à la température ambiante pour trois valeurs d'épaisseur divers.

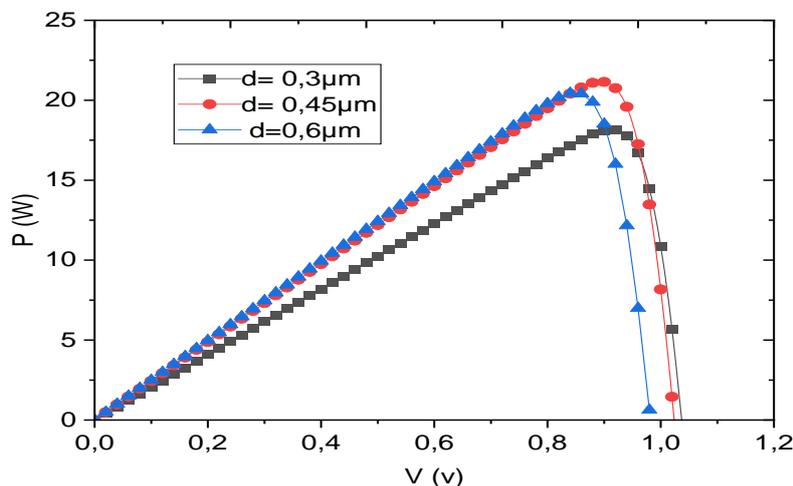


Figure 2.26 L'effet de variation de la puissance en fonction de V pour différentes valeurs de l'épaisseur.

La figure 2.27 représente la variation de la tension et la densité de courant de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{I}_{1-x}\text{Cl}_x$ pour $x=10\%$ à $T=25^\circ\text{C}$, suivant la variation de l'épaisseur. On remarque que la tension et l'épaisseur augmentent de façon proportionnelle contrairement à la densité.

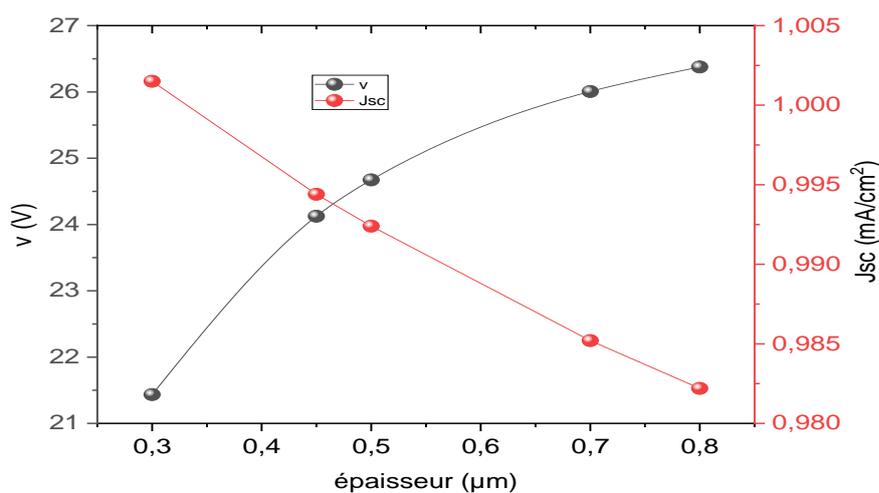


Figure 2.27 La variation de courant de court-circuit J_{cc} et la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de couche absorbante.

Chapitre 02 Simulation et optimisation des cellules solaires à base de CIGS et à base de pérovskite

La figure 2.38 montre l'effet de l'épaisseur sur la capacité de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{I}_{1-x}\text{Cl}_x$ pour $x=10\%$ à $T=25^\circ\text{C}$, on remarque que l'épaisseur et la capacité sont inversement proportionnelle.

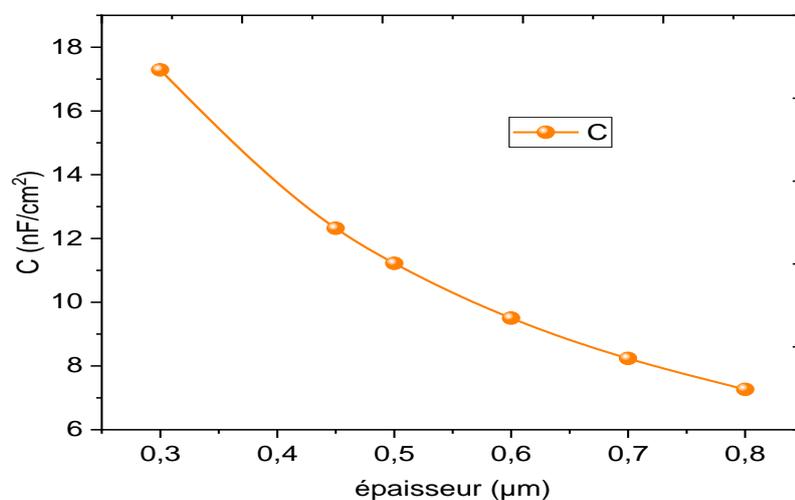


Figure 2.28 La variation de la capacité pour différentes épaisseurs de la couche absorbante.

La figure 2.29 représente les variations du facteur de forme et le rendement de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{I}_{1-x}\text{Cl}_x$ pour $x=10\%$ à $T=25^\circ\text{C}$ selon la variation de l'épaisseur, on note que le rendement augmente suivant l'augmentation de l'épaisseur et le facteur de forme diminue.

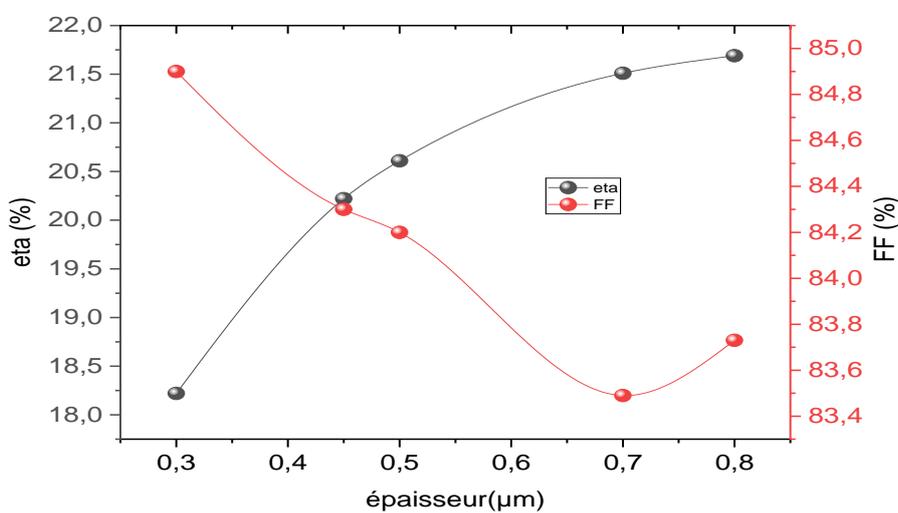


Figure 2.29 La variation du facteur de forme FF % et eta % en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante.

La figure 2.30 décrit la variation du rendement de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{I}_{1-x}\text{Cl}_x$ pour $x=10\%$ à $T=25^\circ\text{C}$ et une épaisseur de $0,45\mu\text{m}$. On remarque le rendement diminue de 20,39% à 4,54% suivant l'augmentation de l'énergie de la bande interdite de la couche absorbante.

Chapitre 02 Simulation et optimisation des cellules solaires à base de CIGS et à base de pérovskite

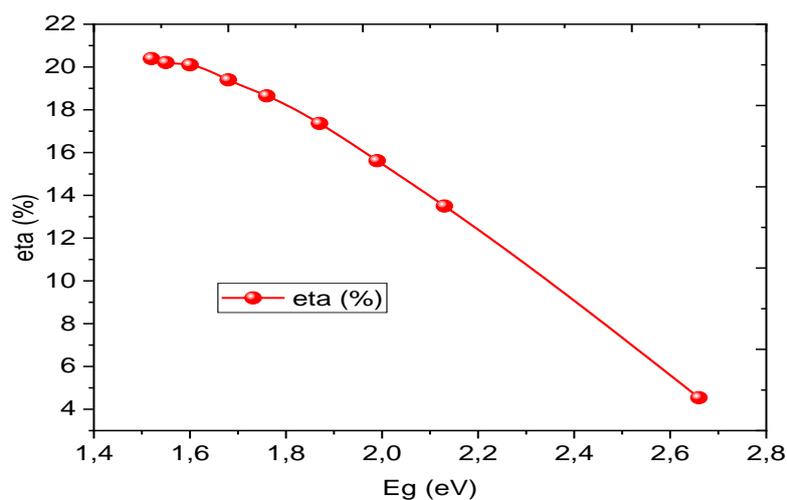


Figure 2.30 La variation du rendement en fonction de l'énergie de bande interdite.

Pour une énergie de bande interdite $E_g=1.52\text{eV}$ et $T=25^\circ\text{C}$ on a les résultats suivants pour une simulation à différentes épaisseurs : Un résultat optimal est obtenu dans l'épaisseur $0.45\ \mu\text{m}$.

Tableau 2.3 Propriétés physique de matériau $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{I}_{1-x}\text{Cl}_x$.

d(μm)	$J_{sc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc}(\text{V})$	FF (%)	eta (%)
0.3	21.435058	1.0015	84.90	18.22
0.45	24.125439	0.9944	84.30	20.22
0.5	24.672994	0.9924	84.20	20.61
0.6	25.470353	0.9986	84.05	21.16
0.7	26.005123	0.9852	83.49	21.51
0.8	26.376220	0.9822	83.73	21.69

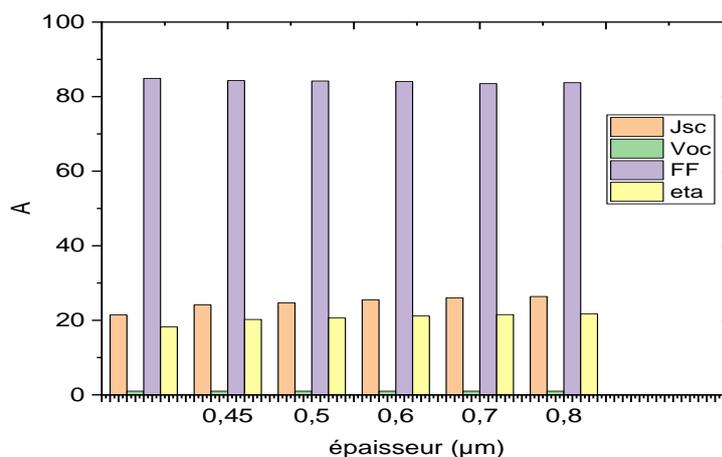


Figure 2.31 Les résultats de déférente épaisseur.

Chapitre 02 Simulation et optimisation des cellules solaires à base de CIGS et à base de pérovskite

D'après le tableau 3 on a obtenu la cellule pérovskite avec les valeurs optimales pour une épaisseur $d=0.45\mu\text{m}$, $T=25^\circ\text{C}$, $E_g=1.52$, $V_{oc}=0.99$, $J_{sc}=24.12$, $FF=84.30\%$ et $\eta=20.22\%$ (figure 2.31).

2.4.5 L'influence de la température sur la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{I}_{1-x}\text{Cl}_x$

La figure 2.32 représente les variations de la densité de courant et le rendement de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{I}_{1-x}\text{Cl}_x$ pour $x=10\%$ à une épaisseur de $0.45\mu\text{m}$ en variant la température de 15°C à 45°C , on note que la température influe négativement sur le rendement si elle dépasse la valeur 35°C .

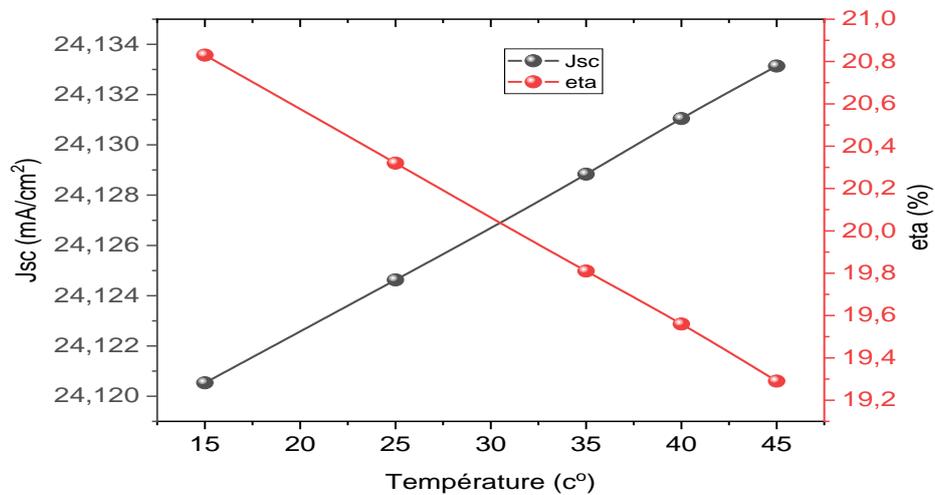
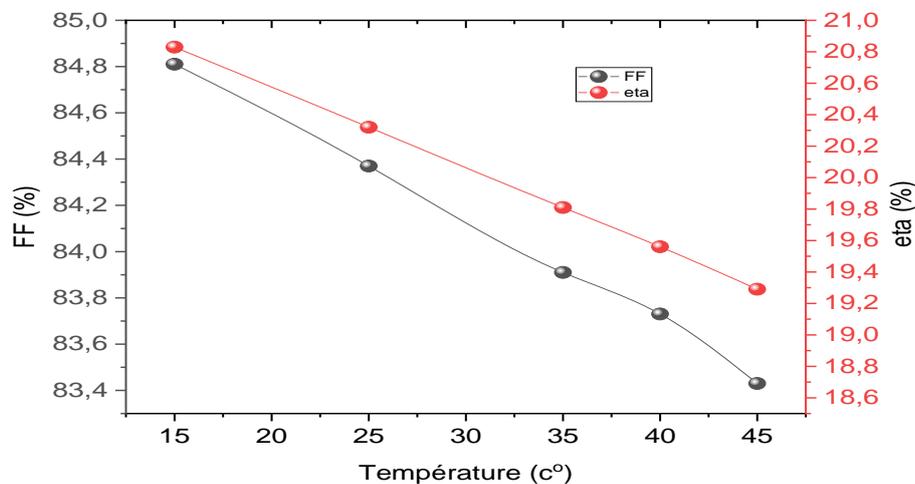


Figure 2.32 La variation de courant de court-circuit J_{cc} et η % pour différentes valeurs de températures.

La figure 2.33 représente la variation du facteur de forme FF et η % de la couche $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{I}_{1-x}\text{Cl}_x$ pour $x=10\%$ à une épaisseur de $0.45\mu\text{m}$ pour différentes valeurs de températures. On observe que le rendement et le facteur de forme diminuent quand la température varie.



Chapitre 02 Simulation et optimisation des cellules solaires à base de CIGS et à base de pérovskite

Figure 2.33 La variation du facteur de forme FF et eta % pour différentes valeurs de températures.

Tableau 2.4 propriétés physiques de matériau CH₃NH₃PbI₃I_{1-x}Cl_x à différentes valeurs de températures.

Température (°C)	Jsc(mA/cm ²)	Voc (v)	FF(%)	eta (%)
15	24.120535	1.0185	84.81	20.83
25	24.124629	0.9984	84.37	20.32
35	24.128836	0.9783	83.91	19.81
40	24.131047	0.9682	83.73	19.56
45	24.133135	0.9580	83.43	19.29

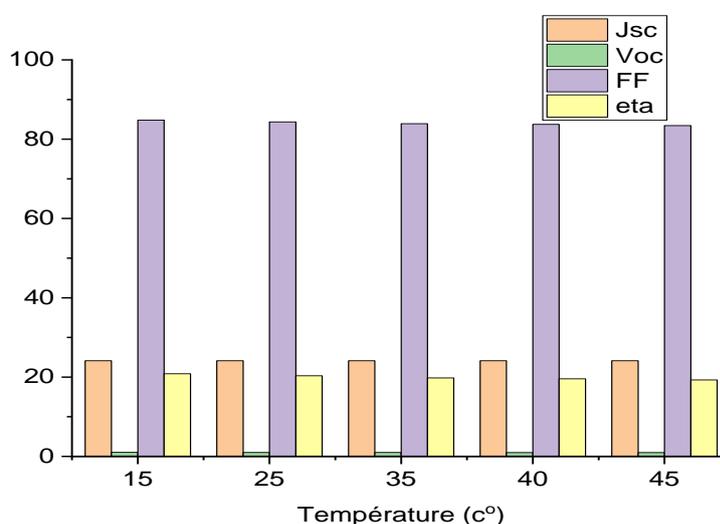


Figure 2.34 Les résultats de différentes températures.

D'après le tableau 4 on a obtenu la cellule pérovskite avec les valeurs optimales pour une température $T=25^{\circ}\text{C}$, $d=0.45\mu\text{m}$, $E_g=1.52\text{eV}$, $V_{oc}=0.99$, $J_{sc}=24.12$, $FF=84.37\%$ et $\eta=20.32\%$ (figure 2.34).

2.5 Conclusion

Dans notre travail, nous avons étudié par simulation numérique la structure des cellules solaires individuelles à base de CIGS et Pérovskite pour optimiser quelques paramètres physiques de ces deux cellules, en utilisant un meilleur logiciel unidimensionnel SCAPS. Nous avons commencé par la simulation de la cellule CIGS et de la cellule pérovskite afin de déterminer l'effet de l'épaisseur des couches (CIGS) et (CH₃NH₃PbI₃I_{1-x}Cl_x) individuellement empilées. Les paramètres photovoltaïques : J_{cc} , V_{co} , FF et le rendement de conversion de la cellule solaire ont été déterminés afin d'obtenir les meilleures conditions.

Chapitre 03

Simulation et optimisation de la cellule solaire tandem à base de CIGS/Pérovskite

Chapitre 03 Simulation et optimisation de la cellule solaire tandem à base de CIGS/Pérovskite

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, on a entamé l'étude du fonctionnement d'une cellule solaire tandem Pérovskite/CIGS par un outil de simulation unidimensionnelle **SCAPS**. La simulation par le logiciel **SCAPS 1D** permet de déterminer, à chaque variation des variables, les caractéristiques électriques de la cellule solaire, on note par exemple : la caractéristique densité de courant – tension (J-V) et la puissance -- tension (P-V).

3.2 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 : $\text{TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{I}_{1-x}\text{Cl}_x/\text{Spiro-OMeTAD}$ comme une cellule supérieure et la structure $\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{CIGS}$ comme une cellule inférieure (figure 3.1).

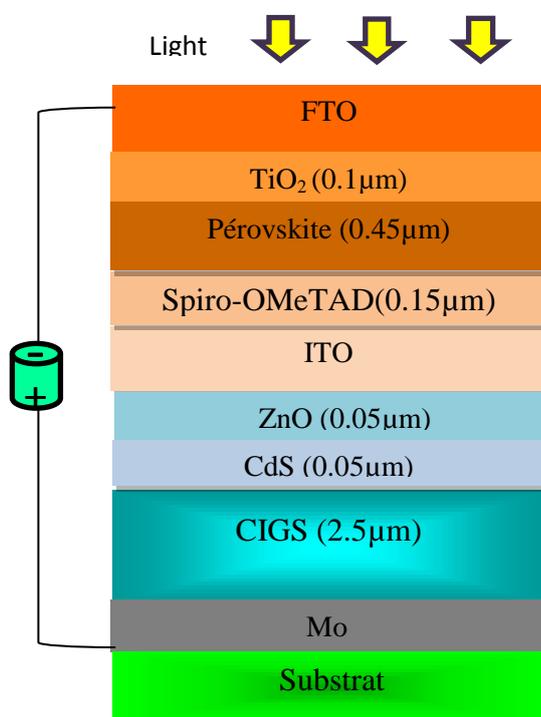


Figure 3.1 Structure schématique du dispositif pérovskite/CIGS cellule solaire tandem à deux électrodes.

Chapitre 03 Simulation et optimisation de la cellule solaire tandem à base de CIGS/Pérovskite

3.3 Paramètres de la cellule Pérovskite individuelle

Tableau 3.1 Paramètres électriques des différentes couches de la cellule individuelle à base de Pérovskite [32].

Layers → Parameters ↓	TiO2	CH ₃ NH ₃ PbI ₃ I _{1-x} Cl _x	Spiro-OMeTAD
Thickness (nm)	100	450	150
Relative Permittivity ϵ_r	9	6.5	3
Band Gap energy (eV)	3.2	1.5	3
Electron Affinity (eV) ⁴	4	3.9	2.45
Electron Mobility (cm ² /V. s)	20	50	2x10 ⁻⁴
Hole Mobility (cm ² /V. s)	10	50	2x10 ⁻⁴
Accept density (cm ⁻³)	_____	10 ¹³	3x10 ¹⁷
Donor density (cm ⁻³)	3x10 ¹⁷	_____	_____
Effective conduction band density (cm ⁻³)	2.2x10 ¹⁸	2.5x10 ²⁰	2.5x10 ²⁰
Effective valence band density (cm ⁻³)	1.8x10 ¹⁹	2.5x10 ²⁰	2.5x10 ²⁰

3.4 Paramètres de la cellule individuelle à base de CIGS

Tableau 3.2 Paramètres électriques des différentes couches de la cellule individuelle à base de CIGS [32] .

Layers → Parameters ↓	CdS	CIGS.
Thickness (nm)	50	2500
Relative Permittivity ϵ_r	10	13.6
Band Gap energy (eV)	2.48	1.15
Electron Affinity (eV) ⁴	4.18	4.58
Electron Mobility (cm ² /V. s)	100	100
Hole Mobility (cm ² /V. s)	25	25
Accept density (cm ⁻³)	_____	2x10 ¹⁵
Donor density (cm ⁻³)	10 ¹⁸	_____
Effective conduction band density (cm ⁻³)	2.41x10 ¹⁸	2.2x10 ¹⁸
Effective valence band density (cm ⁻³)	2.57x10 ¹⁹	1.8x10 ¹⁹

Chapitre 03 Simulation et optimisation de la cellule solaire tandem à base de CIGS/Pérovskite

Tableau 3.3 Performances des dispositifs des cellules solaires CIGS.

Cellule solaire	Eg (eV)	Épaisseur (μm)	Jsc (mA/cm ²)	Voc (V)	FF (%)	Eta (%)	Réf
CIGS	1.15	2.5	33.55	0.66	80.63	17.86	sim
CIGS	1.15	3	37.42	0.63	79.02	18.48	[33]
CIGS	1.17	1	15.9	0.69	75	32.9	[34]

Tableau 3.4 Performances des dispositifs des cellules solaires Pérovskite.

Cellule solaire	Eg (eV)	Épaisseur (μm)	Jsc (mA/cm ²)	Voc (V)	FF (%)	Eta (%)	Réf
Pérovskite	1.52	0.45	24.13	0.99	84.30	20.22	sim
Pérovskite	1.55	0.35	18.24	0.71	73.79	9.6	[33]
Pérovskite	1.5	0.85	34.93	0.81	83	23.4	[35]

Chapitre 03 Simulation et optimisation de la cellule solaire tandem à base de CIGS/Pérovskite

3.5 Résultats de simulation de la cellule tandem Pérovskite/CIGS

La figure 3.2 représente la variation de la densité de courant J_{sc} en fonction de la tension V à $T=25^{\circ}\text{C}$, on observe que la cellule à base de CIGS a la valeur maximale de J_{sc} et la valeur minimale de la tension, la cellule à base de pérovskite a une valeur de J_{sc} moins par rapport à celle du CIGS et la tension est un peu plus élevée. Pour la cellule Tandem on remarque qu'elle prend la valeur minimale de J_{sc} et la tension est une somme de la tension de circuit ouvert des cellules précédentes.

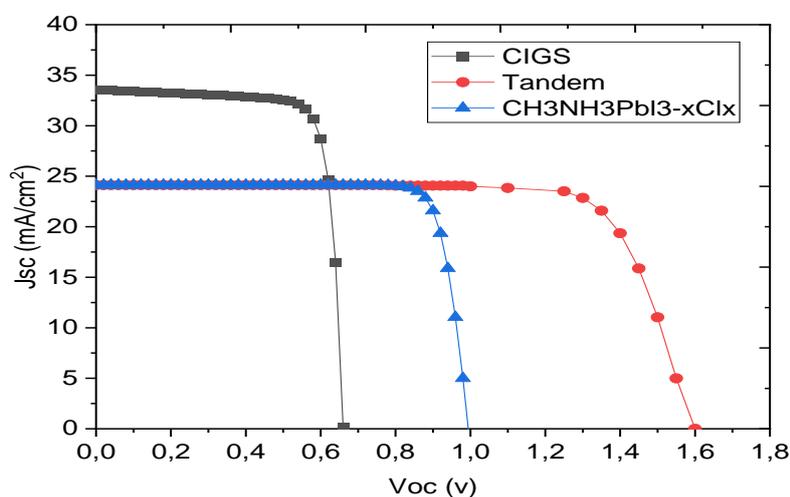


Figure 3.2 La variation de la densité de courant J en fonction de V de la cellule à base de CIGS, Pérovskite et tandem.

La figure 3.3 représente la variation de la puissance P en fonction de la tension V , la cellule à base de CIGS a la plus petite valeur de puissance $P=17.80\text{W}$. La cellule pérovskite a une puissance un peu plus haute $P=20.80\text{W}$. Pour la puissance de la cellule Tandem est la maximale $P= 29.70\text{W}$ c'est-à-dire on a un gain de $\Delta P=8.9\text{W}$.

Chapitre 03 Simulation et optimisation de la cellule solaire tandem à base de CIGS/Pérovskite

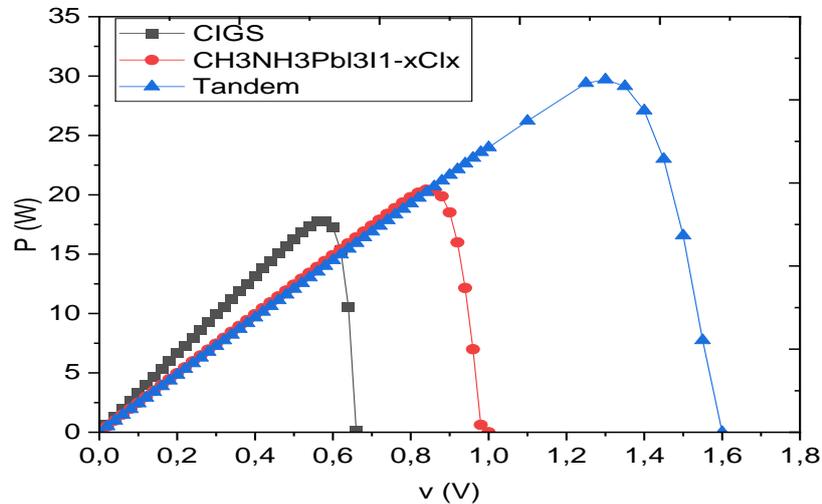


Figure 3.3 La variation de la Puissance en fonction de V de la cellule à base de CIGS, Pérovskite et tandem.

3.6 Conclusion

Dans notre travail, nous avons étudié le fonctionnement de la cellule tandem $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3(1-x)\text{Cl}_x/\text{CIGS}$. Les résultats obtenus nous ont permis d'extraire quelques points, tels que : Le courant induit dans la cellule tandem égale dans tous les cas au minimum des courants des deux cellules supérieure et inférieure. La tension de circuit-ouvert de la cellule tandem est égale à la somme des deux tensions de circuit-ouvert des deux cellules empilées (montées en série) : Les paramètres à commander pour optimiser les performances de la cellule solaire tandem sont : l'épaisseur de la couche absorbante de cellule supérieure ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3(1-x)\text{Cl}_x$) et inférieure à base de (CIGS).

Dans ce projet, nous avons travaillé avec le développement de Dispositifs tandem CIGS-pérovskite. Nous avons réussi à produire dispositifs avec des rendements allant jusqu'à (38.18), basés sur le CIGS avec un d'environ 17.86 % et des pérovskites d'une efficacité d'environ 20.32%. La séquence de pile à deux électrodes qui a le mieux fonctionné en termes d'efficacité et homogénéité étaient composés de : SLG, Mo (pulvérisé), CIGS (évaporé), CdS (dépôt en bain chimique), ZnO (pulvérisé), FTO (pulvérisé), pérovskite (spin-enduit), et enfin ITO (pulvérisé).

Les cellules tandem à deux électrodes présentent plusieurs intérêts dans le domaine du photovoltaïque c'est une technologie en développement et de nombreuses recherches sont en cours pour améliorer leur efficacité et leur coût, actuellement, la fabrication de ces cellules est devenue beaucoup moins coûteuse grâce aux matériaux utilisés, elles sont extrêmement flexibles car elles peuvent être intégrées sur tout type de support. Aussi ces cellules sont performantes cela est dû qu'elles-mêmes sont composées de deux ou plus couches de matériaux différentes, chacune absorbe une partie différente de spectre solaire. Il convient de noter que les cellules tandem à deux électrodes peuvent varier en termes de matériaux utilisés et de conception de la cellule. Les cellules solaires en tandem testées dernièrement en extérieur pendant plus d'un an montrent qu'elles ont conservé plus de 80 % de leur efficacité de conversion solaire. Les résultats encourageants proviennent de tests effectués dans un climat ensoleillé, chaud et humide de la côte de la mer Rouge de l'Arabie saoudite ce qui permet à ces dispositifs de devenir bientôt commerciaux. En perspectives nous pourrions utiliser d'autres matériaux semi-conducteurs pour améliorer les performances de la cellule solaire proposée et d'étudier des nouvelles structures et nanostructures pour les composants optoélectroniques ultra-rapides.

- [1] T. Jesper Jacobsson, Adam Hultqvist , Sebastian Svanström , Lars Riekehr , Ute B. Cappel ,Eva Unger , HåkanRensmo , Erik M.J. Johansson , Marika Edoff , Gerrit Boschloo
- [2] AbdollahiNejand, B., Ritzer, D.B., Hu, H. *et al.* Scalable two-terminal all-perovskite tandem solar modules with a 19.1% efficiency. *Nat Energy* **7**, 620–630 (2022).
<https://doi.org/10.1038/s41560-022-01059-w>
- [3] Madan, J., Singh, K. & Pandey, R. Comprehensive device simulation of 23.36% efficient two-terminal perovskite-PbS CQD tandem solar cell for low-cost applications. *Sci Rep* **11**, 19829 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99098-y>
- [4] Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology (EMPA). "Tandem solar cells are simply better: Higher efficiency thanks to perovskite magic crystal." ScienceDaily. ScienceDaily, 23 November2015.<www.sciencedaily.com/releases/2015/11/151123203430.htm>.
- [5] Geoffrey S. Kinsey, Solar cell efficiency divergence due to operating spectrum variation, *Solar Energy*, Volume 217,2021, Pages 49-57, doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.024.
- [6] M.Orgeret, «Les piles solaires, le composent et ces applications» Préface de F.Allest.
- [7] energie-photovoltaïque-et-solaire, historique des cellule solaire, <https://energie-photovoltaïque-et-solaire.com/historique/>, consulté le : 07/03/2023
- [8] Nelson. (2003). *The physics of solar cells*. World Scientific PublishingCompany.
- [9] Y.Mebrak, "Contribution à l'étude et à la modélisation des éléments d'un système photovoltaïque", mémoire Magister, Département de Physique, Université Abou-Bakr Belkaid,TlemcerL ,2011
- [10] S. Mekliche, Etude et Simulation des paramètres électriques d'une cellule solaire photovoltaïque à base de Silicium, UNIVERSITE MOULOUDE MAMMARI DE TIZI-OUZOU, Département d'Electronique,2017.
- [11] KOUADRI BOUDJELTHIA El Amin.2016. Les technologies photovoltaïques : Entre la recherche scientifique et la réalité économique. Recherche et Développement.
- [12] energieplus-lesite.be, caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïque, <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaïque6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaïque/>, consulté le : 12/03/2023

- [13] [photovoltaique.guidenr.fr](http://www.photovoltaique.guidenr.fr), caractéristique courant-tension d'une cellule, <http://www.photovoltaique.guidenr.fr/informations-techniques/propriete-electrique-module-photovoltaique/caracteristique-courant-tension-cellule.php/>, consulte le : 12/03/2023
- [14] S. R. Wenhan, M. A. Green, M. E. Watt, R.P. Corkish and A.B. Sproul, « Applied Photovoltaics, (thirdedition), Earthscan, 2011.
- [15] Des, U., & Mentouri, F. (2015). Doctorat en Sciences en Electronique Intitulée Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}$
- [16] [edumedia-sciences.com](https://www.edumedia-sciences.com), caractéristiques d'une cellule photovoltaïque, <https://www.edumedia-sciences.com/fr/media/945-caracteristique-dune-cellule-photovoltaique>. Consulté le : 38/03/2023
- [17] Kasdi, U., & Ouargla, M. (2017).
- [18] M. ADAMA SYLLA, Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couches minces à base de $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ utilisant un tampon Zn (O, S). Université Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire ,2018.
- [19] Almosni S., Delamarre A., Jehl Z., Suchet D., Cojocar L., Giteau M., Behaghel B., Julian A., Ibrahim C., Tatry L., et al. Material challenges for solar cells in the twenty-first century : Directions in emerging technologies. *Sci.Technol.Adv.Mater.* 2018;19:336369.doi: 10.1080/14686996.2018.1433439.
- [20] Kuczyńska-Łażewska A., Klugmann-Radziemska E., Witkowska A. Recovery of Valuable Materials and Methods for Their Management When Recycling Thin-Film CdTe Photovoltaic Modules. *Materials.* 2021;14:7836. doi: 10.3390/ma14247836.
- [21] Suman, Sharma, P., & Goyal, P. (2020). Evolution of PV technology from conventional to nano materials. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1593-1597. doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.846
- [22] AFFAF ALLOUCHE . Simulation des propriétés et performances des cellules photovoltaïques en couches minces à base des matériaux semi-conducteurs CIGS. Master. Université Mohamed El Bachir Elibrahimi –Bordj.2020.

[23] N. Benabdallah, « Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe », thèse de magister, 2006, université Abou Bekrbelkaid Tlemcen.

[24] Wu, C., Wang, K., Batmunkh, M., Bati, A. S. R., Yang, D., Jiang, Y., ... Priya, S. (2020). *Multifunctional nanostructured materials for next generation photovoltaics*. *Nano Energy*, 70, 104480. doi:10.1016/j.nanoen.2020.104480

[25] greencoast.org, les avantages des cellules photovoltaïques, <https://greencoast.org/advantages-of-photovoltaic-cells/>, consulté le: 21/04/2023

[26] Charles Roger, Développement de cellules photovoltaïques a base de CIGS sur substrats métalliques, Autre, Université de Grenoble, 2013, Farçais.NNT :2013GRENI050.

[27] U. Rau and H. W. Schock, —Chapiter IC-3 :Cu (In , Ga) Se₂ Thin-Film Solar Cells, in «Practical Handbook of Photovoltaics», Elsevier Ltd, 2012, pp. 323–372.

[28] J. E. Jaffe and A. Zunger, —Defect-induced nonpolar-to-polar transition at the surface of CuInSe₂, J. Phys. Chem. Solids, vol. 64, pp. 1547–1552, 2003.

[29] T.-B. Song, Q. Chen, H. Zhou, S. Luo, Y. Yang, J. You, Y. Yang, Unraveling film transformations and device performance of planar perovskite solar cells, *Nano Energy* 12 (2015) 494e500.

[30] R. Lindblad, D. Bi, B. w. Park, J. Oscarsson, M. Gorgoi, H. Siegbahn, M. Odelius, E.M.J. Johansson, H. Rensmo, Electronic structure of TiO₂/CH₃NH₃PbI₃ perovskite solar cell interfaces, *J. Phys. Chem. Lett.* 5 (2014) 648e653.

[30] B. Ilschner et Ch. Janot, Matériaux émergents, 19,118 (2001).

[31] P. Coeuré, Solid State Communications, 2 (1968) 129

[32] Un-Gi Jong, Chol-Jun Yu, Yong-Man Jang, Gum-Chol Ri, Song-Nam Hong, and Yong-Hyon Pae. Revealing the stability and efficiency enhancement in mixed halideperovskites mapb (i1-xclx) 3 with ab initio calculations. *Journal of Power Sources*, 350 :65–72, 2017.

- [33] Tianyue Wang et al, Designing novel thin film polycrystalline solar cells for high efficiency: sandwich CIGS and heterojunction perovskite, *J. Semicond.* 2017, 38(1) :014005.
- [34] Jacobsson, T. Jesper; Hultqvist, Adam; Sebastian Svanström; Riekehr, Lars; Cappel, Ute B.; Unger, Eva; Håkan Rensmo; Johansson, Erik M.J.; Edoff, Marika; Boschloo, Gerrit (2020). 2-Terminal CIGS-perovskite tandem cells: A layer by layer exploration. *Solar Energy*, 207(), 270–288. doi:10.1016/j.solener.2020.06.034
- [35] Pham, M., Harris, J., Shaffer, J. et al. Bismuth perovskite as a viable alternative to Pb perovskite solar cells: device simulations to delineate critical efficiency dynamics. *J Mater Sci: Mater Electron* 30, 9438–9443 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01275-3>.