

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

N° .....



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE  
FILIERE : ELECTRONIQUE  
OPTION : MICROELECTRONIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention  
du Diplôme de Master Académique**

**Par :**

HADJAB Safwan.

BENSEDDIK Mohamed.

**Intitulé**

**Amélioration de rendement des cellules  
solaires à base de Pérovskites**

**Soutenu le 22 Juin 2025 devant le jury composé de :**

<b>Pr. LADJAL Mohamed</b>	University of Mohamed Boudiaf-M'sila	President
<b>Pr. BOURAS Mounir</b>	University of Mohamed Boudiaf-M'sila	Encadreur
<b>Dr. KHENNOUF Salah</b>	University of Mohamed Boudiaf-M'sila	Co-Encadreur
<b>Dr. HADJAB Moufdi</b>	University of Mohamed Boudiaf-M'sila	Examineur
<b>Dr. ATTALLAH Bilal</b>	University of Mohamed Boudiaf-M'sila	Représentant de l'Incubator

**Année universitaire : 2024 / 2025**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Remerciements

Nous tenons à exprimer notre sincère reconnaissance à nos chers parents pour leur soutien indéfectible, leurs sacrifices inestimables et leurs prières constantes qui nous ont permis de franchir chaque étape de notre parcours académique.

Nous remercions également nos frères et sœurs pour leurs encouragements continus et leur présence précieuse à nos côtés.

Nos remerciements les plus chaleureux vont à nos enseignants respectés, qui nous ont accompagnés tout au long de notre formation, partageant avec générosité leurs savoirs et leurs conseils éclairés.

Nous exprimons notre profonde gratitude à Monsieur **Bouras Mounir**, professeur au Département d'Électronique de l'Université de M'sila, pour nous avoir offert l'opportunité de mener ce travail de recherche, ainsi que pour son encadrement rigoureux, son soutien constant et ses orientations précieuses.

Nous remercions également chaleureusement Monsieur **Khennouf Salah**, professeur au même département, pour son aide précieuse et ses recommandations constructives qui ont joué un rôle clé dans l'avancement de notre travail.

Enfin, nous adressons un grand merci à toutes les personnes qui nous ont soutenus, de près ou de loin, tout au long de cette aventure académique.

**HADJAB Safwan, BENSEDDIK Mohamed**

# Dédicaces

**Je dédie ce travail à :**

Ma mère **Djoudi Baya** et mon père **Hadjab Youcef**, pour leur patience, leurs sacrifices et leur soutien inestimable tout au long de mon parcours.

Mes frères : **Mohamed Elghazali, Mamoune.**

Mes sœurs : **Belkiss, Hadjer, Safana et Maria.**

Pour leur affection et leur présence constante.

Mes enseignants, Monsieur **Bouras Mounir** et Monsieur **Khennouf Salah**, pour leur accompagnement bienveillant et leurs conseils éclairés.

Mes amis pour leur soutien sincère et leur motivation dans les moments de doute.

Toutes les personnes qui m'ont encouragé, de près ou de loin, même par une simple parole.

**HADJAB Safwan**

# Dédicaces

## Je dédie ce travail à :

Ma mère **BEDIAR Widad** et mon père **Benseddik Youssef**, le cœur battant de ma vie et le fondement de mon succès, pour leur amour inconditionnel, leur patience sans pareille et leur soutien qui ont éclairé mon chemin.

Mes frères et sœurs, mon refuge et mon soutien constant à chaque étape.

Mes estimés professeurs : **Bouras Mounir** et **Khenouf Salah**, pour leurs connaissances et leurs conseils éclairés qui ont guidé mon chemin.

Tous ceux qui m'ont enseigné, guidé et assuré ma réussite.

Mes chers amis, pour avoir été honnêtes et là pour moi dans les moments cruciaux.

Tous ceux qui m'ont redonné un coup de pouce moral, par un mot, un sourire ou une croyance sincère en mes capacités.

**BENSEDDIK Mohamed**

# *Table des matières*

Remerciements .....	ii
Dédicaces.....	iii
Liste des abréviations .....	viii
Liste des figures .....	ix
<b>Introduction général .....</b>	<b>1</b>

## **Chapitre-1**

### **Les cellules photovoltaïques : Aperçu général**

1.1 Introduction .....	6
1.2 Historique du photovoltaïque.....	7
1.3 Définition d'une cellule solaire .....	7
1.4 Principe de fonctionnement des cellules solaires .....	8
1.5 Le rôle du dopage dans les cellules solaires.....	10
1.5.1 Dopage de type n.....	10
1.5.2 Dopage de type p.....	10
1.6 Les différents types de cellules solaires.....	11
1.6.1 Les cellules monocristallines.....	11
1.6.2 Les cellules amorphes (couches minces).....	12
1.6.3 Les cellules solaires polycristallines.....	12
1.6.4 Les pérovskites .....	13
1.7 Différents paramètres de sortie de la cellule photovoltaïque .....	13
1.7.1 La tension de circuit ouvert $V_{CO}$ (pour $I_{CC} = 0$ ).....	14
1.7.2 Le courant de court-circuit $I_{CC}$ (pour $V_{CO} = 0$ ).....	15
1.7.3 Facteur de forme FF .....	15
1.7.4 Le rendement .....	16
1.8 L'effet photovoltaïque .....	16
1.9 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	17
1.9.1 Les avantages.....	17
1.9.2 Les inconvénients .....	18
1.10 Conclusion.....	19

## Chapitre-2

### Les cellules photovoltaïques à base de pérovskite

2.1	Introduction .....	20
2.2	Évolution historique et développement.....	21
2.3	Structure cristalline des Pérovskites.....	22
2.4	Propriétés des matériaux pérovskites .....	23
2.4.1	Propriétés optiques et électroniques des pérovskites .....	23
2.4.2	Propriétés optoélectroniques.....	24
2.5	Approches de fabrication des structures en pérovskite .....	24
2.6	Couche de transport de trous (HTL) .....	25
2.7	Couche de transport d'électrons (ETL) .....	26
2.8	Conception et procédés de fabrication des cellules solaires à pérovskite.....	27
2.9	Principe de fonctionnement de la cellule solaire à base de pérovskite .....	28
2.10	Processus de transfert de charge dans les cellules solaires à pérovskite.....	29
2.11	Conclusion.....	30

## Chapitre-3

### Résultats et Discussion

3.1	Introduction .....	32
3.2	Présentation de l'outils de simulation et les méthodes de simulations numériques .....	33
3.2.1	Environnement de CAD .....	33
3.3	Module de simulation utilisé.....	33
3.3.1	Le simulateur << Solar Cell >> .....	33
3.4	Simulation optique avec DiffractMOD.....	34
3.4.1	DiffractMOD .....	34
3.4.2	La méthode RCWA .....	34
3.5	Les interfaces du simulateur « Solar Cell ».....	35
3.6	Structure et caractéristique .....	38
3.6.1	Structure étudiée .....	38
3.7	Optimisation de l'efficacité de la couche pérovskite .....	38
3.8	Impact des matériaux et de l'épaisseur des couches ETL et HTL.....	39

3.9 Conclusion.....	45
Conclusion générale.....	48
Références bibliographiques .....	50
Résumé (Ar, Ang, Fr) .....	53

## *Liste des abréviations*

**PV** : Photovoltaïque.

**PDMS** : Polydiméthylsiloxane.

**ETL** : Couche de transport d'électrons.

**HTL** : Couche de transport de trous.

**Voc** : Tension en circuit ouvert.

**I<sub>ph</sub>** : est la densité du photo-courant généré.

**I<sub>cc</sub> (I<sub>sc</sub>)** : Courant de court-circuit.

**I<sub>m</sub>** : Courant au point de puissance maximale.

**V<sub>m</sub>** : Tension au point de puissance maximale.

**η** : Rendement de conversion.

**FF** : Facteur de Forme.

**P<sub>m</sub>** : La puissance maximale.

**CsPbX<sub>3</sub>** : Halogénure de plomb au césium.

**MAPbX<sub>3</sub>** : Méthylammonium Plomb Iode.

**MAPbI<sub>3</sub>** : Méthylammonium Plomb Iodure.

**MASnI<sub>3</sub>** : Méthylammonium Etain Iodure.

**MAGeI<sub>3</sub>** : Méthylammonium Germanium Iodure.

**MAGeBr<sub>3</sub>**: Méthylammonium Germanium Bromure.

**MAGeCl<sub>3</sub>**: Méthylammonium Germanium Chlorure.

**BL**: Blocking Layer (Couche de Blocage).

**CBD** : Continuous Blow-Down (Purge continue).

**P3HT** : Poly(3-hexylthiophène).

**AZO** : Oxyde de Zinc dopé Aluminium.

**Cu<sub>2</sub>O** : Oxyde Cuivreux.

**PEDOT:PSS** : Poly(3,4-éthylènedioxythiophène).

**TiO<sub>2</sub>** : Dioxyde de Titane.

**ZnSe** : Sulfure de Zinc et Sélénium.

**ZnO** : L'oxyde de Zinc.

**ZnS** : Sulfure de Zinc.

**TCO** : Electrode transparente.

**P-I-N**: Positive-Intrinsic-Negative.

**N-I-P**: Negative-Intrinsic-Positive.

**FTO** : Electrode conductrice transparente.

**RCWA**: Rigorous coupled-wave analysis.

**µm** : Micromètre.

**nm** : Nanomètre.

# *Liste des Figures*

Figure 1.1 Principe de fonctionnement des cellules solaires.....	9
Figure 1.2 Schéma du fonctionnement d'un dopage .....	11
Figure 1.3 Cellule solaire à base de silicium monocristallin.....	11
Figure 1.4 Cellule solaire amorphe.....	12
Figure 1.5 Cellule solaire organique.....	12
Figure 1.6 Cellule solaire pérovskites. ....	13
Figure 1.7 Caractéristiques I(V) d'une cellule PV soumise à différents éclairagements.....	14
Figure 1.8 Tension de circuit ouvert.....	15
Figure 1.9 Courant de court-circuit.....	15
Figure 1.10 L'effet photovoltaïque .....	17
Figure 2.1 Evolution de l'efficacité des cellules solaires en silicium et en pérovskite .....	22
Figure 2.2 Structure cubique de la pérovskite .....	23
Figure 2.3 Coefficients d'absorption de quelques pérovskites hybrides .....	24
Figure 2.4 Les architectures les plus utilisés dans les cellules solaires à base de pérovskite.....	28
Figure 2.5 Diagramme schématique des niveaux de bande d'énergie.....	29
Figure 3.1 La fenêtre de simulation de << Solar Cell>> présente la sortie J-V par défaut .....	36
Figure 3.2 les résultats de l'efficacité quantique .....	37
Figure 3.3 les résultats des spectres.....	37
Figure 3.4 Cellule solaire à base de pérovskite .....	38
Figure 3.5 (a) Cell Efficiency (b) Caractéristiques $I=f(V)$ d'une cellule PV	

(c) Efficacité quantique (d) Absorption totale de la lumière .....	39
Figure 3.6 Le rendement en fonction de l'épaisseur.....	40
Figure 3.7 (a) Caractéristiques $I=f(V)$ d'une cellule PV, (b) Efficacité quantique, (c) et (d) Absorption totale de la lumière, pour HTL : $Cu_2O$ et ETL : $ZnO$ .....	41
Figure 3.8 (a) Caractéristiques $I=f(V)$ d'une cellule PV, (b) Efficacité quantique (c) et (d) Absorption totale de la lumière, pour HTL : $Cu_2O$ et ETL : $ZnSe$ .....	42
Figure 3.9 (a) Caractéristiques $I=f(V)$ d'une cellule PV, (b) Efficacité quantique, (c) et (d) Absorption totale de la lumière, pour HTL : $Cu_2O$ et ETL : $ZnS$ .....	43
Figure 3.10 (a) Caractéristiques $I=f(V)$ d'une cellule PV, (b) Efficacité quantique, (c) et (d) Absorption totale de la lumière, pour HTL : $Cu_2O$ et ETL : $TiO_2$ .....	44

# **INTRODUCTION GENERALE**

## **Introduction Générale**

La consommation énergétique mondiale connaît une croissance continue en raison du développement des secteurs industriels, des moyens de transport et des télécommunications. Les sources d'énergie fossile, telles que le pétrole, le gaz naturel, le charbon et l'uranium, représentent encore plus de 85 % de la consommation énergétique globale. Avec l'épuisement progressif de ces ressources d'une part, et l'augmentation constante de la demande énergétique d'autre part, les énergies renouvelables sont appelées à jouer un rôle de plus en plus crucial dans la satisfaction des besoins futurs de la société.

Dans ce contexte, les cellules solaires photovoltaïques (PV) se sont imposées comme l'une des solutions les plus prometteuses pour assurer un développement durable, grâce à leur capacité à convertir directement le rayonnement solaire en électricité. Cette importance stratégique leur a conféré une place centrale dans la recherche scientifique, notamment avec l'accélération de leur développement depuis les années 1990 [1].

La recherche dans le domaine des cellules PV repose principalement sur deux axes : l'augmentation du rendement de conversion via l'amélioration de l'efficacité des l'absorption de la lumière à l'intérieur de la cellule, tout en veillant à réduire les coûts de fabrication. La connaissance approfondie des matériaux constituant les cellules est essentielle pour atteindre cet objectif.

Les cellules photovoltaïques traditionnelles à base de silicium affichent un rendement d'environ 17 % sur le marché commercial, un taux relativement faible par rapport à l'abondance du rayonnement solaire disponible. Ainsi, plusieurs technologies ont été développées pour maximiser l'absorption lumineuse, et les cellules PV ont été classées en trois générations :

- Première génération : Les cellules de première génération reposent sur le silicium cristallin, atteignant un rendement de 26,6 % pour le silicium monocristallin avec concentrateurs, 26,1 % sans concentrateurs, et 21,2 % pour le silicium multicristallin [1].

## INTRODUCTION GENERALE

Malgré leur rendement élevé, leur coût de production reste élevé en raison de procédés de fabrication complexes et de matériaux coûteux.

- Deuxième génération : Ces cellules utilisent du silicium amorphe (Rendement de 14 %), des technologies à base de CIGS (23,4 %) et des cellules CdTe (22,1 %) [1]. Bien que leur rendement soit inférieur à celui des cellules au silicium cristallin, leurs coûts de fabrication réduits les rendent plus attractives économiquement [1].

- Troisième génération : Récemment, l'émergence des matériaux pérovskites, notamment les halogénures organométalliques ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ , où  $X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$ ), a ouvert de nouvelles perspectives pour le développement de dispositifs photovoltaïques à faible coût. En quelques années seulement, l'efficacité des cellules à pérovskite est passée de 3,8 % à environ 25 % [1].

Ces cellules offrent de nombreux avantages : faible coût de production, simplicité de fabrication, flexibilité dans l'ajustement de leurs propriétés optoélectroniques, et grande polyvalence d'intégration dans différents systèmes [1].

Pour améliorer le rendement de conversion de la lumière, diverses stratégies ont été explorées, telles que l'ingénierie des matériaux d'interface et l'optimisation des couches. Ces approches visent à renforcer les performances électriques des cellules en réduisant les pertes de porteurs et en augmentant l'absorption de la lumière au sein des couches actives [1].

Dans une cellule solaire à pérovskite standard, une couche active (par exemple  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ) est insérée entre une couche de transport de trous (HTL) et une couche de transport d'électrons (ETL) [1].

Dans ce travail, nous étudions particulièrement l'impact de la modification des matériaux et de l'épaisseur des couches de transport sur l'amélioration de l'absorption dans la couche active à base de pérovskite.

## **INTRODUCTION GENERALE**

En agissant simultanément sur ces deux paramètres (matériaux et épaisseurs), notre objectif est de maximiser l'absorption des photons, de minimiser les pertes optiques et, par conséquent, d'améliorer significativement le rendement de conversion des cellules étudiées.

Notre méthodologie repose sur le remplacement des matériaux des couches d'interface (HTL et ETL) et sur l'ajustement de leur épaisseur. Ainsi, pour la couche HTL, nous avons utilisé plusieurs matériaux :  $\text{Cu}_2\text{O}$ , AZO, PEDOT : PSS et P3HT, en maintenant une épaisseur constante de 50 nm considérée optimale selon la littérature. Concernant la couche ETL, nous avons exploré différentes options :  $\text{TiO}_2$ , ZnO, ZnSe et ZnS, avec une variation contrôlée de l'épaisseur entre 10 et 120 nm.

Notre étude vise à identifier la meilleure combinaison matériau/épaisseur permettant de maximiser l'absorption de la lumière et d'optimiser ainsi les performances photovoltaïques globales des cellules à pérovskite. Cette mémoire est divisée en trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à des notions générales sur le photovoltaïque et les cellules solaires.
- Dans le deuxième chapitre, on se familiarise sur les matériaux pérovskites.
- Le dernier chapitre comprend le logiciel de simulation ainsi que les résultats obtenus avec leurs discussions.

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale.

# **Chapitre-1**

## **Les cellules photovoltaïques : Aperçu général**

## **1.1 Introduction**

L'énergie joue un rôle crucial dans le développement durable. Depuis deux siècles, les civilisations modernes s'appuient sur les sources fossiles (charbon, gaz, pétrole), qui offrent une énergie dense et à faible coût. Cependant, ces sources ne sont pas renouvelables et constituent la principale cause des émissions de dioxyde de carbone, contribuant ainsi au changement climatique.

Aujourd'hui, il devient indispensable de passer à des sources d'énergie bas carbone afin de faire face aux enjeux climatiques, en améliorant l'efficacité énergétique et en généralisant l'usage des énergies renouvelables ainsi que de l'énergie nucléaire.

La consommation énergétique mondiale se concentre dans trois grands secteurs : la production d'énergie thermique, le transport et la production d'électricité. D'importantes économies d'énergie peuvent être réalisées dans le secteur résidentiel, tandis que la réduction de la consommation dans le secteur des transports reste un défi plus complexe. Les sources d'énergie se divisent en deux grandes catégories : les sources fossiles et les sources naturelles (comme le vent, le soleil et l'eau), elles-mêmes classées en énergies renouvelables et non renouvelables [1].

Dans ce chapitre, nous avons abordé les concepts liés à l'énergie solaire photovoltaïque, qui est une forme d'énergie renouvelable. Cette énergie, issue du rayonnement solaire capté par la Terre, constitue une source naturelle inépuisable et totalement respectueuse de l'environnement. Ce domaine connaît des avancées technologiques récentes visant à améliorer ses performances et à renforcer sa compétitivité économique. Depuis plusieurs années, la recherche s'efforce d'élargir ses applications tout en réduisant les coûts de production.

## **1.2 Historique du photovoltaïque**

L'énergie solaire photovoltaïque a connu un développement remarquable au fil des décennies, passant d'un simple phénomène scientifique à une source d'énergie renouvelable essentielle et largement utilisée. Cette histoire commence avec la découverte de l'effet photoélectrique en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel, qui observa que certains matériaux produisaient de l'électricité lorsqu'ils étaient exposés à la lumière. Cette découverte a donné lieu à une série de recherches menées par des scientifiques tels que William Grylls Adams et Richard Evans Day, qui ont renforcé l'intérêt pour l'utilisation de l'énergie solaire comme source alternative. Cependant, à cette époque, l'efficacité des cellules était faible et la technologie n'était pas encore prête pour un usage commercial. En 1883, l'inventeur américain Charles Fritts a créé la première cellule solaire utilisant de fines couches de sélénium, qui, malgré son efficacité limitée, a ouvert la voie à des améliorations ultérieures. En 1921, Albert Einstein a reçu le prix Nobel pour son explication de l'effet photoélectrique, posant ainsi les bases d'une compréhension approfondie de l'interaction entre la lumière et la matière et contribuant au développement de cette technologie. Dans les années 1940, Russell Ohl, Gerald Pearson et Daryl Chapin ont mis au point la première cellule solaire en silicium cristallin avec des performances nettement améliorées, marquant un tournant majeur qui a conduit à un progrès continu vers des applications pratiques et efficaces [2].

## **1.3 Définition d'une cellule solaire**

Les cellules photovoltaïques ont la particularité de produire un courant électrique lorsqu'elles sont exposées aux rayonnements du Soleil. Elle est généralement constituée d'un semi-conducteur de type n et d'un semi-conducteur de type p, Les semi-conducteurs sont assemblés en deux couches, l'une dopée positivement (p) et l'autre négativement (n), qui forment une jonction p-n à leur interface [3].

En présence de lumière, les photons interagissent avec leurs atomes, au point d'exciter des électrons qui vont alors se diriger vers une électrode. Ils laissent derrière eux des trous qui se comportent, de manière extrêmement simplifiée, comme des charges positives. Ils sont donc eux aussi récoltés par une électrode, ce qui donne

naissance à une différence de potentiel entre les deux bornes de chaque entité électronique (que l'on mesure en volts). Une cellule photovoltaïque produit ainsi du courant électrique continu [4].

Cette conversion repose essentiellement sur trois étapes clés :

- a) L'absorption des photons s'effectue grâce à la présence d'un gap énergétique entre les bandes de valence et de conduction, une propriété essentielle des matériaux semi-conducteurs.
- b) Cette énergie photonique est ensuite transformée en énergie électrique, générant des paires électron-trou.
- c) Enfin, la jonction p-n ou une hétérojonction dans le cas de deux semi-conducteurs différents facilite la collecte des charges générées au sein du matériau

La survenue de ce phénomène nécessite que les matériaux utilisés dans la cellule photovoltaïque disposent de deux niveaux d'énergie bien définis, tout en étant suffisamment conducteurs pour permettre la circulation du courant. Cela explique l'importance majeure des semi-conducteurs dans le domaine du photovoltaïque [4].

#### **1.4 Principe de fonctionnement des cellules solaires**

Les cellules photovoltaïques fonctionnent sur la base de l'effet photoélectrique, en convertissant la lumière du soleil en courant électrique continu. Elles sont composées d'un substrat en matériau semi-conducteur, le plus souvent en silicium, dopé avec une impureté de type p afin de créer un déficit d'électrons dans la bande de conduction, ce qui engendre une charge positive.

Le comportement des photo-porteurs varie selon la région du semi-conducteur :

- **Dans les zones n ou p**, les porteurs minoritaires qui atteignent la région de charge sont repoussés par le champ électrique : les trous sont dirigés vers la zone p et les électrons vers la zone n. Cette accumulation de porteurs contribue à la formation d'un photo-courant de diffusion.

- **Dans la région de charge (jonction)**, les paires électron-trou générées par l'absorption des photons sont séparées par le champ électrique interne : les électrons sont entraînés vers la zone n et les trous vers la zone p. Ce processus engendre un photo-courant de génération [5].

Une cellule photovoltaïque repose sur l'association de deux types de semi-conducteurs : l'un enrichi en électrons, et l'autre appauvri. Ces deux zones sont respectivement appelées dopage de type n (négatif) et dopage de type p (positif). Le dopage consiste à introduire dans le cristal de silicium des atomes étrangers afin d'améliorer sa conductivité électrique. Le silicium pur possède quatre électrons de valence.

Pour obtenir un dopage de type n, on ajoute des atomes de phosphore, qui possèdent cinq électrons de valence, soit un électron supplémentaire par rapport au silicium.

Ce surplus d'électrons confère une charge négative au matériau. Inversement, le dopage de type p s'effectue en ajoutant des atomes de bore, qui ne disposent que de trois électrons de valence, créant ainsi un déficit d'électrons (appelé « trou »), ce qui donne au matériau une charge positive [6].

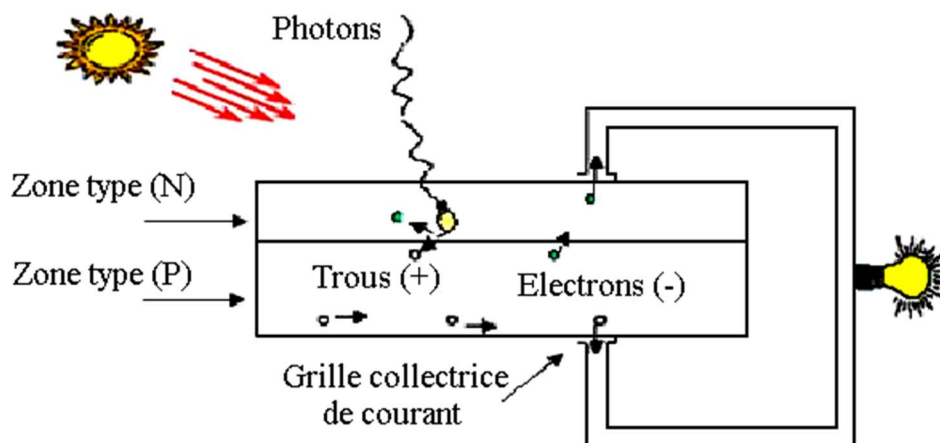


Figure 1.1 Principe de fonctionnement des cellules solaires.

## **1.5 Le rôle du dopage dans les cellules solaires**

Dans le secteur photovoltaïque, le dopage constitue une technique utilisée pour altérer les propriétés d'un semi-conducteur, dans le but d'améliorer le rendement de conversion des cellules solaires.

Cette technique repose sur l'introduction de deux types de semi-conducteurs au sein de la cellule : de type p et de type n. Le processus de dopage consiste à diffuser thermiquement une solution dopante dans la plaquette de silicium, à des températures comprises entre 800 et 900 °C.

Sous l'effet de cette chaleur, les atomes dopants acquièrent l'énergie nécessaire pour pénétrer dans le réseau cristallin du silicium et s'y intégrer, modifiant ainsi ses propriétés électriques [7].

### **1.5.1 Dopage de type n**

Le dopage de type n consiste à introduire dans un semi-conducteur pur des atomes donneurs, tels que le phosphore, qui possèdent un électron de valence supplémentaire par rapport à l'atome de base (comme le silicium). Ces électrons excédentaires se retrouvent majoritairement dans la bande de conduction, ce qui augmente la densité de porteurs de charge négatifs dans le matériau. Ainsi, la conductivité électrique de la cellule est améliorée, car le courant circule plus facilement grâce à la mobilité accrue des électrons [7].

### **1.5.2 Dopage de type p**

Le dopage de type p est l'opposé du dopage de type n. Il consiste à introduire dans un semi-conducteur pur des atomes accepteurs, comme le bore, qui possèdent moins d'électrons de valence que le matériau de base (comme le silicium).

Cette opération crée des lacunes électroniques ou trous dans la bande de valence, c'est-à-dire des positions vacantes laissées par l'absence d'électrons. Ce sont ces trous, chargés positivement, qui deviennent alors les principaux porteurs de charge, permettant le passage du courant électrique dans le matériau [7].

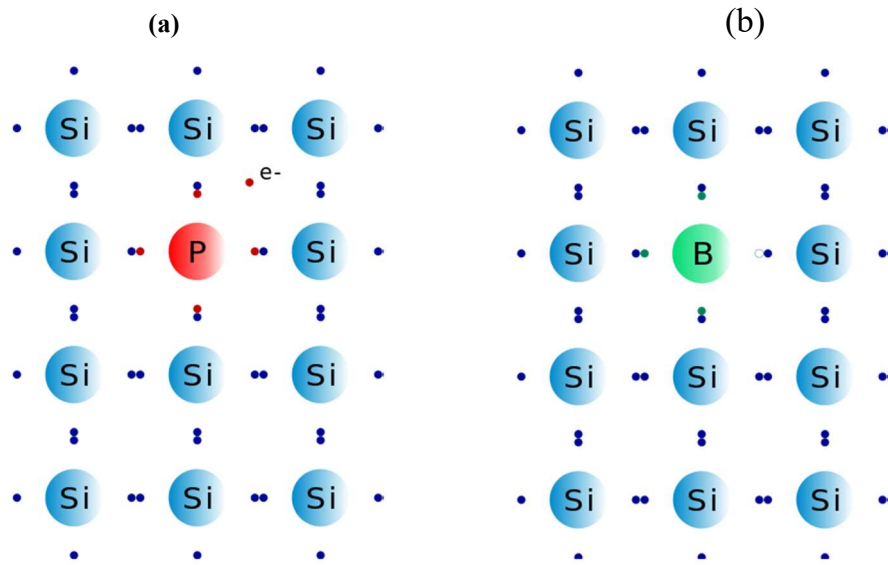


Figure 1.2 a) Schéma du fonctionnement d'un dopage de type n,  
b) Schéma du fonctionnement d'un dopage de type p

## 1.6 Les différents types de cellules solaires

Les cellules PV sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs, le silicium étant le plus utilisé aujourd'hui, bien que d'autres matériaux puissent également être employés selon les technologies.

### 1.6.1 Les cellules monocristallines

Le type de cellule le plus répandu actuellement est la cellule PV monocristalline. Elle se compose d'un cristal unique de silicium surmonté d'une fine couche de dioxyde de silicium, ce qui optimise sa capacité à transformer la lumière solaire en électricité. Malgré son coût élevé, elle se distingue par un rendement supérieur [7].



Figure 1.3 Cellule solaire à base de silicium monocristallin.

### 1.6.2 Les cellules amorphes (couches minces)

Ces cellules se composent d'un matériau en silicium amorphe et ont l'avantage d'être imprimables sur des supports flexibles.

Cette technologie est idéale pour les vitres ou pare-brise de voiture, car elles ne nécessitent pas d'équipement spécial. Le silicium amorphe est coûteux à produire en grandes quantités, c'est pour cela qu'il n'est plus couramment utilisé dans les panneaux solaires [7].



Figure 1.4 Cellule solaire amorphe.

### 1.6.3 Les cellules solaires polycristallines

Ces cellules comportent plusieurs couches de silicium, chacune étant d'une couleur différente. On empile les différentes couches de manière à créer de nombreux petits points sur la surface. La taille et l'espacement entre ces points déterminent la quantité de lumière que la cellule peut absorber et diriger vers votre système électrique. Les cellules polycristallines sont moins chères, mais elles n'ont pas une puissance de sortie aussi élevée [7].

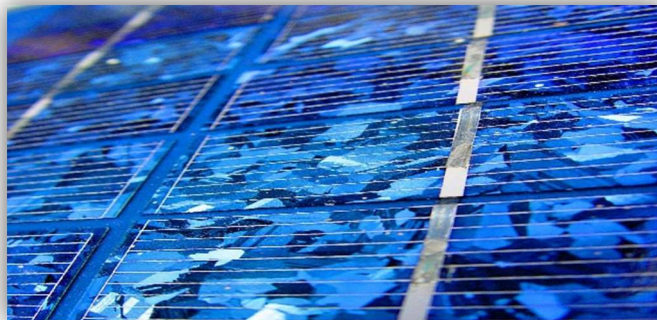


Figure 1.5 Cellule solaire organique.

#### 1.6.4 Les pérovskites

La pérovskite est un matériau hybride organique-inorganique doté d'une structure cristalline tétragonale, offrant un fort potentiel dans le domaine du photovoltaïque. Utilisée pour capter l'énergie solaire, elle permet la fabrication de cellules solaires capables de convertir la lumière en électricité. Contrairement au silicium, encore largement employé dans les cellules photovoltaïques classiques, la pérovskite offre un rendement de conversion énergétique élevé, avoisinant les 20 %. En plus d'être moins coûteuses, les cellules à base de pérovskite sont plus faciles à produire. Toutefois, leur faible stabilité, notamment en extérieur, constitue un frein à leur déploiement à grande échelle [7].



Figure 1.6 Cellule solaire pérovskites.

#### 1.7 Différents paramètres de sortie de la cellule photovoltaïque

Une cellule PV se caractérise par plusieurs paramètres clés : le rendement de conversion ( $\eta$ ), la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ), ainsi que le facteur de forme (FF).

Ces grandeurs sont déterminées à partir de la courbe courant-tension (I-V), qui permet d'évaluer les performances globales de la cellule solaire. [8].

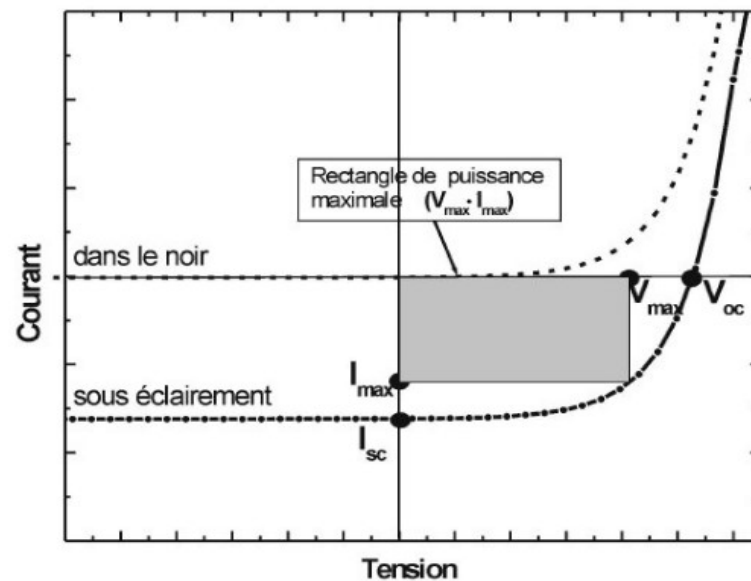


Figure 1.7 Caractéristiques I(V) d'une cellule PV soumise à différents éclairagements.

- $V_{oc}$  : Tension en circuit ouvert lorsque  $I=0$ .
- $I_{ph}$  : est la densité du photo-courant généré.
- $I_{cc}$  ( $I_{sc}$ ) : Courant de court-circuit lorsque  $V=0$ .
- $I_m$  : Courant au point de puissance maximale de la cellule photovoltaïque.
- $V_m$  : Tension au point de puissance maximale de la cellule photovoltaïque.
- $\eta$  : Rendement de conversion.
- $FF$  : Facteur de forme.

### 1.7.1 La tension de circuit ouvert $V_{CO}$ (pour $I_{CC} = 0$ )

La tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) est la tension continue relevée aux bornes d'un panneau photovoltaïque soumis à un éclairage constant, lorsque le circuit est ouvert, c'est-à-dire en l'absence totale de circulation de courant.

Exprimée généralement en millivolts, cette tension est influencée par plusieurs facteurs : elle dépend notamment de la différence des travaux de sortie entre les électrodes, ainsi que de la résistance de shunt du dispositif.

Elle diminue avec l'augmentation de la température et varie proportionnellement à l'intensité lumineuse incidente sur la cellule [8].

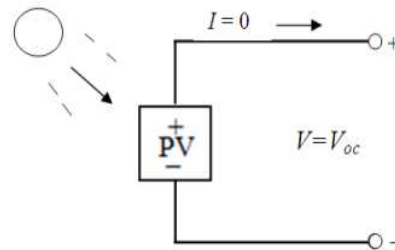


Figure 1.8 Tension de circuit ouvert

### 1.7.2 Le courant de court-circuit $I_{CC}$ (pour $V_{CO} = 0$ )

À l'inverse, le courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ) fait référence au courant maximal généré par une cellule photovoltaïque lorsque la tension à ses bornes est nulle (circuit fermé).

Cette information est particulièrement importante, car elle reflète directement l'intensité de la lumière solaire que reçoit le panneau. Plus la lumière incidente est forte, plus le courant de court-circuit est élevé [8].

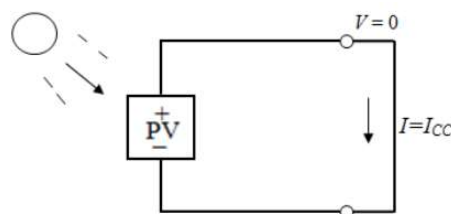


Figure 1.9 Courant de court-circuit

### 1.7.3 Facteur de forme FF

Il se définit comme le rapport entre la puissance maximale ( $P_m$ ) que peut fournir le module photovoltaïque et le produit de la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) par le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ). Autrement dit, c'est une mesure de l'efficacité de la cellule à convertir l'énergie disponible en puissance utile. Ce rapport permet d'estimer le degré d'optimisation de la cellule par rapport à une cellule idéale dont la courbe courant-tension serait parfaitement rectangulaire [8].

$$FF = \frac{P_M}{V_{CO} \times I_{CC}} = \frac{V_M \times I_M}{V_{CO} \times I_{CC}} \quad (1.1)$$

Plus le Facteur de Forme est élevé, l'efficacité de conversion est meilleure.

#### 1.7.4 Le rendement

Le rendement de conversion ( $\eta$ ) d'un module photovoltaïque représente le rapport entre la puissance électrique maximale produite par la cellule et la puissance lumineuse incidente reçue à sa surface.

Il s'agit d'un paramètre électrique fondamental, car il exprime la capacité de la cellule solaire à convertir l'énergie solaire en électricité utilisable de manière efficace.

$$\eta = \frac{P_M}{P_{inc}} = \frac{V_M \times I_M}{P_{inc}} = \frac{FF \times V_{CO} \times I_{CC}}{P_{inc}} \quad (1.2)$$

Les performances peuvent être améliorées en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert.

Le rendement d'une cellule photovoltaïque dépend de trois paramètres clés : le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) et le facteur de forme (FF) [8].

### 1.8 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque, découvert pour la première fois en 1839 par Alexandre Becquerel, constitue le principe fondamental des cellules solaires. Il a été observé pour la première fois dans un matériau solide, le sélénium, en 1876, avant que le silicium ne devienne le matériau de référence dans cette technologie. Aujourd'hui, le silicium cristallin est le matériau le plus utilisé pour la fabrication des panneaux solaires, représentant environ 90 % de la production mondiale [3].

Ce phénomène correspond à la conversion directe d'une partie de l'énergie lumineuse en électricité lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière. Lorsque des photons d'énergie suffisante frappent le semi-conducteur, ils transfèrent leur énergie aux électrons, les excitent et créent ainsi des paires électron-trou. Si ces porteurs de charge sont efficacement séparés et dirigés vers des électrodes opposées, un courant électrique peut être généré à travers un circuit externe [9].

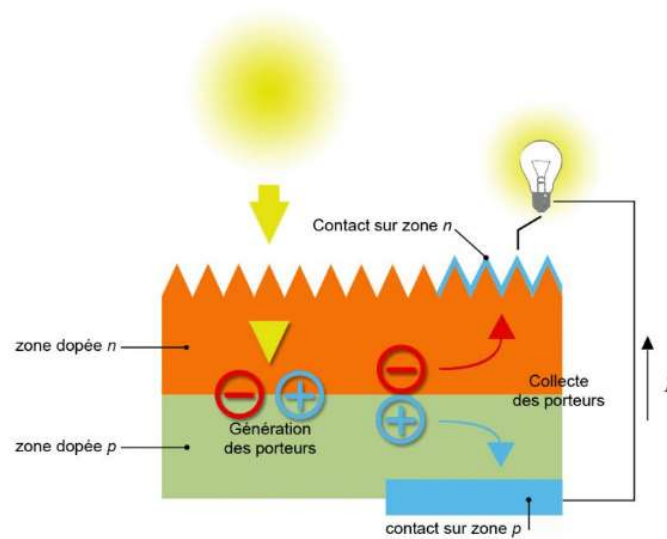


Figure 1.10 L'effet photovoltaïque.

## 1.9 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

### 1.9.1 Les avantages

- La production d'électricité à partir du solaire photovoltaïque est respectueuse de l'environnement et ne génère pas de substances toxiques.
- Les systèmes photovoltaïques se distinguent par leur grande fiabilité et leur faible besoin en maintenance.
- Grâce à leur compacité et à leur fonctionnement silencieux, ces installations s'intègrent parfaitement dans les environnements urbains.
- L'abondance de la lumière solaire sur l'ensemble du territoire permet une utilisation aussi bien dans des zones isolées que dans les centres urbains.
- L'énergie est produite localement, au plus près des consommateurs, ce qui favorise une production décentralisée et autonome.
- Les matériaux composant les panneaux (tels que le verre et l'aluminium) sont conçus pour résister aux conditions climatiques sévères, comme les fortes pluies ou la grêle.
- Les panneaux solaires bénéficient d'une longévité remarquable, avec des garanties de performance allant jusqu'à 25 ans chez certains fabricants.

### 1.9.2 Les inconvénients

- La production d'électricité dépend fortement du niveau d'ensoleillement, qui peut varier selon le lieu et les conditions météorologiques.
- Le coût initial d'installation reste relativement élevé, ce qui représente un frein pour de nombreux utilisateurs.
- Le rendement de conversion de l'énergie solaire en électricité demeure relativement faible par rapport à d'autres sources d'énergie.
- Le recours aux systèmes de stockage, notamment les batteries, est nécessaire pour pallier l'intermittence de la production, ce qui augmente considérablement le coût global.
- Le processus de fabrication des cellules photovoltaïques peut entraîner une certaine pollution, notamment à cause des matériaux utilisés.

Malgré ces limites, le secteur photovoltaïque continue de croître rapidement, avec des avancées technologiques visant à réduire ces inconvénients, notamment en ce qui concerne les coûts [8].

### 1.10 Conclusion

Ce chapitre a offert une vue d'ensemble claire et structurée sur l'énergie solaire photovoltaïque. Après une introduction générale sur son importance croissante, nous avons retracé l'historique du photovoltaïque, mettant en lumière ses étapes clés. La définition d'une cellule solaire a permis de comprendre son rôle essentiel de convertisseur direct de lumière en électricité. Le principe de fonctionnement, fondé sur l'effet photovoltaïque, a été expliqué en détail, illustrant le phénomène physique central de cette technologie. Le rôle du dopage, avec ses types n et p, a été présenté comme un élément crucial pour le fonctionnement efficace des cellules solaires. Nous avons étudié les différents types de cellules photovoltaïques, notamment monocristallines, amorphes, polycristallines et à pérovskite. Les paramètres électriques clés tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), facteur de forme (FF) et rendement ( $\eta$ ) ont été définis comme indispensables pour évaluer les performances des cellules.

Une explication détaillée de l'effet photovoltaïque a ensuite été présentée pour approfondir la compréhension du processus de conversion d'énergie. Enfin, traité des avantages et des inconvénients de l'énergie solaire, mettant en avant son caractère renouvelable et écologique ainsi que ses limites liées aux coûts initiaux et aux conditions météorologiques. Cette organisation logique permet une compréhension progressive et complète des fondements et enjeux de la technologie photovoltaïque.

**Chapitre-2**  
**Les cellules photovoltaïques à base de**  
**pérovskite**

## 2.1 Introduction

Les panneaux solaires à pérovskite sont une nouvelle technologie photovoltaïque qui attire de plus en plus l'intérêt en raison de leur efficacité élevée et de leur coût de fabrication abordable. L'introduction initiale dans les cellules solaires sensibilisées par des colorants en 2009 des matériaux hybrides à base de pérovskite organiques et inorganiques ont montré un grand potentiel. Leur taux de conversion est monté à 15 % en 2013 puis à 22, 1 % en 2017, avec certain rapport mentionnant des efficacités allant jusqu'à 26, 3 % [10]. Les cellules dont il est question ont rapidement dépassé les cellules solaires à colorant et les cellules solaires organiques pour rivaliser désormais avec les performances des cellules solaires en silicium monocristallin. Leur efficacité repose non seulement sur les caractéristiques optoélectroniques exceptionnelles de la pérovskite mais aussi sur l'optimisation des couches fonctionnelles environnantes qui garantissent une absorption lumineuse optimale ainsi qu'un transport efficace des charges et une réduction des pertes énergétiques.

## 2.2 Évolution historique et développement

Au cours du siècle dernier, les premières recherches sur les pérovskites halogénées ont été publiées, notamment sur la famille  $\text{CsPbX}_3$ , connue pour sa structure cristalline de type pérovskite et ses propriétés de photoconductivité. Dans les années 1980, la famille  $\text{MAPbX}_3$  a été synthétisée et les premiers travaux sur la conductivité ionique du  $\text{CsPbX}_3$  ont été rapportés. Toutefois, ce n'est qu'en 2009 que ces matériaux ont été utilisés comme couches actives dans des cellules solaires, avec une efficacité initiale inférieure à 4 % et une stabilité limitée, ce qui a freiné l'intérêt de la communauté scientifique à l'époque. Ce n'est qu'à partir de 2012 que des recherches convergentes ont permis de démontrer une efficacité de conversion d'environ 10 %, marquant ainsi le début d'un véritable engouement pour les pérovskites. Depuis, les pérovskites halogénées ont suscité un intérêt croissant à l'échelle mondiale, au point de devenir l'un des candidats les plus prometteurs pour le développement des cellules solaires de nouvelle génération [10].

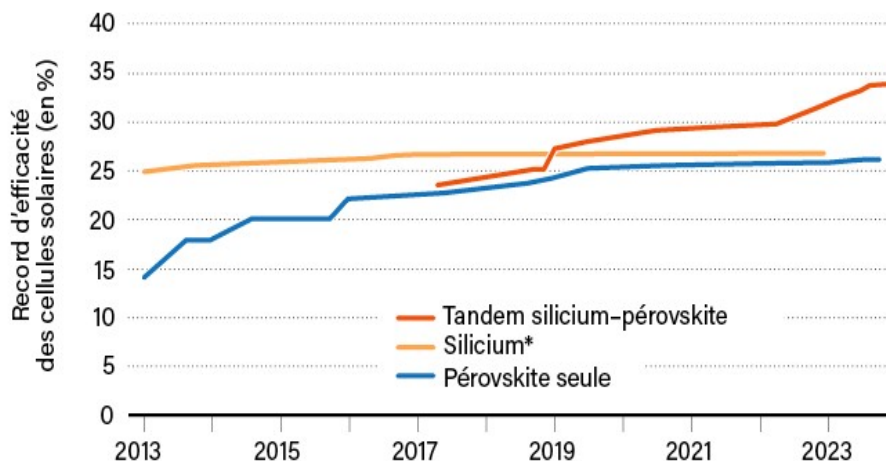


Figure 2.1 Evolution de l'efficacité des cellules solaires en silicium et en pérovskite entre 2013 et 2023.

### 2.3 Structure cristalline des Pérovskites

À l'origine, le terme pérovskite désignait le titanate de calcium ( $\text{CaTiO}_2$ ), découvert en 1839 par Gustav Rose, qui l'a nommé en hommage au minéralogiste Lev Alexeïevitch Perovski. Par la suite, il a été établi que la structure cristalline de ce minéral est partagée par de nombreux autres composés. Aujourd'hui, le terme « pérovskite » fait référence à une famille de matériaux cristallisant selon une structure de type ABX (voir Figure 2.1), où A représenté un cation monovalent, B un cation divalent, et X un anion monovalent [11].

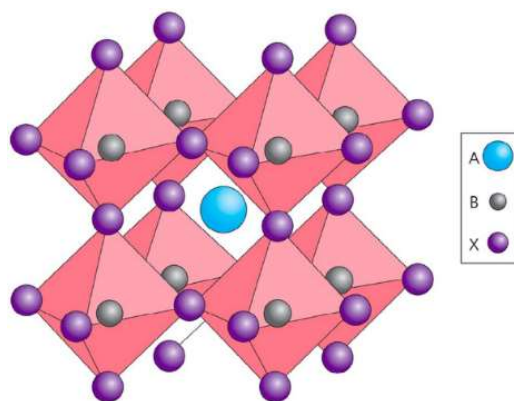


Figure 2.2 Structure cubique de la pérovskite.

## 2.4 Propriétés des matériaux pérovskites

### 2.4.1 Propriétés optiques et électroniques des pérovskites

Les halogénures de méthyl ammonium présentent des propriétés électroniques et optiques remarquables. Ce sont des pigments semi-conducteurs à transition directe, ce qui leur confère une forte capacité d'absorption de la lumière. Ils sont généralement considérés comme des matériaux de type p.

Afin d'illustrer l'aptitude de cinq composés pérovskites —  $\text{MAPbI}_3$ ,  $\text{MASnI}_3$ ,  $\text{MAGeI}_3$ ,  $\text{MAGeBr}_3$  et  $\text{MAGeCl}_3$  — à absorber la lumière dans le domaine visible, leurs coefficients d'absorption optique ont été calculés et représentés dans la Figure 2.3 [12].

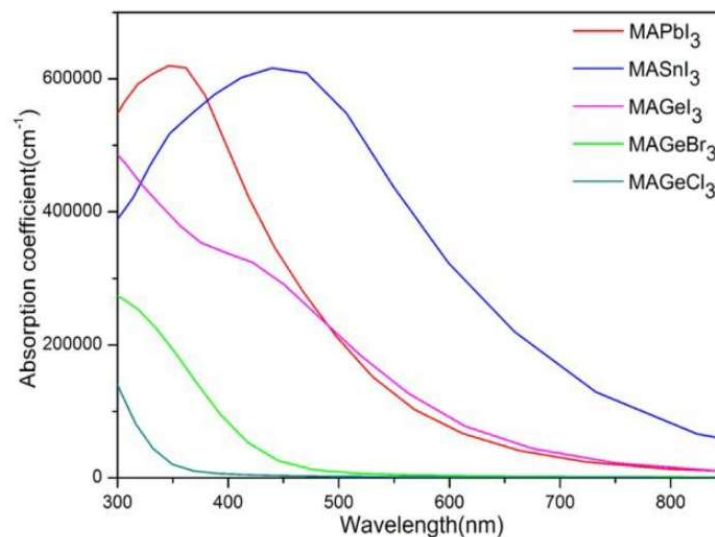


Figure 2.3 Coefficients d'absorption de quelques pérovskites hybrides [12].

## 2.5 Propriétés optoélectroniques

L'intérêt croissant pour les oxydes à structure pérovskite de type  $\text{ABX}_3$ , observé depuis plus de quarante ans, s'explique par la flexibilité qu'offre cette structure en permettant de modifier facilement les cations A et B. Ce changement de composition chimique entraîne une variation significative des propriétés du matériau, ouvrant ainsi la voie à une large gamme de comportements physiques, en fonction de la nature chimique et électronique des éléments A et B [12].

## 2.6 Approches de fabrication des structures en pérovskite

Les principales méthodes de dépôt des films de pérovskite incluent le dépôt sous vide, tel que le dépôt en une seule étape à partir de précurseurs, le dépôt séquentiel en phase vapeur ou le dépôt à double source, ainsi que les procédés en solution, notamment le spin-coating en une ou deux étapes (par pulvérisation ou dépôt chimique en solution, CBD), cette dernière étant la technique la plus répandue. La qualité des films dépend de critères essentiels : une couverture uniforme de la couche ETL ou de la couche de blocage (BL), une faible rugosité de surface et une taille de grains pouvant atteindre l'échelle du micron. Ces films présentent de nombreux avantages, notamment une forte absorption de la lumière, des niveaux d'énergie bien alignés pour un transfert efficace des charges, une structure limitant la recombinaison des porteurs, ainsi qu'un excellent rapport performance/coût. Toutefois, leur développement est freiné par certaines limitations, notamment leur grande sensibilité à l'humidité, une composition parfois peu respectueuse de l'environnement, et une stabilité à long terme qui reste un défi majeur [12].

## 2.7 Couche de transport de trous (HTL)

La couche des trous en transport, HTL, joue un rôle à la fois critique ; elle facilite la mobilité des trous générés et les achemine ensuite au niveau de l'interface couche pérovskite, niveau arrière. En HTL, le matériau est un semiconducteur de type P, qui a les caractéristiques suivantes : une mobilité raisonnable des trous, de l'ordre de  $10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; une correspondance énergétique parfaite du niveau de Fermi avec la bande de valence de pérovskite; une conductivité électrique maximale et une stabilité chimique et thermique décente. De nombreux matériaux ont été étudiés pour le HTL, parmi lesquels des composants organiques, inorganiques et polymères. Le P3HT, l'AZO, le  $\text{Cu}_2\text{O}$  et le PEDOT:PSS sont parmi les matériaux les plus récents en raison de leurs performances dans les cellules à pérovskite [13].

- **P3HT** : (Poly(3-hexylthiophène)) est un polymère semi-conducteur organique largement utilisé dans les cellules solaires organiques (COS). Il est fréquemment employé comme matériau ses bonnes propriétés optiques et électroniques.

- **AZO** : (oxyde de zinc dopé aluminium) est un matériau transparent conducteur (TCO) couramment utilisé dans les cellules solaires, notamment dans les cellules solaires en couche mince. AZO sert de couche fenêtre pour faciliter le transfert des porteurs de charge et améliorer l'efficacité de la cellule.
- **Cu<sub>2</sub>O** : (oxyde cuivreux) est un semi-conducteur de type p qui peut être utilisé dans les cellules solaires, notamment comme absorbeur de lumière ou dans des hétérojonctions. Il est connu pour sa bonne absorption de la lumière dans la région visible du spectre et pour son potentiel à bas prix.
- **PEDOT:PSS** : poly(3,4-éthylènedioxythiophène) et poly(styrène sulfonate) de sodium, est un matériau utilisé comme couche de transport de trous (HTL) dans les cellules solaires. Il est également employé comme couche HTL dans les cellules solaires à pérovskite. Les propriétés essentielles d'une couche de transport de trous efficace incluent une conductivité électrique élevée permettant un transfert efficace des charges.

## 2.8 Couche de transport d'électrons (ETL)

Dans la structure de la cellule, la couche de transport d'électrons (ETL) est en effet aussi une couche semi-conductrice de type N (négatif) qui elle joue le double rôle de support de la couche de pérovskite et de channel pour le transfert des électrons vers le contact de l'anode. Les matériaux utilisés pour le transport des ports de l'ETL sont généralement de nature organique, inorganique ou polymérisante. Sa structure précédente proprement à elle-même peut offrir un transport efficace des porteurs de charges générés dans la pérovskite. Pour garantir un transfert électronique optimal, l'ETL doit avoir une bande de conduction bien alignée sur celle de la pérovskite pour permettre un transfert rapide de l'électron de la couche de pérovskite, sans que ce dernier ne parte pour recombiner en dehors, ceci à condition de garantir un bon contact entre l'ETL et la couche active, en jouant également sur sa transparence pour maximiser l'absorption de lumière par la pérovskite.

Les matériaux les plus utilisés pour cette couche de transport électronique (ETL) sont principalement le  $\text{TiO}_2$ , le  $\text{ZnSe}$ , le  $\text{ZnS}$  et le  $\text{ZnO}$  ayant déjà montré de bonnes performances sur les cellules solaires à pérovskite [13].

- **$\text{TiO}_2$**  : (dioxyde de titane) est un matériau semi-conducteur utilisé dans les cellules solaires, notamment dans les cellules à colorant (DSSC). Il joue un rôle crucial dans le transport des électrons et l'absorption de la lumière.
- **$\text{ZnSe}$**  : (sulfure de zinc et sélénium) peut être utilisé dans les cellules solaires, principalement comme couche tampon ou comme matériau absorbant dans les cellules solaires à couche mince. En tant que couche tampon, le  $\text{ZnSe}$  peut améliorer le rendement des cellules solaires en optimisant la qualité de la jonction avec la couche absorbante.
- **$\text{ZnO}$**  : (L'oxyde de zinc) joue un rôle important dans les cellules solaires, principalement en tant que couche tampon ou fenêtre optique. Il contribue à la performance des cellules solaires en améliorant la conductivité, en améliorant la transmission de la lumière et en agissant comme une barrière contre les courants de fuite.
- **$\text{ZnS}$**  : (sulfure de zinc) est un composant important utilisé comme couche tampon dans certains types de cellules, notamment les cellules solaires à base de  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  (CIGS) ou de  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS).

## 2.9 Conception et procédés de fabrication des cellules solaires à pérovskite

Quatre architectures principales sont utilisées dans la conception et la fabrication des cellules solaires à pérovskite, chacune présentant des caractéristiques de performance différentes. Ces structures incluent la structure mésoporeuse, la structure à couche de recouvrement, la structure plane de type n-i-p et celle de type p-i-n. Pour la modélisation numérique, les configurations les plus adaptées sont les architectures planes à couches minces hétérogènes de type n-i-p ou p-i-n, similaires à celles des cellules solaires à couches minces comme les CIGS.

La structure mésoporeuse comprend un substrat en verre avec une électrode transparente (TCO), sur laquelle est déposée une couche compacte de transport

d'électrons (ETL). Une couche mésoporeuse est ensuite formée par frittage de nanoparticules à haute température ( $>400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Cette structure est ensuite imprégnée d'une couche active de pérovskite, suivie d'une couche de transport de trous (HTL) dopée et d'un contact arrière opaque.

Avec le temps, cette architecture a évolué vers une structure à couche de recouvrement, après avoir démontré que la pérovskite pouvait assurer seule le transport bipolaire des charges sans nécessité d'une interface mésoporeuse.

Une couche dense de pérovskite est alors déposée au sommet, réduisant la complexité de la structure. Enfin, les structures planes n-i-p et p-i-n ont été développées pour éliminer complètement la porosité. La structure n-i-p commence par le dépôt de la couche ETL sur le TCO, suivie de la couche pérovskite puis de la HTL. À l'inverse, dans la structure p-i-n, la couche HTL est déposée en premier sur le TCO, suivie de la pérovskite et enfin de l'ETL [14].

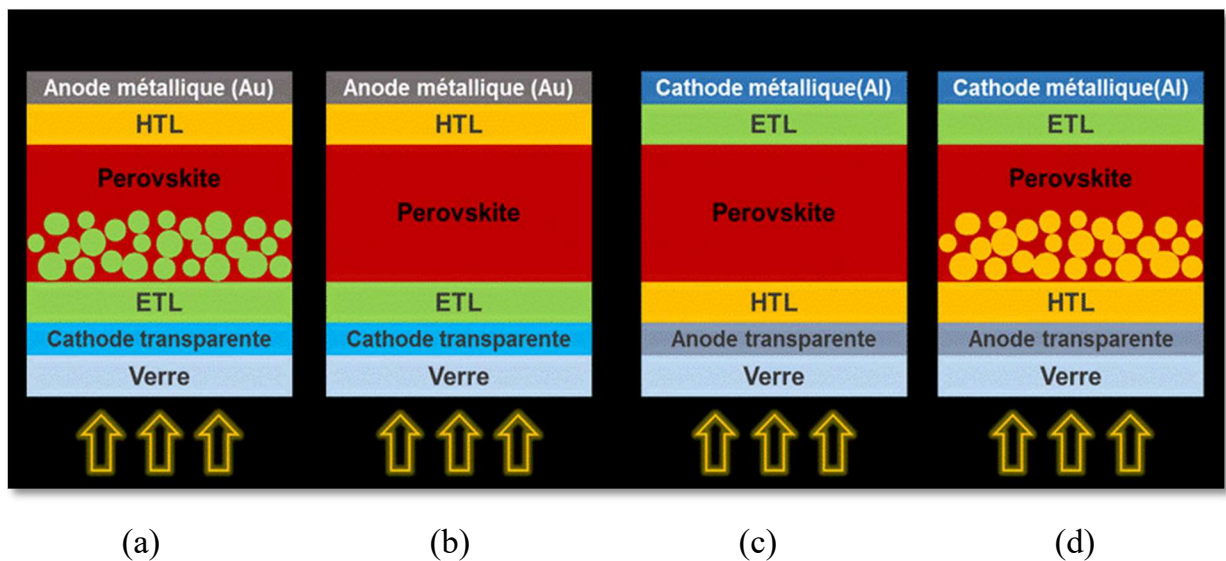


Figure 2.4 Les architectures les plus utilisés dans les cellules solaires à base de pérovskite, (a) mésoporeuse, (b) plane de type n-i-p, (c) plane inversée de type p-i-n, (d) mésoporeuse inversée.

## 2.10 Principe de fonctionnement de la cellule solaire à base de pérovskite

Le fonctionnement d'une cellule solaire à pérovskite peut être expliqué de façon simple. Lorsque la lumière du soleil atteint la cellule, les photons sont absorbés par la couche active de pérovskite. Cette couche est spéciale car elle possède une faible énergie de liaison excitonique, ce qui permet de générer très rapidement (en quelques picosecondes) des porteurs de charge libres, c'est-à-dire des électrons et des trous.

Ces porteurs de charge se déplacent ensuite vers les couches d'interface pour être collectés. Cependant, tout ne se passe pas toujours parfaitement : certains phénomènes indésirables peuvent apparaître, comme la recombinaison des porteurs générés par la lumière, le retour des charges vers la pérovskite à travers les interfaces avec le  $\text{TiO}_2$  ou le HTL, ou même un contact direct entre les couches HTL et ETL, ce qui n'est pas souhaitable. Une fois que les porteurs réussissent à franchir ces obstacles, ils sont finalement extraits via des interfaces de contact dites sélectives, puis récupérés par les électrodes. C'est ce processus qui permet à la cellule de produire de l'électricité [14].

## 2.11 Processus de transfert de charge dans les cellules solaires à pérovskite

Le mécanisme général de fonctionnement d'une cellule solaire à pérovskite, illustré dans la figure 2.5, repose sur l'absorption de la lumière par une fine couche de pérovskite, ce qui génère des paires électron-trou appelées excitons. Grâce à la constante diélectrique élevée de la pérovskite, ces excitons se séparent facilement en électrons et trous libres, qui sont ensuite efficacement transportés et collectés sous forme de photo courant.

Les électrons sont injectés sélectivement dans la bande de conduction de la couche de transport d'électrons (ETL) (1), puis récupérés au niveau de l'électrode conductrice transparente (FTO). Le matériau ETL est choisi de manière à bloquer les trous, grâce à un alignement de bandes défavorable à leur passage. Inversement, les trous sont injectés dans la couche de transport de trous (HTL) (2), tandis que les électrons y sont bloqués.

Finalement, les charges sont collectées par les deux électrodes (FTO et or) et extraites vers le circuit externe, générant ainsi un courant électrique continu sous l'effet de la lumière.

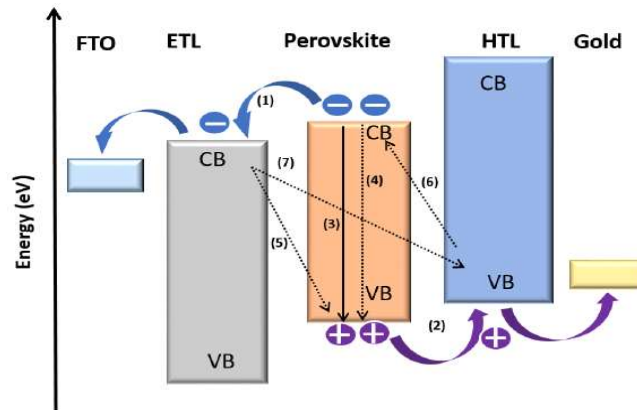


Figure 2.5 Diagramme schématisé des niveaux de bande d'énergie et des processus de transport de charge des électrons et des trous dans les cellules solaires à pérovskite.

D'autres phénomènes indésirables peuvent compromettre les performances des cellules à pérovskite, notamment l'annihilation des excitons par photoluminescence (3), la recombinaison non radiative (4), ainsi que le transfert inverse des électrons et des trous. À cela s'ajoutent les recombinaisons de charges aux interfaces entre la pérovskite et les couches ETL et HTL (5,6), ainsi qu'entre les couches ETL et HTL elles-mêmes (7). Ces recombinaisons, en particulier celles se produisant à la surface ou aux interfaces (5 à 7), sont susceptibles d'apparaître dans le film mince de pérovskite. Pour limiter ces pertes, il est essentiel de sélectionner soigneusement les matériaux constituant les contacts et les électrodes [15].

## 2.12 Conclusion

Dans ce chapitre, La cellule solaire pérovskite a également été définie ainsi que ses caractéristiques optiques, électroniques et optoélectroniques. Nous avons finalement exposé les mécanismes de transfert de charge dans les cellules solaires à pérovskite.

# **Chapitre-3**

## **Résultats et discussions**

### 3.1 Introduction

L'optimisation des performances de ces cellules repose en grande partie sur le Les cellules solaires à base de pérovskite figurent parmi les innovations les plus prometteuses dans le domaine des énergies renouvelables. L'optimisation de leurs performances repose en grande partie sur le contrôle précis des propriétés optiques et physiques des différentes couches qui composent la cellule, notamment à travers le choix des matériaux et l'ajustement de leur épaisseur.

Dans ce contexte, le logiciel RSoft CAD™ constitue une plateforme puissante et complète de modélisation et de simulation, permettant d'analyser avec précision l'interaction de la lumière avec des structures multicouches complexes, grâce aux modules spécialisés Solar Cell Utility et DiffractMOD. Ces outils sont basés sur la méthode RCWA (Rigorous Coupled-Wave Analysis), reconnue pour sa précision dans la modélisation des phénomènes optiques.

Dans le cadre de cette étude, nous avons examiné une cellule solaire multicouche comprenant une couche de transport d'électrons (ETL), une couche active en pérovskite  $\text{CH}_2\text{NH}_2\text{PbI}_3$ , une couche de transport de trous (HTL), ainsi qu'un revêtement antireflet en PDMS.

L'objectif principal est d'évaluer l'impact de la variation d'épaisseur de chaque couche, en particulier la couche active, sur la performance optique globale de la cellule. Cela inclut l'absorption de la lumière, en vue d'augmenter le rendement des cellules solaires à base de pérovskite. Par ailleurs, plusieurs matériaux alternatifs ont été étudiés pour les couches intermédiaires, dans le but d'optimiser la conception, d'améliorer l'absorption du rayonnement solaire, de renforcer le confinement optique, tout en maintenant une structure fine, stable et économiquement viable.

## **3.2 Présentation de l'outils de simulation et les méthodes de simulations numériques**

### **3.2.1 Environnement de CAD**

L'environnement RSoft CAD™ est le programme central de la suite d'outils RSoft pour les dispositifs photoniques. Il permet aux chercheurs et ingénieurs de concevoir des systèmes pour la création de dispositifs à guide d'ondes, de circuits optiques et d'autres composants photoniques. Il sert également de programme de contrôle pour les modules de dispositifs passifs de RSoft, notamment BeamPROP, FullWAVE, BandSOLVE, GratingMOD, DiffractMOD, FemSIM et ModePROP. Il définit les entrées essentielles nécessaires à ces programmes, telles que les propriétés des matériaux et la géométrie structurelle du dispositif à étudier [16].

## **3.3 Module de simulation utilisé**

### **3.3.1 Le simulateur << Solar Cell >>**

Le simulateur Solar Cell Utility de RSoft est destiné à l'analyse des performances optiques des structures multicouches utilisées dans les cellules photovoltaïques. La conception de la structure s'effectue dans l'environnement RSoft CAD Layout, où l'utilisateur peut sélectionner des matériaux absorbants depuis une bibliothèque spécialisée. Il est également possible d'intégrer des moniteurs à divers emplacements pour examiner précisément l'absorption lumineuse au sein de chaque couche de la cellule [16].

Le module est particulièrement efficace lorsqu'il est combiné à DiffractMOD, qui utilise la méthode RCWA pour simuler avec précision la réponse spectrale de la structure, notamment l'absorption, la transmission et la réflexion. Les résultats obtenus offrent une vision détaillée du comportement optique de la cellule et facilitent l'optimisation de l'absorption et du piégeage de la lumière dans les différentes [17].

Le logiciel permet de sélectionner un spectre incident, tel que le spectre solaire au niveau de la mer, de définir des efficacités de collecte spécifiques pour chaque région observée et de réaliser des simulations sur une gamme de longueurs d'onde. Les résultats sont automatiquement collectés et utilisés pour évaluer l'efficacité de la cellule ainsi que les propriétés du circuit.

### 3.4 Simulation optique avec DiffractMOD

#### 3.4.1 DiffractMOD

DiffractMOD™ est un logiciel performant dédié à la conception et à la simulation de structures optiques diffractives, telles que les éléments diffractifs, les structures périodiques à échelle sub-longueur d'onde et les cristaux photoniques à bande interdite. Il utilise la méthode de l'analyse rigoureuse des ondes couplées (RCWA), intégrant des algorithmes avancés comme la factorisation rapide de Fourier et la formulation généralisée de ligne de transmission. Grâce à sa précision et sa polyvalence, DiffractMOD est largement utilisé dans des domaines variés tels que l'optique des ondes et la micro fabrication dans l'industrie des semi-conducteurs [17].

DiffractMOD permet une modélisation précise des structures périodiques bidimensionnelles, en s'appuyant sur le concept de cellule unitaire. Cette méthode est particulièrement efficace pour l'étude des systèmes multicouches complexes.

#### 3.4.2 La méthode RCWA

La méthode modale de Fourier, couramment appelée RCWA (Rigorous Coupled Wave Analysis), est une technique puissante pour résoudre les problèmes de diffraction dans les structures périodiques. Elle s'appuie sur le calcul des modes électromagnétiques présents dans la structure et sur l'analyse de leurs interactions aux interfaces. Pour ce faire, les grandeurs physiques telles que le champ électromagnétique, la permittivité et la perméabilité sont exprimées sous forme de séries de Fourier [18].

L'extension de la méthode RCWA permet de modéliser des structures périodiques complexes avec des matériaux variés et des ondes incidentes quelconques. Elle repose sur une décomposition en harmoniques de Fourier pour résoudre les équations de Maxwell, une approche équivalente à celle des lignes de transmission modales. Les équations de Maxwell peuvent être formulées, ainsi :

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \quad (2.3)$$

$\mu$  : la perméabilité.       $\varepsilon$  : la permittivité.       $\sigma$  : la conductivité.

### 3.5 Les interfaces du simulateur « Solar Cell »

Après avoir défini tous les paramètres de la cellule solaire, il suffit d'entrer un préfixe de sortie pour nommer les fichiers de résultats, puis de cliquer sur OK pour lancer la simulation. Il est également possible d'enregistrer la configuration sans démarrer le calcul en sélectionnant "Enregistrer les paramètres". Au démarrage, la fenêtre de simulation de la cellule solaire affichera les interfaces correspondant au moteur de calcul choisi. Pendant l'exécution, des options dans la barre d'outils permettent de suspendre, reprendre ou arrêter la simulation. Lorsque la génération d'un spectre d'absorption est activée, une pause ou un arrêt de la simulation n'interrompt pas le point de calcul en cours, mais empêche le passage au point suivant. Une fois la simulation terminée, l'état du processus et les résultats obtenus sont automatiquement affichés.

Dans cette figure, le rectangle gris illustre le facteur de remplissage (FF). Le point où la tension  $V=0$  correspond au courant de court-circuit, tandis que le point où le courant est nul représente la tension en circuit ouvert. Le point définissant les dimensions du rectangle gris indique le point de fonctionnement optimal de la cellule photovoltaïque.

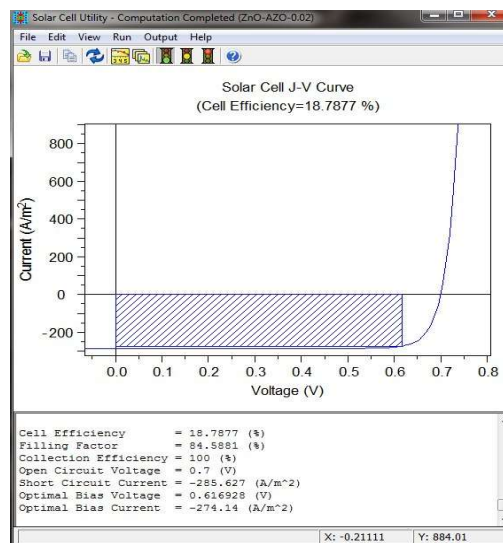


Figure 3.1 La fenêtre de simulation de « Solar Cell » présente la sortie J-V par défaut.

Par défaut, la fenêtre de simulation affiche la courbe J-V. Il est possible de visualiser les efficacités quantiques ainsi que différents spectres : absorption incidente, absorption échantillonnée et absorption totale. Pour passer d'une vue à une autre, il suffit d'utiliser le menu "Sortie". Le spectre échantillonné (la version interpolée du spectre incident, admet de vérifier si le taux d'échantillonnage est suffisant pour garantir la fiabilité des résultats. L'ensemble des données générées par la simulation est sauvegardé dans un sous-dossier portant le nom du préfixe de sortie. Dans la fenêtre de simulation de l'utilitaire affiche les résultats de l'efficacité quantique et ceux des spectres, montrant les spectres incidents, échantillonné et absorbé.

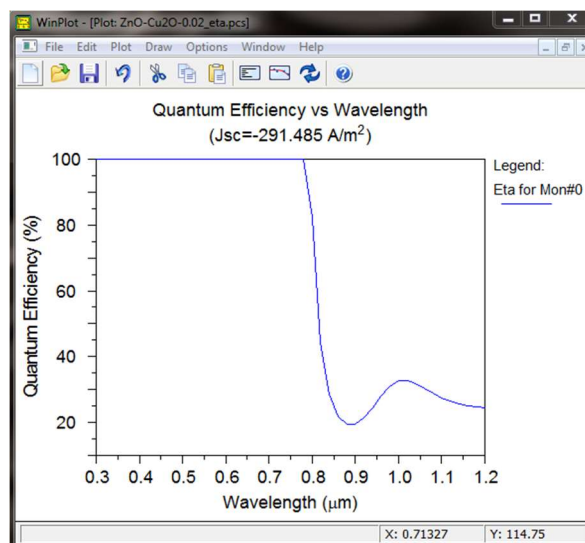


Figure 3.2 les résultats de l'efficacité quantique.

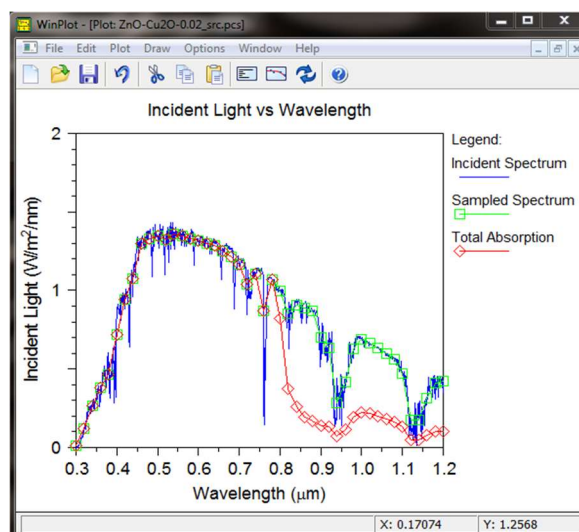


Figure 3.3 les résultats des spectres, montrant les spectres incidents, échantillonné et absorbé.

Lorsqu'on utilise plusieurs moniteurs d'absorption, les efficacités quantiques externes correspondantes à chacun d'eux, ainsi que l'efficacité totale, sont affichées simultanément.

### 3.6 Structure et caractéristique

#### 3.6.1 Structure étudiée

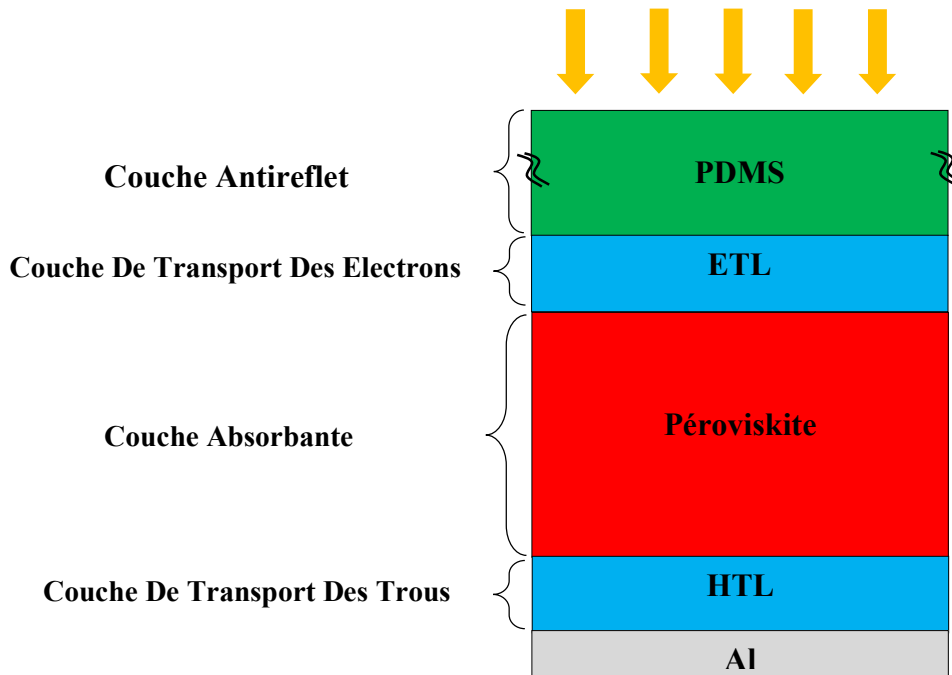


Figure 3.4 Cellule solaire à base de pérovskite.

Dans la structure étudiée (Figure 3.4), une cellule solaire optimisée a été conçue en intégrant la pérovskite comme couche active, le PDMS comme couche fenêtre, le  $\text{TiO}_2$  comme couche de transport d'électrons (ETL), et le P3HT comme couche de transport de trous (HTL). Afin d'atteindre les meilleures performances opto-électroniques possibles, plusieurs matériaux alternatifs ont été évalués pour les couches intermédiaires. Ainsi, la couche ETL en  $\text{TiO}_2$  a été successivement remplacée par ZnSe, ZnO et ZnS, tandis que la couche HTL en P3HT a été remplacée par AZO,  $\text{Cu}_2\text{O}$  et PEDOT:PSS.

### 3.7 Optimisation de l'efficacité de la couche pérovskite

L'étude s'est d'abord axée sur l'impact de la variation de l'épaisseur de la couche de pérovskite sur les performances globales et l'absorption optique, dans le but

d'identifier l'épaisseur optimale garantissant une efficacité maximale de conversion de la cellule solaire.

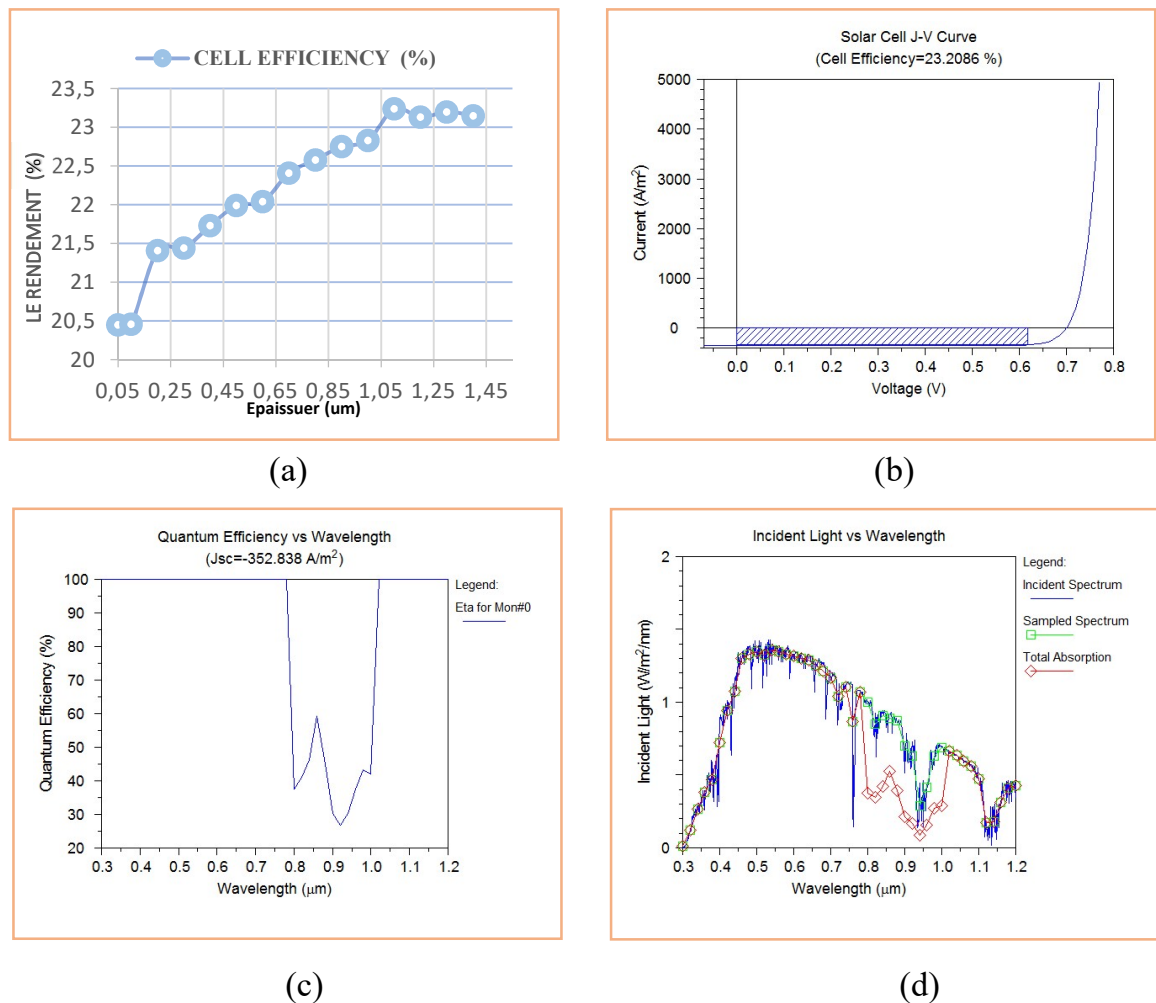


Figure 3.5 (a) Cell Efficiency (b) Caractéristiques  $I=f(V)$  d'une cellule PV (c) Efficacité quantique (d) Absorption totale de la lumière.

Les résultats ont montré qu'une épaisseur de 1.1 μm constitue le choix optimal, offrant un équilibre idéal entre absorption de la lumière et rendement énergétique. Cette configuration a permis d'atteindre des performances nettement supérieures, comme en témoignent les courbes d'absorption et d'efficacité quantique obtenues.

### 3.8 Impact des matériaux et de l'épaisseur des couches ETL et HTL sur l'efficacité de la cellule solaire

Après avoir déterminé l'épaisseur optimale de la couche de pérovskite, l'étude s'est poursuivie en analysant l'effet de la variation de l'épaisseur et du matériau de la couche de transport des électrons (ETL), ainsi que des matériaux utilisés pour la

couche de transport des trous (HTL), sur les performances globales de la cellule solaire et l'absorption optique.

L'objectif était d'identifier la combinaison idéale de matériau et d'épaisseur permettant d'atteindre une efficacité de conversion maximale.

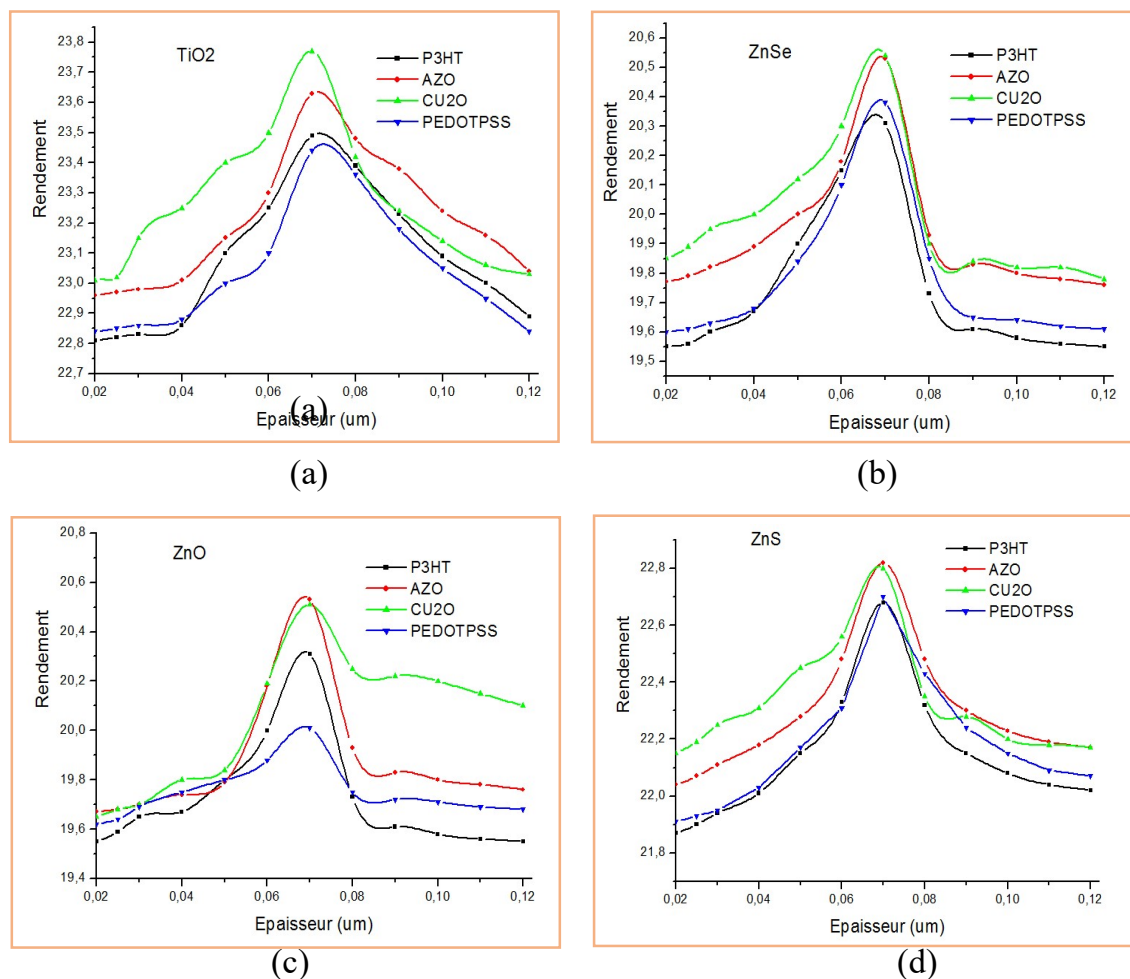


Figure 3.6 Le rendement en fonction de l'épaisseur (a) ETL : TiO<sub>2</sub>, HTL : Cu<sub>2</sub>O, AZO, PEDOT:PSS et P3HT, (b) ETL : ZnSe, HTL : Cu<sub>2</sub>O, AZO, PEDOT:PSS et P3HT, (c) ETL : ZnO, HTL : Cu<sub>2</sub>O, AZO, PEDOT:PSS et P3HT, (d) ETL : ZnS, HTL : Cu<sub>2</sub>O, AZO, PEDOT:PSS et P3HT

Pour la couche HTL, plusieurs matériaux ont été utilisés : Cu<sub>2</sub>O, AZO, PEDOT:PSS et P3HT, avec une épaisseur maintenue constante à 0.05 μm, valeur considérée comme optimale selon la littérature scientifique. En ce qui concerne la couche ETL, différentes options ont été explorées, notamment : TiO<sub>2</sub>, ZnO, ZnSe et ZnS, avec une variation contrôlée de l'épaisseur entre 0.01 et 0.12 μm.

Les résultats ont montré que l'épaisseur optimale de la couche ETL est de 0.07  $\mu\text{m}$ , tandis que l'utilisation du  $\text{Cu}_2\text{O}$  comme matériau pour la couche HTL permet d'atteindre la meilleure efficacité de conversion. Ces performances optimales sont illustrées dans la figure 3.6.

Nous avons constaté que le matériau le plus approprié pour la couche HTL est le  $\text{Cu}_2\text{O}$ , car il permet d'obtenir une efficacité optimale pour chaque matériau utilisé dans la couche ETL, comme l'illustre la figure 3.6.

- ZnO/Cu<sub>2</sub>O

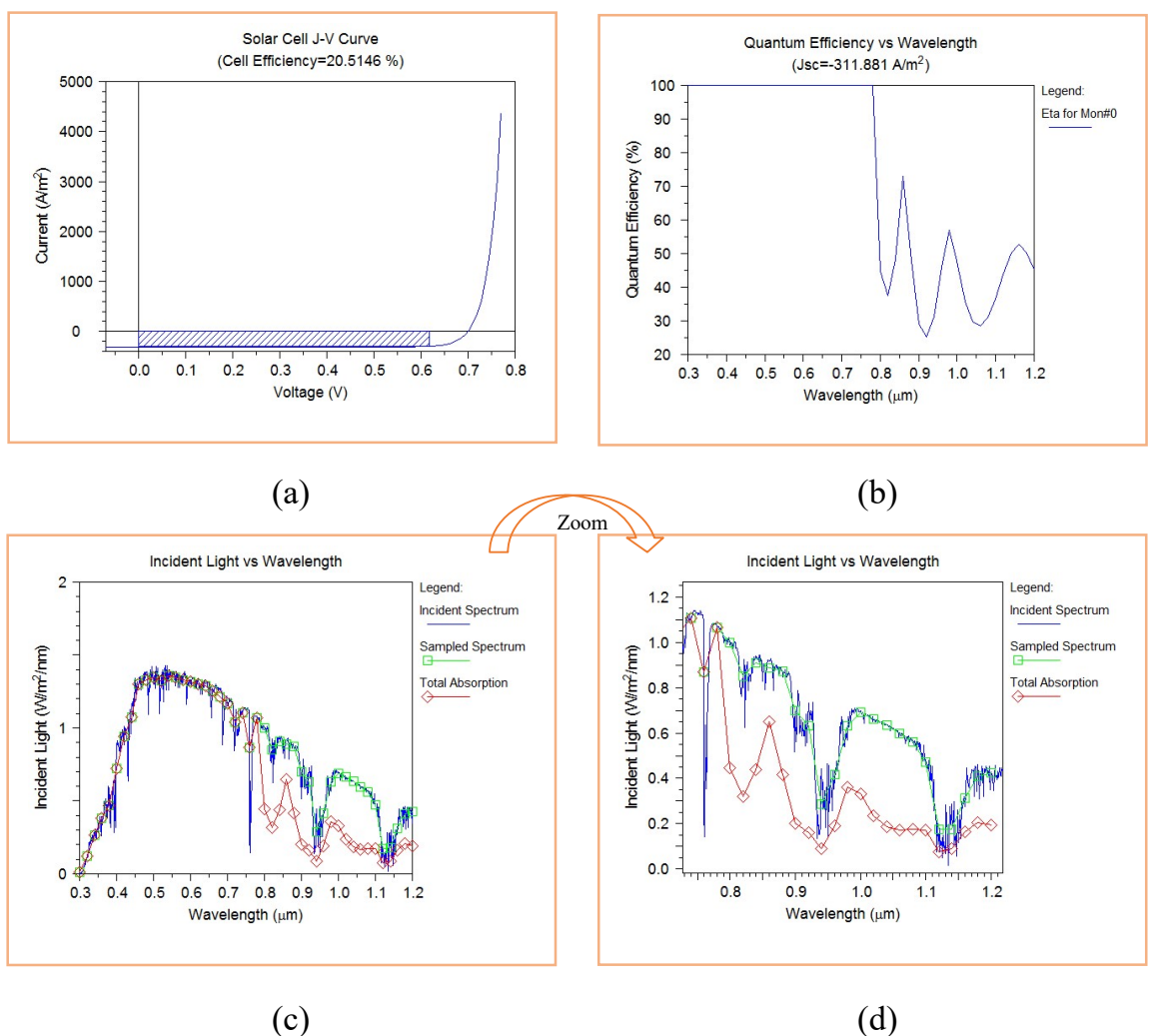


Figure 3.7 (a) Caractéristiques I=f(V) d'une cellule PV, (b) Efficacité quantique, (c) et (d) Absorption totale de la lumière, pour HTL :  $\text{Cu}_2\text{O}$  et ETL : ZnO

Les résultats ont montré que, lors de l'utilisation du ZnO comme couche de transport d'électrons (ETL) et du  $\text{Cu}_2\text{O}$  comme couche de transport de trous (HTL), une efficacité de conversion de 20.51 % a été atteinte, comme illustré dans la figure 3.7.

- ZnSe/Cu<sub>2</sub>O

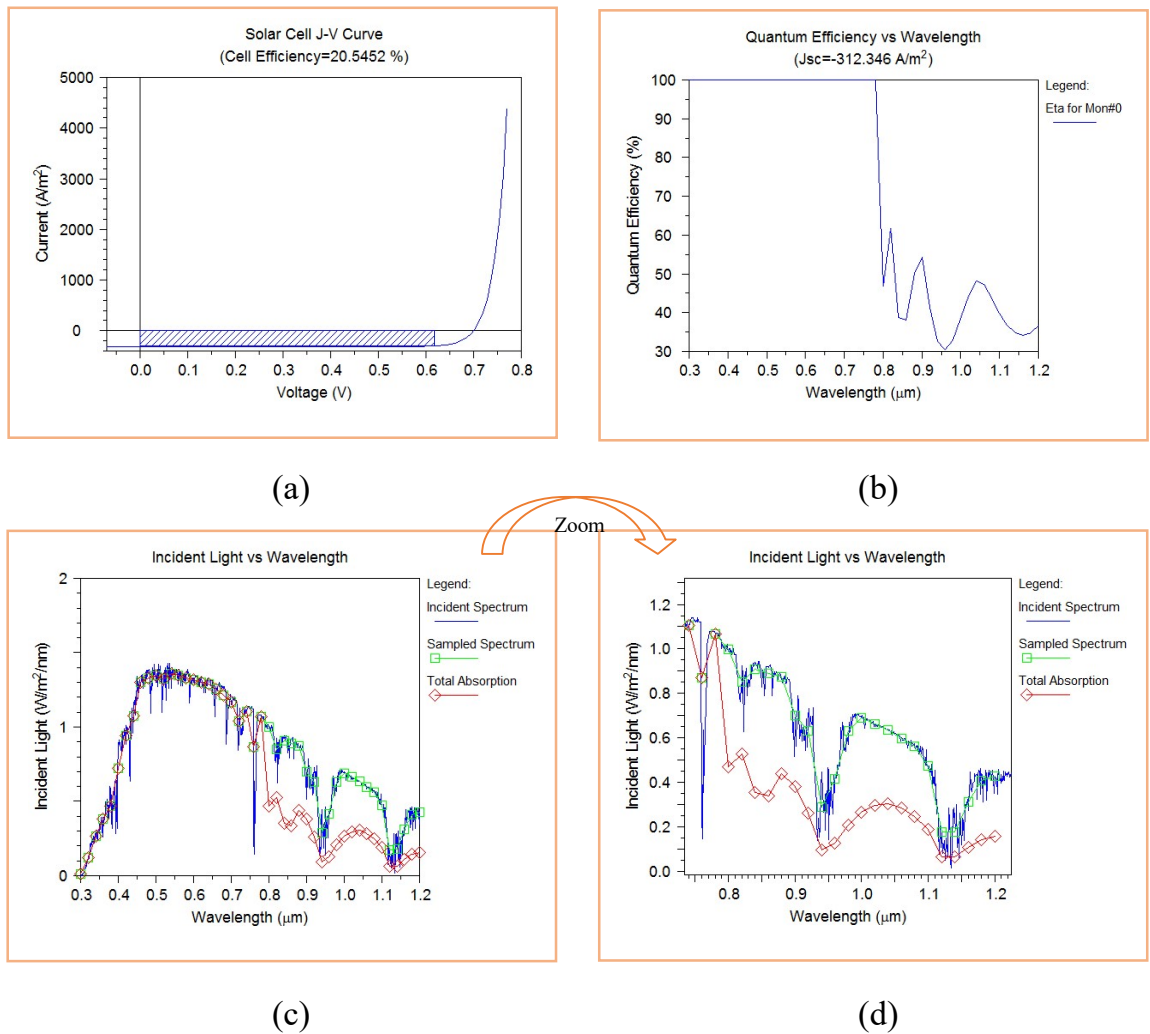


Figure 3.8 (a) Caractéristiques  $I=f(V)$  d'une cellule PV, (b) Efficacité quantique, (c) et (d) Absorption totale de la lumière, pour HTL : Cu<sub>2</sub>O et ETL : ZnSe

Les résultats ont montré que, lors de l'utilisation du ZnSe comme couche de transport d'électrons (ETL) et du Cu<sub>2</sub>O comme couche de transport de trous (HTL), une efficacité de conversion de 20.54 % a été atteinte, comme illustré dans la figure 3.8.

• ZnS/Cu<sub>2</sub>O

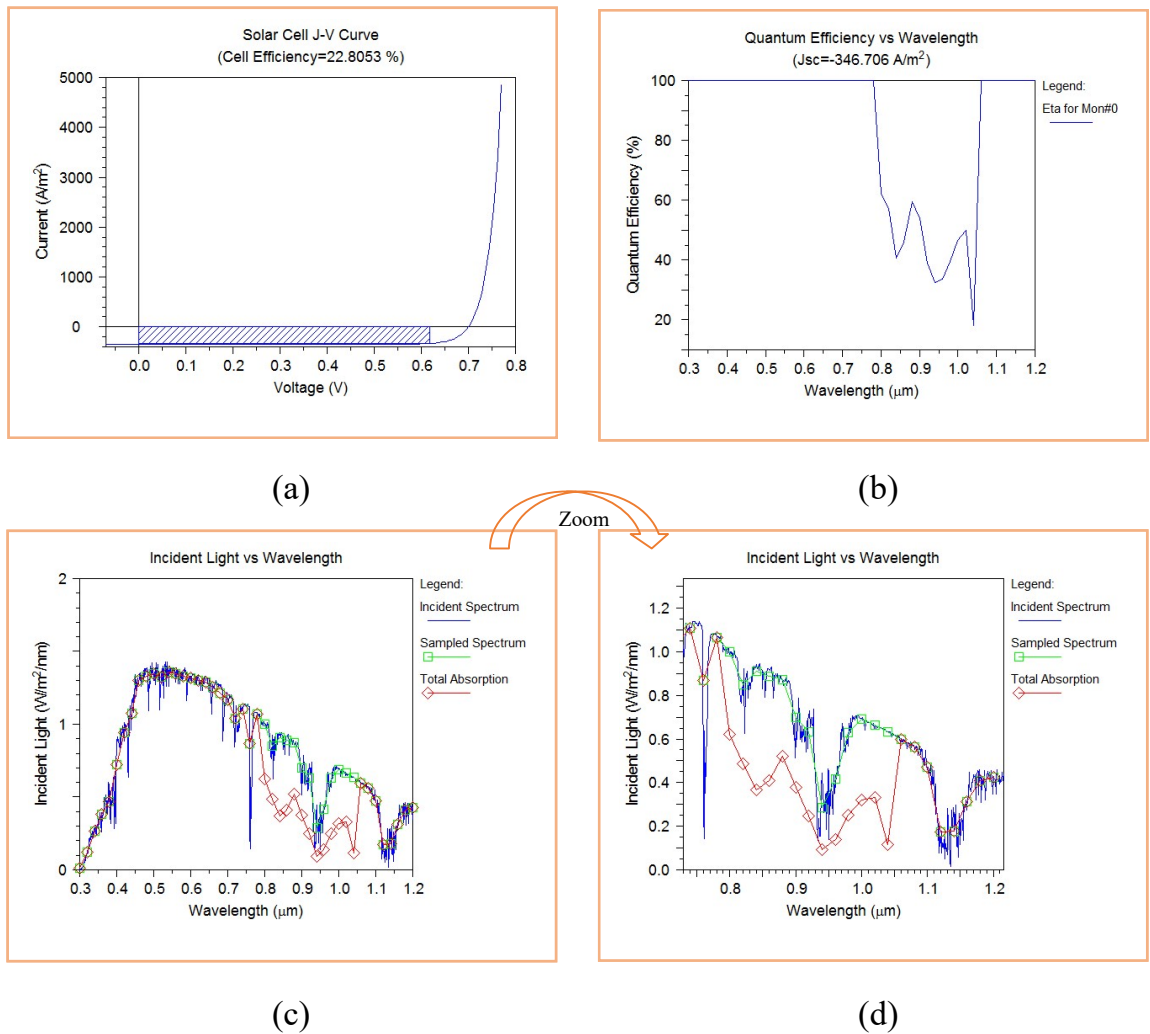


Figure 3.9 (a) Caractéristiques  $I=f(V)$  d'une cellule PV, (b) Efficacité quantique, (c) et (d) Absorption totale de la lumière, pour HTL : Cu<sub>2</sub>O et ETL : ZnS

Les résultats ont montré que, lors de l'utilisation du ZnS comme couche de transport d'électrons (ETL) et du Cu<sub>2</sub>O comme couche de transport de trous (HTL), une efficacité de conversion de 22.80 % a été atteinte, comme illustré dans la figure 3.9.

• TiO<sub>2</sub>\Cu<sub>2</sub>O

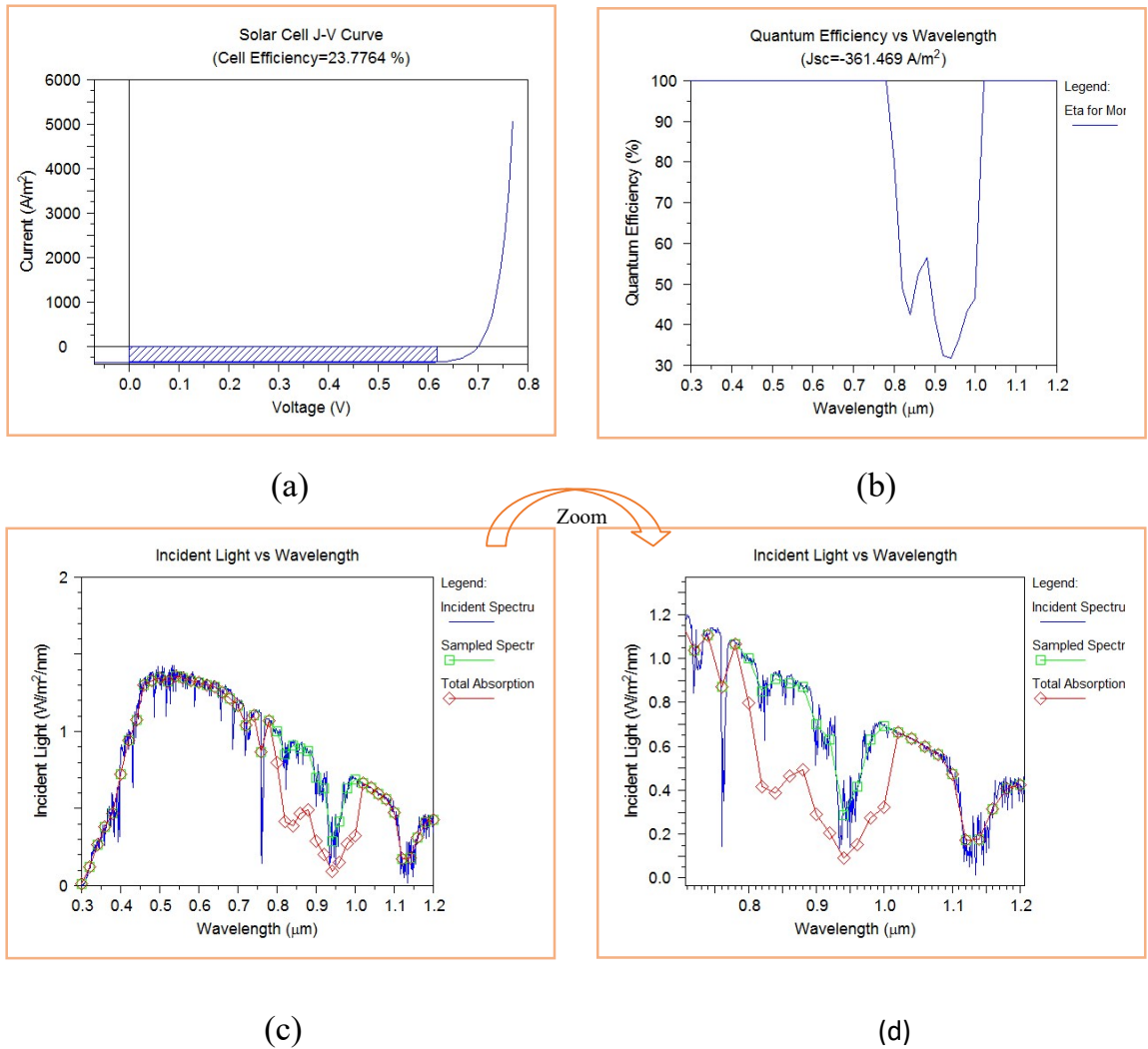


Figure 3.10 (a) Caractéristiques I=f(V) d'une cellule PV, (b) Efficacité quantique, (c) et (d) Absorption totale de la lumière, pour HTL : Cu<sub>2</sub>O et ETL : TiO<sub>2</sub>

Les résultats ont montré que, lors de l'utilisation du TiO<sub>2</sub> comme couche de transport d'électrons (ETL) et du Cu<sub>2</sub>O comme couche de transport de trous (HTL), une efficacité de conversion de 23.77 % a été atteinte, (voir figure 3.10.).

HTL	ETL	ZnO	ZnSe	ZnS	TiO <sub>2</sub>
<b>Cu<sub>2</sub>O</b>		20.51%	20.54%	22.80%	23.77%

Tableau 3.1 Tableau des rendements pour différents ETL et HTL : Cu<sub>2</sub>O

Selon cette étude, le matériau ETL optimal est le TiO<sub>2</sub>, tandis que le matériau HTL le plus approprié est l’Cu<sub>2</sub>O, comme le montre l’optimisation de nos cellules solaires à base de pérovskite l’efficacité a été augmentée comme le montre le tableau 3.1. Les matériaux ont été sélectionnés en raison de leurs propriétés optoélectroniques favorables et de leur compatibilité économique.

Le but principal de cette analyse est d’améliorer l’efficacité énergétique globale de la cellule solaire tout en réduisant les coûts de fabrication, grâce à une sélection judicieuse des matériaux pour les couches fonctionnelles. Les résultats obtenus mettent en évidence l’influence critique des propriétés optiques et électroniques des matériaux sur les performances globales de la cellule, notamment en termes d’absorption de la lumière, de gestion des charges et de minimisation des pertes résistives.

### 3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail le logiciel RSoft CAD ainsi que ses simulateurs intégrés, en particulier DiffractMOD et l’unité Solar Cell Utility, qui jouent un rôle central dans l’étude et l’optimisation des cellules solaires à base de pérovskite. Nous avons décrit les principales fonctionnalités de ces outils, notamment leur capacité à modéliser avec précision des structures multicouches complexes, en tenant compte des variations de matériaux et d’épaisseur des autres couches actives.

Ce travail vise à améliorer les performances des cellules solaires à pérovskite en exploitant les propriétés des couches actives afin d’augmenter le rendement de conversion photovoltaïque. Dans un premier temps, l’étude s’est concentrée sur la couche de pérovskite, en faisant varier son épaisseur pour analyser son impact sur l’efficacité de la cellule. Les résultats ont montré une amélioration significative des performances, permettant ainsi d’identifier l’épaisseur optimale de cette couche.

Par la suite, l'étude s'est orientée vers la recherche du matériau le plus approprié pour la couche de transport des trous (HTL), parallèlement à la détermination de l'épaisseur et du matériau idéaux pour la couche de transport des électrons (ETL). Plusieurs matériaux ont été testés pour chaque couche. Les résultats expérimentaux ont permis d'identifier la combinaison optimale, mettant en évidence que le  $\text{TiO}_2$  est le matériau le plus adapté pour l'ETL en termes de rendement, en association avec le  $\text{Cu}_2\text{O}$  pour la couche HTL.

Ce travail représente ainsi une avancée significative dans le développement de cellules solaires à pérovskite à haut rendement, destinées à des applications photovoltaïques avancées.

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

L'optimisation de l'efficacité de la couche de pérovskite fait l'objet d'une étude approfondie, en particulier à travers l'ajustement de son épaisseur pour améliorer les performances globales. Enfin, l'impact combiné du choix des matériaux et de l'épaisseur des couches ETL et HTL sur l'efficacité de conversion est analysé, dans le but d'identifier la configuration optimale assurant une absorption maximale et une performance photovoltaïque élevée.

La comparaison entre quatre matériaux différents a révélé une amélioration notable du rendement de la cellule solaire, passant de 20,51 % à 23,77 %. En ce qui concerne l'absorption lumineuse, une augmentation significative de la densité du courant de court-circuit a été observée, allant de 311,88 A/cm<sup>2</sup> avec le ZnO à 361,46 A/cm<sup>2</sup> avec le TiO<sub>2</sub>.

En fin, ce travail a démontré l'impact significatif des couches actives sur l'amélioration des performances des cellules solaires à pérovskites. Ces avancées ouvrent la voie au développement de dispositifs photovoltaïques innovants et hautement performants, offrant des solutions prometteuses pour améliorer la conversion énergétique tout en maintenant la rentabilité. De plus, cette étude souligne le rôle essentiel des approches théoriques et des simulations numériques dans l'optimisation des structures des dispositifs et la résolution de défis tels que la stabilité et la faisabilité d'une production à grande échelle. Ces résultats mettent en évidence le potentiel de la combinaison de matériaux avancés et de méthodes de calcul pour alimenter la prochaine génération de technologies photovoltaïques.

# Références Bibliographiques

## Liste des références bibliographiques

### Références Bibliographiques

- [1] : M. Chahmi, Piégeage de la lumière pour le contrôle de l'absorption dans les cellules solaires photovoltaïques, Thèse de Doctorat, Université du M'sila, 2024.
- [2]: Solargie, L'histoire du photovoltaïque, 2024, Récupéré de : <https://www.solargie.com/actualites/l-histoire-du-photovoltaïque>, (dernier accès, le 20.05.2025).
- [3]: M. Mimoune, Etude des capteurs PV basés sur les nanotechnologies, Thèse de Doctorat, Université du Québec, 2016.
- [4]: Futura, Cellule photovoltaïque, 2013, Récupéré de : <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-cellule-photovoltaïque-4462/>, (dernier accès, le 20.05.2025).
- [5]: Connaissance des Énergies, Solaire photovoltaïque, Fiche pédagogique, 2024, Récupéré de : <https://www.connaissancedesenergies.org> (dernier accès, le 20.05.2025).
- [6]: Planète Energies, Cellule photovoltaïque : comment ça marche, 2024, Récupéré de <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/cellulephotovoltaïque-comment-ca-marche/> (dernier accès, le 20.05.2025).
- [7]: Arkolia, Tout ce qu'il faut savoir sur la cellule photovoltaïque, 2021, Récupéré de : <https://arkolia.com/analyse-detaillée-dune-cellule-photovoltaïque/> , (dernier accès, le 20.05.2025).
- [8]: K. HELALI, Modélisation d'une cellule photovoltaïque - étude comparative", Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [9]: S. MEKLIICHE, Etude et Simulation des paramètres électriques d'une cellule solaire photovoltaïque à base de Silicium, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017.
- [10]: I. SIRADJ, KH. SIRADJ, Simulation d'une cellule solaire pérovskite à base d'étain, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2024.
- [11]: T. LEMERCIER, Développement de cellules solaires pérovskites semi-transparentes de type P-I-N dans la perspective d'une application tandem, Thèse de Doctorat , Université Savoie Mont Blanc, France, 2016.

## Liste des références bibliographiques

- [12]: I. Bennis, S. Derradj , Simulation numérique et optimisation des performances d'une cellule solaire à pérovskite, Mémoire de Master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj, 2022.
- [13]: Shen Wang. Function of Hole Transport Layer Components in Perovskite Solar Cells, A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree Doctor of Philosophy in NanoEngineering 2018. University of California San Diego.
- [14]: M. BENNAOUM, Etude Théorique des Cellules Solaires à base de Pérovskites, Thèse de Doctorat, UNIVERSITE Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes, 2021.
- [15]: I. M. ASUO, "Ambient-Processed Halide Perovskites for Photovoltaic and Optoelectronic Devices," 2021.
- [16]: O. HALASSA, Kh. MESSAOUDI, Étude et Simulation de la Propagation des Ondes Électromagnétiques dans les guides à Cristaux Photoniques, Mémoire de Magister, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2018.
- [17]: <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/rsoft-photonic-device-tools/cad-environment.html> , (dernier accès, le 23.05.2025).
- [18]: RSoft-CAD 5.1.9, User guide, RSoft Design Group, 200 Executive Blvd. Ossining, NY 10562.

## المخلص

لتلخيص عملنا، أُجريت محاكاة بصرية وكهربائية مقترنة لدراسة الخصائص البصرية والكهربائية لخلايا البيروفسكايت. أولاً، دُرست خلية كهروضوئية قائمة على البيروفسكايت. قمنا بدراسة تغير سمك الطبقة النشطة وتأثيرها على تحسين كفاءة الخلية. ثم انتقلت الدراسة بعد معرفة السمك الأمثل لطبقة البيروفسكايت الى تحليل مواد وسمك كل طبقة من طبقات نقل الالكترونات والسمك المثالي لطبقة نقل الثقوب. وُجد أن الامتصاص في الهيكل المقترح يتزايد عند تغيير المواد، حيث زادت كفاءة تحويل الطاقة لخلايا البيروفسكايت من 20.51 % إلى 23.77%.

## ABSTRACT

To summarize our work, a coupled optical and electrical simulation was conducted to study the optical and electrical properties of perovskite solar cells. Initially, a perovskite-based photovoltaic cell was analyzed. We examined how varying the thickness of the active layer affects the improvement of the cell's efficiency. After determining the optimal thickness for the perovskite layer, the study moved on to analyze the materials and thickness of each electron transport layer, as well as the ideal thickness for the hole transport layer. It was found that light absorption in the proposed structure increases with changes in materials, resulting in an improvement in the energy conversion efficiency of perovskite cells from 20.51% to 23.77%.

## RESUME

Pour résumer notre travail, une simulation optique et électrique couplée a été réalisée afin d'étudier les propriétés optiques et électriques des cellules solaires à pérovskite. Dans un premier temps, une cellule photovoltaïque à base de pérovskite a été étudiée. Nous avons analysé l'effet de la variation de l'épaisseur de la couche active sur l'amélioration du rendement de la cellule. Une fois l'épaisseur optimale de la couche de pérovskite déterminée, l'étude s'est ensuite concentrée sur l'analyse des matériaux et de l'épaisseur de chaque couche de transport d'électrons ainsi que l'épaisseur optimale de la couche de transport de trous. Il a été constaté que l'absorption dans la structure proposée s'améliore avec le changement de matériaux, ce qui a permis d'augmenter le rendement de conversion énergétique des cellules à pérovskite de 20,51 % à 23,77 %.