

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة

التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد -

تلمس -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Electronique

Spécialité : INSTRUMENTATION

Par : - MEZIANE ISMAIL

- KHEDDAM OUSSAMA

Sujet

**Etude et optimisation des performances d'une cellule
Solaire en tandem**

Soutenu publiquement, le 29 /06/ 2025 , devant le jury composé de :

Mme GUN Ahlem	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mr BENADDA Belkacem	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur
Mme KADDOURI Nadera	MCB	Université de Tlemcen	Encadreur
Mme BECHLAGHEM Fatema	MCB	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire :2024 /2025

Remerciements

Je remercie « Allah » qui m'avoit donné la volonté, la patience et la force pour arriver à ce modeste travail.

*Je tiens à remercier chaleureusement madame **KADDOURI Nadera** mon encadreur de mémoire pour tous ces conseils durant ce travail. Ensuite, je remercie également tous les membres de jury.*

***Mme GUN Ahlem** qui nous a fait l'honneur de présider le jury de notre mémoire. Nous remercions aussi **Mr BENADDA Belkacem** qui a aimablement accepté d'expertiser ce travail. Nous remercions aussi vivement monsieur **ZOUGAR Nabile** responsable de la formation Master instrumentation Electronique*

Aussi, je remercie tout ma famille, mes parents pour leurs soutiens et encouragement durant cette formation de master.

Pour finir, je remercie tous les enseignements de faculté de technologie surtout du département de génie électrique et électronique (GEE) qui ont enseigné durant ces années d'études.

Table des matières

Résumé	II
Remerciement.....	III
Table de matière	IV
Liste des abréviations	VII
Liste des symbole	VIII
Liste des tableaux	IX
Liste des figures.....	X
Introduction générale	1

Introduction générale

Chapitre I : Généralités sur les cellules photovoltaïques et présentation des cellules solaires perovskites.

Introduction :	15
I-1. L'effet photovoltaïque et cellule solaire :	15
I-2. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire :	17
I-3. Notion du spectre solaire et masse d'air :	18
I-4. Les différentes technologies photovoltaïques :	19
I-4-1 Cellules solaires au silicium cristallin :	20
I-4-2 Cellules à base de couche mince :	22
I-4-3. Cellules à base de photovoltaïque organique :	23
I-4-4. Cellules multi-jonctions :	24
I-4-5. Cellules à pérovskites :	24
Figure I.12 : Pérovskite [40] :	25
Conclusion :	26

Chapitre II : Etude théorique d'une cellule simple et une cellule tandem pérovskite/silicium

II Introduction :	28
II-1. Structure d'une cellule photovoltaïque :	28
Figure II.1 : La structure de la cellule photovoltaïque [43] :	28
II-1-1 La couche antireflet :	28
II-1-2 Les contacts :	29
II-1-3 Texturisation :	30
II-1-4 Fenêtre :	30
II-1-5 L'émetteur et la base :	30
II-1-6 BSF (Back Surface Field) :	30
II-2 Principe de fonctionnement de la cellule solaire PV : [44] :	31
II-3 Les paramètres de la cellule solaire [41] :	31
II-4-1 Architecture fondamentale des pérovskites : d'un minéral prototype à une famille de matériaux polyvalents	34
II-5 Propriétés électriques des pérovskites hybrides $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ pour applications photovoltaïques :	34
II-6 Principe de fonctionnement des cellules solaires à pérovskite :	34
II-7 Élaboration des cellules photovoltaïques à pérovskite :	35
II-7-1 Électrode de collecte transparente (TCE) :	35
II-7-2 Couche bloqueuse d'électrons (EBL) ou couche compacte de TiO_2 [51] :	36
II-8 Cellule tandem pérovskite/silicium :	37
II-8-1 Principe de fonctionnement :	37
II-8-1-2 Production d'électricité :	37
II-8-1-3 Tandem :	37
II-8-2 Avantage des cellules solaires tandem pérovskite/silicium :	38
II-8-3 Amélioration du rendement :	38
II-8-2-2 Utilisation plus efficace du spectre solaire :	38
II-8-2-2 Potentiel de réduction des coûts :	38
II-9 Développement des cellules tandem pérovskite/silicium et utilisations : [63] :	38
Conclusion :	39

Chapitre III : Simulation et interprétation des résultats obtenus Oghmanano

Partie I : Logiciel de simulation Oghmanano.....	41
III-1- Introduction	41
III-2-Objectifs et Justification.....	41
III-3-Fonctionnalités Techniques Principales	42
III-3-1-Simulation Électrique.....	42
III-3-2-Simulation Optique	42
Prise en Main et Interface Utilisateur	43
Cas d'Utilisation Typique : Cellule Solaire Organique.....	43
Perspectives, Collaboration et Évolutivité.....	44
Partie II : Modélisation et interprétation des résultats d'une cellule solaire tandem :.....	46
III-1-La structure de la cellule tandem étudiée :.....	46
III-1-1-Description de la cellule tandem :.....	46
III-2-Étude des performances de la cellule solaire tandem :	49
La variation d'épaisseur.....	49
Conclusion.....	63
Résumé	70

Liste des abréviations

AM: Air masse.

BSF: Back Surface Field.

SRH: Schockley Read Hall.

Tcad: Technology computer Aided Design.

Silvaco: Silicon Valley corporation.

Top : en haut.

Bottom : en bas.

Liste des symboles

Symbole	signification	Unité
E _g	énergie interdite	(ev)
σ	fréquence de l'onde électromagnétique	(Hz)
h	constante de Plank	(ev.s)
c	vitesse de la lumière	(m/s)
λ	longueur d'onde	(μm)
k	constante de Boltzmann	(k)
T	température	(c)
q	la charge d'électron	(mA/cm ²)
I _{cc}	courant de court-	tension(v)
V _{co}	circuit	(%)
FF	de circuit ouvert	(%)
η	Facteur de forme	(A)
I _m	rendement électrique	(v)
V _m	courant maximal	(w)
P _m	tension maximale	cm ⁻¹
N _c	puissance maximale	cm ⁻³
N _v	la densité d'état des électrons	
	la densité d'états des trous	

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Le rendement des cellules au silicium cristallin.	9
Tableau III.1 : Les paramètres de la structure de cellule solaire tandem Pérovskite/Silicium.	33
Tableau III.2: La caractéristique courant- tension J(v) de cellule tandem Pérovskite /Silicium.....	34
Tableau III.3: Les résultats obtenus par la variation d'épaisseur de la couche absorbante Pérovskite ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$).....	41
Tableau III.4: Les résultats obtenus par la variation d'épaisseur de la couche Silicium Cristallin	43
Tableau III.5: Les résultats obtenus par la variation d'épaisseur de Tunnel	44
Tableau III.6: Les résultats obtenus par la variation d'épaisseur de ETL	46
Tableau III.7: Les résultats obtenus par la variation d'épaisseur de HTL.....	50

Liste des figures

Figure I.1 : Création d'un pair électron-trou [7].....	5
Figure I.2 : Principe de l'effet photovoltaïque et d'une cellule solaire [1].....	5
Figure I.3 : La variation de spectre électromagnétique [9].....	6
Figure I.4 : Spectre solaire (AM0) et (AM1.5) en fonction de la longueur d'onde [53]	7
Figure I.5 : Classification des principales technologies de cellules solaires photovoltaïques	8
Figure I.6: Cellule solaire de silicium monocristallin (a) et silicium polycristallin (b)]	9
Figure I.7 : La structure d'une cellule sélénure de cuivre indium gallium (CIGS) [19]	10
Figure I.8 : La structure d'une cellule a couche mince [22].....	11
Figure I.10 : Cellule solaire organique [54].....	12
Figure I.11 : Cellule solaire multijonction [55]	12
Figure I.12 : Cellule solaire multijonction [40]	13
Figure I.13 : Cellule solaire pevorskite [57]	22
Figure II.1 : La structure de la cellule photovoltaïque [43].....	15
Figure II.2: présentation d'une couche antireflet de la cellule solaire [3]	16
Figure II.3 : La réflexion de la lumière sur un surface lisse (a) et texturé (b) [3]	17
Figure II.4: Les caractéristiques courant– tension de la cellule photovoltaïque [59]	17
Figure II.5 Cellule tandem pevorskite/silicium [61].....	17
Figure III.1: Interface du Logiciel Oghmanano	36
Figure III.2: Description de la cellule solaire tandem (double jonction).....	32
Figure III.3 : La structure de la cellule tandem Pérovskite/ Silicium	32
Figure III.4: La caractéristique courant- tension $J(v)$ de cellule tandem Pérovskite /Silicium.....	34
Figure III.5 : La caractéristique courant- tension $J(v)$ de cellule tandem Pérovskite /Silicium La variation d'épaisseur de la couche absorbante Pérovskite ($CH_3NH_3PbI_3$)	41
Figure III.6 : La caractéristique courant- tension $J(v)$ de cellule tandem (Pérovskite /Silicium) La variation d'épaisseur de la couche Silicium Cristallin	43
Figure III.7 : La variation de paramètres essentiels de la cellule solaire (FF, Voc, Icc) en fonction d'épaisseur de la couche Silicium Cristallin de la cellule solaire tandem	43
Figure III.8 : La caractéristique courant- tension $J(v)$ de cellule tandem (Pérovskite /Silicium) La variation d'épaisseur de Tunnel	44
Figure III.9 : La variation de paramètres essentiels de la cellule solaire (FF, Voc, Icc)	

en fonction d'épaisseur de Tunnel dans la cellule solaire tandem.....	45
Figure III.10 : La caractéristique courant- tension J(v) de cellule tandem (Pérovskite /Silicium) La variation d'épaisseur de ETL.....	46
Figure III.11 : La variation de paramètres essentiels de la cellule solaire (Rendement ,FF, Voc, Icc) en fonction d'épaisseur de ETL dans la cellule solaire tandem	46
Figure III.12 : La caractéristique courant- tension J(v) de cellule tandem (Pérovskite /Silicium) La variation d'épaisseur de HTL	47
Figure III.13 : La variation de paramètres essentiels de la cellule solaire (FF, Voc, Icc) en fonction d'épaisseur de HTL dans la cellule solaire tandem	48
Figure III.14 : La variation d'gap de la cellule solaire tandem	48
Figure III.15 : La variation de Temperature dans la cellule solaire tandem.....	49
Figure III.16 : La variation de Quantum en fonction de enrgy dans la cellule solaire tandem.....	51

Introduction

Introduction générale

Face à une crise énergétique mondiale persistante et à une urgence climatique de plus en plus alarmante, le développement des énergies renouvelables apparaît comme une stratégie incontournable pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles et limiter les émissions de gaz à effet de serre. Parmi ces sources d'énergie, l'énergie solaire se distingue par son abondance, sa disponibilité quasi universelle et son potentiel élevé en matière de production d'énergie propre et durable. Ces dernières années, le secteur photovoltaïque a connu un essor considérable, porté par des avancées technologiques majeures et un intérêt croissant pour la recherche et le développement de nouveaux matériaux performants. L'un des enjeux principaux dans ce domaine est d'augmenter le rendement des cellules photovoltaïques tout en réduisant les coûts de fabrication, afin de rendre cette technologie plus compétitive et accessible à grande échelle.

La cellule solaire tandem, qui associe deux matériaux complémentaires pour optimiser l'absorption du spectre solaire, constitue une piste prometteuse pour surmonter les limitations des cellules à jonction unique. En particulier, la combinaison du silicium – matériau dominant dans l'industrie photovoltaïque, représentant plus de 90 % de la production mondiale de modules – et des pérovskites halogénées – matériaux émergents aux propriétés optoélectroniques remarquables – suscite un intérêt considérable.

Les pérovskites, telles que $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$, se caractérisent par une bande interdite ajustable, une forte absorption lumineuse, un bon transport des charges et une fabrication peu coûteuse, ce qui en fait des candidats idéaux pour les architectures tandem. Cependant, l'optimisation des performances d'une cellule solaire tandem nécessite une compréhension fine des phénomènes physiques qui y interviennent, ainsi qu'un ajustement précis des paramètres structuraux et environnementaux. À cet égard, la simulation numérique constitue un outil puissant pour modéliser le comportement des cellules et prédire leurs performances avant fabrication. Le présent travail s'inscrit dans cette perspective et vise à optimiser les performances d'une cellule solaire tandem pérovskite-silicium à l'aide du logiciel de simulation OghmaNano.

L'étude portera notamment sur l'effet des épaisseurs des différentes couches constitutives de la cellule ainsi que sur l'influence de la température sur les principales caractéristiques électriques telles que la densité de courant de court-circuit (J_{sc}), la tension de circuit ouvert (V_{oc}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion (η). Ce mémoire est structuré de la manière suivante : Le premier chapitre présente les concepts fondamentaux des cellules

photovoltaïques, leur fonctionnement et les principaux paramètres caractérisant leur performance.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des matériaux utilisés, notamment le silicium et les pérovskites. Le troisième chapitre introduit le logiciel OghmaNano et expose les résultats de simulation obtenus pour la cellule tandem, avec une analyse des effets des différents paramètres sur les performances globales du dispositif.

Ce travail a pour ambition de contribuer à la compréhension et à l'amélioration des dispositifs photovoltaïques de nouvelle génération, en mettant en évidence le potentiel des cellules tandem pérovskite-silicium dans la transition énergétique actuelle.

Chapitre I :
Généralités sur les cellules photovoltaïques
et présentation des cellules solaires
perovskites.

Introduction :

Actuellement, les technologies solaires les plus répandues sont le solaire photovoltaïque et le solaire thermique, représentant les formes les plus courantes de valorisation de l'énergie solaire. Parmi elles, la cellule solaire photovoltaïque occupe une place centrale en tant que dispositif capable de convertir directement la lumière du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque [4]. Ce chapitre présente une introduction générale au phénomène de conversion photovoltaïque, en mettant particulièrement l'accent sur les cellules solaires à base de pérovskites, qui suscitent un intérêt croissant en raison de leurs propriétés remarquables et de leur potentiel d'efficacité élevé. Nous y aborderons les principes de fonctionnement de ces cellules, la composition des matériaux utilisés, ainsi que leurs caractéristiques physiques et architectures structurelles. Dans un premier temps, nous définirons les notions fondamentales liées à l'effet photovoltaïque et expliquerons les paramètres électriques clés qui permettent d'évaluer la performance d'une cellule solaire (tels que le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement). Dans un second temps, nous passerons en revue les principales technologies de cellules photovoltaïques disponibles à ce jour, en mettant en évidence leurs avantages et leurs limites. Cette base théorique est essentielle pour comprendre les enjeux de conception et d'optimisation abordés dans les chapitres suivants, en particulier dans le cadre des cellules solaires tandem intégrant des matériaux hybrides tels que les pérovskites.

I-1. L'effet photovoltaïque et cellule solaire :

L'effet photovoltaïque constitue le principe fondamental de fonctionnement des cellules solaires. Il s'agit d'un phénomène physique par lequel un matériau semi-conducteur génère une tension électrique lorsqu'il est exposé à un rayonnement lumineux [34]. Cet effet tire son origine de l'effet photoélectrique, observé pour la première fois par Heinrich Hertz et théorisé par Albert Einstein en 1905, ce qui lui valut le prix Nobel de physique en 1921 [35].

Dans une cellule photovoltaïque, lorsque les photons issus du rayonnement solaire possèdent une énergie suffisante, ils peuvent exciter des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction du matériau semi-conducteur. Ce transfert d'énergie conduit à la création d'une paire électron-trou [36][37].

Le silicium est l'un des matériaux semi-conducteurs les plus utilisés dans les cellules solaires, notamment en raison de sa structure cristalline bien ordonnée, appelée réseau cristallin. Le mécanisme de génération de courant dans une cellule solaire peut être résumé comme suit : lorsque des photons de haute énergie sont absorbés par le semi-conducteur, un électron peut acquérir cette énergie et devenir libre de se déplacer dans le matériau. Cette excitation n'est possible que si l'énergie du photon ($E = h \cdot \nu$) est supérieure à l'énergie de la bande interdite (E_g) du matériau. L'électron ainsi libéré passe de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), laissant derrière lui un trou dans la bande de valence.

La figure I.1 illustre ce processus de génération de paires électron-trou, qui constitue la base de la production du courant électrique dans une cellule photovoltaïque.

La figure I.1 représente la création de cette paire électron-trou.

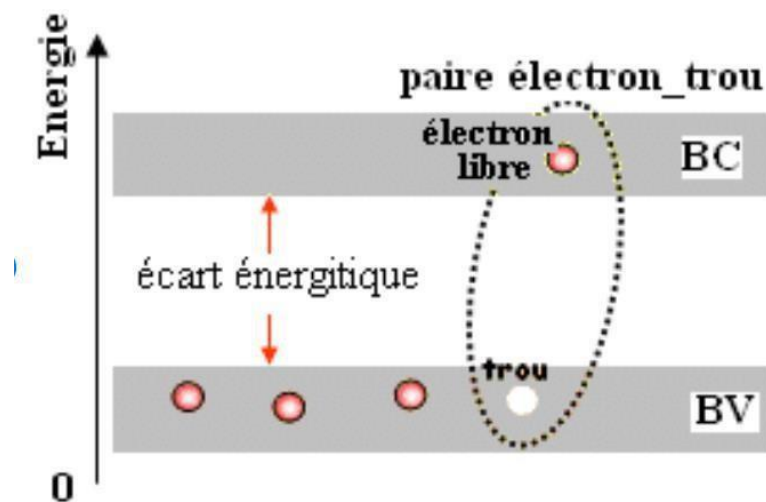


Figure I.1 : Création d'un pair électron-trou [7].

I-2. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire :

Sous l'effet du rayonnement solaire, les photons incidents peuvent transférer leur énergie aux électrons liés des atomes du matériau semi-conducteur, provoquant ainsi leur libération. Les électrons excités quittent leurs orbitales et laissent derrière eux des lacunes électroniques, appelées trous. Ces porteurs de charge (électrons et trous) se déplacent alors sous l'influence du champ électrique interne situé au niveau de la jonction P-N[1].

Lorsque les électrons migrent vers la région de type N et que les trous se déplacent vers la région de type P, une différence de potentiel électrique est créée entre les deux zones. Ce déséquilibre de charge génère une tension électrique au niveau de la jonction. Si un circuit électrique externe est connecté aux bornes de la cellule, les électrons circulent à travers ce circuit, produisant ainsi un courant électrique continu à partir de l'énergie lumineuse absorbée.

La figure I.2 illustre le principe de l'effet photovoltaïque et le fonctionnement général d'une cellule solaire. [1]

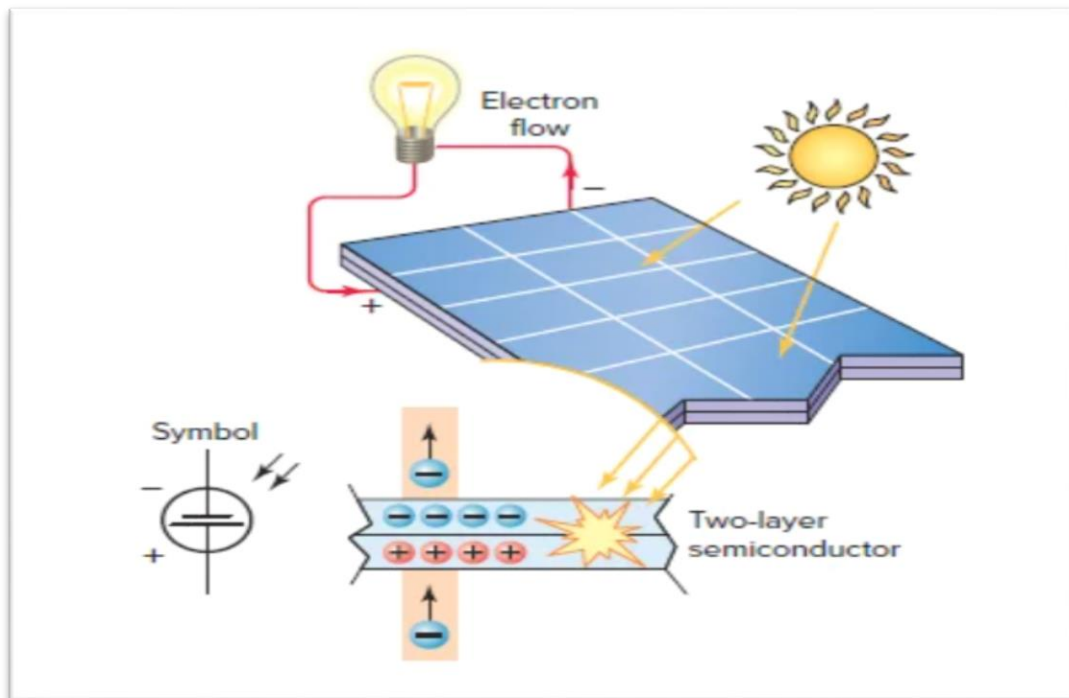


Figure I.2 : Principe de l'effet photovoltaïque et d'une cellule solaire [1].

I-3. Notion du spectre solaire et masse d'air :

La lumière émise par le Soleil est constituée d'un ensemble de rayonnements électromagnétiques couvrant un large éventail de longueurs d'onde, correspondant à différentes couleurs visibles et invisibles [32]. Le spectre solaire décrit la distribution de l'intensité du rayonnement solaire en fonction de la longueur d'onde. Il permet de caractériser l'énergie disponible dans chaque région du spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge, en passant par la lumière visible.

Ce rayonnement peut être modélisé comme une onde électromagnétique, dont la relation fondamentale entre la vitesse de propagation (c), la longueur d'onde (λ) et la fréquence (ν) est donnée par l'équation suivante :

$$E = h \cdot \sigma = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.1)$$

E = énergie de photon (eV)

σ = fréquence de l'onde électromagnétique en (Hz)

h = constante de Planck

c = vitesse de la lumière (m/s)

λ = longueur d'onde (μm)

La Figure I.3 présente la variation de ce spectre.

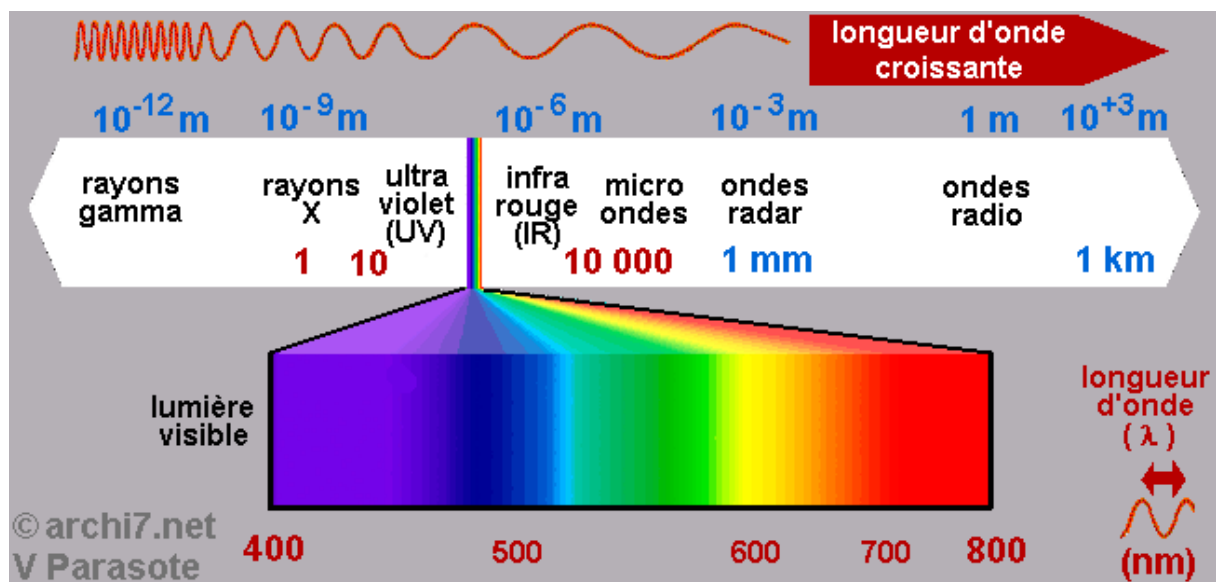


Figure I.3 : La variation de spectre électromagnétique [9].

L'énergie solaire est une libération d'une grande quantité d'énergie sous forme d'un

rayonnement et d'une chaleur qui est produite par la fusion d'hydrogène aux noyaux d'hélium, sa quantité de rayonnement moyenne mesurée est environ $5.691.107 \text{ W.m}^2$ [17].

Pour caractériser le spectre solaire on utilise la notion AM appelée « masse d'air », ou « Air masse » en anglais, c'est un rapport entre l'épaisseur de l'atmosphère qui laisse passer le rayonnement lumineux pour atteindre la terre et l'épaisseur de la place verticale [10]. Cette notion AM est donnée par la formule :

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \quad (I.2)$$

Avec θ : angle de soleil au zénith

Il y a quatre types d'air masse [10] :

- **AM0** : le spectre hors atmosphère.
- **AM1** : le spectre au niveau de la mer quand le soleil au zénith.
- **AM1.5** : utilise pour la photovoltaïque par une température du soleil $41,8^\circ$.
- **AM2** : la valeur de température du Soleil à 30°

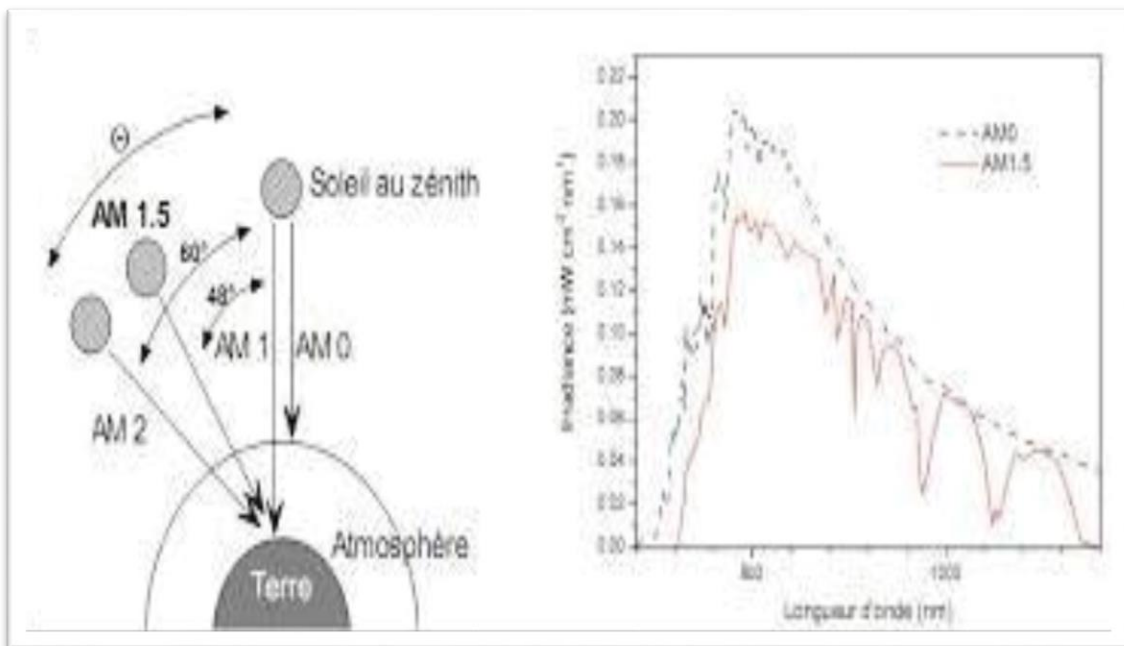


Figure I.4 : Spectre solaire (AM0) et (AM1.5) en fonction de la longueur d'onde [53].

I-4. Les différentes technologies photovoltaïques :

Les recherches dans le domaine des cellules solaires ont donné naissance à plusieurs technologies de cellules solaires photovoltaïques sur le marché. Elles sont divisées en quatre familles, La figure I.5 ci-dessous présente la classification de ces cellules solaires.

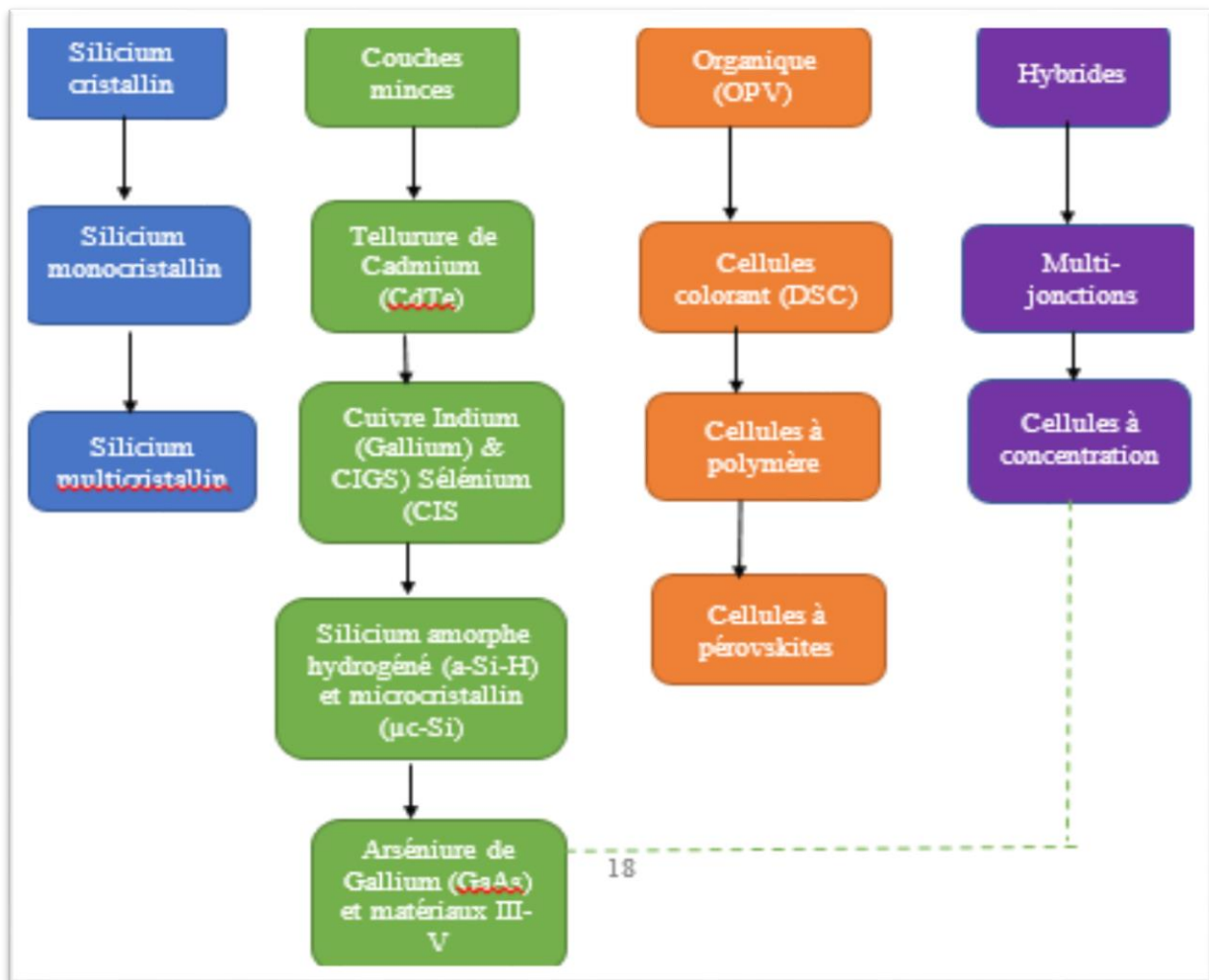


Figure I.5 : Classification des principales technologies de cellules solaires photovoltaïques [4].

I-4-1 Cellules solaires au silicium cristallin :

La technologie des cellules solaires à base de silicium cristallin constitue l'une des plus répandues au niveau mondial, représentant environ 40 % de la production totale de cellules photovoltaïques. Le silicium cristallin (c-Si) est le matériau semi-conducteur le plus utilisé dans ce domaine, en raison de ses propriétés électroniques favorables, de sa stabilité et de sa maturité technologique.

On distingue principalement deux types de cellules solaires à base de silicium cristallin :

Le silicium monocristallin (sc-Si ou mono-Si), caractérisé par une structure cristalline uniforme,

Le silicium multicristallin ou polycristallin (mc-Si ou poly-Si), composé de plusieurs cristaux orientés de manière aléatoire.

La Figure I.6 illustre la structure typique des cellules solaires monocristallines et polycristallines.

Le silicium cristallin présente une bonne capacité d'absorption dans la région visible du spectre solaire, bien qu'il soit moins efficace dans l'infrarouge. Sa bande interdite relativement faible ($E_g \approx 1,1$ eV) permet une conversion efficace de l'énergie lumineuse en électricité. Typiquement, ces cellules peuvent produire un courant de l'ordre de 35 mA/cm², une tension de circuit ouvert d'environ 550 mV, et atteignent un rendement supérieur à 25 % dans des conditions optimales [12].

Caractéristiques des cellule solaire en policristallin et en mono cristallin

Le Tableau I.1 présente une comparaison des principaux types de cellules solaires à base de silicium : monocristallin, polycristallin, amorphe et micromorphe. Ces technologies se différencient par leur structure cristalline, leur méthode de fabrication, leur coût de production, ainsi que leur efficacité de conversion énergétique.

Tableau I.1 : Le rendement des cellules au silicium cristallin[13].

	Rendement max cellule labo	Rendement module	Surface pour 1 kWc	Part de marché (2010)
Monocristallin	25,0%	15-20%	~6 m ²	33,3%
Polycristallin	20,4%	13-16%	~7 m ²	52,9%
Silicium ruban	19,7%	11-15%	~7,5 m ²	1,2%
Silicium amorphe	13%	5-9%	~14 m ²	5%
Silicium micromorphe	13%	6,5-9,5%	~12,5 m ²	

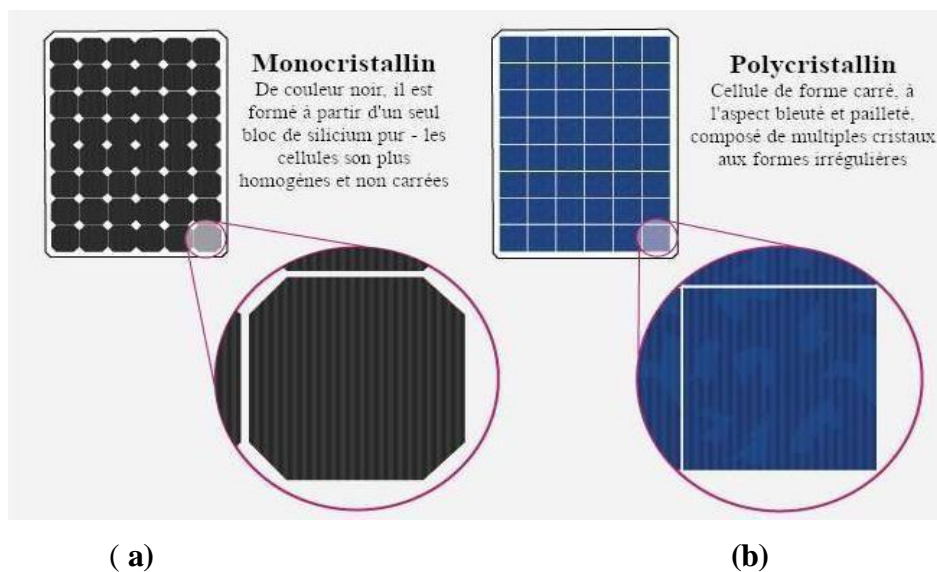


Figure I.6: Cellule solaire de silicium monocristallin (a) et silicium polycristallin (b) [20] [21].

I-4-2 Cellules à base de couche mince

Les cellules solaires à couches minces exploitent des matériaux alternatifs au silicium cristallin, tels que le tellure de cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre-indium-gallium (CIGS), ou encore le silicium amorphe (a-Si). Ces matériaux sont déposés sous forme de couches très fines sur des substrats flexibles ou rigides à l'aide de procédés de dépôt chimiques ou physiques.

Ces technologies présentent plusieurs avantages, notamment un coût de production réduit, une légèreté accrue ainsi qu'une flexibilité qui facilite leur intégration dans divers supports. Cependant, elles souffrent généralement de rendements énergétiques inférieurs à ceux des cellules au silicium cristallin. De plus, certains matériaux, comme le cadmium, posent des problèmes environnementaux et de toxicité potentielle.

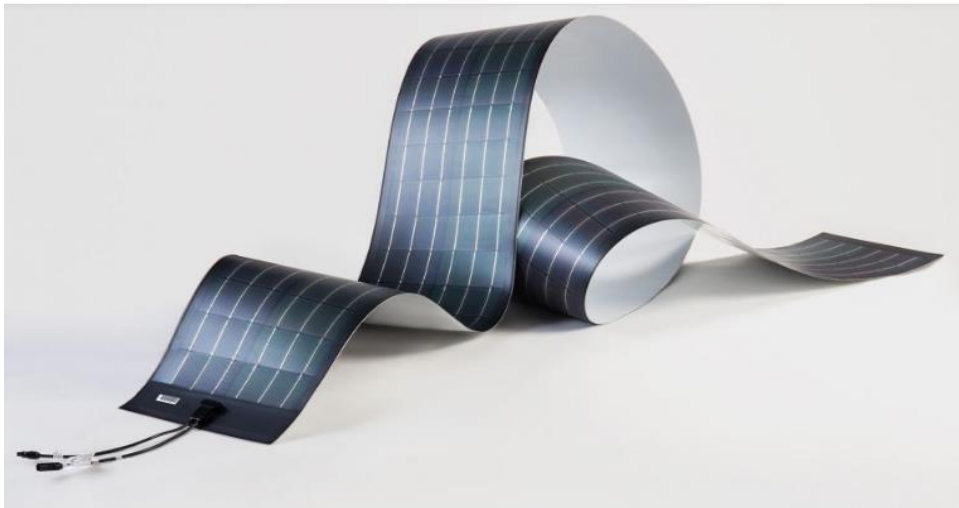


Figure I.7 : La structure d'une cellule séléniure de cuivre indium gallium (CIGS) [19].

Les cellules à couche mince basées sur les matériaux Cuivre-Indium-Sélénium (CIS) et Cuivre-Indium-Gallium-Sélénium (CIGS) appartiennent à la famille des composés chalcopyrites, combinant des éléments des colonnes I, III et VI du tableau périodique. Le CIS, abrégé pour chalcopyrite de séléniure de cuivre et d'indium (CuInSe_2), a démontré un rendement de conversion pouvant atteindre environ 19,5 % dans le cas de petites cellules expérimentales. Cependant, la commercialisation à grande échelle de ces cellules reste complexe en raison des défis liés à la fabrication et à la stabilité [15].

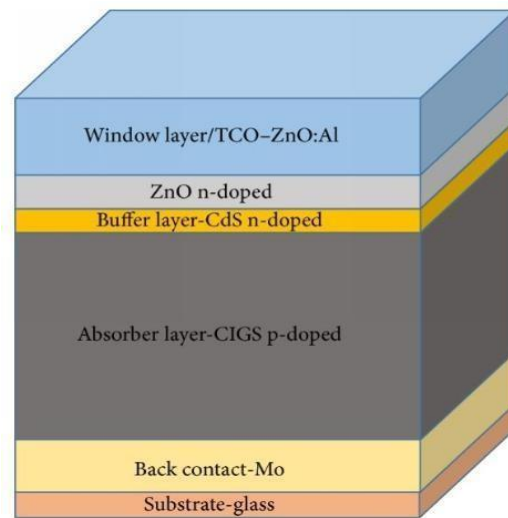


Figure I.8 : La structure d'une cellule à couche mince [22].

I-4-3. Cellules à base de photovoltaïque organique :

Les cellules photovoltaïques organiques (OPV) représentent une technologie émergente qui occupe une place croissante en raison de leurs propriétés avantageuses, notamment la réduction des coûts de fabrication, la flexibilité mécanique des modules solaires, ainsi que la possibilité d'utiliser des matériaux photovoltaïques d'épaisseur extrêmement faible [16].

Les OPV sont composées de matériaux organiques riches en carbone, dont la structure chimique peut être modifiée afin d'optimiser des fonctionnalités spécifiques telles que la transparence, la couleur, ou encore la performance électronique. Cette adaptabilité permet de concevoir des cellules solaires légères, fines et potentiellement flexibles, ouvrant la voie à des applications innovantes dans des domaines variés.

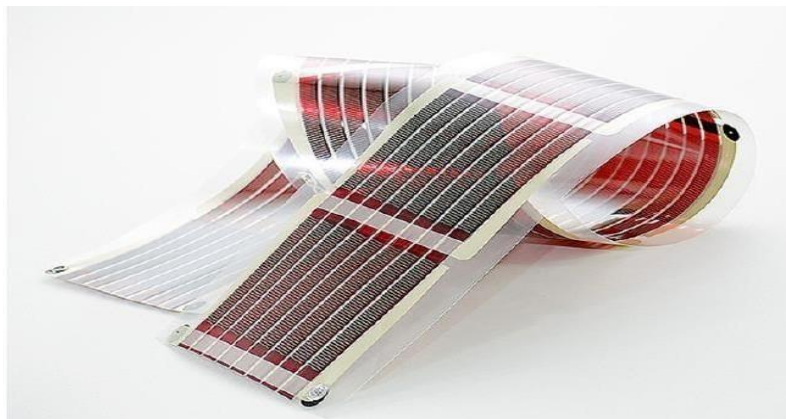


Figure I.10 : Cellule solaire organique [54].

I-4-4. Cellules multi-jonctions :

Les cellules photovoltaïques multi-jonctions sont des dispositifs inorganiques constitués de plusieurs jonctions semi-conductrices distinctes, qui peuvent être simples, doubles ou triples jonctions. Ces cellules présentent un coût de fabrication particulièrement élevé, en raison de la complexité de leur architecture et des matériaux utilisés. Parmi ces dispositifs, les cellules solaires tandem, composées de deux jonctions empilées, constituent une catégorie importante. Notre étude se focalise sur la modélisation et l'analyse d'une cellule double jonction, dont la structure est plus complexe que celle des cellules à simple jonction. La connexion électrique entre les jonctions, réalisée via une interface de type jonction n-p, permet de minimiser les pertes électriques et optiques [17]. Les cellules multi-jonctions tirent parti de la capacité à exploiter efficacement différentes longueurs d'onde du spectre solaire, ce qui conduit à des performances énergétiques supérieures. En laboratoire, les cellules tandem ont atteint des rendements records avoisinant 40 % [18].

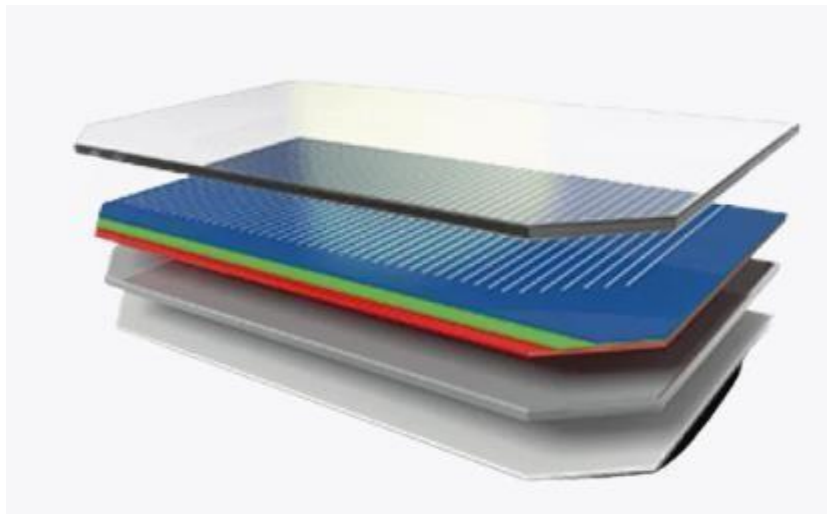


Figure I.11 : Cellule solaire multijonction [55].

I-4-5. Cellules à pérovskites :

Les cellules photovoltaïques à pérovskites sont conçues à partir de matériaux hybrides organo-inorganiques possédant une structure cristalline particulière. Ces cellules ont démontré en laboratoire des rendements dépassant 25 %, bien que leur stabilité et leur toxicité posent encore des défis importants. Leur couche active contient un composé à structure pérovskite, le plus souvent un hybride organique-inorganique à base de plomb, ou parfois un halogénure

d'étain. Cette technologie innovante suscite un grand intérêt en raison de ses performances prometteuses, mais elle est encore limitée par une faible résistance à l'humidité, ce qui complique son industrialisation. Le rendement maximal obtenu en laboratoire reste à ce jour d'environ 19,7 % [56]. Classées parmi les cellules à couches minces, les cellules à pérovskites tirent leur nom de leur arrangement cristallin caractéristique. Leur fabrication s'appuie sur le dépôt de fines couches de matériaux sur un substrat, souvent par des techniques d'impression ou de dépôt sous vide. Ces cellules sont relativement faciles à produire et peuvent rivaliser avec les cellules en silicium cristallin en termes d'efficacité. Depuis leur apparition en 2009, avec un rendement initial de seulement 3 %, elles ont connu une progression rapide, atteignant plus de 25 % en 2020. Pour que cette technologie devienne commercialement viable, il est indispensable que les cellules présentent une durabilité d'au moins vingt ans en conditions réelles d'utilisation. Ainsi, la recherche actuelle se concentre sur l'amélioration de leur stabilité ainsi que sur la mise au point de procédés industriels peu coûteux [38]. Par ailleurs, des études récentes ont exploré l'association des pérovskites avec le silicium afin d'améliorer les performances des cellules solaires. Par exemple, une recherche menée à Stanford a révélé qu'ajouter une couche pérovskite à une cellule initialement efficace à 11,4 % augmentait son rendement jusqu'à 17 %, soit une amélioration supérieure à 50 %. En revanche, l'intégration d'une couche pérovskite à une cellule de silicium avec un rendement initial de 17 % n'a amélioré l'efficacité que de 0,9 %. Ces résultats soulignent le potentiel important des pérovskites et justifient les efforts de recherche en cours dans ce domaine [39] [40].



Figure I.12 : Pérovskite [40]

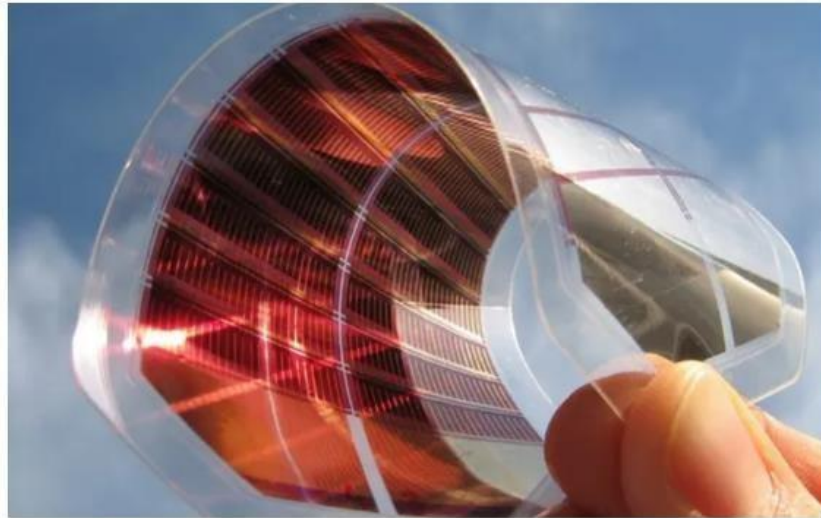


Figure I.13 : Cellule solaire pevorskite [57]

Conclusion

Les cellules photovoltaïques représentent une solution technologique mature et stratégique pour répondre aux enjeux de transition énergétique. Grâce aux avancées constantes de la recherche, aux politiques incitatives et à l'adhésion croissante de la société civile, le solaire photovoltaïque est appelé à jouer un rôle de plus en plus essentiel dans le monde énergétique. Toutefois, cette augmentation doit être accompagnée d'une réflexion globale sur les impacts environnementaux, les modèles économiques et les équilibres géopolitiques. Le défi du XXI^e siècle ne réside pas seulement dans la capacité à produire de l'énergie propre, mais également à le faire de manière durable, équitable et résiliente

Chapitre II :
Etude théorique d'une cellule simple et une
cellule tandem pevorskite/silicium

II Introduction

La cellule photovoltaïque simple, appelée aussi cellule solaire à simple jonction, est fabriquée à partir d'un seul matériau semi-conducteur qui absorbe la lumière solaire et génère de l'électricité. Dans le but d'augmenter leurs rendement quantique et électrique les chercheurs ont conçu une nouvelle structure appelée cellule solaire tandem, cette dernière, est composée de deux ou plusieurs cellules simples empilées l'une sur l'autre, chacune avec des propriétés d'absorption spécifiques pour une plage de longueur d'onde différente du spectre solaire.

II-1. Structure d'une cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est constituée de six couches essentielles, la figure II.1 résume les compositions de la cellule solaire.

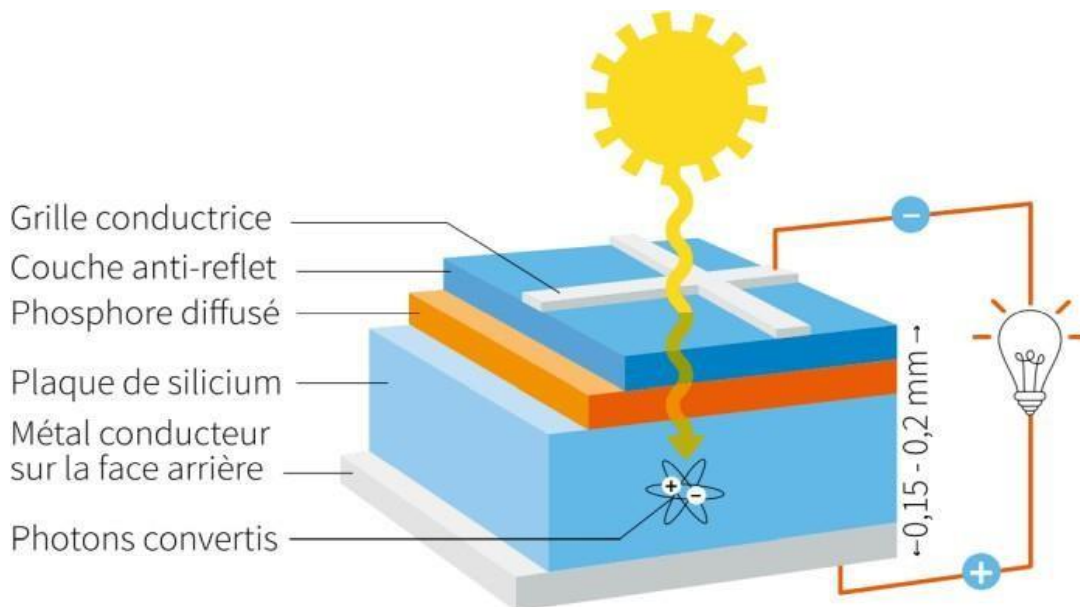


Figure II.1 : La structure de la cellule photovoltaïque [43].

II-1-1 La couche antireflet :

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une couche antireflet (CAR) est utilisée. Le principe des couches antireflet se conçoit sur l'interaction des faisceaux lumineux avec les couches diélectriques minces (Figure II-2). [42] Si l'épaisseur de la couche diélectrique est

$$d_{CAR} = \frac{(2N+1)\lambda}{4n_{CAR}}, \quad N = 1,2,3, \dots$$

égale à :

II-1

n_{CAR} étant l'indice de réfraction de la couche antireflet

Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement on utilise une couche antireflet doublée. Le

rôle de la couche antireflet augmente la pénétration des rayons lumineux dans des fines couches isolantes [3].

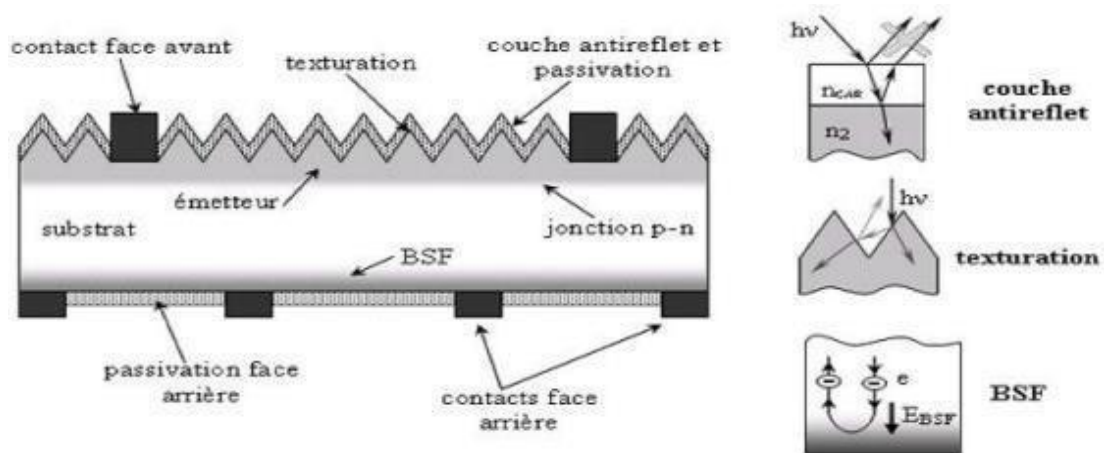


Figure II.2: présentation d'une couche antireflet de la cellule solaire [3].

II-1-2 Les contacts :

L'établissement de contacts électriques fiables est une étape cruciale pour la collecte du courant généré par la cellule photovoltaïque. Ces contacts sont réalisés par le dépôt de métaux conducteurs sur la face avant (électrode négative) et la face arrière (électrode positive) de la cellule.

La technique couramment employée pour la formation de ces contacts est la sérigraphie, suivie d'une étape de frittage. Sur la face avant, une pâte d'argent (Ag) est sérigraphiée selon un motif optimisé pour minimiser l'ombrage de la surface active tout en assurant une faible résistance série. L'argent est privilégié pour sa haute conductivité électrique. Sur la face arrière, une pâte d'aluminium (Al) est généralement sérigraphiée sur toute la surface, assurant un bon contact ohmique avec la couche P+ formée précédemment et contribuant également à la réflexion interne de la lumière (rétro-rélecteur).

Après le dépôt des pâtes métalliques par sérigraphie, les plaquettes sont soumises à un traitement thermique de frittage. Cette étape, réalisée à des températures élevées, permet d'assurer une bonne adhérence des contacts métalliques au silicium et de réduire la résistance de contact en formant des liaisons électriques efficaces entre le métal et le semi-conducteur., les matériaux les plus utilisés : Ag, Al, Cu, ... [3].

II-1-3 Texturisation :

Afin d'optimiser la capture des photons incidents sur la surface des cellules solaires, une étape de texturation est mise en œuvre. Cette technique consiste à créer des microstructures régulières ou aléatoires, telles que des pyramides inversées ou des entonnoirs à l'échelle micrométrique, sur la face avant de la plaquette de silicium. L'objectif principal de cette texturation est de réduire la réflectivité de la surface par un mécanisme de réfraction multiple, augmentant ainsi la probabilité d'absorption des photons quelle que soit leur angle d'incidence. Ce phénomène est également désigné sous le terme de confinement optique, car il favorise le piégeage de la lumière au sein du matériau semi-conducteur [58].

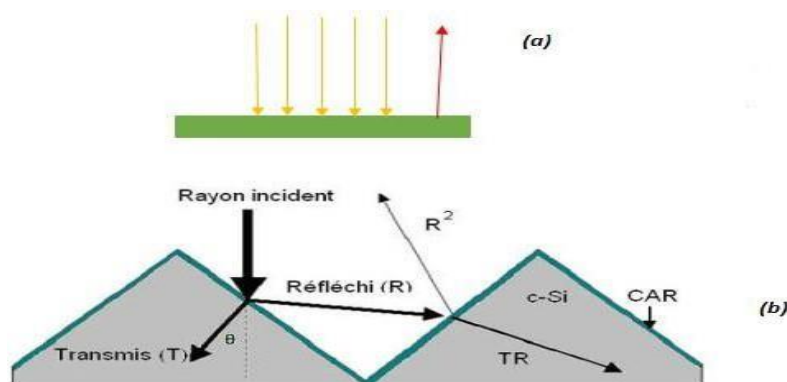


Figure II.3 : La réflexion de la lumière sur une surface lisse (a) et texturée (b) [3].

II-1-4 Fenêtre :

La couche fenêtre est une couche qui permet de faire circuler les électrons vers les contacts électriques, les matériaux utilisés dans cette couche sont des matériaux d'énergie de gap pour faciliter au rayon lumineux de pénétrer dans la cellule photovoltaïque [3].

II-1-5 L'émetteur et la base :

Le semi-conducteur est constitué de deux couches fines : émetteur et base. La couche de type n de la cellule n-p appelée émetteur. La couche de type p de la cellule n-p appelée base, le dopage de la base doit être plus faible par rapport à l'émetteur car il a un rôle très important pour augmenter le rendement de la cellule solaire et la durée de vie [3].

II-1-6 BSF (Back Surface Field) :

Le BSF a pour rôle principal de minimiser la recombinaison des porteurs de charge minoritaires (électrons) au niveau de la surface arrière. Cette zone présente typiquement un taux de recombinaison élevé en raison de la proximité du contact métallique. En exerçant une force répulsive sur ces porteurs, le BSF réduit significativement leur recombinaison, ce qui a pour effet d'améliorer l'efficacité de collecte et, par conséquent, le rendement global de la cellule photovoltaïque.

Contact Ohmique et Extraction du Courant

En outre, la couche d'aluminium diffusée établit un contact ohmique avec l'électrode métallique arrière. Un contact ohmique se caractérise par une faible résistance de contact, facilitant ainsi l'extraction efficiente du courant électrique généré par la cellule avec des pertes de tension minimisées.

Processus de Fabrication

La mise en œuvre de la diffusion thermique de l'aluminium s'effectue généralement à une température d'environ **850°C**. Une pâte contenant des particules d'aluminium, appliquée par sérigraphie sur l'intégralité de la face arrière de la plaquette de silicium, constitue la source d'aluminium. Durant le traitement thermique, l'aluminium s'incorpore dans la matrice de silicium, formant ainsi la région P+ fortement dopée.[3]

II-2 Principe de fonctionnement de la cellule solaire PV : [44]

Une cellule solaire convertit l'énergie solaire en courant continu (DC) par l'intermédiaire de matériaux semi-conducteurs. Il existe trois technologies principales de cellules solaires, distinguées par la structure cristalline du silicium employé :

Silicium monocristallin : Offre généralement les rendements les plus élevés, avoisinant les 15%.
Silicium multicristallin (ou polycristallin) : Présente des rendements légèrement inférieurs, autour de 13%.

Silicium amorphe : Caractérisé par des rendements plus faibles, d'environ 7%.

Cette conversion énergétique s'effectue sans aucune pièce mécanique en mouvement, ce qui garantit un fonctionnement silencieux, non polluant et ne requérant aucun combustible.

La tension générée par une cellule individuelle varie typiquement entre 0,3 V et 0,7 V. Cette variation dépend de plusieurs facteurs, notamment le matériau semi-conducteur utilisé, la configuration de la cellule, la température ambiante et le degré de vieillissement de la cellule.

Afin d'obtenir des niveaux de puissance adaptés aux applications pratiques, les cellules solaires sont interconnectées :

La connexion en série permet d'augmenter la tension de sortie globale du module.

La connexion en parallèle permet d'augmenter le courant de sortie global du module.

II-3 Les paramètres de la cellule solaire [41]

II-3-1 Courant de court-circuit I_{cc} :

I_{cc} est le courant qui traverse la cellule solaire lorsqu'elle est court-circuitée c'est-à-dire la tension entre ses bornes (+) et (-) est nulle alors ($v=0$) [23].

$$I_{cc} = I_{ph} / (1 + \frac{R_s}{R_{sh}}) \quad (I.3)$$

Avec :

I_{ph} : Le photo-courant de la cellule solaire

R_s : Résistance Série

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle)

II-3-2 Tension de circuit ouvert V_{co} :

V_{co} est la tension aux bornes de la cellule solaire lorsque celle-ci est en circuit ouvert donc le courant traversé dans la cellule est nulle $I=0$, dans le cas de cellule solaire idéale la tension de circuit ouvert (V_{co}) est déterminé par l'équation [23] :

$$V_{co} = \frac{kt}{q} \ln \left[\frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right] \quad (I.4)$$

Où :

K : constante de Boltzmann ($=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ j/k} = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ ev/k}$)

T : la température de cellule en Kelvin

I_0 : le courant de saturation

q : la charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{ coulomb}$)

II-3-3 Facteur de forme (FF) :

Le facteur de forme ou facteur de remplissage est le rapport entre la puissance maximale et la puissance de rectangle $I_{cc} \times V_{co}$ [23], il est déterminé à partir de l'expression :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (I.5)$$

Où :

P_m : puissance maximale

II-3-4 Le rendement électrique (η) :

Le rendement de cellules photovoltaïque est un rendement de conversion en puissance, il est défini par le rapport de puissance maximale de la cellule calculée sur la puissance reçue de l'ensoleillement, donné par l'expression :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \quad (I.6)$$

Avec :

P_{in} : la puissance incidente

La performance de la cellule représentée par les caractéristiques courant-tension $I(v)$ qui est déterminé sous éclairement, cette dernière apporte des paramètres essentiels comme le rendement et le facteur de forme (FF) de cellule photovoltaïque ainsi que la puissance maximale. La Figure II.4 présente la courbe des caractéristiques courant-tension de la cellule solaire et la caractéristique de puissance.

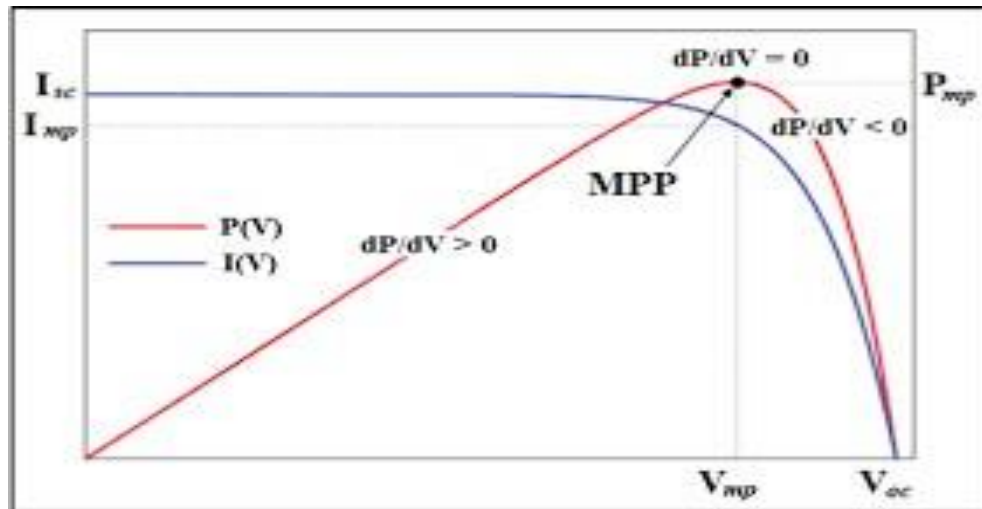


Figure II.4: Les caractéristiques courant– tension de la cellule photovoltaïque [59].

II-4-1 Architecture fondamentale des pérovskites : d'un minéral prototype à une famille de matériaux polyvalents

Le terme « pérovskite » réfère spécifiquement au minéral naturel CaTiO_3 (titanate de calcium), identifié pour la première fois en 1839 par le minéralogiste russe L.A. Perovski. Avec le temps, l'appellation s'est étendue pour englober une vaste classe de composés cristallins de formule générale ABX_3 , qui partagent une architecture structurale commune. Cette formule représente une structure tridimensionnelle (3D) caractérisée par une symétrie cubique (voir figure). Dans cet arrangement atomique, le cation « A » se positionne aux huit coins d'un cube

et est coordonné à douze anions « X ». Simultanément, le cation « B » occupe le centre d'un octaèdre formé par six anions « X » situés au centre des faces du cube. L'importance de cette famille structurale réside dans son immense variété de compositions et sa présence significative dans la géosphère, avec des estimations suggérant que plus de la moitié du volume de la Terre est constituée de minéraux de type pérovskite[46].

On distingue principalement deux grandes catégories au sein des pérovskites : les pérovskites oxydes, qui sont exclusivement inorganiques, et les pérovskites halogénées, qui peuvent être

inorganiques ou présenter une nature hybride, combinant des composants inorganiques et organiques.

Cette nouvelle formulation met un peu plus en avant l'idée d'une "famille de matériaux polyvalents" et insiste sur l'évolution du terme "pérovskite" depuis sa désignation initiale d'un minéral spécifique.

II-5 Propriétés électriques des pérovskites hybrides $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ pour applications photovoltaïques

La pérovskite méthylammonium plomb iodure ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$), notée MAPbI₃, présente un ensemble de propriétés optiques et électriques remarquables, qui ont suscité un intérêt considérable dans le domaine du photovoltaïque, s'appuyant sur des études antérieures menées au cours des deux dernières décennies pour d'autres applications optoélectroniques. Ces caractéristiques optoélectroniques intrinsèques confèrent à ce matériau un excellent potentiel en tant qu'absorbeur de lumière dans les cellules solaires [47].

Contrairement aux oxydes métalliques traditionnellement utilisés dans les dispositifs semi-conducteurs, les propriétés de transport de charge des pérovskites hybrides halogénées sont rarement ajustées par dopage extrinsèque. Au lieu de cela, leurs propriétés intrinsèques peuvent être aisément modulées par des modifications de la composition chimique du matériau. Fondamentalement, les propriétés électroniques des pérovskites sont principalement déterminées par la liaison entre le cation B (dans le cas de MAPbI₃, le plomb, Pb) et l'anion halogénure X (l'iode, I). La nature du cation organique A (le méthylammonium, MA) ne contribue pas directement à la modification de ces propriétés électroniques[47]. Néanmoins, des simulations théoriques ont démontré que la taille du cation A peut indirectement influencer les propriétés électroniques du matériau en altérant le degré de distorsion du réseau cristallin de

II-6 Principe de fonctionnement des cellules solaires à pérovskite :

II-6-1 Absorption de lumière et transport de charges

Dans une architecture typique de cellule solaire à pérovskite, la couche active de pérovskite est intercalée entre une couche de transport de trous (HTM, Hole Transport Material), agissant comme une couche de type p, et une couche de transport d'électrons (ETL, Electron Transport Layer), de type n, formant ainsi une structure p-i-n. Le succès remarquable des pérovskites en tant qu'absorbeurs solaires repose en grande partie sur leurs caractéristiques intrinsèques, notamment une longue longueur de diffusion des charges et une mobilité élevée des porteurs au sein du matériau [48].

Le mécanisme de conversion photovoltaïque dans une cellule à pérovskite initie par l'absorption

de photons par la couche active de pérovskite. L'absorbeur pérovskite se distingue par une faible énergie de liaison excitonique, ce qui favorise une dissociation rapide en porteurs de charge libres (électrons et trous) suite à l'absorption photonique, un processus qui se déroule à l'échelle de quelques picosecondes. Ces porteurs de charge libres ainsi générés sont ensuite transportés vers les contacts interfaciales sélectifs pour leur type de charge [48].

II-6-2 Processus de transfert de charge

Le processus de transfert de charge souhaité s'articule en trois étapes fondamentales :

II-6-2-1 Photo-excitation au sein de la couche absorbante de pérovskite, générant des paires électron-trou [49].

II-6-2-2 Transfert des électrons vers la couche de transport d'électrons (ETL) [49].

II-6-2-3 Transfert des trous vers la couche de transport de trous (HTL), ou de manière équivalente, transfert d'électrons de la HTL vers la pérovskite dans certaines configurations. Cependant, plusieurs processus non désirés peuvent concurrencer le transfert de charge efficace (illustrés par des flèches vertes dans un schéma de principe) [49]. Ces processus incluent :

- La **recombinaison** des porteurs de charge photogénérés, entraînant une perte d'efficacité.
- Le **transfert de charge inverse** (back transfer) aux interfaces entre la HTL et la pérovskite, ainsi qu'entre l'ETL (souvent à base de TiO₂) et la pérovskite, réduisant le
- Un **contact direct** entre la couche de transport de trous (HTL) et la couche de transport d'électrons (ETL), pouvant induire des courts-circuits.

Finalement, après avoir surmonté les barrières d'extraction de charge présentes aux interfaces, les porteurs de charge restants peuvent être transférés efficacement à travers les contacts sélectifs et extraits par les électrodes respectives, générant ainsi un courant électrique.

II-7 Élaboration des cellules photovoltaïques à pérovskite

II-7-1 Électrode de collecte transparente (TCE)

La fabrication d'une cellule solaire à pérovskite débute par le dépôt d'une électrode transparente conductrice (TCE) sur un substrat de verre ou de plastique. Les deux matériaux les plus couramment utilisés pour cette électrode sont le dioxyde d'étain dopé au fluor (FTO) et l'oxyde d'indium dopé à l'étain (ITO) [50]. Le FTO présente une meilleure stabilité thermique et un coût de production inférieur à celui de l'ITO, ce qui en fait souvent un choix privilégié pour les applications nécessitant une résistance à des températures élevées lors des étapes

ultérieures. Une étape initiale cruciale consiste à définir le motif de l'électrode. Typiquement, une bande de FTO est sélectivement éliminée du substrat par une réaction chimique avec de l'acide chlorhydrique (HCl) en présence de poudre de zinc (Zn). Durant ce processus, les zones du substrat où le FTO doit être conservé sont protégées par un ruban adhésif, exposant uniquement la bande de FTO destinée à être retirée[50].

II.-7-2 Couche bloqueuse d'électrons (EBL) ou couche compacte de TiO₂ [51]

La deuxième couche déposée est un film mince et dense de dioxyde de titane (TiO₂), souvent désignée comme couche bloqueuse d'électrons (Electron Blocking Layer - EBL) ou couche compacte de TiO₂. Cette couche joue un rôle essentiel en facilitant le transfert des électrons photogénérés depuis la pérovskite vers l'électrode collectrice (FTO) tout en bloquant le transport des trous vers cette même électrode, ce qui pourrait entraîner des recombinaisons non désirées. De plus, la couche compacte de TiO₂ permet d'éviter un contact direct entre l'électrode FTO et la couche de pérovskite, ce qui pourrait induire des phénomènes de recombinaison interfaciale et dégrader les performances de la cellule [].

Sur la couche bloqueuse d'électrons est ensuite déposée une couche mésoporeuse (m-ETL) chargée de transporter efficacement les électrons à travers sa structure. Cette couche est généralement fabriquée à partir de nanoparticules de dioxyde de titane (TiO₂) et, dans certaines configurations avancées, peut incorporer du graphène (TiO₂/graphène) pour améliorer la conductivité électronique et le transport des charges.

La fabrication de cette couche mésoporeuse implique la préparation d'une suspension colloïdale où les nanoparticules de TiO₂ sont dispersées dans de l'éthanol absolu. Afin d'augmenter la viscosité de cette suspension et de favoriser la formation d'une structure poreuse lors du dépôt du film mince, de l'éthylcellulose est ajoutée. L'épaisseur finale de la couche mésoporeuse est déterminée par les paramètres du processus de dépôt par spin-coating ainsi que par la concentration de la solution.

Après le dépôt, les échantillons subissent un traitement thermique de frittage. Cette étape a pour objectif d'éliminer les composants organiques présents dans la solution de dépôt (solvants, polymères) et de créer un réseau interconnecté (percolant) entre les nanoparticules de TiO₂, assurant ainsi un transport efficace des électrons à travers la couche. Le frittage est réalisé sous des conditions de température contrôlées pour éviter la décomposition du graphène dans les configurations TiO₂/graphène et est effectué de manière progressive pour minimiser les contraintes mécaniques au sein du film.

II-8 Cellule tandem pérovskite/silicium

Une cellule solaire tandem pérovskite-silicium est une cellule photovoltaïque qui combine deux matériaux différents, la pérovskite et le silicium, pour améliorer son rendement. La pérovskite, un matériau absorbant fortement les photons de haute énergie (UV et une partie du spectre visible), est combinée au silicium, qui absorbe les photons de plus faible énergie. Ce mariage des deux matériaux permet de capter une plus large gamme de lumière solaire et d'augmenter considérablement l'efficacité de conversion d'énergie, atteignant des rendements de plus de 30% [60]

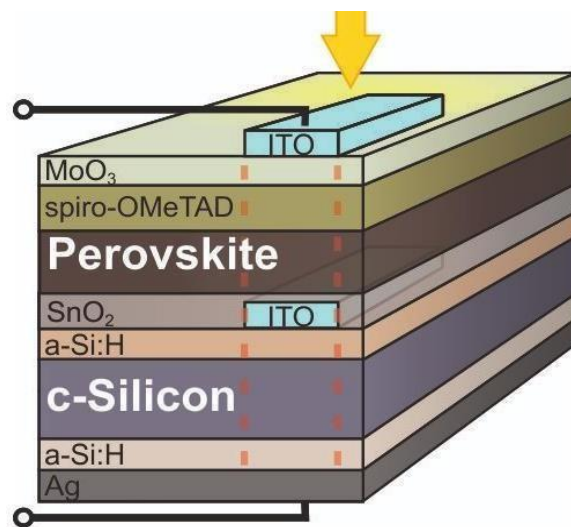


Figure II.5 Cellule tandem pérovskite/silicium [61].

II-8-1 Principe de fonctionnement :

II-8-1-1 Absorption de la lumière :

La pérovskite capte les photons de haute énergie, tandis que le silicium absorbe les photons de plus faible énergie, ce qui permet de mieux exploiter le spectre solaire.

II-8-1-2 Production d'électricité:

Les photons absorbés par chaque matériau génèrent des électrons qui sont ensuite transportés vers des électrodes pour produire de l'électricité.

II-8-1-3 Tandem :

La combinaison des deux matériaux en "tandem" (une couche de pérovskite sur une couche de silicium) permet de capter une plus grande part de la lumière solaire et d'améliorer l'efficacité globale de la cellule.

II-8-2 II-8-2 Avantage des cellules solaires tandem pérovskite/silicium

II-8-3 II-8-2-1 Amélioration du rendement:

Les cellules tandem pérovskite-silicium offrent des rendements supérieurs à ceux des cellules en silicium classiques, avec des records de plus de 30%.

II-8-2-2 Utilisation plus efficace du spectre solaire

En combinant deux matériaux aux propriétés d'absorption différentes, la cellule tandem capte une plus large gamme de lumière solaire, améliorant l'efficacité de conversion.

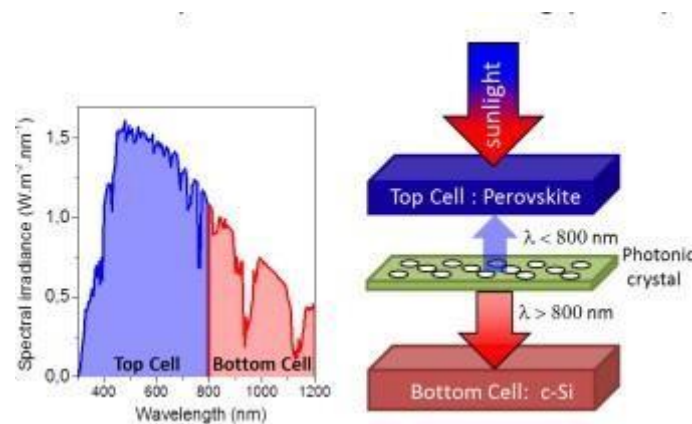


Figure II.6 Gamme d'absorption élargie dans la cellule tandem pérovskite/silicium [60]

II-8-2-2 Potentiel de réduction des coûts

Les pérovskites sont identifiées comme des matériaux potentiellement plus économiques à produire comparativement au silicium. Cette caractéristique intrinsèque pourrait contribuer à la réduction des coûts de fabrication des cellules solaires tandem, les rendant ainsi plus abordables et compétitives sur le marché de l'énergie photovoltaïque. [62]

II-9 Développement des cellule tandem pérovskite/silicium et utilisations : [63]

Les cellules tandem pérovskite-silicium constituent un domaine de recherche très dynamique, et elles sont considérées comme une technologie prometteuse pour le futur de l'énergie solaire. Leur potentiel réside dans leur capacité à atteindre des rendements élevés, ce qui les rend particulièrement adaptées aux panneaux solaires, aux dispositifs portables et à toute autre application nécessitant une efficacité énergétique supérieure et une faible consommation.

Progrès Notables en Recherche et Développement

Plusieurs institutions et fabricants ont déjà démontré des avancées significatives dans ce domaine, avec des records d'efficacité régulièrement surpassés :

L'Université de KAUST a annoncé avoir atteint un rendement de 33,7% pour ses cellules tandem pérovskite-silicium.

L'Institut National de l'Énergie Solaire (INES) a développé une cellule de 9 cm² affichant un rendement de 29,8%.

Le fabricant chinois Longi détient actuellement le record mondial d'efficacité pour ces cellules, avec un rendement impressionnant de 34,85%.

Des recherches ont également mené à des cellules solaires tandem pérovskite-silicium atteignant un rendement de 30,04%.

Ces résultats illustrent le rythme rapide des progrès et le potentiel de cette technologie pour révolutionner le secteur de l'énergie solaire.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exploré les fondements de la technologie photovoltaïque en examinant d'abord la cellule solaire au silicium et la cellule à pérovskite. Nous avons ensuite approfondi une architecture innovante, la cellule tandem, qui combine ces deux technologies. L'objectif principal de cette approche est d'optimiser le rendement et d'élargir le spectre d'absorption de la lumière solaire, dont les principes de fonctionnement et les performances ont été détaillés.

En résumé, la cellule solaire simple représente la base de la conversion photovoltaïque. Cependant, la cellule tandem vise à surpasser les limites de cette technologie en utilisant des combinaisons de matériaux et de structures pour capter et convertir la lumière solaire avec une efficacité accrue.

Chapitre III : Simulation et interprétation des résultats obtenus Oghmanano

Partie I : Logiciel de simulation Oghmanano [2]

III-1-Introduction

OghmaNano (acronyme de Organic and hybrid Material Nano Simulation tool) est un outil logiciel avancé conçu pour la simulation des dispositifs optoélectroniques. Il permet de modéliser avec précision l'interaction entre les électrons, les photons et les phonons dans des dispositifs tels que les cellules photovoltaïques (organique, pérovskite, etc.), les diodes électroluminescentes organiques (OLEDs), les transistors à effet de champ organiques (OFETs), les filtres optiques, les cristaux photoniques et bien d'autres. [2]

Son nom est inspiré de "Oghma", le dieu celtique du savoir, et "Nano", en référence à l'échelle nanométrique des dispositifs simulés. Ce logiciel repose sur des principes physiques solides et une architecture modulaire qui lui confère une grande flexibilité. Depuis sa création en 2009, il a été continuellement amélioré pour répondre aux besoins croissants des chercheurs et des ingénieurs travaillant sur des matériaux et dispositifs émergents. [2]

III-2-Objectifs et Justification

Le développement d'OghmaNano s'inscrit dans un contexte de crise climatique mondiale où les émissions de CO₂ doivent être drastiquement réduites. Les dispositifs à couches minces tels que les cellules solaires organiques ou les OLEDs constituent des alternatives prometteuses aux technologies traditionnelles à haute empreinte carbone. [2]

OghmaNano vise à accélérer la recherche sur ces technologies en offrant une plateforme puissante et accessible pour tester, concevoir et optimiser des dispositifs innovants. Il constitue ainsi un outil stratégique pour la transition énergétique, tout en favorisant l'enseignement et la vulgarisation scientifique.

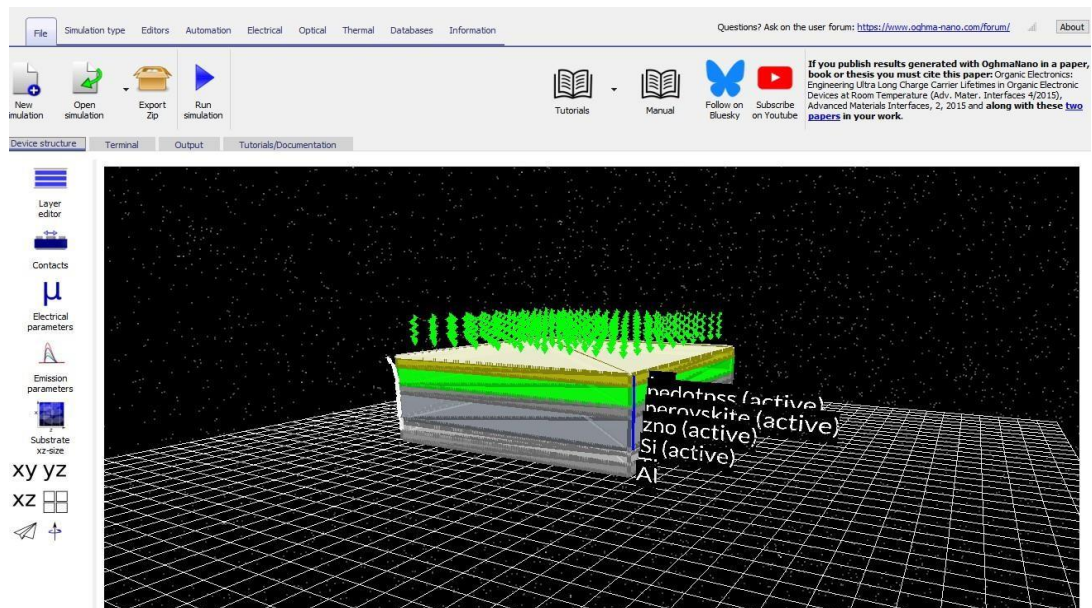


Figure II.7 Interface du Logiciel Oghmanano [2]

III-3-Fonctionnalités Techniques Principales

III-3-1-Simulation Électrique [2]

Solveur drift-diffusion en 1D et 2D Modélisation des recombinaisons : SRH dynamique,

Auger, Langevin Prise en compte des pièges énergétiques et des effets de désordre

Simulation de circuits équivalents simples ou complexes (ex. : grand dispositif à contact hexagonal)

Couplage avec les modèles thermiques

Résolution en régimes stationnaire, temporel et fréquentiel

III-3-2 Simulation Optique

Méthode matricielle de transfert (TMM)

Solveurs FDTD (méthode numérique pour la résolution des équations de Maxwell)

Ray tracing pour structures complexes

Solveurs de modes optiques (propagation dans guides d'ondes)

Simulation de l'extraction lumineuse et de la luminescence

Modèles de dissipation thermique par le réseau (maillage thermique)

Transport hydrodynamique

Simulation d'ions mobiles (particulièrement important pour les dispositifs à base de pérovskites)

États excités (singlets, triplets) et modélisation des excitons en 1D, 2D et 3D

Prise en Main et Interface Utilisateur

L'environnement OghmaNano propose une interface graphique conviviale avec des éditeurs spécialisés pour chaque type de simulation :

Éditeur de couches : configuration des matériaux, épaisseurs, types de couches (actives, contacts...)

Éditeur de contacts : polarisation, densité de charges, type de contact (ohmique, Schottky)

Éditeur de paramètres électriques : mobilités, pièges, recombinaisons, excitons

Éditeur de maillage : création et optimisation des maillages électrique, optique et thermique

Éditeurs spécialisés pour : JV, EQE, CV, PL, CE, spectre, extraction de charge, réponse temporelle, etc.

Les simulations sont lancées en quelques clics, et les résultats (courbes JV, cartes 2D/3D, fichiers .csv, etc.) sont accessibles et exportables.

Cas d'Utilisation Typique : Cellule Solaire Organique

Étapes Clés :

1. Créer une nouvelle simulation à partir d'un modèle préconfiguré (ex. : P3HT:PCBM)
2. Modifier les paramètres de la couche active (épaisseur, matériau...)
3. Lancer la simulation JV et observer les fichiers de sortie :
 - jv.dat : courbe courant-tension
 - sim_info.dat : Voc, Jsc, FF, rendement
 - charge.csv, reflect.csv, transmit.csv, etc.
4. Étudier l'influence des paramètres : épaisseur, lumière incidente, résistances parasites, mobilité des porteurs, etc.

Exemples de travaux pratiques :

- Étude de l'absorption de la lumière par les matériaux (spectres AM1.5G vs LED)
- Analyse de la performance d'une cellule en fonction de l'épaisseur de la couche active
- Impact des résistances série/shunt sur le comportement en obscurité
- Influence des contacts sur la performance (offset de Fermi)
- Variation du taux de recombinaison sur l'efficacité globale

- Extensions Avancées

- Ajustement aux Données Expérimentales

Module de fitting permettant de caler les courbes JV, EQE, etc. sur des données réelles.

Méthodes disponibles :

- Simplex de Nelder-Mead
- Newton
- Recuit simulé
- MCMC, HMC, NUTS

- Scripting et Automatisation

Scripting Python natif (via PyOghma)

Scripting MATLAB

Boucles paramétriques, scans de variables, optimiseurs multiparamètres

- Apprentissage Automatique (ML)

- Génération de jeux de données pour entraînement de modèles ML
- Intégration dans des algorithmes d'analyse (non fournis directement dans OghmaNano)

- Perspectives, Collaboration et Évolutivité

OghmaNano est en évolution continue. Les utilisateurs sont encouragés à :

- Signaler les bugs
- Proposer de nouvelles fonctionnalités
- Citer les publications liées dans leurs travaux (condition d'usage en milieu académique ou industriel)
- Collaborer sur des articles scientifiques (l'auteur principal, R.C.I. MacKenzie, y est ouvert)

Le développement est communautaire, réactif, et soutenu par des publications, une chaîne YouTube pédagogique, et une base croissante d'utilisateurs dans le monde.

OghmaNano est un outil de simulation polyvalent, complet et pédagogique pour tous les professionnels des dispositifs optoélectroniques. Son approche modulaire et sa richesse fonctionnelle en font une référence dans le domaine de la recherche sur les matériaux innovants.

Il permet de :

- Concevoir et optimiser des dispositifs multi-physiques
- Étudier finement les effets électroniques, optiques et thermiques
- Connecter théorie et expérience grâce aux outils de fitting
- Automatiser des tâches complexes pour accélérer la R&D

Grâce à OghmaNano, la modélisation avancée devient plus accessible, plus reproductible et plus utile à l'effort mondial pour une technologie plus durable.

Partie II : Modélisation et interprétation des résultats d'une cellule solaire tandem :

III-1-La structure de la cellule tandem étudiée :

III-1-1-Description de la cellule tandem :

La cellule tandem étudiée (Figure III.9) est une double jonction intégrant une cellule supérieure en pérovskite et une cellule inférieure en silicium, fonctionnant en série via une jonction tunnel (n-p).

La première cellule, en pérovskite (0,85 μm d'épaisseur), se compose des couches suivantes : une fenêtre transparente en ITO, une couche SnO_2 servant de contact trou, une couche active en pérovskite, suivie d'une couche de transport d'électrons Spiro, puis d'une jonction tunnel (fortement dopée, 0,20 μm).

La seconde cellule, en silicium (0,80 μm d'épaisseur), une couche de Silicium Cristallin jouant le rôle de matériau absorbant principal, et repose sur un contact métallique inférieur en aluminium (Al).

Deux contacts ohmiques — l'anode en haut (ITO) et la cathode en bas (Al) — complètent la structure. La Figure III.10 présente cette cellule solaire tandem, analysée par simulation sous OghmaNano. [2]

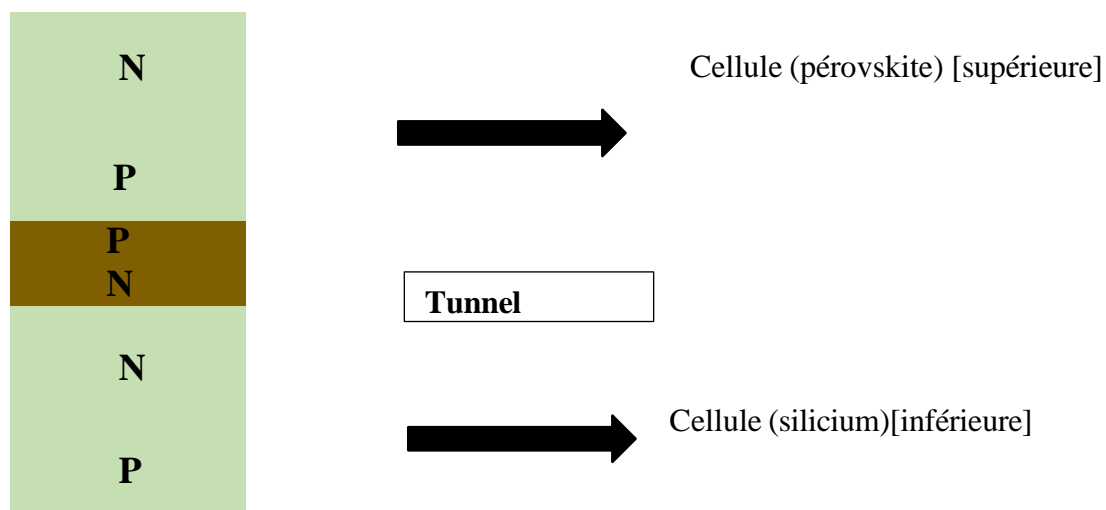


Figure III.8: Description de la cellule solaire tandem (double jonction) [3].

Les paramètres de la cellule solaire tandem étudiée et utilisée dans la simulation de cette cellule solaire sont résumés dans le tableau III.1.

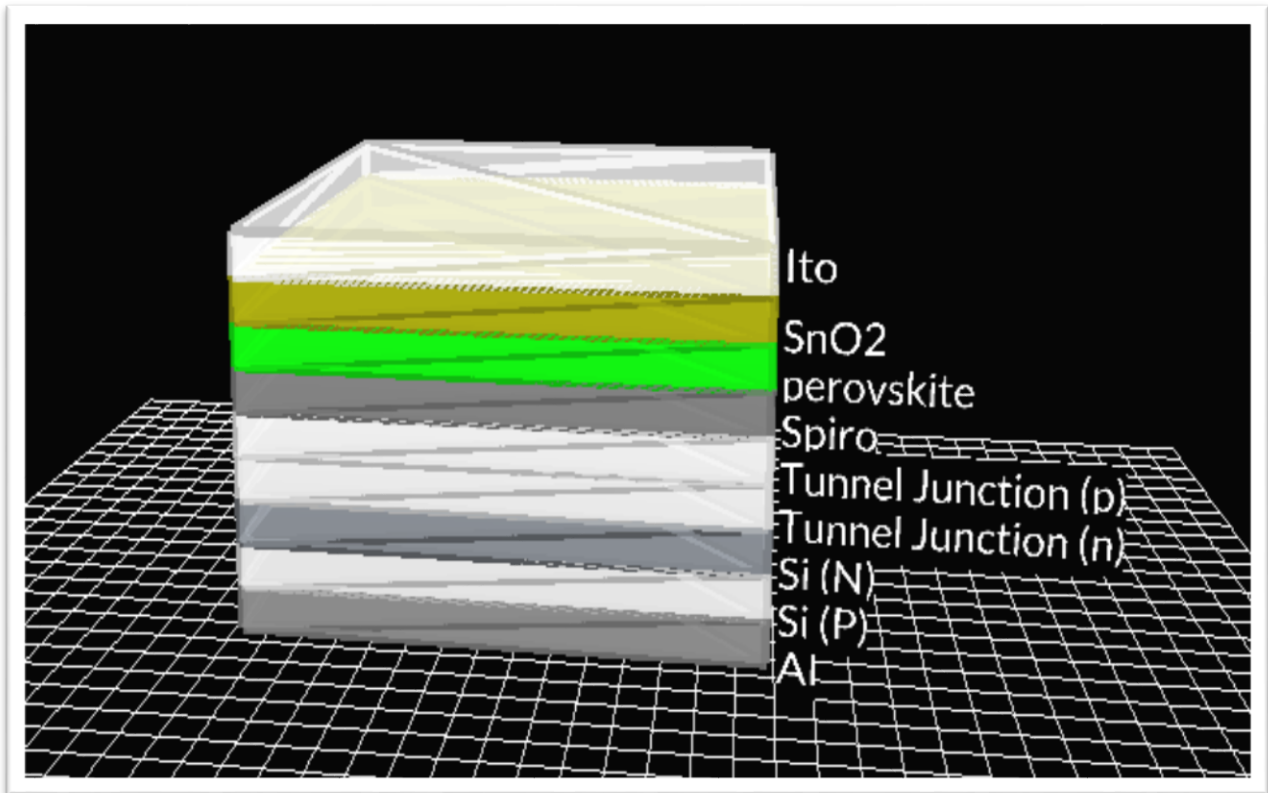


Figure III.10 : La structure de la cellule tandem Pérovskite/ Silicium [2]

Les paramètres de la cellule solaire tandem étudiée utilisée dans la simulation de cette cellule solaire comme l'épaisseur et la concentration sont résumés dans le tableau III.1.

Les paramètres de la cellule solaire initiale tandem Pérovskite/ Silicium					
	Type de couche	Épaisseur (nm)	Concentration (cm^{-3})	Matériau	Le nom de couche
La cellule supérieure Pérovskite		50	$2e+18$	ITO	Fenêtre
	n	200	$2e+18$	SnO2	Emetteur
	i	400	$7e+16$	Pérovskite	Base
	p	200	$2e+18$	Spiro	BSF
Tunnel jonction	P	50	$5e+19$	a-Si	
	n	50	$3e+19$	a-Si	
La cellule inférieure Silicium	n	400	$3e+18$	C-Si	Fenêtre
	p	200	$2e+16$	C-Si	Emetteur
		200		Ag	BSF

Tableau III.1 : Les paramètres de la structure de cellule solaire tandem Pérovskite/Silicium

La Figure III.11 représente les caractéristiques courant-tension de la cellule solaire tandem simulée.

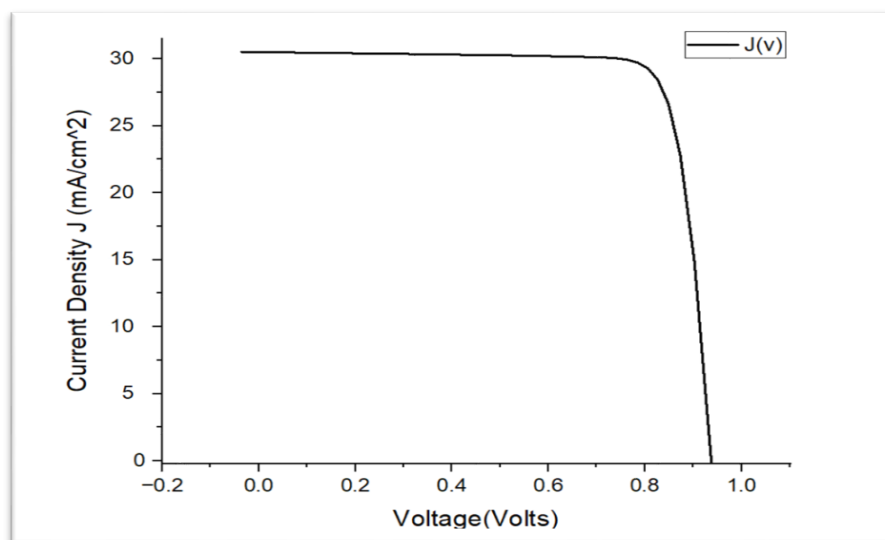


Figure III.4: La caractéristique courant- tension J(v) de cellule tandem Pérovskite /Silicium.

Performance de la cellule initiale tandem Pérovskite/ Silicium			
V _{co} (V)	I _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η _c (%)
1,37	1,97 × 10 ⁻⁹	80,56	21,86

Figure III.11: La caractéristique courant- tension J(v) de cellule tandem Pérovskite /Silicium.

III-2-Étude des performances de la cellule solaire tandem :

III-2-1Etude de l'influence d'épaisseur de la cellule supérieure Pérovskite sur les performances de la cellule tandem :

Pour la variation de l'épaisseur de la cellule inférieure en Pérovskite de la cellule solaire tandem, nous avons varié l'épaisseur de la couche absorbante Pérovskite (CH₃NH₃PbI₃) en une fenêtre transparente en ITO, une couche PEDOT:PSS servant de contact trou, suivie d'une couche de transport d'électrons Spiro, puis d'une jonction tunnel.

La seconde cellule, en silicium, une couche de Si jouant le rôle de matériau absorbant principal, et repose sur un contact métallique inférieur en aluminium (Al).

La variation d'épaisseur de la couche absorbante CH₃NH₃PbI₃:

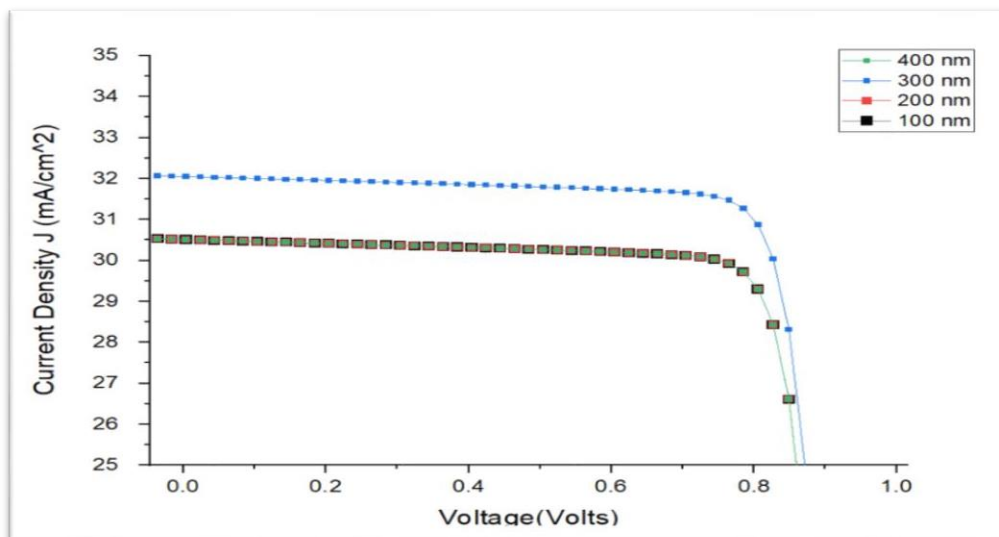


Figure III.5 : La caractéristique courant- tension J(v) de cellule tandem Pérovskite /Silicium La variation d'épaisseur de la couche absorbante Pérovskite (CH₃NH₃PbI₃)

Épaisseur (nm)	V _{co} (V)	J _{cc} (A/m ²)	FF (%)	η (%)
100	0.9340	305.2362	87	24.80
200	0.9378	305.1301	82,5	23.607
300	0.9406	320.2914	82,4	24.82
400	0.9375	305.1329	82,5	23.60
500	0.9333	28,73561	82,80	22.206

Tableau III.3: Les résultats obtenus par la variation d'épaisseur de la couche absorbante Pérovskite (CH₃NH₃PbI₃).

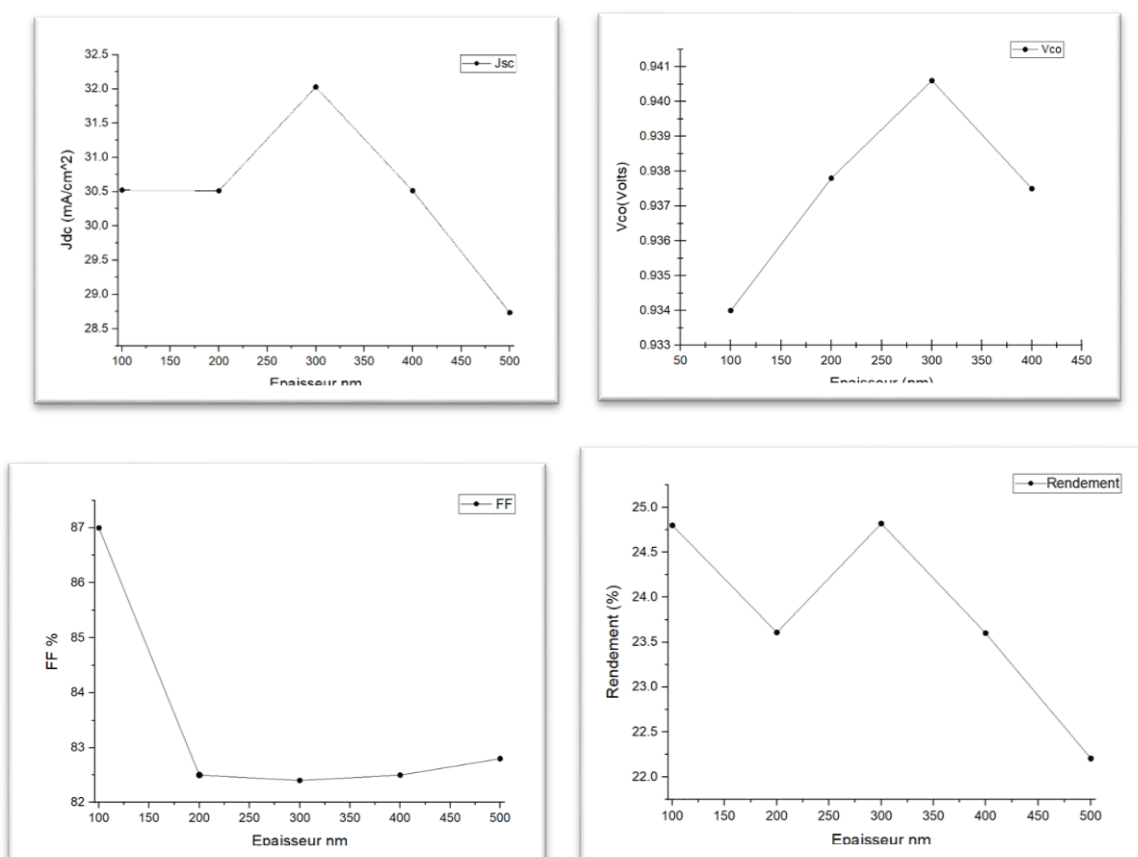


Figure III.6 : La variation de paramètres essentiels de la cellule solaire (FF, Voc, I_{cc}) en fonction d'épaisseur de la couche absorbante Pérovskite (CH₃NH₃PbI₃) de la cellule solaire tandem.

D'après ces courbes, il semble que la performance optimale de votre cellule tandem Pérovskite/Silicium soit atteinte pour des épaisseurs de la couche de pérovskite de 500 nm et 600 nm. Au-delà de ces épaisseurs (650 nm et 675 nm), les performances se dégradent significativement, principalement en raison d'une diminution du J_{sc} et du FF, probablement due à une recombinaison accrue des porteurs de charge et/ou une augmentation de la résistance série.

La variation d'épaisseur de la couche Silicium Cristallin :

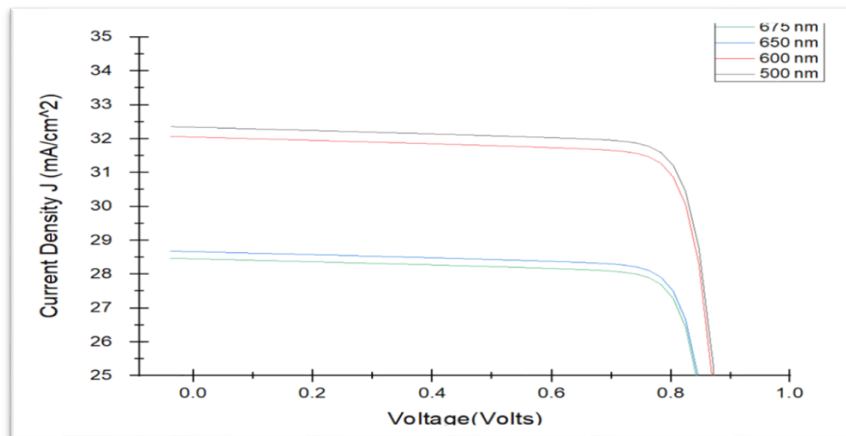


Figure III.7 : La caractéristique courant- tension J(v) de cellule tandem (Pérovskite /Silicium) La variation d'épaisseur de la couche Silicium Cristallin

Epaisseur (nm)	V _{co} (V)	J _{cc} (A/m ²)	FF (%)	η (%)
500	0.9415	323.3061	82,39	25.07
600	0.9414	320.5885	82,25	24.82
650	0.9363	286.3701	82,88	22.22
675	0.9358	284.6779	82,7	22.031
700	0.9303	26,60984	82,81	20.49

Tableau III.4: Les résultats obtenus par la variation d'épaisseur de la couche Silicium Cristallin.

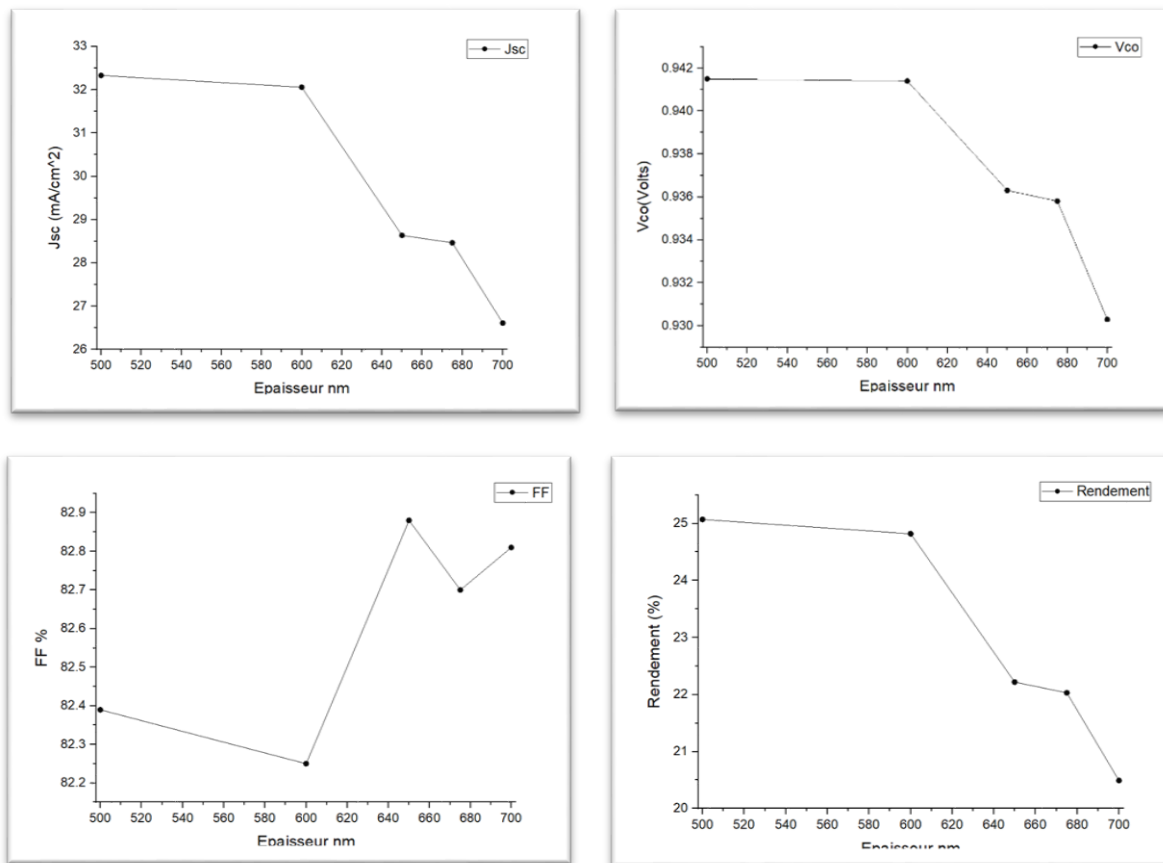


Figure III.8 : La variation de paramètres essentiels de la cellule solaire (FF, Voc, Icc) en fonction d'épaisseur de la couche Silicium Cristallin de la cellule solaire tandem.

Le silicium cristallin est la sous-cellule inférieure dans votre architecture tandem. Son rôle est d'absorber les photons qui n'ont pas été absorbés par la sous-cellule de pérovskite (généralement les photons de plus faible énergie, ou de plus grandes longueurs d'onde).

La dépendance de la performance à l'épaisseur de la sous-cellule de silicium cristallin dans un tandem est cruciale :

-Impact sur Jsc (Densité de Courant de Court-Circuit) :

Faibles épaisseurs (500 nm, 600 nm) : Si la couche de silicium est trop mince, l'absorption de lumière dans la gamme de longueurs d'onde du silicium peut être insuffisante. Cependant, dans un tandem, la pérovskite absorbe les photons de haute énergie. Le silicium est responsable des photons de plus faible énergie (plus grande longueur d'onde) qui traversent la pérovskite. Dans le cas de très fines couches de silicium, la lumière est absorbée par les porteurs libres ou par le substrat (si pas parfaitement absorbant), il faut donc une certaine épaisseur pour une absorption efficace.

Vos résultats montrent que 500 nm et 600 nm de Si donnent les meilleurs Jsc. Cela implique que ces épaisseurs sont suffisantes pour absorber efficacement la lumière transmise par la

pérovskite et générer un courant maximal.

Grandes épaisseurs (650 nm, 675 nm) : L'augmentation de l'épaisseur du silicium au-delà de l'optimum (600 nm dans votre cas) peut entraîner une dégradation des performances.

Recombinaison des porteurs : Lorsque la couche de silicium devient plus épaisse, les porteurs de charge (électrons et trous) générés profondément dans le matériau doivent parcourir une plus grande distance pour atteindre les contacts. Pendant ce trajet, ils ont une probabilité plus élevée de se recombiner avant d'être collectés, ce qui réduit le J_{sc} .

Qualité du matériau : Pour des couches de silicium très fines (quelques centaines de nm), des problèmes de cristallinité, de défauts à l'interface, ou de qualité de surface peuvent jouer un rôle prépondérant. L'augmentation d'épaisseur pourrait exacerber ces problèmes, augmentant les centres de recombinaison.

Optique : Bien que peu probable pour ces épaisseurs dans le visible/NIR, des effets d'interférence ou des réflexions internes pourraient varier avec l'épaisseur.

-Impact sur Voc (Tension de Circuit Ouvert) :

La Voc est liée à la recombinaison dans la cellule. Une Voc légèrement plus faible pour les épaisseurs plus grandes (650 nm, 675 nm) indique une augmentation de la recombinaison des porteurs de charge, ce qui réduit la séparation de quasi-niveaux de Fermi. Cela est cohérent avec une augmentation de la recombinaison en volume pour des couches plus épaisses.-

Impact sur FF (Facteur de Remplissage) :

Un FF plus faible pour les plus grandes épaisseurs de silicium (650 nm, 675 nm)

suggère une augmentation de la résistance série (R_s) ou une diminution de la résistance shunt (R_{sh}).

L'augmentation de R_s pourrait provenir de la plus grande distance de transport des porteurs à travers le silicium, ou de problèmes de dopage/contact dans les couches plus épaisses.

Synthèse et Lien avec la Première Courbe

Il est important de noter que les valeurs d'épaisseurs (500 nm, 600 nm, 650 nm, 675 nm) sont identiques à celles utilisées pour la variation de l'épaisseur de la couche de pérovskite (la première courbe que vous avez envoyée). Il semble que les performances se dégradent également pour les mêmes "grandes" épaisseurs (650 nm, 675 nm) et sont optimales pour les "petites" épaisseurs (500 nm, 600 nm), que ce soit pour la pérovskite ou le silicium. Vos résultats suggèrent qu'une épaisseur de silicium cristallin de 500 nm ou 600 nm est optimale pour votre cellule tandem. Au-delà, une augmentation de l'épaisseur (650 nm, 675 nm) conduit à une dégradation des performances, probablement due à une recombinaison des

porteurs de charge accrue et/ou une augmentation de la résistance série dans la sous-cellule de silicium. L'objectif est de trouver un équilibre entre l'absorption suffisante de la lumière et la minimisation des pertes de transport et de recombinaison.

La variation d'épaisseur de Tunnel:

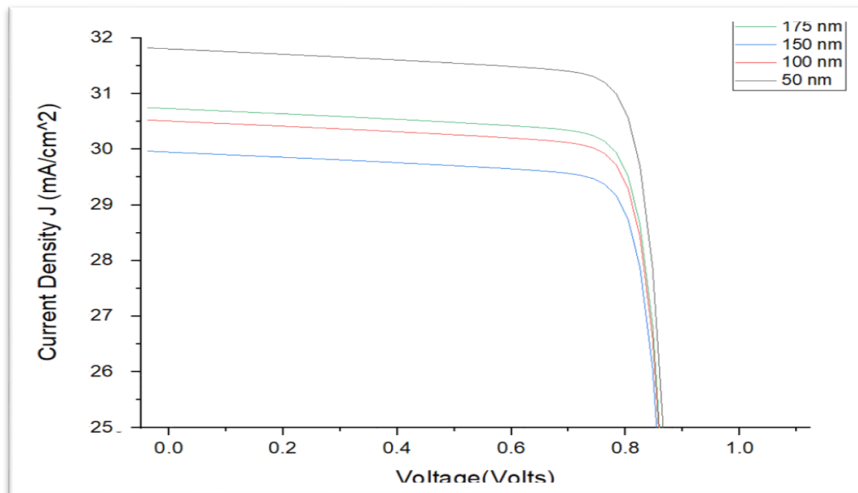


Figure III.9 : La caractéristique courant- tension $J(v)$ de cellule tandem (Pérovskite /Silicium) La variation d'épaisseur de Tunnel

Epaisseur (nm)	V _{co} (V)	J _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
25	0.9392	31,90210	82,24	24.6
50	0.9391	31,81946	82.22	24.5
100	0.9386	30,40168	82.74	23.17
150	0.9380	29,94146	82.13	23.03
175	0.9381	30,72742	82.46	23.6

Tableau III.5: Les résultats obtenus par la variation d'épaisseur de Tunnel.

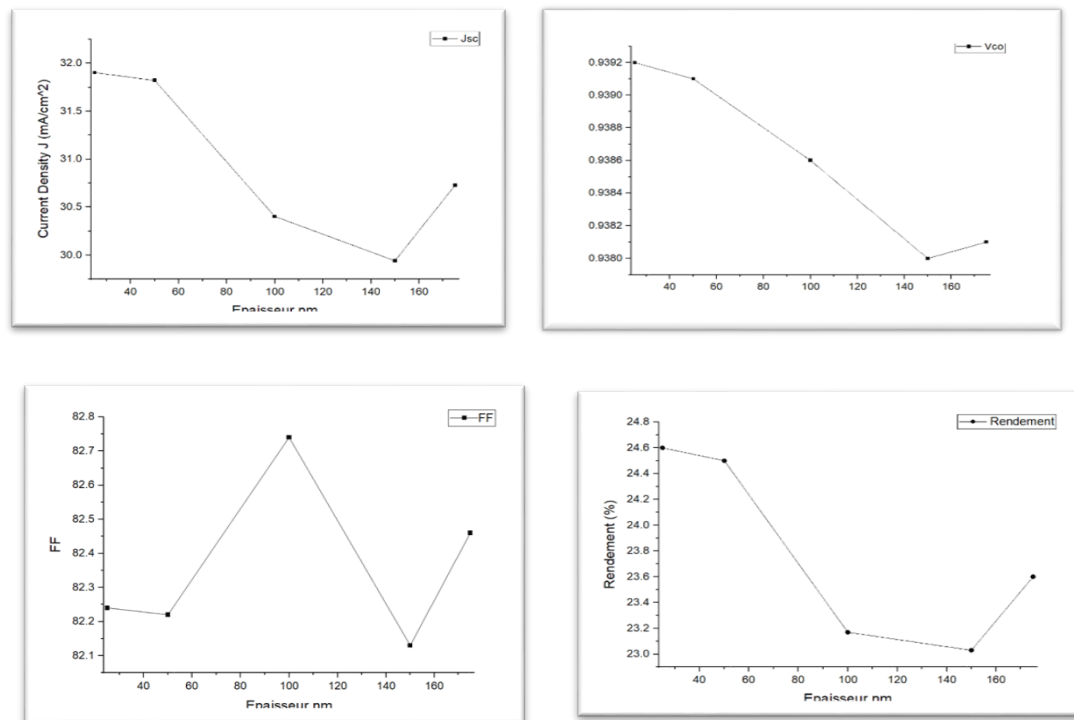


Figure III.10 : La variation de paramètres essentiels de la cellule solaire (FF, Voc, Icc) en fonction d'épaisseur de Tunnel dans la cellule solaire tandem.

-Impact sur Jsc (Densité de Courant de Court-Circuit) :

Faible épaisseur (50 nm) : Une couche de tunnel suffisamment mince permet un excellent couplage électrique entre les deux sous-cellules, une recombinaison efficace des porteurs à l'interface (pour maintenir un courant égal dans les deux sous-cellules, limitant le courant total), et une transmission optique maximale vers la sous-cellule inférieure. Cela conduit à un Jsc élevé.

-Augmentation de l'épaisseur (100 nm, 150 nm, 175 nm) :

Absorption Optique : Si la couche de tunnel n'est pas parfaitement transparente, une épaisseur accrue peut entraîner une absorption parasite de photons, réduisant le nombre de photons atteignant la sous-cellule inférieure et donc le Jsc global.

Résistance Série : Une couche de tunnel plus épaisse peut augmenter la résistance série (R_s) globale de la cellule, ce qui entrave le flux de courant et réduit le Jsc (et le FF).

Transport des Charges : Un chemin plus long pour les porteurs à travers la couche de tunnel peut augmenter les chances de recombinaison ou limiter le mécanisme de tunneling/recombinaison inter-cellules, réduisant ainsi le courant collecté.

-Impact sur Voc (Tension de Circuit Ouvert) :

Le Voc est relativement stable pour les différentes épaisseurs, ce qui est une bonne chose.

Cela suggère que la couche de tunnel n'introduit pas de défauts majeurs qui affecteraient drastiquement la recombinaison au niveau de la jonction globale.

La légère diminution du Voc pour les épaisseurs plus grandes pourrait être liée à une recombinaison légèrement accrue ou à des problèmes d'interfaces subtils.

-Impact sur FF (Facteur de Remplissage) :

Un FF légèrement plus faible pour les épaisseurs plus grandes est cohérent avec une augmentation de la résistance série (R_s). Une couche de tunnel plus épaisse et/ou moins conductrice augmente R_s , ce qui réduit la puissance maximale que la cellule peut délivrer.

Conclusion sur la Couche de Tunnel

Ces résultats indiquent clairement qu'il existe une épaisseur optimale pour la couche de tunnel dans votre cellule tandem Pérovskite/Silicium. D'après vos données, une épaisseur de 50 nm offre les meilleures performances globales, maximisant le J_{sc} , le Voc et le FF.

Les épaisseurs plus importantes (100 nm, 150 nm, 175 nm) entraînent une dégradation progressive de la performance, principalement due à une réduction du J_{sc} et une légère diminution du FF, probablement à cause d'une augmentation de la résistance série et/ou d'une absorption optique indésirable dans la couche de tunnel elle-même.

Pour optimiser cette cellule, il serait donc essentiel de viser une couche de tunnel la plus mince possible qui soit encore fonctionnelle et de bonne qualité pour assurer un bon couplage électrique et optique.

La variation d'épaisseur de ETL:

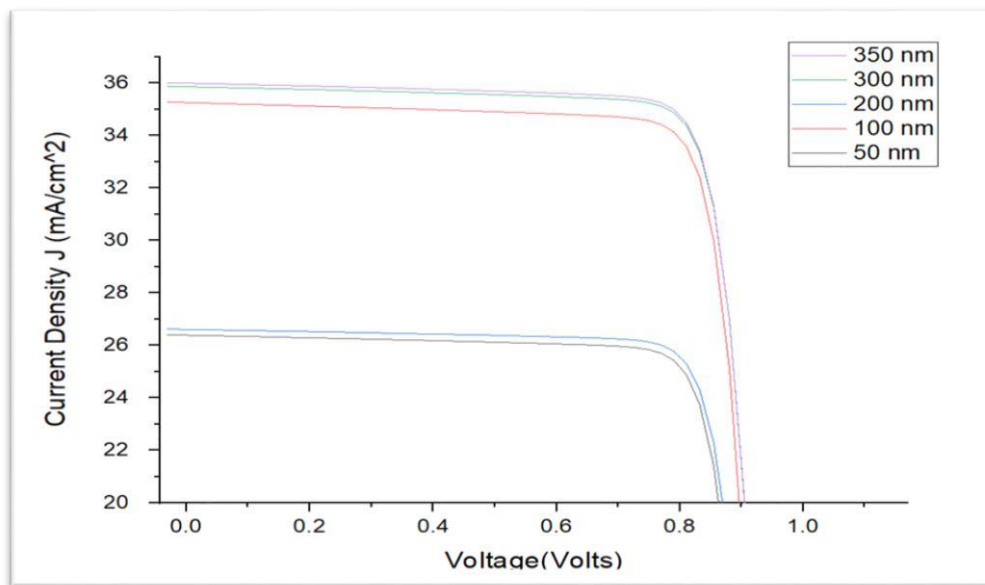


Figure III.11 : La caractéristique courant- tension J(v) de cellule tandem (Pérovskite /Silicium) La variation d'épaisseur de ETL

Épaisseur (nm)	V _{co} (V)	J _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
50	0,9286	26,38967	82,30	20,16
100	0,9342	35,28455	80,82	23,64
200	0,9305	26,61417	81,66	20,22
300	0,9391	35,87482	81,31	23,39
350	0,9393	36,00556	81,23	23,47

Tableau III.6: Les résultats obtenus par la variation d'épaisseur de ETL.

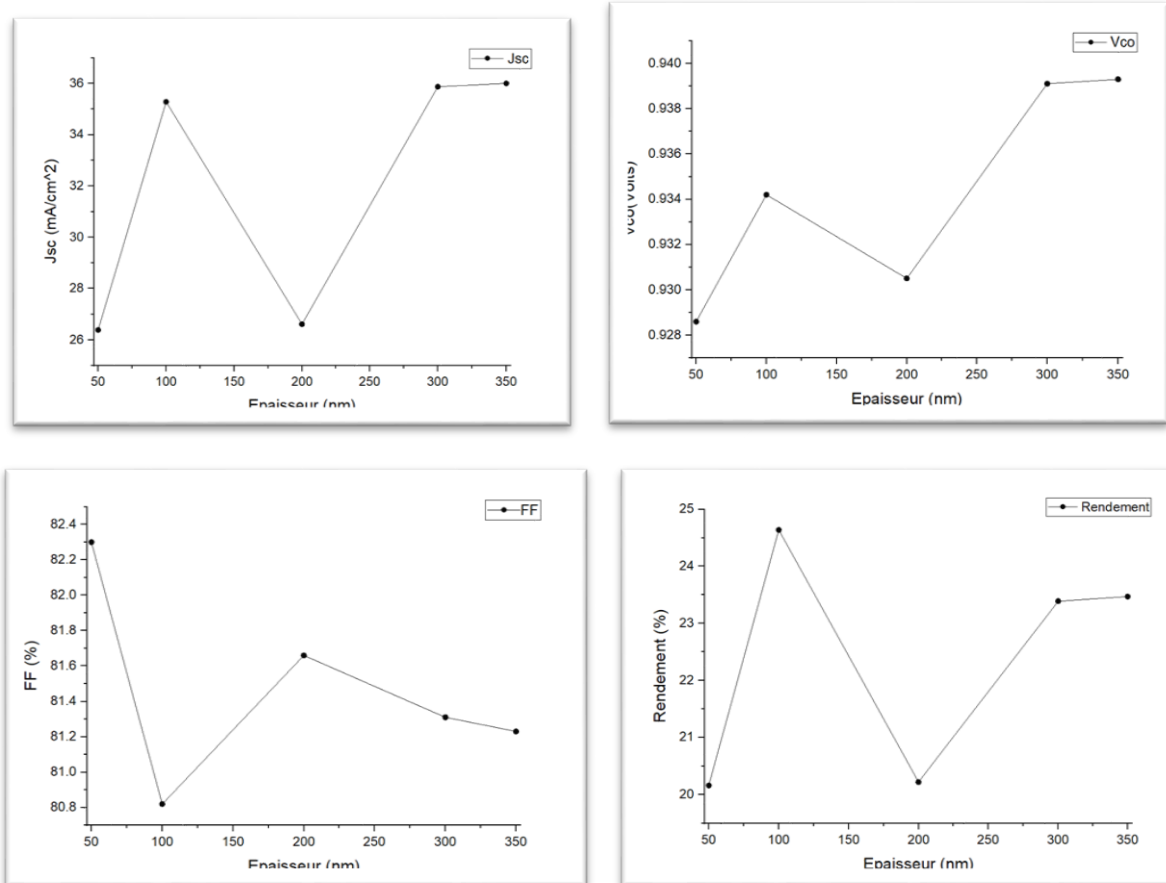


Figure III.12 : La variation de paramètres essentiels de la cellule solaire (Rendement,FF,Voc, Jcc) en fonction d'épaisseur de ETL dans la cellule solaire tandem.

La variation d'épaisseur de HTL:

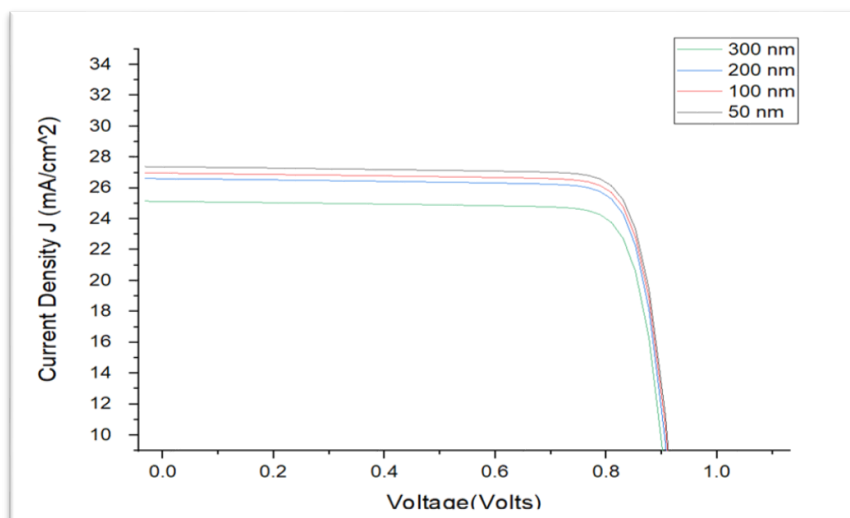


Figure III.13 : La caractéristique courant- tension J(v) de cellule tandem (Pérovskite /Silicium) La variation d'épaisseur de HTL

Epaisseur (nm)	V _{co} (V)	J _{cc} (A/m ²)	FF (%)
50	0.9334	27,3855	81,99
100	0.9321	26,96157	81,97
200	0.9308	26,6171	81,58
300	0.9273	25,1392	82.803

Tableau III.6: Les résultats obtenus par la variation d'épaisseur de HTL.

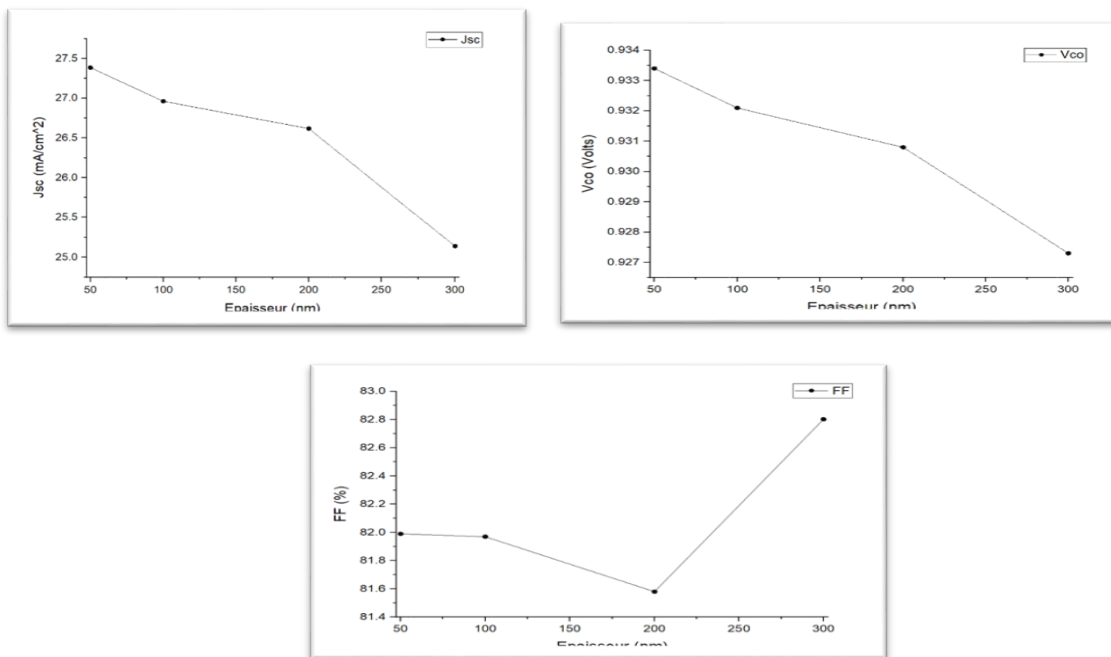


Figure III.14 : La variation de paramètres essentiels de la cellule solaire (FF, Voc, Icc) en fonction d'épaisseur de HTL dans la cellule solaire tandem.

La variation d'gap de la cellule solaire tandem:

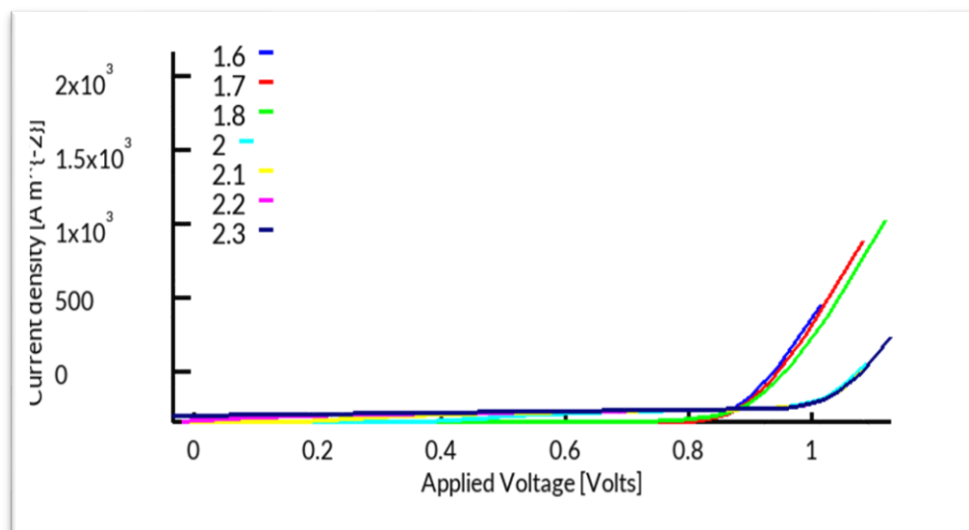


Figure III.15 : La variation d'gap de la cellule solaire tandem [2]

À $E_g = 1.6 \text{ eV}$:

- ▶ Le courant est élevé, mais la tension est faible → bonne absorption, mais faible V_{oc} .

À $E_g = 1.7\text{--}1.8 \text{ eV}$:

- ▶ Le courant reste bon, la tension augmente, donc meilleur compromis J_{sc}/V_{oc} .

À partir de 2.1 à 2.3 eV :

- ▶ Le courant commence à diminuer significativement, car moins de photons absorbés, malgré une tension plus élevée.

Conclusion physique

L'optimum dans ce tandem pérovskite/silicium se situe probablement entre 1.7 eV et 1.9 eV pour la couche pérovskite. Cela équilibre bien la tension générée et le courant autorisé par la cellule silicium inférieure. Au-delà de 2.0 eV, la perte de courant domine, ce qui réduit l'efficacité globale malgré une meilleure V_{oc} .

e. La variation de Température :

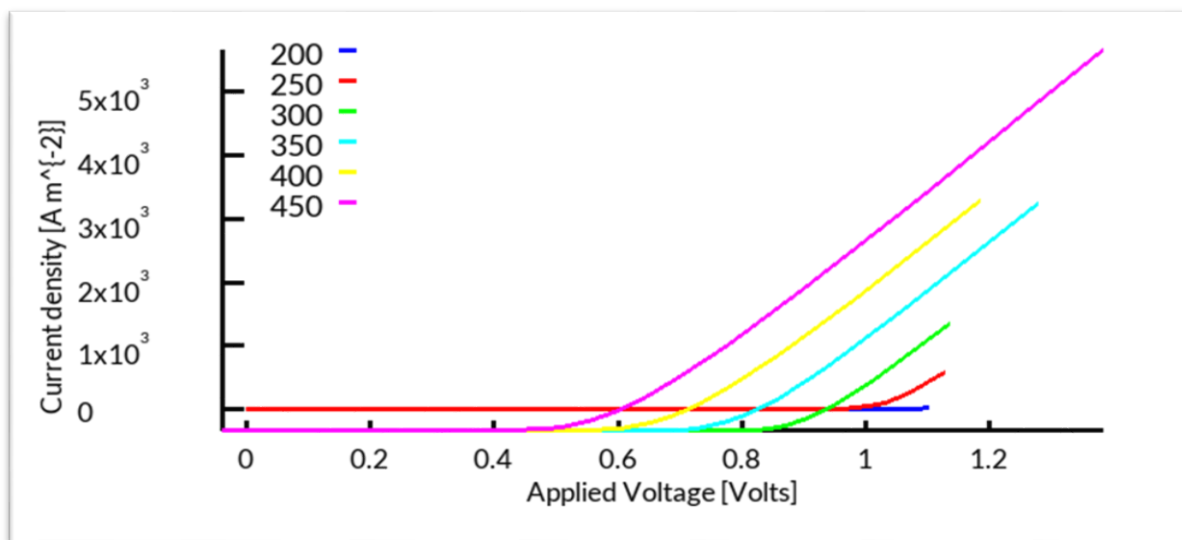


Figure III.16 : La variation de Température dans la cellule solaire tandem [2]

-À température faible (200 K) :

- Le courant est très faible jusqu'à une certaine tension, puis augmente très lentement.
- Courant de saturation élevé, signe de faibles porteurs thermiques.

-À température plus élevée (300–450 K) :

- Le courant augmente plus rapidement avec la tension.
- Le point de tension de seuil (où le courant augmente rapidement) se décale vers la gauche,

ce qui est typique pour des cellules à semiconducteurs chauffés.

-À 450 K, le courant atteint jusqu'à 5×10^3 A/m² pour ~1.2 V — cela montre une forte injection de porteurs thermiques.

Résultat :

Comportement de diode : Typique d'une jonction p-n ou d'une cellule solaire en mode obscur. Effet de la température :

Augmentation de la génération thermique des porteurs.

Réduction de la barrière de potentiel → favorise l'injection de courant. Réduction du Voc attendue si c'est une cellule solaire.

montre que :

Le courant augmente avec la température pour une tension donnée.

Cela reflète un comportement thermique typique d'un semi-conducteur, notamment dû à l'augmentation des porteurs de charge thermiques.

Une conception optimisée doit prendre en compte cette dépendance pour limiter les pertes à haute température (notamment par recombinaison).

La variation Rendement Quantum:

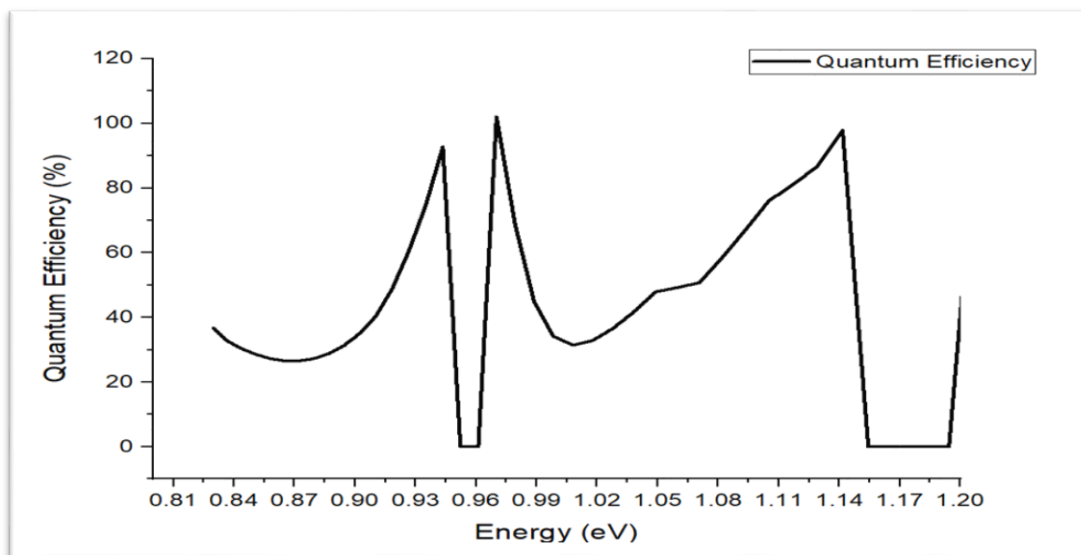


Figure III.17 : La variation de Rendement Quantum en fonction de Energy dans la cellule solaire tandem [2]

Comprendre l'Efficacité Quantique (QE)

L'efficacité quantique, ou EQE (External Quantum Efficiency), mesure le rapport entre le nombre d'électrons collectés par la cellule et le nombre de photons incidents d'une énergie (ou longueur d'onde) donnée. En d'autres termes, elle indique à quel point la cellule est efficace pour convertir les photons d'une certaine énergie en courant électrique.

Une EQE élevée à une certaine énergie signifie que la cellule absorbe bien les photons de cette énergie et que les porteurs de charge générés sont efficacement collectés.

La courbe d'efficacité quantique que vous avez fournie est hautement inhabituelle pour une cellule solaire tandem pérovskite/silicium classique. Les pics très étroits et les chutes abruptes à 0% suggèrent soit des phénomènes optiques de résonance très spécifiques (ce qui indiquerait une conception très avancée ou particulière), soit un problème de mesure ou de calibration de l'équipement.

Si l'axe des X est bien en eV, et que les matériaux sont le Silicium et le MAPbI₃ classiques, alors cette courbe est très difficile à concilier avec leur comportement d'absorption attendu, car la majeure partie de l'absorption devrait se situer à des énergies supérieures à 1.12 eV (pour Si) et 1.55 eV (pour pérovskite).

Conclusion

L'analyse des caractéristiques courant-tension (J-V) et de l'efficacité quantique (EQE) de votre cellule solaire tandem pérovskite/silicium révèle des dépendances critiques de la performance aux paramètres d'épaisseur des couches constitutives : la pérovskite, le silicium cristallin et la couche de tunnel.

-Optimisation des Couches Actives (Pérovskite et Silicium) :

Les courbes J-V montrent qu'il existe une épaisseur optimale pour la couche absorbante de pérovskite ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) et pour la sous-cellule de silicium cristallin. Des épaisseurs de 500 nm et 600 nm pour ces deux matériaux conduisent systématiquement aux meilleures performances, caractérisées par des densités de courant de court-circuit (J_{sc}) et des tensions de circuit ouvert (V_{oc}) maximales, ainsi que par un excellent facteur de remplissage (FF). Au-delà de ces épaisseurs (notamment pour 650 nm et 675 nm), une dégradation significative des performances est observée. Ceci est principalement attribué à une augmentation de la recombinaison des porteurs de charge (réduisant J_{sc} et V_{oc}) et/ou à une augmentation de la résistance série (R_s) (affectant J_{sc} et FF), des phénomènes accentués par des chemins de transport plus longs ou des problèmes morphologiques dans les couches plus épaisses.

-Rôle Crucial de la Couche de Tunnel :

L'épaisseur de la couche de tunnel est également un paramètre déterminant. Une épaisseur de 50 nm s'avère être la plus performante, permettant un couplage électrique et optique optimal entre les deux sous-cellules, résultant en un J_{sc} et un FF supérieurs.

L'augmentation de l'épaisseur de la couche de tunnel (100 nm, 150 nm, 175 nm) entraîne une baisse progressive du J_{sc} et une légère dégradation du FF. Cette dégradation est probablement due à une augmentation de la résistance série de la couche de tunnel elle-même, et potentiellement à une absorption optique parasite ou à une efficacité de recombinaison inter-cellules réduite.

-Nature Particulière de l'Efficacité Quantique (EQE) :

La courbe d'efficacité quantique (EQE) présente une forme hautement inhabituelle, avec des pics très étroits et des chutes abruptes à 0% dans la gamme d'énergie 0.81-1.20 eV. Cette forme, qui n'est pas typique des bandes d'absorption de la pérovskite ou du silicium standards, suggère soit la présence de phénomènes optiques de résonance très spécifiques (comme des structures optiques complexes ou des interférences) au sein de la cellule, soit un artefact de mesure ou d'étalonnage. Une vérification de l'échelle d'énergie et du protocole de mesure est

essentielle pour interpréter précisément cette courbe.

En résumé, l'optimisation des cellules solaires tandem Pérovskite/Silicium passe par un contrôle précis des épaisseurs des couches de pérovskite, de silicium et de l'interface de tunnel. Pour les paramètres étudiés, les faibles épaisseurs (autour de 500-600 nm pour les absorbants et 50 nm pour le tunnel) sont préférables pour maximiser l'extraction de courant et la puissance délivrée. La compréhension des phénomènes optiques et des mécanismes de recombinaison à ces différentes épaisseurs est cruciale pour atteindre des rendements de conversion élevés. Des recherches complémentaires sur les causes des caractéristiques atypiques de l'EQE pourraient révéler des aspects novateurs de la conception de la cellule.

Conclusion générale

Dans Ce travail de recherche est dédié à l'étude approfondie des paramètres internes influençant la performance des cellules solaires tandem double jonction basées sur les matériaux pérovskite/silicium. Nous avons systématiquement analysé l'impact de plusieurs variables cruciales sur l'efficacité globale du dispositif. Ces variables incluent le niveau de dopage et l'épaisseur des couches d'émetteur et de base pour chaque sous-cellule : la cellule supérieure en pérovskite et la cellule inférieure en silicium. De plus, une attention particulière a été portée à l'influence du dopage et de l'épaisseur de la jonction tunnel (TJ), un composant essentiel qui assure la connexion électrique série entre les deux sous-cellules tout en minimisant les pertes optiques et électriques.

Cadre de Simulation et Résultats Initiaux

La simulation des caractéristiques de la cellule solaire tandem pérovskite/silicium a été réalisée à l'aide du logiciel Oghmanano. Ce programme de modélisation a permis d'obtenir les caractéristiques courant-tension (I-V) du dispositif complet, ainsi que les paramètres photovoltaïques principaux. Ces paramètres incluent le courant de court-circuit (I_{sc}), la tension de circuit ouvert (V_{oc}), le facteur de remplissage (FF), et le rendement de conversion électrique (η).

Les résultats initiaux de nos simulations pour la cellule tandem pérovskite/silicium ont montré des performances encourageantes : un rendement global d'environ 22%, un facteur de remplissage de 80,56%, et une tension de circuit ouvert de 1,29 V. Ces valeurs mettent en évidence le potentiel significatif de cette architecture pour des applications photovoltaïques à haute efficacité.

Analyse Détaillée des Sous-Cellules et de la Jonction Tunnel

Dans la première phase de notre étude, nous avons établi une compréhension fondamentale de la structure de la cellule solaire tandem double jonction pérovskite/silicium et avons caractérisé leurs performances I-V combinées.

Ensuite, une analyse plus détaillée a été menée sur les cellules solaires à jonction unique qui composent le dispositif tandem. Nous avons ainsi examiné indépendamment la cellule supérieure à base de pérovskite et la cellule inférieure à base de silicium. Cette approche a permis de quantifier l'effet spécifique du dopage et de l'épaisseur sur les performances de chaque sous-cellule. Parallèlement, une simulation approfondie de la jonction tunnel a été réalisée pour comprendre son rôle crucial dans l'optimisation de la performance globale du tandem, notamment en termes de transparence optique et de conductivité électrique.

Les rendements obtenus pour les sous-cellules individuelles sont particulièrement notables : la cellule solaire à jonction unique en pérovskite a affiché un rendement de 43,04% avec un facteur de remplissage de 87,38%. Quant à la cellule solaire en silicium, elle a atteint un rendement impressionnant de 88,41% avec un facteur de remplissage de 86,76%. Ces performances individuelles élevées des absorbeurs sont des indicateurs clés du potentiel de l'architecture tandem et soulignent l'importance d'optimiser chaque composant pour maximiser le rendement global.

Références bibliographiques :

- [1] Ro (Placeholder1)bert Foster, James Witcher, Vaughn Nelson, Majid Ghassemi, Luz Elena Mimbela, Abbas Ghassemi - Solar Energy_ Renewable Energy and the Environment (2009).
- [2] oghma-nano.com/docs/man/understanding_oghma_nano.pdf.
- [3] Djaafar Fatiha (Etude et Modélisation des Performances des Cellules Photovoltaïques Multi Couches à Base des Semi-conducteurs inorganiques), thèse de doctorat université Mohammed Boudiaf Oran 2018.
- [4] <https://www.photovoltaique.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-materiel/caracteristiques-des-panneaux-photovoltaiques/technologies-de-cellules-solaires-photovoltaiques/>.
- [5] : <https://paleo-energetique.org/paleoinventions/lhistoire-des-cellules-photovoltaiques/>
- [6] : <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaiques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/4/>.
- [7] Abdoul Wahab Adaine (optimisation numérique de cellule solaire à très haut rendement à base d'InGaN) thèse de doctorat, université de Lorraine-2018.
- [8] Cellules solaires - 5ème édition - Les bases de l'énergie photovoltaïque by Anne Labouret, Pascal Cumunel, Jean-Paul Braun, Benjamin Faraggi (2010).
- [9] <http://radiotelescopeamateur.e-monsite.com/medias/images/sans-titre.jpg>.
- [10] Installations photovoltaïques - 5e éd. Conception et dimensionnement d'installation raccordées au réseau by Michel Viloz(2012).
- [11] <https://www.semanticscholar.org>
- [12] Radu D. Rugescu - Solar Energy (2010).
- [13] www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaiques.
- [14] Solar Photovoltaic Energy by Anne Labouret, Michel Viloz (2010).
- [15] The Sun and Photovoltaic Technologies by Tomislav Pavlovic (2020).
- [16] Next Generation Multilayer Graded Bandgap Solar Cells by A. A. Ojo, W. M. Cranton, I. M. Dharmadasa (2019).
- [17] Thin Film Solar Cells Fabrication, Characterization and Applications by Jef Poortmans, Vladimir Arkhipov (2006).
- [18] <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaiques>.
- [19] <https://www.docplayer.fr>.

[20] https://fr.made-in-china.com/co_kinsunsolar/product_156mm-Monocrystalline-Silicon-4bb-Solar-Cell-Solar-Panel_rhouuhghg.html.

[21] <https://www.hisour.com/fr/polycrystalline-silicon-39635/>

[22] Raphaël Lachaume (Contribution à la caractérisation électrique et à la simulation numérique des cellules photovoltaïques silicium à hétérojonction) thèse de doctorat, université de Grenoble (2014).

[23] Arras Aida (Caractéristiques des cellules photovoltaïques à base d'hétérojonction de silicium a-Si/c-Si) mémoire de master, université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen (2018).

[24] Advances in thin-film solar cells by I.M. Dharmadasa (2012).

[25] Photovoltaic solar energy from fundamentals to applications by Freundlich, Alexandre Reinders, Angèle Sark, Wilfried van Verlinden, Pierre (2017).

[26] Solar Energy the Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems by Olindo Isabella, Klaus Jäger, Arno Smets, René van Swaaij, Miro Zeman (2016).

[27] Physics of Solar Cells From Basic Principles to Advanced Concepts by Peter Würfel, Uli Würfel (2016).

[28] Properties of group-IV, III-V and II-VI semiconductors by Sadao Adachi (2005).

[29] Introducing technology computer-aided design (TCAD) fundamentals, simulation and applications by chinway K.Miti (2017).

[30] Mourad el Bar (Etude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS à multi-jonction par le logiciel Tcad Silvaco) thèse de doctorat, université Mohamed Khider – Biskra (2018).

[31] Menacer Fouzia (Simulation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco) Magister en Physique des Matériaux, université Mohamed Khider – Biskra (2016).

[32] <https://www.photovoltaique.info/fr/info-ou-intox/lenergie-solaire/de-la-lumiere-a-lelectricite/principe-de-leffet-photovoltaique/>

[33] <https://fr.khanacademy.org/science/physique-a-l-ecole/x6e8a541a302cdab5:physique-a-l-ecole-6e-annee-secondaire-2h/x6e8a541a302cdab5:physique-a-l-ecole-6e-2h-mecanique-quantique-l-atome-et-le-photon/a/photoelectric-effect>

[34] BorniAbdelhalim "Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire", Mémoire magistère Constantine, 2009

[35] B. Wafa S. Samah, « étude comparative des systèmes de pompage photovoltaïque " Mémoire ingénieurs.Biskra, 2006

[36] https://theses.hal.science/tel-02499789v1/file/DALLY_2019_archivage.pdf

[37] <https://www.connaissancedesenergies.org/les-perovskites-revolution-du-marche-photovoltaïque-venir>

[38] <https://solaire-france.com/cellules-solaires/>

[39] J. Zhao, A. Wang, M.A. Green et F. Ferrazza, Applied Physics Letters 1998, 73, 1991.

[40] D. Thibaut. Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière . 30/11/2009

[41] <https://conseils-thermiques.org/contenu/panneau-solaire-photovoltaïque.php>

[42] H. Yatimi¹, E. Aroudami¹ et M. Louzani¹
¹Université Abdelmalek Essaadi, Faculté des Sciences, Laboratoire de Modélisation et Simulation de Système Mécaniques
Tétouan, Maroc

[43] Y. Li, G. Zheng, C. Lin, J. Lin, Synthesis, structure and optical properties of different dimensional organic-inorganic perovskites, Solid State Sci. 9 (2007) 855-861.

[44] KANOUN, Ahmed-Ali. Etude théorique et prédictive des nouveaux matériaux pour conception des cellules solaires et applications photovoltaïques. Thèse de doctorat.
16-02-2020. Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen.

[45] BELALEM, Abdeldjabar et SANDALI, Walid. Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de $Cu_2ZnSn(S, Se)$ 4. Mémoire de master académique. 06-06-2017. Université Kasdi Merbah Ouargla

[46] KHERALLA, Adam et CHETTY, Naven. A review of experimental and computational attempts to remedy stability issues of perovskite solar cells. Heliyon, 2021, vol. 7, no 2, p. e06211.

[47] ULFA, Maria. Nouveaux contacts sélectifs pour des cellules à pérovskites hybrides très efficaces. 2019. Thèse de doctorat. Paris Sciences et Lettres.

[48] <https://www.france-renouvelables.fr/guide-energie-solaire/energie-solaire-fabrication-cellules-solaires-perovskite/>

[49] OURAHMOUN, O. Les cellules solaires à base de matériaux pérovskites-Structures et performances. Home, 2018, vol. 21, no 4, p. 515-520.

- [50] <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/ee/c5ee02965a>
- [51] <https://ensbiotech.edu.dz/images/thesesmemoires/touafeknaimathesedoctorat.pdf>
- [52] <https://www.infinitypv.com/roll-to-roll-academy/what-are-organic-solar-cells-and-how-do-they-work>
- [53] <https://eom.unicore.com/en/germanium-solutions/markets/>
- [54] https://theses.hal.science/tel-02499789v1/file/DALLY_2019_archivage.pdf
- [55] <https://www.metaltechnews.com/story/2020/07/08/tech-metals/graphene-armor-for-durable-solar-cells/272.html>
- [56] https://theses.hal.science/tel-01870260v1/file/DDOC_T_2018_0085_ADAINE.pdf
- [57] <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2415518>
- [58] <https://www.fis-astro-lm.unifi.it/upload/sub/offerte-di-lavoro/these-perovskite-cSiTandem.pdf>
- [59] https://www.helmholtz-berlin.de/pubbin/news_seite?nid=14342;sprache=en
- [60] <https://www.connaissancedesenergies.org/les-perovskites-revolution-du-marche-photovoltaique-venir>
- [61] <https://www.ines-solaire.org/news/29.8-nouveau-record-de-rendement-pour-une-cellule-tandem-de-9-cm/>

Résumé

La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique au moyen d'une cellule solaire. Ce domaine avantageux rencontre plusieurs recherches. Dans ce travail nous avons abordé l'étude géométrique et physique d'une cellule à double jonction (cellule tandem) par le logiciel dont le but est d'atteindre un rendement maximal grâce à l'exploitation d'un grand intervalle du spectre solaire où le rendement obtenu est presque 24%.

Différentes perspectives d'amélioration sont proposées au niveau de la géométrie de la structure.

Ces optimisations devraient permettre à la fois une simplification dans la réalisation des cellules solaires tandem et une augmentation de leurs rendements.

Mots clés : Cellule solaire tandem, double jonction,

Abstract

The transformation of solar energy into electrical energy by means of a solar cell. This advantageous field meets several researches. In this work we discussed the geometric and physical study of a double junction cell (tandem cell) by the software, the aim of which was to achieve maximum efficiency by exploiting a large range of the solar spectrum or the efficiency by exploiting a large range of the solar spectrum or the efficiency obtained is almost 24%. Different perspectives for improvement are proposed at the realization of solar cells tandem and an increase in their yields.

Keywords: Tandem solar cell, double junction,

تلخيص

تحويل الطاقة الشمسية الى طاقة كهربائية بواسطة خلية شمسية، ويلتقي هذا المجال المفيد بعدة بحوث، وفي هذا العمل ناقشنا الدراسة الهندسية والفيزيائية لخلية تقاطع مزدوج بواسطة برمجيات والتي كان الهدف منها تحقيق أقصى قدر من الكفاءة من خلال استغلال مجموعة كبيرة من الطيف الشمسي أو الكفاءة التي تم الحصول عليها هي 24 تقريبا، ونقترح وجهات نظر مختلفة للتحسين على مستوى هندسة الهيكل ونبغني ان نتيج هذه الاستخدامات المثلى تبسيطاً في تحقيق الخلايا الشمسية بالترادف وزيادة غلظتها.
الكلمات الرئيسية:تانديم خلية شمسية، تقاطع مزدوج.