

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi



Bordj Bou Arreridj

*Faculté des Sciences et de la technologie Département science de la
matière*

Mémoire de fin d'étude

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLOME DE : Master 2

FILIERE : physique

Spécialité : physique énergétique et énergie renouvelable

THÈME :

**Etude et simulation des propriétés physiques des
cellules solaires**

Préparé par : BELDJILALI Hayet

Soutenue le : 23-06-2024

Devant le jury composé de :

<i>Nom et prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>
<i>MAMER Samir</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>
<i>LEBGA Noudjoud</i>	<i>Pr</i>	<i>Examinatrice</i>
<i>REDAOUI Djaida</i>	<i>MAB</i>	<i>Examineur</i>
<i>BENDJEFFAL Abdelhak</i>	<i>MAB</i>	<i>Encadreur</i>
<i>BAHLOUL Brahim</i>	<i>MCA</i>	<i>Co-Encadreur</i>

Année universitaire : 2023-2024

Remerciement

Je remercie ALLAH le tout puissant de m'avoir accordé la santé, le courage et la volonté d'arriver au terme de ce travail

Je remercie vivement MES PARENTS pour leurs sacrifices, leur soutien, leur encouragement et leurs précieux conseils, ue dieu les protège.

Mes remerciement s'adresse également au Mr. Bendjeffal Abdelhak l'encadreur de mon travail pour toutes les orientations et les conseils tout le long de ce travail

Nos remerciements aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter de lire et de juger ce travail.

Nous adressons également nos remerciements, à tous nos enseignants, qui nous ont donné les bases de la science,

ous tenons à remercier enfin, tous ceux qui ont aidés de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Dédicaces

A mes très chère parents, source de vie d'amour et d'affection

A mes chères sœurs et mon frère source de joie et de bonheur

*A mon marie et mes chère filles, source d'espoir et de
motivation*

A toute ma famille et ma belle famille

A toutes mes amies

*A vous tous, je dédie ce travail avec mes vœux de santé, de
bonheur et de prospérité.*

Sommaire

<i>Remerciement</i>	
<i>Dédicace</i>	
<i>Liste des figures</i>	
<i>Liste des tableaux</i>	
<i>Liste des abréviation / symboles</i>	
<i>Introduction générale</i>	1
Chapitre 1 : généralité sur l'énergie solaire	4
<i>1-1 Introduction à l'énergie solaire</i>	5
<i>1-1-1 Origine de l'énergie solaire</i>	5
<i>1-1-2 Importance des cellules solaire dans l'utilisation des énergies renouvelables</i>	6
<i>1-2 Évolution technologique dans le domaine des cellules solaire</i>	7
<i>1-2-1 Histoire et évolution des techniques des cellules solaires</i>	7
<i>1-2-2 Dernière technologies et innovation dans le domaine des cellules solaires</i>	9
<i>1-2-2-a Les cellules solaires organique</i>	9
<i>1-2-2-b Les solaires photovoltaïque concentré</i>	9
<i>1-2-2-c Les cellules solaires hybrides thermique et photovoltaïque</i>	10
<i>1-2-2-d Les cellules CZTS</i>	10
<i>Conclusion</i>	10
<i>Bibliographie du chapitre 1</i>	11
Chapitre 2 : structure et types des cellules solaires	12
<i>2-1 Introduction</i>	13
<i>2-2 Structure de la cellule solaire</i>	13
<i>2-2-1 Phases fondamentales de la structure de la cellule solaire</i>	13
<i>2.2.1.a Métallisation</i>	13
<i>2.2.1.b Texturation</i>	13
<i>2.2.1.c Passivation</i>	14
<i>2.2.1.d Traitement anti-reflet</i>	14
<i>2-2-2 Moyen utilisé pour améliorer la structure des cellules solaires</i>	15
<i>1-2-2-a Matériaux de haute qualité</i>	15
<i>1-2-2-b Architecture cellulaire avancée</i>	15
<i>1-2-2-c Optimisation de la surface</i>	16
<i>1-2-2-d Encapsulation et protection</i>	16
<i>1-2-2-e Optimisation des processus de fabrication</i>	16
<i>2-3 Type de cellule solaire</i>	16
<i>2-3-1 1^{ère} génération ; les cellules solaires au silicium</i>	17
<i>2-3-1-a Les cellules monocristallines</i>	17
<i>2-3-1-b Les cellules polycristallin</i>	18
<i>2-3-2 2^{ème} génération ; les cellules solaires à base de couche mince</i>	18
<i>2-3-2-a Les cellules en silicium amorphe</i>	18
<i>2-3-2-b Les cellules CIS/CGIS</i>	19

2-3-2-c Les cellules au tellurure de cadmium CdTe	19
2-3-2-d Les cellules à base d'arséniure de gallium (GaAs)	20
2-3-3 Les cellules de 3 ^{ème} génération	21
2-3-3-a Les cellules solaires organiques	21
2-3-3-b Les cellules solaires DSSC	21
Conclusion	22
Bibliographie du chapitre 2	23
Chapitre 3 : performance et amélioration de l'efficacité énergétique	24
3-1 Introduction	25
3-2 paramètres de performances des cellules solaires	25
3-2-1 Courant de court-circuit (I_{cc})	25
3-2-2 Tension en circuit ouvert (V_{oc})	25
3-2-3 Courant de crête (I_m)	25
3-2-4 Tension de crête (U_m)	25
3-2-5 Puissance de crête (P_m)	25
3-2-6 Facteur de remplissage (FF)	26
3-2-7 Efficacité de conversion (η)	26
3-2-8 Efficacité de conversion rendement quantique (QE)	26
3-3 Efficacité globale	26
3-3-1 La qualité des matériaux	26
3-3-2 Les conditions d'utilisation	26
3-3-3 La conception de la cellule	27
3-3-4 La technologie de la fabrication	27
3-4 Perte d'énergie et amélioration de l'efficacité	27
3-4-1 Perte d'énergie	27
3-4-1-a Perte optique	27
3-4-1-b Perte électrique	28
A Les pertes résistives	28
B Les pertes par recombinaison	28
3-4-2 Amélioration de l'efficacité	30
3-5 Amélioration de la technologie de production	31
3-5-1 Utilisation de matériaux avancés dans la production des cellules solaires	31
3-5-1-a Cellules solaires à couche mince	31
3-5-1-b Matériaux organiques	32
3-5-1-c Cellules solaires a pérovskites	32
3-5-2 Technique de fabrication avancées pour améliorer la performance des cellules	34
3-5-2-a Cellules solaires tendem pérovskite/ silicium	34
3-5-2-b Cellules solaires à hétérojonction	36
3-5-2-c Technologie à concentration solaire	36
3-5-2-d Nanotechnologie et cellules solaire	37

<i>Conclusion</i>	38
<i>Bibliographie du chapitre 3</i>	39
<i>Chapitre 4 : simulation de la cellules solaire pérovskite CH₃NH₃SnI₃ par SCAPS-1D</i>	40
<i>4-1 Introduction</i>	41
<i>4-2 Présentation du SCAPS-1D</i>	41
<i>4-3 Paramètres et propriétés de la cellule de référence</i>	45
<i>4-4 Résultat et discussion</i>	47
<i>4-4-1 Partie I: TiO₂/CH₃NH₃SnI₃/CuO₂</i>	47
<i>4-4-1-a Effet de l'épaisseur de la couche absorbante et de la température</i>	47
<i>4-4-1-b Effet de l'épaisseur de la couche ETL (TiO₂)</i>	48
<i>4-4-1-c Effet de l'épaisseur de la couche HTL (Cu₂O)</i>	49
<i>4-4-2 Partie II: ZnO/CH₃NH₃SnI₃/CuO₂</i>	50
<i>4-4-2-a Effet de l'épaisseur de la couche absorbante</i>	51
<i>4-4-2-b Effet de l'épaisseur de la couche ETL (ZnO)</i>	51
<i>4-4-2-c Effet de l'épaisseur de la couche HTL (Cu₂O)</i>	52
<i>Conclusion</i>	52
<i>Bibliographie du chapitre 4</i>	53
<i>Conclusion générale</i>	54
<i>Résumé</i>	55

Liste des figures

Chapitre 1

<i>Figure 1-1 : le soleil matière première du 21^{ème} siècle</i>	5
<i>Figure 1-2 : le dispositif qui a permis à Becquerel de découvrir l'effet photovoltaïque</i>	8
<i>Figure 1-3 : les premières prototype proposés par Fritts (à gauche) et Grondahl(à droit)</i>	8

Chapitre 2

<i>Figure 2-1 : comparaison entre la réflexion de la lumière incidente sur une surface texturée et une surface lisse</i>	14
<i>Figure 2-2 : structure d'une cellule photovoltaïque</i>	15
<i>Figure 2-3 : différentes générations des cellules solaires</i>	17
<i>Figure 2-4 : cellule solaire monocristalline</i>	18
<i>Figure 2-5 : cellule solaire polycristalline</i>	18
<i>Figure 2-6 : cellule silicium amorphe</i>	19
<i>Figure 2-7 : cellule photovoltaïque en couche mince à base de cuivre</i>	19
<i>Figure 2-8 : cellule au tellure de cadmium</i>	20
<i>Figure 2-9 : cellule solaire à base d'Arsénium de gallium</i>	20
<i>Figure 2-10 : (a) cellule solaire organique, (b) cellule de type Gratzel (DSSC)</i>	21

Chapitre 3

<i>Figure 3-1 : différents types de pertes dans les cellules solaires</i>	27
<i>Figure 3-2 : le processus de recombinaison de type radiatif</i>	29
<i>Figure 3-3 : mécanisme de recombinaisons de type Auger</i>	29
<i>Figure 3-4 : mécanisme de recombinaison non radiatives</i>	30
<i>Figure 3-5 : coup transversale d'une cellule solaire à pérovskite</i>	33
<i>Figure 3-6 : représentation schématique d'une cellule tandem silicium cristallin et pérovskite</i>	35
<i>Figure 3-7 : schéma de principe de l'hétérojonction silicium</i>	36

Chapitre 4

<i>Figure 4-1 : fenêtre d'exécution (Acton Panel) du logiciel SCAPS-1D</i>	43
<i>Figure 4-2 : définir le problème</i>	44
<i>Figure 4-3 : le point de fonctionnement</i>	44
<i>Figure 4-4 : panneau des bandes d'énergie</i>	45
<i>Figure 4-5 : coefficient d'absorption de la pérovskite</i>	46
<i>Figure 4-6 : variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de CH₃NH₃SnI₃ et de la température</i>	47
<i>Figure 4-7 : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de CH₃NH₃SnI₃ et de la température</i>	51

Liste des tableaux

Chapitre 1 :

Tableau 1-1 : caractéristiques principales du soleil.....6

Chapitre 4 :

Tableau 4-1 : propriétés électriques et options des différentes couches de la cellule
TiO₂/CH₃NH₃SnI₃/CuO₂.....45

Tableau 4-2 : paramètre pour les défauts dans les matériaux et les interfaces.....46

Tableau 4-3 : variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de TiO₂.....48

Tableau 4-4 : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de Cu₂O.....49

Tableau 4-5 : propriété électriques et optique des différentes couche de la cellule
ZnO/CH₃NH₃SnI₃/CuO₂.....49

Tableau 4-6 : variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de ZnO.....51

Tableau 4-7 : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de Cu₂O.....52

Liste des abréviations / symboles

Liste des abréviations / symboles

ICC : courant de court-circuit

VOC : tension en circuit ouvert

η : rendement de conversion

JSC : densité du courant de court-circuit

FF : facteur de forme

QE : rendement quantique

PV: photovoltaïque

SCAPS: Solar Cell Capacitance Simulator

OSC: cellule solaire organique

PEC : efficacité de conversion de l'énergie

SiO₂ : oxyde de silicium

SiN_x :h : nitrure de silicium hydrogène

a-Si :H : silicium amorphe hydrogène

Al₂O₃ :oxyde de l'aluminium

CIS : cuivre-indium-sélénium

CIGS : cuivre-indium-gallium-sélénium

CdTe :tellurure de cadmium

GaAs : arséniure de gallium

DSSC : dye-sensitized solar cells

EPEL: Ecole Polytechnique Fédérale de lausanne

TiO₂ : dioxyde de titane

ZnO : oxyde de zinc

SnO₂ : dioxyde d'étain

Cu₂O : oxyde de cuivre

CH₃NH₃SnI₃ : iodure de méthylammonium et d'étain

Liste des abréviations / symboles

E_g(ev) Energie de gap

μ_n Mobilité des électrons

μ_p Mobilité des trous

N_a concentration d'accepteur

N_c la densité effective d'état de la bande conduction

N_v la densité effective d'état de la bande de valence

N_d concentration de donneur

α coefficient d'absorption

Introduction générale

La production d'énergie constituée un défi majeur pour les années à venir, en raison de l'augmentation de la consommation mondiale de l'électricité qui est fortement liée au développement de l'industrie de transport et des moyens de communication.

Une partie importante de production d'électricité provient de ressource non renouvelable comme le charbon, les gaz naturels, le pétrole

L'inconvénient de la consommation excessive de ces sources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie pour les générations futures. De plus, ce type de consommation n'est pas neutre sur l'impact environnemental par l'augmentation de la pollution.

Ce constat encourage la recherche de solutions créatives qui réduisent le déficit énergétique et minimise les effets néfastes sur l'environnement.

Par énergie renouvelable, on entend des énergies éoliennes, l'énergie solaire, la biomasse, l'énergie hydraulique, ... etc. Contrairement aux sources d'énergie fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies a ressource illimitée, inépuisables et facilement exploitables.

L'énergie solaire photovoltaïque a connu une évolution remarquable au fil des décennies, passant d'une simple curiosité scientifique à une source d'énergie renouvelable incontournable

En parallèle, des efforts considérables ont été déployés pour améliorer l'efficacité des cellules solaires. Les chercheurs continuent de se pencher sur de nouveaux matériaux et technologies pour améliorer l'efficacité et la durabilité des cellules solaires. Des avancées dans des domaines tels que les cellules solaires à matériau pérovskite et les cellules solaires à plusieurs jonctions ouvrent la voie à de nouvelles opportunités pour l'énergie solaire.

L'objectif de ce travail est d'améliorer les performances de la cellule solaire pérovskite tels que le courant de court-circuit ICC, le rendement de conversion η , la tension de circuit ouvert VCO et le facteur de forme FF moyennant le logiciel SCAPS-1D

Ce mémoire se divise en quatre chapitres, comme suit :

Dans le premier chapitre, nous donnerons quelques rappels sur l'énergie solaire car le développement, l'optimisation et la caractérisation des cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée qu'est le soleil.

Le deuxième chapitre consacré à la description de la structure de la cellule solaire qui passe par 4 phases : métallisation, texturation, passivation et traitement anti-reflet. Ensuite nous passerons en revue les différents types de cellules solaires.

Dans le troisième chapitre nous décrirons les caractéristiques électriques principales d'une cellule photovoltaïque et les pertes d'énergie qui limitent le rendement de la cellule solaire.

Pour finir, on étudiera les moyennes utilisées dans le domaine de l'amélioration de la technologie de production des cellules solaires.

Le quatrième chapitre on trouve tout d'abord une introduction générale sur le logiciel de simulation SCAPS-1D ensuite une présentation et discussion des résultats de la simulation numérique des cellules solaires pérovskite hybride à base d'étain ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$), l'évolution des diverses performances des cellules, en fonction de la variation de plusieurs paramètres tels que : la nature de couche fenêtre, l'épaisseur des différentes couches.

Finalement, nous présenterons dans la conclusion générale les principaux résultats obtenus dans cette étude.

Chapitre 1

Généralité sur l'énergie solaire

1-1 Introduction à l'énergie solaire

Le rayonnement solaire est la ressource énergétique la plus abondante et la mieux distribuée sur terre. Pendant une heure, l'énergie émise par le soleil et captée par la terre pourrait potentiellement répondre aux besoins énergétiques mondiaux pour une année entière.

L'énergie solaire est une énergie non polluante, disponible et aisément transformable. Elle est utilisée essentiellement pour deux usages : la production de la chaleur, et la production d'électricité grâce à des équipements robustes et fiables.

1-1-1 Origine de l'énergie solaire

La source directe d'énergie solaire est la récolte du rayonnement solaire. En effet la terre reçoit plus de 3000 h de lumière solaire par année avec un haut niveau d'éclairement, avec une optimisation des angles de réception, la moyenne annuelle journalière est de 5 à 7 kwh /m²/jour [1].

Le soleil est l'étoile la plus proche de la terre, il mesure 1392000 km de diamètre, soit 110 fois le diamètre de la terre. Il est composé de matière gazeuse essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium [2].

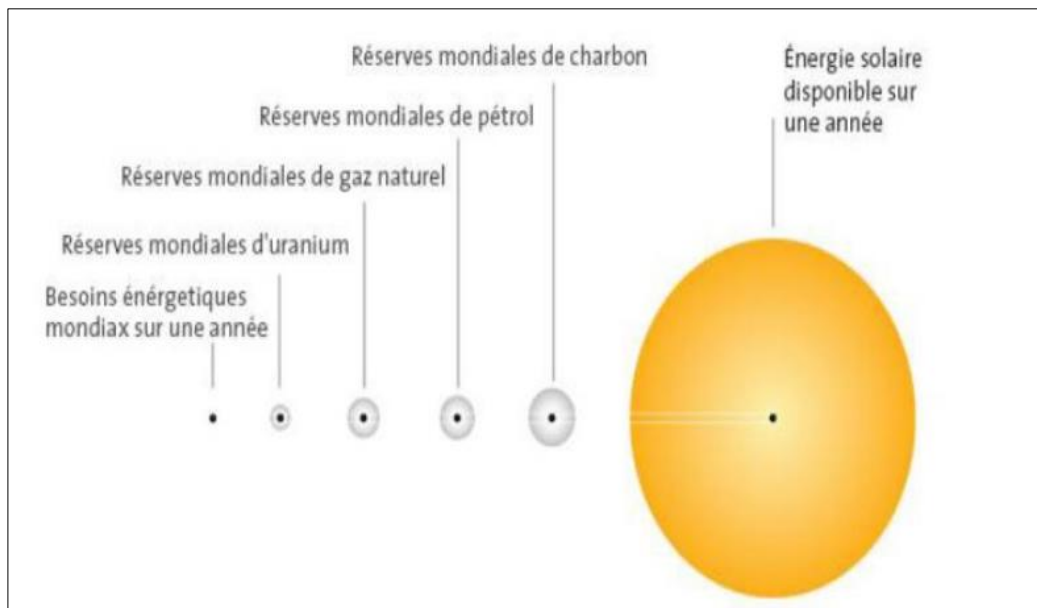


Figure 1-1 : Le soleil : matière première du 21^{ème} siècle [3]

Le tableau suivant montre quelques caractéristiques principales du soleil :

Caractéristiques	Valeur
Masse	$1.989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
Diamètre	$1.392 \cdot 10^9 \text{ m}$
Masse volumique moyenne	1410 kg m^{-3}
Puissance rayonnée	$3.83 \cdot 10^{26} \text{ W}$
Température superficielle	5770 K

Tableau 1-1 : Caractéristiques principales du soleil [2]

1-1-2 Importance des cellules solaires dans l'utilisation des énergies renouvelables

Le soleil offre une grande quantité d'énergie lumineuse à la terre cependant, le défi se pose lorsque cette énergie n'est pas toujours disponible sous une forme directement utilisable. Pour l'utiliser, nous devons la convertir en une forme d'énergie facile à domestiquer (énergie électrique ou thermique).

C'est pourquoi nous devons utiliser des dispositifs qui convertissent cette énergie lumineuse en électricité, c'est-à-dire un système solaire photovoltaïque, par contre, si nous voulons la transformer en chaleur, il nous faudra utiliser un système solaire thermique.

Les cellules photovoltaïques sont l'une de ces sources d'énergie renouvelables, qui jouent un rôle crucial dans l'exploitation de l'énergie solaire et sa conversion en électricité.

Nous explorerons l'importance des cellules photovoltaïques dans la fourniture d'énergie renouvelable, ainsi que leur impact potentiel sur l'avenir de l'énergie durable [4] :

1- Source d'énergie renouvelable :

L'énergie solaire est une ressource abondante, renouvelable, inépuisable et propre, ce qui en fait une solution durable pour répondre à nos besoins énergétiques.

2- Production d'électricité :

Les cellules photovoltaïques convertissent directement la lumière en électricité. Cette électricité est utilisée pour alimenter des maisons, des entreprises et même des villes entières.

3- Énergie propre :

Contrairement aux combustibles fossiles, les cellules solaires produisent de l'électricité sans émettre de gaz à effet de serre ni de polluants nocifs. Ce qui permet d'atténuer les dommages environnementaux causés par la production d'énergie conventionnelles.

4- Indépendance énergétique :

En utilisant les cellules solaires photovoltaïques, les individus et les entreprises peuvent atteindre une grande indépendance énergétique et réduire leur dépendance aux réseaux électriques centralisés.

5- Avantage économique :

- Facilité d'utilisation
- Durabilité et fiabilité
- Réduction des coûts

1-2 Evolution technologique dans le domaine des cellules solaires

1-2-1 Histoire et évolution des technique des cellules solaires

L'énergie solaire a connu une évolution remarquable au fil de décennies passant d'une simple curiosité scientifique à une source d'énergie renouvelable.

Nous allons retracer l'histoire des PV en explorant les dates clés, les découvertes majeures et les progrès technologiques qui ont amélioré cette industrie dynamique

- En 1839, Becquerel découvre l'effet photovoltaïque qui permet la transformation directe de l'énergie lumineuse en électricité.

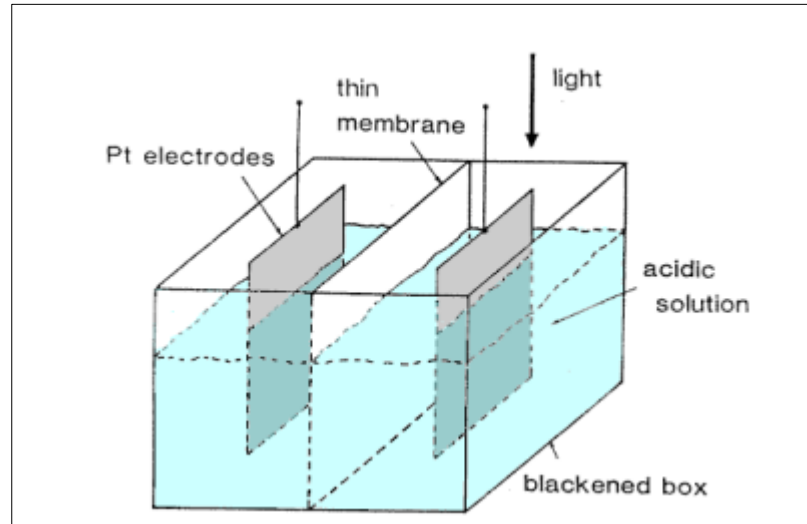


Figure 1-2 : le dispositif qui a permis à Becquerel de découvrir l'effet photovoltaïque [5]

- Fritts (1883) et Grondahl (1930-32), proposèrent les premiers dispositifs photovoltaïques avec un rendement de 1%

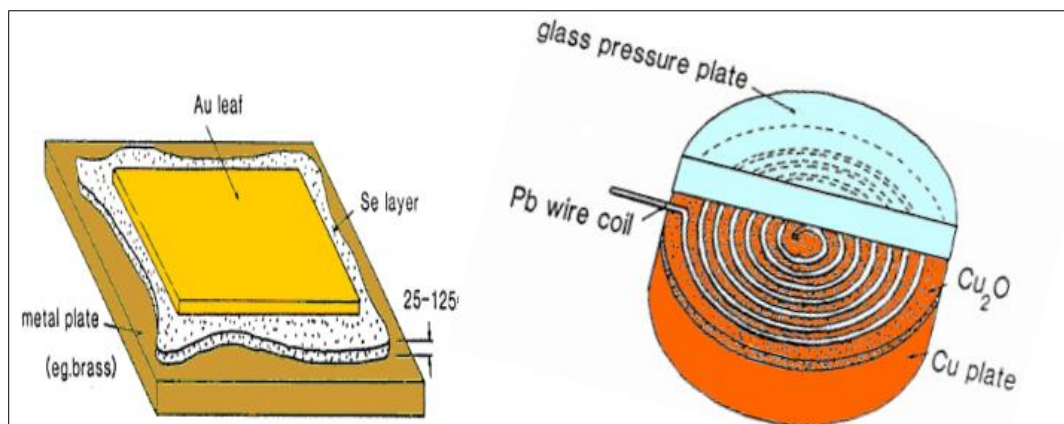


Figure 1-3 : Les premiers prototypes proposés, par Fritts (à gauche) et Grondahl (à droite) [5]

- En 1954, Pearson, Chapin et Fuller, mirent au point une première cellule photovoltaïque (jonction pn à base du silicium cristallin) avec un rendement de conversion de l'ordre de 6 %.
- En 1958, les premières cellules, fixées à l'extérieur du satellite Vanguard, ont été envoyées dans l'espace pour alimenter l'un des deux émetteurs radioélectriques embarqués à bord du satellite et affichaient un rendement de 9 %

- En 1959, les premiers panneaux solaires attachés sur le satellite Explorer 6 ont été lancés dans l'espace.
- À partir de 1970, les premières utilisations terrestres ont concerné l'électrification des sites isolés.
- En 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.
- En 1983, la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.
- À partir des années 1990, l'usage des cellules photovoltaïques et des panneaux solaires s'est démocratisé un peu grâce à une diminution progressive de leur coût.
- Actuellement, la recherche s'intéresse aux polymères et matériaux organiques (éventuellement souples) susceptibles de remplacer le silicium et les autres matériaux inorganiques [5].

1-2-2 Dernière technologie et innovation dans le domaine des cellules solaire

1-2-2-a Les cellules solaires organiques :

Déjà développées pour fabriquer des panneaux solaires, ces cellules photovoltaïques sont composées de matériaux semi-conducteurs de synthèse. On les connaît sous le nom de cellules à colorants, cellules à polymères ou encore cellules à pérovskites. Ces cellules photovoltaïques sont élaborées à partir de fines couches organiques qui sont déposées dans une solution liquide placée entre deux électrodes. Le faible coût de fabrication et la non-toxicité des matériaux renouvelables utilisés en font une solution d'avenir très intéressante. [6]

Des chercheurs ont réalisé une avancée remarquable en matière d'efficacité de conversion de l'énergie (PCE) avec des cellules solaires organiques (OSC), atteignant un taux de 19,31 %. Cette percée dans l'efficacité a pour objectif d'améliorer l'application de ces dispositifs d'énergie solaire.[7]

1-2-2-b Le solaire photovoltaïque concentré

Les miroirs concentrent les rayons du soleil sur une petite cellule solaire photovoltaïque à haut rendement. Grâce à cette technologie de concentration, les matériaux semi-conducteurs peuvent être remplacés par des systèmes optiques moins coûteux. A puissance égale, ceci permet

d'utiliser 1 000 fois moins de matériel photovoltaïque que dans les panneaux photovoltaïques à insolation directe.

Le rendement théorique maximum de la conversion photon-électron est de l'ordre de 85% (le rendement de Carnot est 95 %). Le rendement expérimental maximal obtenu avec cette technologie est pour le moment de 46% [8]

1-2-2-c Les cellules hybrides : thermique et photovoltaïque

Le rendement des cellules solaires photovoltaïques diminue lorsque les panneaux montent en température. Certains centres de recherche ont eu l'idée de récupérer la chaleur captée et libérée par le photovoltaïque pour simultanément optimiser le rendement électrique et obtenir une source de chauffage. Ils développent ainsi des capteurs solaires hybrides mariant le photovoltaïque et la thermique [8]

1-2-2-d Les cellules CZTS

Les laboratoires technologiques sont sans cesse à la recherche de nouveaux matériaux semi-conducteurs afin de créer les cellules photovoltaïques de demain. La cellule CZTS n'est encore qu'un projet en cours d'élaboration. Elle marie du cuivre, du zinc, de l'étain et du soufre (ce qui forme le sigle CZTS). Ce sont des matériaux non toxiques et disponibles en grande quantité sur la surface de la Terre. Ces cellules sont composées de pellicules fines qui absorbent l'énergie solaire sur leur support (verre, plastique, etc.). Le rendement est toutefois moyen, tandis qu'on ne peut pas encore définir sa durée de vie, ni le coût de ces panneaux solaires.[6]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions sur le rayonnement solaire et son application dans le domaine photovoltaïque et l'importance des cellules solaires dans la conversion et l'utilisation de l'énergie solaire pour créer une source d'énergie renouvelable.

Nous avons fait aussi un survol sur l'historique, l'évolution des techniques et les dernières innovations dans le domaine des cellules solaires à la recherche des solutions qui réduisent le déficit énergétique

Bibliographie du chapitre 1

- [1] Abdelmalek bouden « analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque» Mémoire de magistère université de Constantine algerie 2008
- [2] Assistance scolaire personnalisée (asp), le rayonnement ultraviolet émis par le soleil
- [3] <https://www.fotovoltacosulweb.it/guida/scegliere-un-impianto-fotovoltaiico.html>, 02/03/2024 a 14:00.
- [4] <https://www.basengreen.com/fr/what-is-the-function-of-a-solar-photovoltaic-cell/>
- [5] 1^{er} Journées portes ouvertes sur la Faculté des Sciences Exactes (JFSE 2017) : Cellules photovoltaïques De la couche active au panneau solaire photovoltaïque Abdelhamid Benhaya Département d'Electronique, Faculté de Technologie Université Batna 2 Batna, Algérie
- [6] <https://www.totalenergies.fr/particuliers/nos-services/autoconsommation-solaire/fonctionnement-panneaux-photovoltaïques/différents-types-de-cellules-photovoltaïques> , 14/03/2024 a 23:15.
- [7] <https://www.enerzine.com/les-cellules-solaires-organiques-atteignent-une-efficacite-record-de-1931/57040-2023-06> , 26/03/2024 a 10:15.
- [8] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaïque>, 02/03/2024 a 13:01.

Chapitre 2

Structure et types des cellules solaires

2-1 Introduction

L'énergie solaire est une source abondante et renouvelable, mais pour la convertir en énergie électrique nous devons utiliser des cellules solaires photovoltaïques.

Ce chapitre est consacré à la description de la structure et les différents types de cellules solaires.

2-2 Structure de la cellules solaires

Une cellule solaire est un dispositif qui convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique. Elle est composée de plusieurs couches différentes, chacune jouant un rôle crucial dans le processus de conversion.

2-2-1 Phases fondamentales de la structure de la cellule solaire

La cellule solaire est basée essentiellement sur la jonction P-N. La structure de la cellule solaire passe par 4 phases : métallisation, texturation, passivation et traitement anti-reflet.

2-2-1-a Métallisation :

Le processus de métallisation des cellules solaires a pour but l'assurance de passage des électrons et des trous dans la face avant et la face arrière pour avoir une cathode et une anode et de tirer la puissance maximale avec des pertes résistives minimales

Les contacts métalliques sont placés sur la face avant et sur la face arrière de la cellule solaire. Ils créent une barrière de potentiel « barrière de Schottky »

Le choix de type de métal a un rôle important dans la collecte de maximum de courant. En plus les contacts métalliques donnant des contacts ohmiques, sont choisis afin d'avoir des résistances de contact plus faibles, car la forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme ainsi que le rendement.

Parmi les métaux utilisés pour les contacts ohmiques des cellules solaires sont : Li, Na, K, Fe, Ni, Al, Cu, Ag, Au, Pt [1].

2-2-1-b Texturation :

La surface de substrat de la cellule ressemble à un miroir, elle réfléchit plus de 35% de la lumière incidente. Afin de réduire cette réflexion, une opération appelée texturation permet de rendre la surface moins lisse, soit par un procédé mécanique soit par un procédé chimique. *De cette façon, la lumière qui a été réfléchie la première fois aura une deuxième chance de frapper la surface de la cellule.*[2]

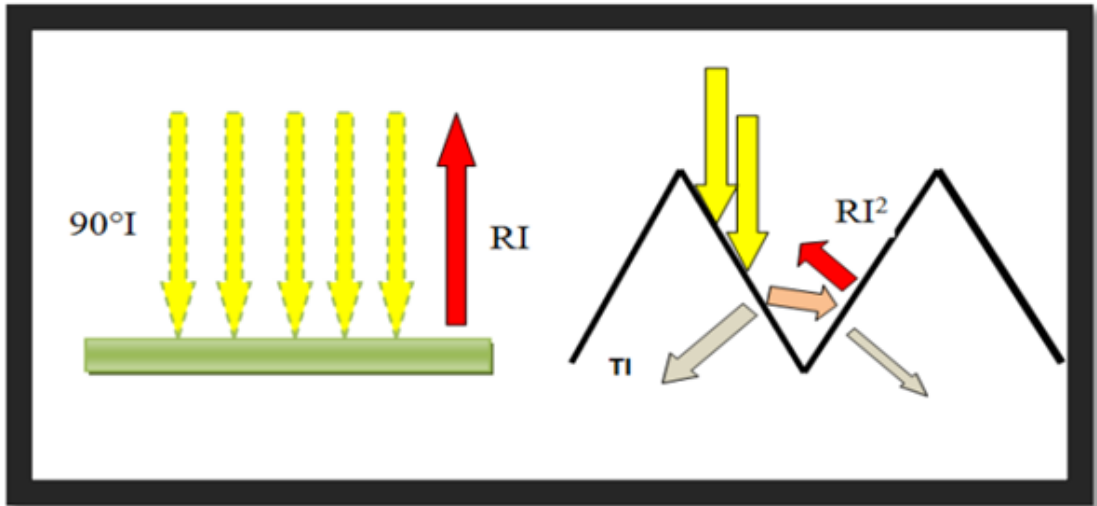


Figure 2-1 : Comparaison entre la réflexion de la lumière incidente sur une surface texturée et une surface lisse. I : intensité lumineuse incidente, R : coefficient de réflexion, T : coefficient de transmission [1]

2-3-1-a Passivation :

La passivation permet réduire les combinaisons de surface des cellules solaires. Cette opération peut se faire :

- soit en repoussant un type de porteurs de charge (>0 ou <0) grâce à un champ électrique proche de l'interface,
- soit en réduisant la densité d'états pièges d'interface grâce à un matériau approprié déposé à l'interface, Les matériaux le plus souvent utilisés pour la passivation de surface dans la filière photovoltaïque silicium sont l'oxyde de silicium (SiO_2), le nitrure de silicium hydrogéné ($\text{SiN}_x:\text{H}$), le silicium amorphe hydrogéné ($\text{a-Si}:\text{H}$) et plus récemment l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3). [3]

2-3-1-b Traitement anti-reflet :

Le fait que la surface de silicium cristallin soit réfléchissante provient de la différence entre l'indice de réfraction de silicium cristallin et celui du milieu extérieur. On peut réduire la réflexion en déposant à la surface des cellules une couche transparente ayant un indice de réfraction moyen.

La figure suivante résume la composition d'une cellule solaire

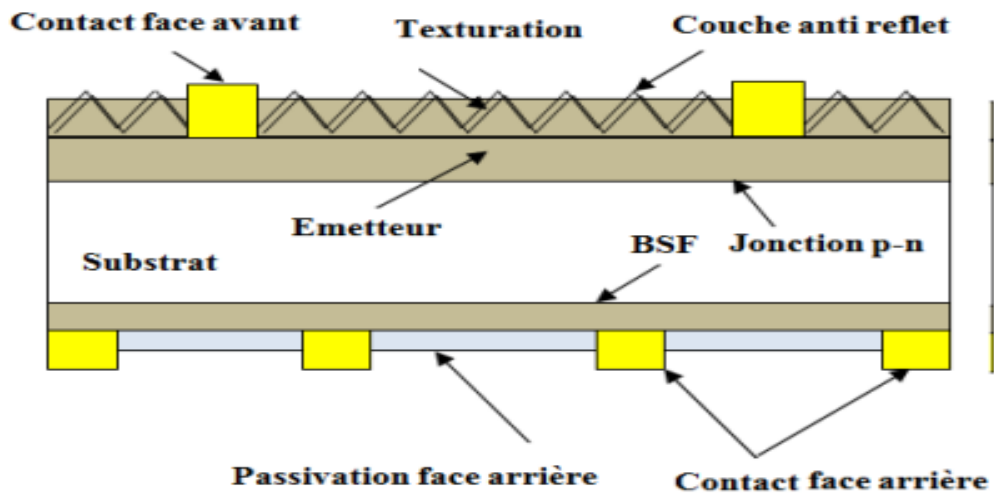


Figure 2-2 : Structure d'une cellule photovoltaïque [2]

2-2-2 Moyens utilisés pour améliorer la structure des cellules solaires

De nombreuses recherches sont en cours pour améliorer l'efficacité des cellules solaires et ainsi les rendre plus performantes et économiques :

2-2-2-a Matériaux de haute qualité : Utiliser des matériaux de haute qualité pour les cellules solaires, tels que des semi-conducteurs à haut rendement comme le silicium cristallin, le tellure de cadmium, ou les pérovskites, qui peuvent augmenter l'efficacité de conversion de la lumière en électricité.

2-2-2-b Architecture cellulaire avancée : Inventer des architectures de cellules solaires avancées, telles que :

- **Les cellules solaires à hétérojonction (HJT)** : Constituées de deux semi-conducteurs différents. La plus répandue est constituée de silicium cristallin, pris en sandwich entre deux fines couches de silicium amorphe de quelques nanomètres [4].
- **Les cellules solaires à pérovskite** : Un autre domaine de recherche sur le solaire, plus récent, concerne les cellules photovoltaïques à base de pérovskites. Il s'agit d'un type de cellule photovoltaïque qui comprend un élément chimique ayant une structure de pérovskite, le plus souvent un hybride organique-inorganique de plomb ou un halogénure d'étain, dans sa couche active. C'est une nouvelle technologie pleine de promesses, mais elle est également confrontée à des défis très importants, comme leur mauvaise résistance à

l'eau, et l'instabilité dans le temps. Actuellement le rendement record obtenu en laboratoire est de 25.5% [5].

- **Les cellules solaires tandem** : Une cellule tandem est une cellule solaire composée deux matériaux semi-conducteurs différents : le silicium et la pérovskite. Cette association permet de tirer parti des bénéfices de chaque matériau. D'un côté, le silicium offre une durabilité exceptionnelle tandis que la pérovskite assure un rendement élevé.
- **Cellules solaires à concentrateur** : Utiliser des lentilles ou des miroirs pour concentrer la lumière du soleil sur une petite cellule solaire, ce qui permet d'augmenter l'efficacité et de réduire les coûts.

Les cellules à concentration sont placées sur un support mobile et doivent être toujours placés dans une position face au soleil.

- **Cellules solaires organiques** : Développer des cellules solaires basées sur des matériaux organiques légers et flexibles peuvent être déposées sur des surfaces souples et déformables (comme les plastiques, les tissus) afin de répondre à certaines applications spécifiques. Elles pourraient être moins coûteuses et plus faciles à produire que les cellules solaires en silicium, mais leur rendement est plus faible que celui des cellules hétérojonctions [4].

2-2-2-c Optimisation de la surface : Appliquer des revêtements antireflets et des structures optiques pour maximiser la quantité de lumière qui atteint les cellules solaires et réduire la réflexion de la lumière.

2-2-2-d Encapsulation et protection : Encapsuler les cellules solaires dans des matériaux durables pour les protéger de l'humidité, de la poussière et d'autres facteurs environnementaux, ce qui peut améliorer leur durabilité et leur longévité.

2-2-2-e Optimisation des processus de fabrication : Optimiser les processus de fabrication des cellules solaires pour réduire les coûts et améliorer la qualité des cellules produites, ce qui peut contribuer à rendre l'énergie solaire plus compétitive sur le marché de l'énergie.

2-3 Types de cellules solaires :

Sur le plan technologique ; plusieurs types de cellules solaires sont distingués :

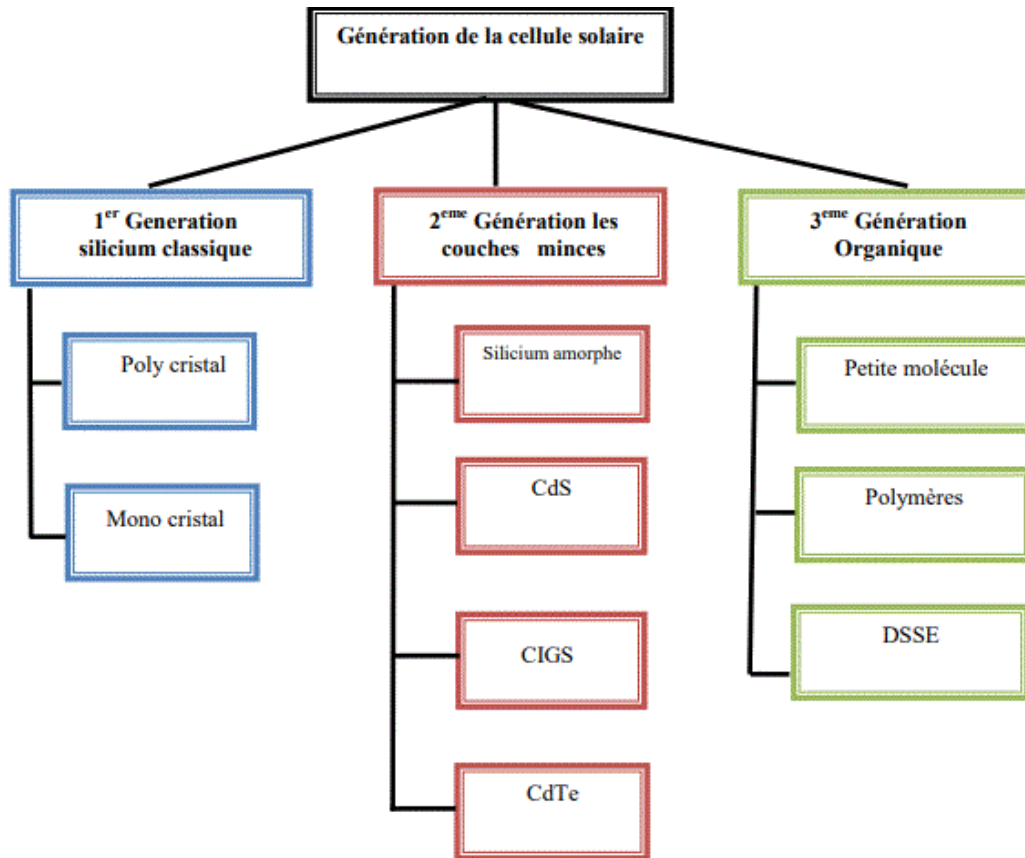


Figure 2-3 : Différentes générations de cellules solaires.

2-3-1 1^{ère} génération : Les cellules solaires au silicium :

Le silicium est le matériau de base des photopiles. C'est le deuxième élément le plus abondant sur notre planète mais, il ne se trouve pas à l'état pur dans la nature (le sable et le quartz en contiennent). On distingue deux types principaux de cellules solaires au silicium :

2-3-1-a Les cellules monocristallines :

Elles sont considérées comme la première génération et les cellules les plus répandues. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme. Ils offrent un rendement excellent environ 24% en laboratoire [6], l'un des meilleurs sur le marché, mais leur processus de fabrication est laborieux et délicat.

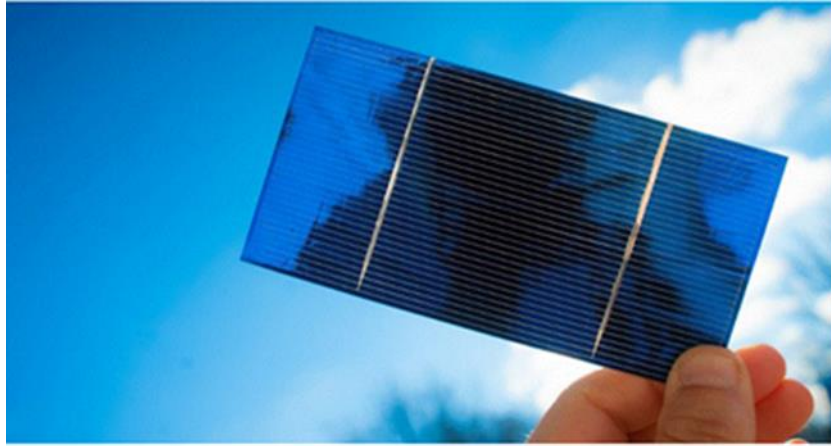


Figure 2-4 : Cellule solaire monocristalline [7].

2-3-1-b Les cellules polycristallines :

Ces cellules sont également bleues mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux, elles ont un rendement autour de 18% en laboratoire [6]. On les trouve souvent dans les installations domestiques et agricoles.

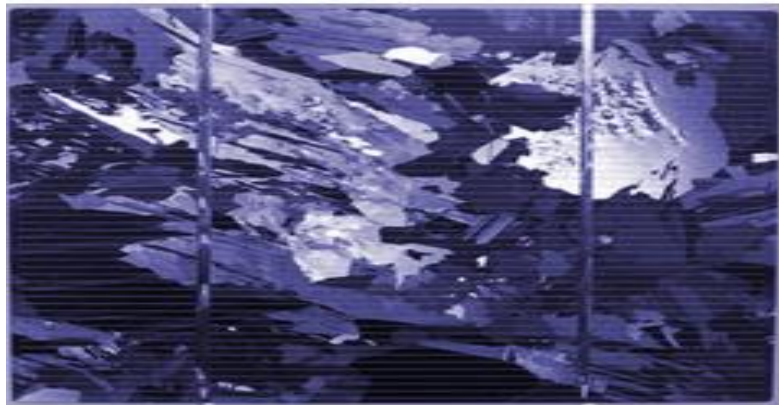


Figure 2-5 : Cellule solaire polycristalline [7].

2-3-2 2^{ème} génération : Les cellules à base de couches minces :

Différentes technologies sont distinguées parmi lesquelles :

2-3-2-a Les cellules en silicium amorphe

Ces cellules se composent d'une fine couche de silicium plus mince que celles des cellules monocristallines et polycristallines. Elles possèdent un rendement faible environ 8% à 10% (13% en laboratoire) [6]. Ces cellules sont utilisées pour alimenter les appareils de faible puissance comme les calculatrices solaires, les montres et les éclairages des jardins.

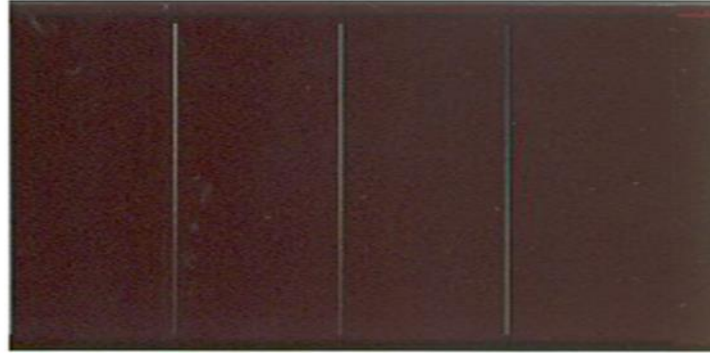


Figure 2-6 : Cellule silicium amorphe [7].

2-3-2-b Les cellules CIS/CGIS :

Ce type représente une nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces. Les cellules CIGS renferment un absorbant constitué de cuivre, d'indium, de gallium et de sélénium. Les cellules CIS (cuivre indium sélénium) offrent un rendement pouvant atteindre 11% (17 % au laboratoire) [6].

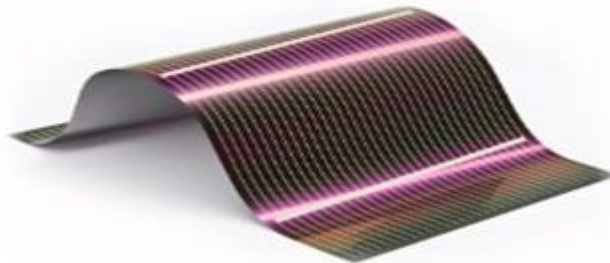


Figure 2-7 : Cellule photovoltaïque en couche mince à base de cuivre [7].

2-3-2-c Les cellules au tellure de cadmium CdTe :

Dans ces dernières années, le tellure de cadmium est devenu moins cher qu'avant, malgré qu'il souffert d'instabilité, mais il devient le leader des couches minces. Aussi, il est considéré comme le meilleur multi jonction de silicium amorphe en termes de sa performance. Cependant, nous avons toujours un problème devant la fabrication de cette cellule soit de pénurie de tellure soit de toxicité du cadmium. Le rendement de ces cellules atteint 10,5% (15.8 % en laboratoire) [6].



Figure 2-8 : Cellule au tellurure de Cadmium [8].

2-3-2-d Les cellules à base d'arséniure de gallium (GaAs) :

Il convient de distinguer deux types de cellules incorporant l'arséniure de gallium. D'un côté, les cellules de « type III-V », de l'autre côté, les cellules multi jonctions (de type GaInP/GaAs/Ge) qui constituent les cellules les plus efficaces. Le rendement de ces cellules dépasse 25% en laboratoire [9], cependant, leur coût de production très élevé restreint leur utilisation à des domaines spécifiques tels que l'aérospatiale.

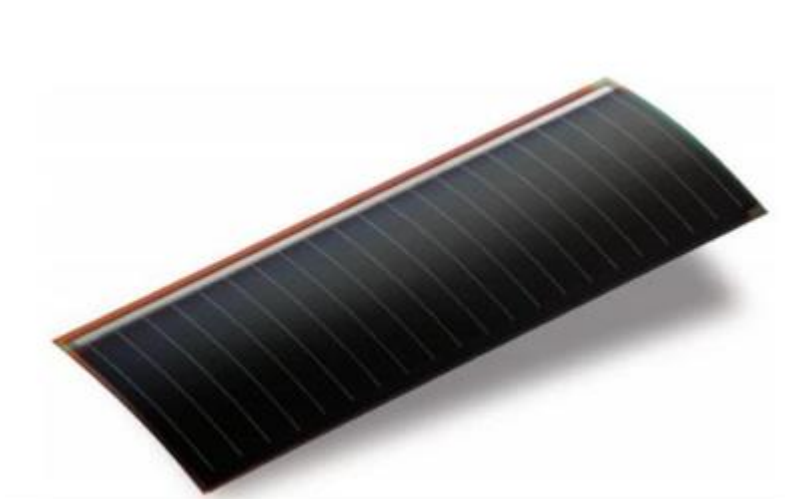


Figure 2-9 : Cellule solaire à base d'Arsénium de Gallium [10]

2-3-3 Les cellules de troisième génération :

La troisième génération a vu le jour dans les années 1980, elle regroupe les technologies à base de matériaux organiques. Cette technologie est encore en phase de développement et elle cherche à combiner une production à bas coûts à partir de matériaux abondants, avec des rendements élevés. On peut classer ces nouvelles technologies en deux grandes familles :

2-3-3-a Les cellules solaires organiques :

Ces cellules sont composées soit de matériaux moléculaires soit des polymères semi-conducteurs. Les procédés de fabrication de ces macromolécules sont issus de la pétrochimie, elles sont donc peu coûteuses. De plus, elles sont légères et peu fragiles. Leur rendement photovoltaïque peut atteindre 18.2% [11, 12].

2-3-3-b Les cellules solaires DSSC:

Les cellules sensibilisées à colorant, en anglais « Dye-Sensitized Solar Cells » (DSSC) reposent sur l'utilisation d'oxydes semiconducteurs inorganiques à large bande interdite (TiO_2 , ZnO , SnO_2 , etc.) nanostructures et sensibilisés par des chromophores organiques ou métal-organiques. Ces cellules sont attrayantes parce qu'elles utilisent des matériaux à faible coût et sont faciles à fabriquer [13]. Le meilleur rendement de conversion de puissance obtenu en laboratoire pour ce type de technologie peut atteindre actuellement 13.0 % [14, 15].



Figure 2-10 :(a) Cellule solaire organique (b) Cellule de type Grätzel (DSSC) [16]

Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'avoir un aperçu sur la structure et les différents types de cellules solaires. Dans le prochain chapitre, nous nous concentrerons sur les paramètres de performance des cellules solaires ainsi que les moyens utilisés pour optimiser leur efficacité.

Bibliographie du chapitre 2

- [1] Melle DJAAFAR Fatiha *Etude et Modélisation des Performances des Cellules Photovoltaïques à Multi Couches à Base des Semi-conducteurs Inorganiques* thèse de doctorat université d'Oran USTOMB Soutenu le : 30-10-2018
- [2] Mr. ABDERREZEK Mahfoud *Modalisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement* thèse de doctorat en science université Sétif -1 soutenue le 18-02-2015
- [3] Corina barbos *passivation de surface des cellules photovoltaïque en silicium cristallin dépôt par ALD et caractérisation de couche mince d'AL₂O₃* thèse de doctorat université de Lyon soutenue le 14/12/2016
- [4] https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/renouvelables/essentiel-sur-cellules-photovoltaïques.aspx?g_3bda4e72_795b_4e80_9ebc_c6f24183cd3d=1, 01/02/2024 a 16:00.
- [5] AZZEMOU Fatiha *Optimisation des performances des cellules solaires à base d'hétérojonctions de silicium* thèse de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences Filière Physique Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique Département de Physique. Soutenu le : 03/ 07 /2022
- [6] A.Labouret, M. Viloz, *Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.*
- [7] <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaïques>, 07/02/2024 a 13:05.
- [8] *Fr.Solarpedia.net* . 10/02/2024 a 11:00.
- [9] H.Matieu, *Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, 1ère édition, DUNOD, Paris, 2001.*
- [10] <http://www.dsnsolar.com>, 11/02/2024 a 11:00.
- [11] NREL. *Efficiency chart* <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>, 11/02/2024 a 11:30.
- [12] M. A. Green, E. D. Dunlop, J. H-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, X. Hao, *Solar cell efficiency tables (version 58)*, *J. Prog. Photovolt: Res. Appl*, 29 (2021) 657-667.
- [13] O'Regan, M. Grätzel, *A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films*, *Nature*, 353 (1991) 737-740.
- [14] Mme HOURI Nadia *Etude et réalisation d'une cellule solaire à bas coût, recyclable et préservant l'environnement de type Grätzel* thèse de doctorat université d'Oran USTOMB Soutenu le : 30-09-2021
- [15] S. Mathew, A. Yella, P. Gao, R. Baker, B.Curchod, N. Astani, I. Tavernelli, U. Rothlisberger, Md.K. Nazeeruddin, M. Grätzel, *Dye-sensitized solar cells with 13% efficiency achieved through the molecular engineering of porphyrin sensitizers*, *J. Nature Chemistry*, 06 (2014) 242-247.
- [16] K. Kalyanasundaram, *Dye-Sensitized Solar Cells*, EPFL, Lausanne, 2010.

Chapitre 3

*Performance et amélioration de
l'efficacité énergétique*

3-1 Introduction

L'évolution rapide des technologies avancées des cellules solaires représente une étape cruciale dans la quête mondiale pour une transition énergétique durable. Ces avancées offrent non seulement des rendements plus élevés, mais ouvrent également de nouvelles possibilités d'intégration dans des domaines aussi variés que l'architecture, l'électronique et le stockage d'énergie.

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'influence de certains paramètres sur la performance des cellules solaires. Ensuite, nous présenterons les différents mécanismes de perte d'énergie. Finalement, nous exposons les technologies et les matériaux avancés dans la production des cellules solaires pour améliorer la performance des cellules.

3-2 Paramètres de performance des cellules solaires

La performance d'une cellule solaire peut être évaluée selon plusieurs paramètres clés, notamment [1] :

3-2-1 Courant de court-circuit (I_{cc}) : C'est le courant maximal qu'une cellule solaire peut produire lorsqu'elle est court-circuitée sans l'application de tension ($V=0$).

3-2-2 Tension en circuit ouvert (V_{oc}) : C'est la différence de potentiel mesurée aux bornes de la cellule lorsqu'aucun courant ne circule.

3-2-3 Courant de crête (I_m) : Également appelé courant de travail maximal, il s'agit de la valeur la plus élevée atteinte par le courant pendant une période.

3-2-4 Tension de crête (U_m) : La tension de crête est également appelée tension de travail maximale. La tension de crête ne change pas avec l'augmentation ou la diminution de la surface de la cellule, généralement 0,45 ~ 0,5 v, et la valeur typique est de 0,48 v.

3-2-5 Puissance de crête (P_m) : Également appelée puissance de sortie maximale ou puissance de sortie optimale. Elle s'agit de la puissance maximale que la cellule peut produire dans des conditions standards de fonctionnement ou de test (une irradiation solaire de 1000 W/m², température 25 °C, spectre AM 1,5) :

$$P_m = I_m * U_m$$

3-2-6 Facteur de remplissage (FF) : Également appelé facteur de forme, indique le degré d'idéalité de la caractéristique courant-tension, donc c'est le rapport entre la puissance de sortie maximale et la puissance idéal [1]

$$FF = P_m / (I_{cc} * V_{oc}) .$$

3-2-7 Efficacité de conversion (η) : L'efficacité de conversion fait référence au rapport entre la puissance de sortie maximale de la cellule solaire lorsqu'elle est éclairée et l'énergie solaire irradiée sur la cellule :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{co} I_{cc} FF}{P_{in}}$$

3-2-8 Rendement quantique (QE) : Le rendement quantique donne la probabilité qu'un photon incident d'énergie E fournira un électron a un circuit externe [1] :

$$QE = \frac{\text{paires électrons trous collectées}}{\text{photons incidents}}$$

Le rendement quantique dépend de plusieurs propriétés du matériau ; coefficient d'absorption, profondeur de jonction, épaisseur de la charge de déplétion, durée de vie des porteurs et leur mobilité, recombinaison en surface, etc.

3-3 Efficacité globale

Il s'agit de la quantité d'énergie absorbée par la cellule solaire qui est efficacement convertie en énergie électrique [2].

Plusieurs facteurs influencent l'efficacité d'une cellule solaire :

3-3-1 La qualité des matériaux

L'efficacité des cellules photovoltaïques est fortement influencée par le choix des matériaux utilisés dans leur fabrication. Ces matériaux présentent des capacités variables en termes d'absorption et de conversion de la lumière solaire en électricité. Par exemple, les cellules en silicium monocristallin sont réputées pour leur rendement élevé, pouvant atteindre plus de 22 % dans des conditions de laboratoire, tandis que les cellules solaires à couches minces ont généralement des niveaux d'efficacité plus bas, autour de 10 % [2].

3-3-2 Les conditions d'utilisation

L'efficacité des cellules photovoltaïques est également affectée par des facteurs environnementaux tels que la température et l'intensité de la lumière solaire [2].

3-3-3 La conception de la cellule :

La structure de la cellule, l'épaisseur des différentes couches et la présence de couches antireflet peuvent tous influencer l'efficacité de la cellule.

3-3-4 La technologie de la fabrication :

Des défauts dans la cellule peuvent réduire son efficacité.

3-4 Perte d'énergie et amélioration de l'efficacité

L'obstacle principal entravant l'efficacité des cellules solaires réside dans la perte d'énergie qu'elles subissent. Pour améliorer l'efficacité des cellules solaires, il est essentiel d'examiner les différentes formes de pertes et de prendre en compte les récentes avancées dans le domaine. Ces pertes peuvent être classées selon les pertes optiques et électriques.

3-4-1 Perte d'énergie

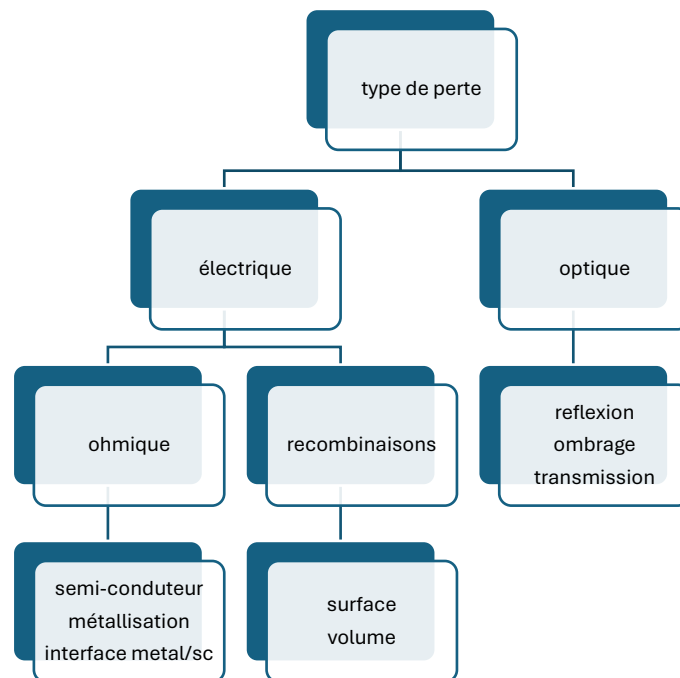


Figure 3-1 : Différents types de pertes dans les cellules solaires [3]

3-4-1-a Perte optique :

Cela inclut les réflexions de la lumière à la surface du matériau PV et l'absorption insuffisante de la lumière dans les matériaux semi-conducteurs :

- Absorption incomplète des photons : Les photons dont l'énergie est inférieure à la bande interdite, ne peuvent être absorbés par les matériaux pour générer des paires électron-trou.

- *Excès d'énergie des photons* : D'un autre côté, les photons d'énergie supérieure à celle de la bande interdite perdent l'énergie en excès par thermalisation [3].

3-4-1-b Perte électrique :

A Les pertes résistives (perte ohmique) :

Également appelées pertes par effet Joule, sont des pertes d'énergie qui se produisent lorsqu'un courant électrique traverse un matériau qui a une résistance électrique. Lorsque le courant traverse la résistance, une partie de l'énergie électrique est convertie en chaleur en raison de la résistance du matériau. Cela peut entraîner une diminution de l'efficacité énergétique des systèmes électriques [3].

B Les pertes par recombinaison :

Dans une cellule solaire, lorsque la lumière incidente frappe le matériau semi-conducteur, elle génère des paires électron-trou, où un électron est libéré de sa liaison atomique et laisse derrière lui un trou, qui est l'absence d'électron. Ces électrons et trous libres sont les porteurs de charge. Pour générer du courant électrique, ces porteurs de charge doivent être séparés et dirigés vers les contacts électriques situés à l'avant et à l'arrière de la cellule solaire.

Cependant, si un électron et un trou se rencontrent et se réunissent avant d'atteindre les contacts électriques, ils se recombinent, annulant ainsi leur charge électrique. Ce processus est appelé recombinaison, et il diminue la quantité de courant générée par la cellule solaire, réduisant ainsi son efficacité énergétique.

Ces types de recombinaisons se manifestent selon plusieurs mécanismes :

- La recombinaison radiative
- La recombinaison Auger
- Recombinaison en surface [la recombinaison Schokley Read Hall (SRH)]

- **La recombinaison radiative** : est défini comme étant la recombinaison d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence. Cette recombinaison libère un photon [4].

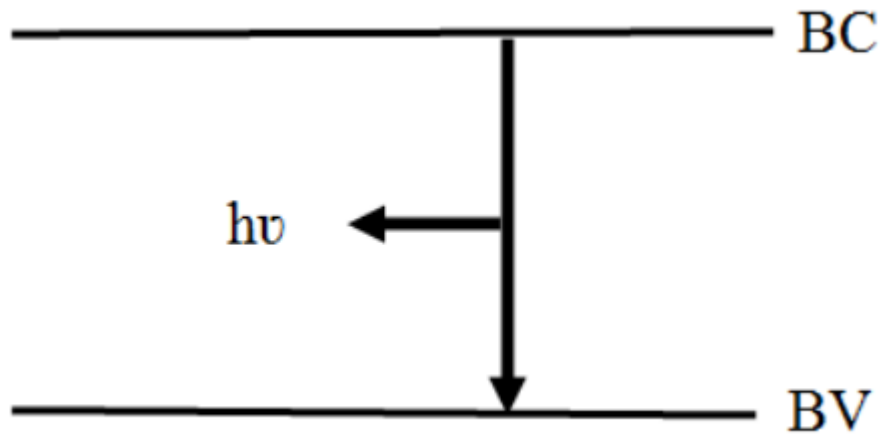


Figure 3-2 : Le processus de recombinaison de type radiatif [4]

- **Recombinaison en volume de type Auger :** La recombinaison de type Auger consiste à un transfert de l'énergie de l'électron de la bande de valence sous forme d'énergie cinétique à un autre électron libre. Cette énergie est libérée sous forme de phonons [4].

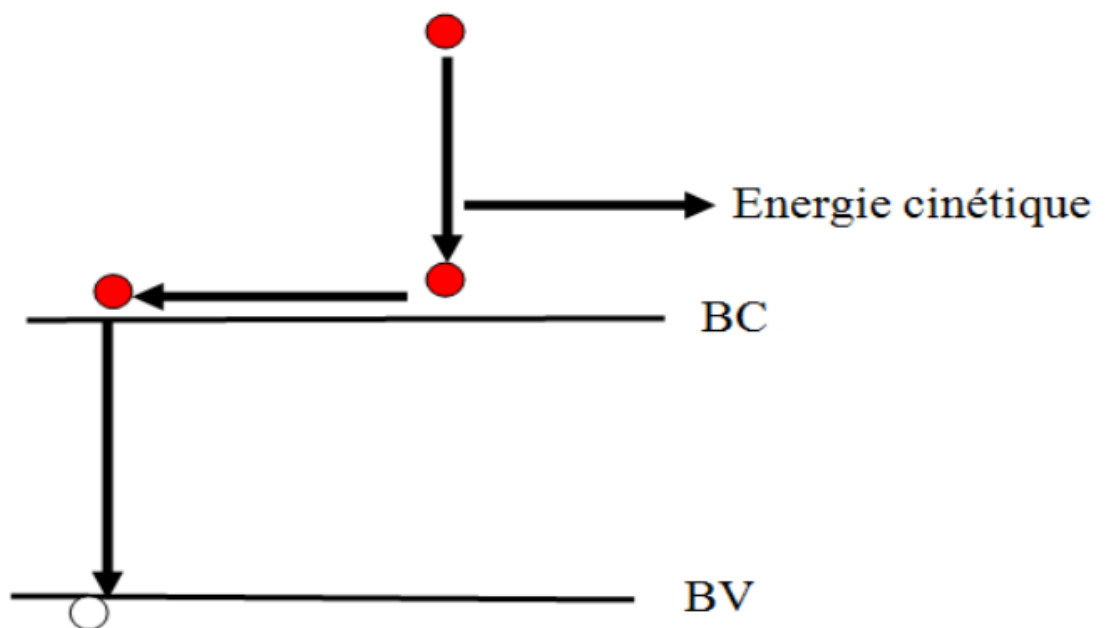


Figure 3-3 : Mécanisme de recombinaison de type Auger.[4]

- **Recombinaison en surface :** Les recombinaisons sur la surface d'un semi-conducteur sont nombreuses à cause des défauts. Ces recombinaisons se font en surface avant et arrière.

Le processus de recombinaison SRH est généralement exprimé en termes de recombinaison par unité de surface et non pas par unité de volume [3]

Les quatre étapes possibles dans ce processus sont :

1. La capture d'un électron par un niveau piège (passage de l'électron de E_c vers E_p).
2. L'émission d'un électron à partir d'un niveau piège (passage de l'électron de E_p vers E_c).
3. L'émission d'un trou à partir d'un niveau piège (passage de l'électron de E_v vers E_p).
4. La capture d'un trou par un niveau piège (passage de l'électron de E_p vers E_v).

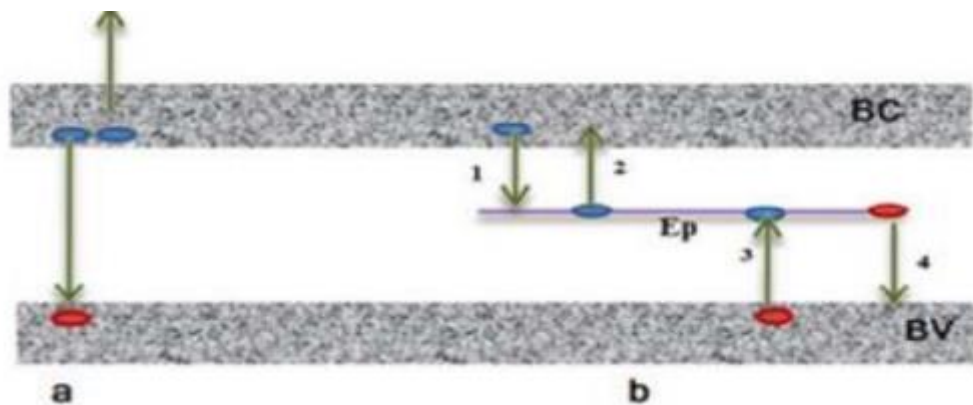


Figure 3-4 : Mécanismes de recombinaisons non radiatives : a) de type Auger, b) de type Shockley-Read -Hall (SRH) [3]

3-4-2 Amélioration de l'efficacité :

L'amélioration de l'efficacité des cellules solaires implique une approche multidisciplinaire qui comprend la physique, la chimie des matériaux, l'ingénierie optique et électrique :

- Utilisation de revêtements antireflets
- Structures photoniques : Des nanostructures
- Matériaux à haute mobilité des porteurs de charge
- Cellules solaires à jonction multiple
- Cellules solaires à hétérojonction
- Technologies avancées (Cellules solaires à pérovskite / Cellules solaires en tandem / Utilisation des matériaux 2D)

3-5 Amélioration de la technologie de production :

L'amélioration de la technologie de production des cellules solaires est un domaine de recherche et de développement très actif qui vise à optimiser et améliorer les processus de fabrication de ces cellules photovoltaïques, parmi les importantes pistes d'amélioration on mentionne l'augmentation de rendement de conversion énergétique, la réduction des coûts de production, l'amélioration de la stabilité et la durabilité et la réduction de l'impact environnemental.

3-5-1 Utilisation de matériaux avancés dans la production des cellules

Les cellules actuelles sont généralement constituées d'un empilement de fines couches de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium, le sulfure de cadmium, ou le tellure de cadmium.

On discute quelques exemples de matériaux avancés utilisés dans la production de cellules solaires.

3-5-1-a Cellule solaire à couche mince :

Les cellules solaires à couche mince représentent une innovation majeure dans le domaine des technologies avancées des cellules solaires. Contrairement aux cellules traditionnelles composées de plusieurs couches de silicium cristallin, les cellules à couche mince utilisent des matériaux semi-conducteurs beaucoup plus minces. Ces matériaux peuvent être déposés sur des substrats flexibles offrant une flexibilité de conception et une adaptabilité à diverses surfaces.

Plusieurs types de matériaux semi-conducteurs minces sont utilisés dans les cellules solaires à couche mince dont le tellurure de cadmium (CdTe), le cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS), et l'amorphe au silicium (a-Si). Pour ces matériaux, une épaisseur mince de seulement quelques microns est suffisante pour une absorption adéquate de la lumière, et ils n'ont pas besoin d'être de haute qualité contrairement au silicium traditionnel.

Les cellules solaires à couche mince présentent plusieurs avantages :

- Légèreté et flexibilité
- Coût de production réduit
- Meilleure performance par temps nuageux.

Bien que les cellules à couche mince présentent de nombreux avantages, des défis persistent tels que la durabilité à long terme et l'efficacité énergétique maximale [5].

3-5-1-b Matériaux organiques :

Les matériaux organiques constituent une nouvelle catégorie de matériaux prometteuse pour la fabrication des cellules photovoltaïques à moindre coût. Les cellules solaires organiques exploitent des polymères organiques ou des molécules organiques spécifiques pour absorber la lumière solaire. Ils offrent des avantages supplémentaires par rapport aux matériaux traditionnels, tels que la transparence et la flexibilité, ce qui ouvre de nouvelles possibilités d'utilisation, comme l'intégration dans les fenêtres ou les façades de bâtiments.

Les cellules solaires organiques à base de polymères ont atteint un rendement moyen de 8 - 10 % [6].

Bien que prometteuses, les cellules solaires organiques présentent également des défis. Leur efficacité énergétique est généralement inférieure à celle des cellules traditionnelles, et elles peuvent être plus sensibles aux conditions environnementales, limitant leur durabilité.

3-5-1-c Cellules pérovskites :

Découverte dans les années 1830, l'existence des pérovskites n'a bouleversé le monde de la science que 180 ans plus tard. Ce n'est en effet qu'en 2010 que Tsutomu Miyasaka a mis en lumière son potentiel dans l'industrie photovoltaïque. Grâce à ces recherches, des ingénieurs ont pu fabriquer des cellules photovoltaïques à base de pérovskite et ont constaté que ces dernières démontrent un rendement supérieur aux cellules à base de silicium.

La pérovskite est en effet un meilleur conducteur d'électricité : les électrons sont transportés plus efficacement, ce qui lui donne un avantage par rapport au silicium. [7]

En 2012, les chercheurs ont découvert pour la première fois comment fabriquer une cellule solaire pérovskite à couche mince stable avec des rendements de conversion photon-électron lumineux de plus de 10 %, en utilisant des pérovskites aux halogénures de plomb comme couche absorbant la lumière. Depuis lors, l'efficacité de conversion de la lumière du soleil en énergie électrique des cellules solaires à pérovskite a grimpé en flèche, [8]

Les cellules solaires à pérovskite présentent plusieurs avantages par rapport aux cellules solaires au silicium traditionnelles :

- **Efficacité accrue** : Comme mentionné précédemment, elles peuvent convertir plus de lumière solaire en électricité, ce qui se traduit par une production d'énergie plus importante pour une même surface.
- **Faible coût de fabrication** : Les matériaux utilisés pour les cellules solaires à pérovskite sont abondants et peu coûteux, ce qui pourrait réduire considérablement le prix de l'énergie solaire.
- **Flexibilité et légèreté** : Contrairement aux cellules solaires au silicium rigides, les cellules solaires à pérovskite peuvent être flexibles et légères, ce qui les rend idéales pour une large gamme d'applications, telles que les toitures ou les appareils portables.
- **Fabrication possible à basse température** : La fabrication des cellules solaires à pérovskite ne nécessite pas de températures élevées, ce qui la rend moins énergivore et plus respectueuse de l'environnement.

La recherche continue dans le domaine des cellules solaires en pérovskite vise à améliorer la stabilité, la durabilité et l'évolutivité de cette technologie. En réussissant à surmonter ces défis, les cellules solaires en pérovskite pourraient jouer un rôle majeur dans la transition vers des sources d'énergie plus durables.

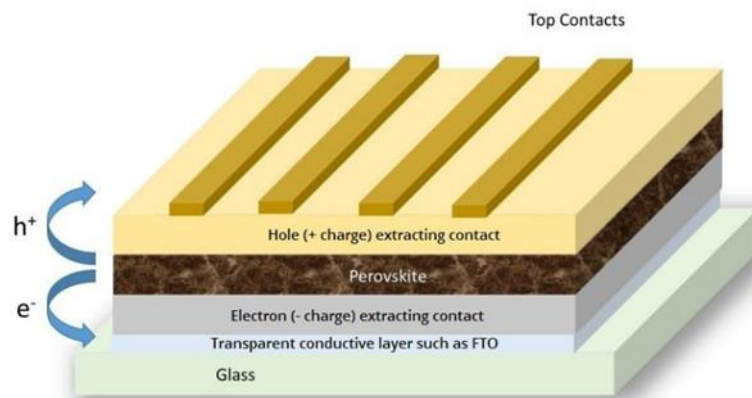


Figure 3-5- Coupe transversale d'une cellule solaire à pérovskite [8]

3-5-2 Technique de fabrication avancées pour améliorer la performance des cellules :

L'industrie photovoltaïque connaît une évolution fulgurante grâce à l'émergence de nouvelles technologies de fabrication qui permettent d'améliorer considérablement l'efficacité et la performance des cellules solaires. Parmi les plus prometteuses, on trouve :

3-5-2-a **Cellules solaires tandem pérovskite / silicium :**

Une cellule tandem est une cellule solaire qui combine le silicium et la pérovskite. Cette association permet d'additionner les points forts des deux semi-conducteurs à savoir la durabilité du silicium et le rendement de la pérovskite.

Selon certains chercheurs, les cellules tandem devraient permettre de produire 33% d'électricité en plus que les cellules au silicium.

En 2018, les scientifiques de l'EPFL ont développé une technique qui permet de répartir les couches de pérovskite de manière uniforme sur le silicium. Cette technique a permis d'atteindre un rendement de 25,2%.

Aujourd'hui cette technique a été améliorée par le processus de cristallisation de la pérovskite et permet de concevoir des couches ultra-transparentes qui offrent des cellules tandem avec un rendement de 29,2% pour une surface de 1 cm².

Ce nouveau record mondial a été certifié par l'institut allemand Fraunhofer ISE [9]

Des scientifiques de l'Université des Sciences et Technologies du Roi Abdallah (KAUST), en Arabie Saoudite, ont testé la performance d'une cellule solaire tandem pérovskite-silicium sur une année complète (entre avril 2021 et avril 2022) à l'extérieur, dans un environnement chaud et humide. D'après leurs conclusions, le dispositif de test a conservé 80 % de son rendement initial [10]

➤ ***Fonctionnement et avantages de la cellule tandem pérovskite-silicium :***

- Combinaison des atouts de deux matériaux : La cellule combine les propriétés de deux matériaux absorbants :
 - La pérovskite, qui capture efficacement les rayons bleus du spectre solaire.
 - Le silicium, qui absorbe les rayons rouges et infra-rouges.

- Cette combinaison permet à la cellule de capter un large éventail du spectre solaire, augmentant ainsi son efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité.
- Structure monolithique innovante :
 - Les chercheurs ont surmonté le défi de l'intégration monolithique de la pérovskite au silicium, un processus délicat car la pérovskite requiert une température élevée qui endommage le silicium.
 - Ils ont remplacé la couche de dioxyde de titane par une couche de dioxyde d'étain à basse température, protégeant ainsi le silicium.

➤ **Défis à relever :**

- **Stabilité à long terme** : La durabilité des cellules pérovskites dans le temps est encore à prouver.
- **Présence de plomb** : La présence de plomb dans certaines cellules pérovskites soulève des questions environnementales et de santé.

Les cellules photovoltaïques pérovskite-silicium constituent une avancée majeure dans le domaine de l'énergie solaire, avec un potentiel d'efficacité et de production d'électricité accrues. Les recherches continues pour améliorer la stabilité et la durabilité de ces cellules, ainsi que pour réduire leur empreinte environnementale, pourraient ouvrir la voie à une nouvelle ère d'énergie solaire plus propre et plus performante [11].

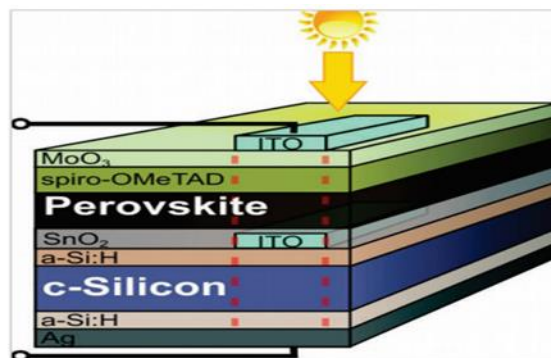


Figure 3-6- représentation schématique d'une cellule tandem silicium cristallin et pérovskite [11]

3-5-2-b Cellules solaires a hétérojonction

On parle d'hétérojonction lorsque deux matériaux différents entrent en contact. Dans le domaine des cellules photovoltaïques, une hétérojonction se produit lorsque le silicium monocristallin est en contact avec du silicium amorphe. À l'inverse, l'homojonction désigne un fonctionnement basé sur un seul matériau. Dans le domaine de l'énergie solaire, cela se traduit par une cellule composée uniquement de silicium monocristallin.

Dans le cadre de l'industrie solaire photovoltaïque, le terme "hétérojonction" est utilisé pour désigner une nouvelle sorte de cellules solaires.

Une cellule solaire à hétérojonction est composée de trois couches : une tranche de silicium cristallin prise en sandwich entre deux couches de silicium amorphe.

Cette structuration multicouche permet de capter une très importante quantité de photons, et donc une production énergétique plus élevée, avec un rendement pouvant atteindre 24 % [12].

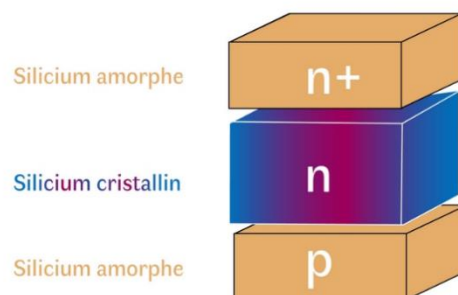


Figure 3-7 : Schéma de principe de l'hétérojonction silicium © M. Colonna d'Istria/CEA

3-5-2-c Technologie à concentration solaire :

Contrairement aux cellules solaires conventionnelles qui capturent la lumière diffusée, les technologies à concentration solaire utilisent des systèmes optiques (des miroirs ou des lentilles) pour focaliser la lumière sur de petites surfaces photovoltaïques augmentant ainsi l'efficacité de conversion. Ils sont particulièrement efficaces dans les régions ensoleillées où la concentration de lumière solaire est maximale [5].

3-5-2-d Nanotechnologie et Cellules Solaires

Le terme nanotechnologie signifie toute conception, fabrication et utilisation des structures d'une dimension inférieure à 100 nanomètres. Lorsqu'elle est appliquée aux cellules solaires, elle utilise des nanoparticules ou des nanomatériaux pour optimiser la capture de la lumière solaire et la conversion en électricité. Ces nanomatériaux peuvent avoir différentes formes, tailles, compositions et structures, ce qui peut affecter leurs propriétés optiques et électriques.

L'utilisation de nanomatériaux présente plusieurs avantages [13] :

- **Améliorer l'absorption de la lumière** : En raison de leur petite taille et de leur grande surface, les nanomatériaux peuvent avoir une absorption optique plus élevée, une réfraction plus faible et des bandes interdites accordables, ce qui est important pour l'efficacité des cellules solaires.
- **Améliorer la collecte de la lumière** : Les nanomatériaux peuvent être utilisés comme absorbeurs de lumière, sensibilisants ou agents de diffusion pour augmenter la quantité de lumière qui atteint la couche active.
- **Faciliter le transport de charge** : Les nanomatériaux peuvent être utilisés comme conducteurs, semi-conducteurs ou isolants pour créer des voies efficaces pour les porteurs de charge et réduire les pertes de recombinaison. Certains des nanomatériaux courants pour le transport de charge sont le graphène, les nanotubes de carbone, les nanoparticules métalliques, les oxydes métalliques, et les polymères.
- **Stabilité et durabilité** : Les nanomatériaux peuvent être utilisés comme revêtement, barrières ou additifs pour protéger la cellule solaire de la dégradation ou de la corrosion. Parmi les nanomatériaux qui assurent la stabilité et la durabilité, on peut citer la silice, le dioxyde de titane, l'oxyde de zinc et les molécules organiques.
- **Reduction des coûts** : Les nanomatériaux peuvent remplacer ou réduire la quantité des matériaux coûteux ou rares.

Conclusion

Les technologies solaires avancées ont le potentiel de transformer notre système énergétique, en le rendant plus propre et plus durable.

Dans ce chapitre ; nous avons basé sur les paramètres de performance des cellules solaires ainsi que les différents types des pertes d'énergie qui limite le rendement d'une cellule solaire

Ensuite nous avons cité des matériaux avancés et des nouvelles technologies de production pour optimiser et amélioré la performance et l'efficacité des cellules solaire

Dans le chapitre qui suit on va présenter la simulation de la structure proposée, les résultats des performances photovoltaïques obtenus et la discussion.

Bibliographie du chapitre 3

- [1] Mr.ABDERREZAK Mahfoud science modélisation des cellules solaires tandem à couche minces et à haut rendement Thèse de doctorat université setif -1 soutenu le 18-02-2015
- [2] <https://www.basengreen.com/fr/quelle-est-l%27efficacit%C3%A9-des-cellules-photovolta%C3%AFques-b/>, 02/05/2024 a 16:00.
- [3] AZZEMOU Fatiha optimisation des performances des cellules solaires base d'hétérojonctions de silicium Thèse de doctorat en science Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem Année Universitaire 2021-2022
- [4] Melle DJAAFAR Fatiha Etude et Modélisation des Performances des Cellules Photovoltaïques à Multi Couches à Base des Semi-conducteurs Inorganiques thèse de doctorat université d'Oran USTOMB Soutenue le : 30-10-2018
- [5] <https://systemessolaire.com/technologies-avancees-des-cellules-solaires-2024/>, 09/05/2024 a 10:20.
- [6] https://ena.etsmtl.ca/pluginfile.php/1474194/mod_folder/content/0/01-Pr%C3%A9sentations%20%28format%20PDF%29/22.5%20Efficacit%C3%A9%20%C3%A9n%20%C3%A9nergie%202021_06_03.pdf?forcedownload=1, 09/05/2024 a 11:10.
- [7] <https://www.monkitsolaire.fr/blog/panneau-solaire-perovskite-n386>, 15/05/2024 a 13:05.
- [8] <https://www.dsnsolar.com/info/introduction-to-perovskite-solar-cell-63411583.html>, 15/05/2024 a 13:05.
- [9] https://www.civisol.fr/actualites-photovoltaique.html/104_record-tandem, 15/05/2024 a 13:05.
- [10] Article « Des cellules solaires tandem pérovskite-silicium conservent 80 % de rendement au bout d'un an » *pv magazine International* MARS 3, 2023 [EMILIANO BELLINI](#)
- [11] <https://www.diplomatie.gouv.fr/fr/politique-etrangere-de-la-france/diplomatie-scientifique-et-universitaire/veille-scientifique-et-technologique/allemande/article/nouveau-type-de-cellule-photovoltaique-en-tandem-silicium-perovskite>, 21/05/2024 a 20:05.
- [12] <https://www.monkitsolaire.fr/blog/heterojonction-photovoltaique-n405>, 15/05/2024 a 21:10.
- [13] Article « Comment les nanomatériaux peuvent-ils améliorer l'absorption et la conversion de la lumière des cellules solaires? » Généré par l'IA et la communauté LinkedIn [Capteur solaire photovoltaïque](#) 14 mai 2024 par Oseghale Okohue BEngr. Msc. MBA. DBA. Prince2

Chapitre 4

*Simulation de la cellule solaire
pérovskite CH₃NH₃SnI₃ par
SCAPS-1D*

4-1 Introduction

Le but de l'étude de simulation est d'estimer l'évolution des propriétés de la cellule simulée et de comprendre physiquement la structure développée d'une cellule solaire donnée en essayant d'analyser la tension du circuit ouvert V_{co} , le courant de court-circuit, le facteur de forme FF et le rendement de conversion η . Pour cela, il est nécessaire d'utiliser un logiciel capable de simuler les paramètres d'une telle cellule. Plusieurs logiciels de simulation existent, parmi ces logiciels, on peut citer AMPS-1D, PC-1D, ASA, SCAPS-1D, SILVACO.

Dans ce chapitre nous allons faire une simulation numérique de la cellule solaire à pérovskite hybride à base d'étain (CH₃NH₃SnI₃) à l'aide du programme de simulation SCAPS-1D version 3.3.09, qui permet de trouver les paramètres les plus importants pour un meilleur fonctionnement de la cellule pérovskite.

4-2 Présentation du SCAPS-1D

SCAPS est un programme de simulation de cellules solaires unidimensionnelle développé au département d'électronique et de systèmes d'information (ELIS) de l'Université de Gand, en Belgique.

SCAPS-1D est basé sur la résolution numérique par la méthode des éléments finis des équations de continuité pour les électrons et les trous et sur l'équation de Poisson

Équations de continuité :

Les équations de continuité permettent de déterminer en tout point et à chaque instant, la concentration des porteurs dans un semi-conducteur, elle s'écrit [1] :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot \bar{J}_n + G_n - R_n$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{-1}{q} \nabla \cdot \bar{J}_p + G_p - R_p$$

G_n et G_p sont les taux de génération optique des paires électrons trous, R_n et R_p sont respectivement les taux de recombinaisons pour les électrons et les trous, \bar{J}_n et \bar{J}_p sont les densités des courants des électrons et trous.

L'équation de Poisson :

L'équation de Poisson relie les variations du potentiel électrostatique (champ électrique) aux densités locales de charge. Elle s'exprime par [1] :

$$\frac{-d^2\varphi}{dx^2} = \frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_r\epsilon_0}$$

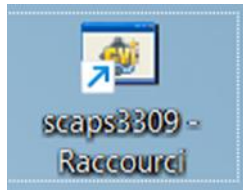
où ρ est la charge électrique totale dans le semi-conducteur, ϵ_0 et ϵ_r , la permittivité dans le vide et relative dans le matériau, respectivement. φ le potentiel électrostatique, n et p les concentrations des porteurs libres.

La charge électrique totale ρ est déterminée par l'équation suivante :

$$\rho = q(p - n + N_D^+ - N_A^-)$$

Où N_D^+ et N_A^- sont les densités des donneurs et accepteurs ionisés

A Notion de base



SCAPS fonctionne sous Windows et est facile à installer. Après installation, un raccourci permettant d'ouvrir le programme apparaîtra sur le bureau.

Pour lancer SCAPS, il suffit de cliquer sur l'icône ci-dessus, et l'interface du programme s'affichera comme illustré dans la figure (Figure 4-1).

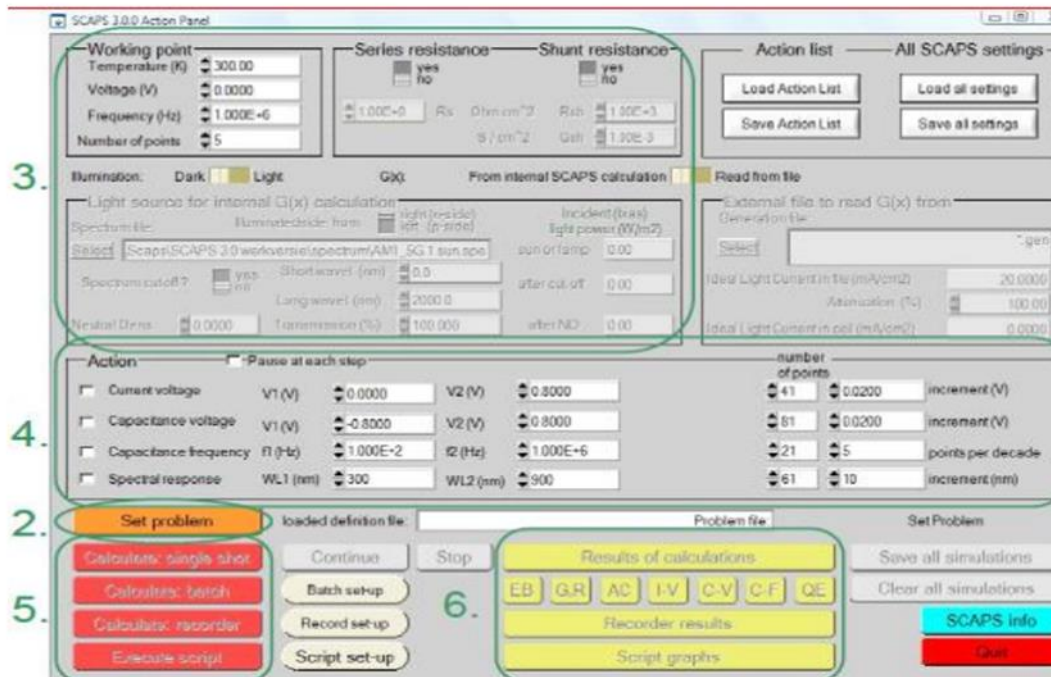
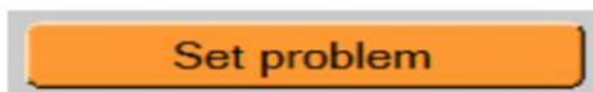


Figure 4-1 Fenêtre d'exécution « Action Panel » du logiciel SCAPS [2]

La signification des blocs numérotés de 2 à 6 est expliquée dans le texte. Il y a des panneaux dédiés pour les actions de base :

2. Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.
3. Indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifier le point de fonctionnement)
4. Indiquer la mesure à simuler.
5. Commencer le(s) calcul(s).
6. Afficher les courbes de simulation

B Définir le problème



On clique sur le bouton « Set problem » dans le panneau d'action, et on choisit « load » dans le coin droit en bas du panneau qui s'ouvre par la suite.



Figure 4.2 : Définir le problème

On sélectionne et on ouvre (par exemple $CH_3NH_3PbI_3.def$). Ceci est un fichier exemple d'une cellule solaire à base de pérovskite. Par la suite, il est possible de modifier toutes les propriétés de la cellule en cliquant sur 'Set problem' dans le panneau d'action.

C Définir le point de fonctionnement

Le panneau «working point» (ou point de fonctionnement en français) sert à spécifier les conditions dans lesquelles la simulation est effectuée. Ceci implique la température T , le voltage V , la fréquence f , et le nombre de points.

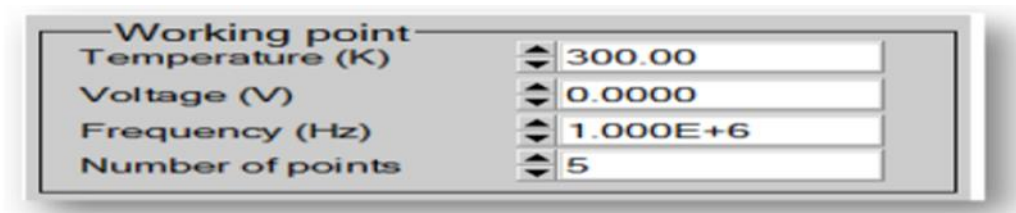


Figure 4.3 : Le point de fonctionnement

D Sélection des caractéristiques à simuler

Dans la partie «Action» du panneau d'action, on peut choisir un ou plusieurs mesures à simuler: I-V, C-V, C-f et $QE(\lambda)$. On peut ajuster également, les valeurs initiales et finales de l'argument, ainsi que le nombre des étapes.

E Lancer le calcul



En cliquant sur le bouton « Calculate: single shot », le panneau «Energy Bands Panel» (Bandes d'énergie) s'ouvre et le calculs démarre.



Figure 4-4 : Panneau des bandes d'énergie [2].

F Afficher les courbes simulées

Une fois les calculs terminés, SCAPS affiche les courbes de simulation : diagrammes de bandes, de densités des porteurs, de densité de courant, ..., etc. Pour imprimer ou sauvegarder les résultats, il suffit de cliquer sur l'un des boutons Save data ou save graphs.

4-3 Paramètres et propriété de la cellule de référence

Le tableau 4-1 résume les propriétés des différentes couches de la cellule (TiO₂/CH₃NH₃SnI₃/Cu₂O). Ces propriétés sont sélectionnées à partir de la littérature [3].

Paramètres	TiO ₂ (ETL)	CH ₃ NH ₃ SnI ₃ (absorbante)	Cu ₂ O (HTL)
Epaisseur (nm)	120	450	420
E_g (eV)	3.2	1.3	2.17
χ (eV)	4.1	4.17	3.2
ϵ_r	9.0	8.2	7.1
N_c (cm ⁻³)	2.2×10^{18}	1×10^{18}	2×10^{17}
N_v (cm ⁻³)	1.8×10^{19}	1×10^{18}	1.1×10^{19}
μ_n (cm ² /Vs)	0.05	2000	200
μ_p (cm ² /Vs)	0.05	300	80
N_D (cm ⁻³)	1×10^{18}	0	0
N_A (cm ⁻³)	0	1×10^{14}	1×10^{18}

Tableau 4-1 : Propriétés électriques et optiques des différentes couches de la cellule.

Les paramètres des interfaces sont exposés dans le tableau 4-2 [3].

<i>Paramètres</i>	<i>TiO2</i>	<i>CH3NH3SnI3</i>	<i>Cu2O</i>	<i>interface TiO2/CH3N H3SnI3</i>	<i>Interface CH3NH3SnI3/ Cu2O</i>
<i>Type</i>	<i>Neutre</i>	<i>Neutre</i>	<i>Neutre</i>	<i>Neutre</i>	<i>Neutre</i>
σ_n (cm^{-2})	1×10^{-15}	2.5×10^{-13}	1×10^{-15}	1×10^{-15}	1×10^{-15}
σ_p (cm^{-2})	1×10^{-15}	8.5×10^{-15}	1×10^{-15}	1×10^{-15}	1×10^{-15}
<i>Distribution d'énergie</i>	<i>Uniform</i>	<i>Gaussian</i>	<i>Uniform</i>	<i>Uniform</i>	<i>Uniform</i>
<i>Niveau d'énergie par rapport à E_v (eV)</i>	<i>0.600</i>	<i>0.650</i>	<i>0.100</i>	<i>0.600</i>	<i>0.600</i>
<i>Caractéristique d'énergie (eV)</i>	-	<i>0.100</i>	-	-	-
N_t (cm^{-3})	1×10^{14}	3.029×10^{16}	1×10^{14}	1×10^{10}	1×10^{10}

Tableau 4-2 : Paramètres pour les défauts dans les matériaux et les interfaces.

Le coefficient d'absorption de la pérovskite CH3NH3SnI3 présenté sur la figure ci-dessous est tiré de l'expérimentation à partir de la référence [4] et a été introduit sous forme de fichier dans le logiciel WebPlotDigitizer-4.7 -

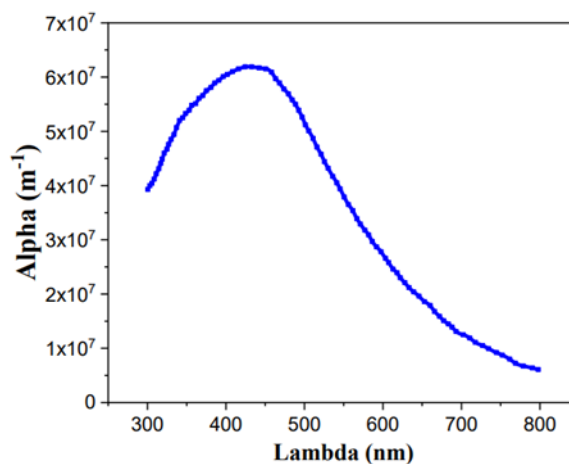


Figure 4-5 : Coefficient d'absorption de la pérovskite CH3NH3SnI3[5]

4-4 Résultat et discussion

4-4-1 Partie I : $TiO_2/CH_3NH_3SnI_3/CuO_2$



4-4-1-a Effet de l'épaisseur de la couche absorbante et de la température

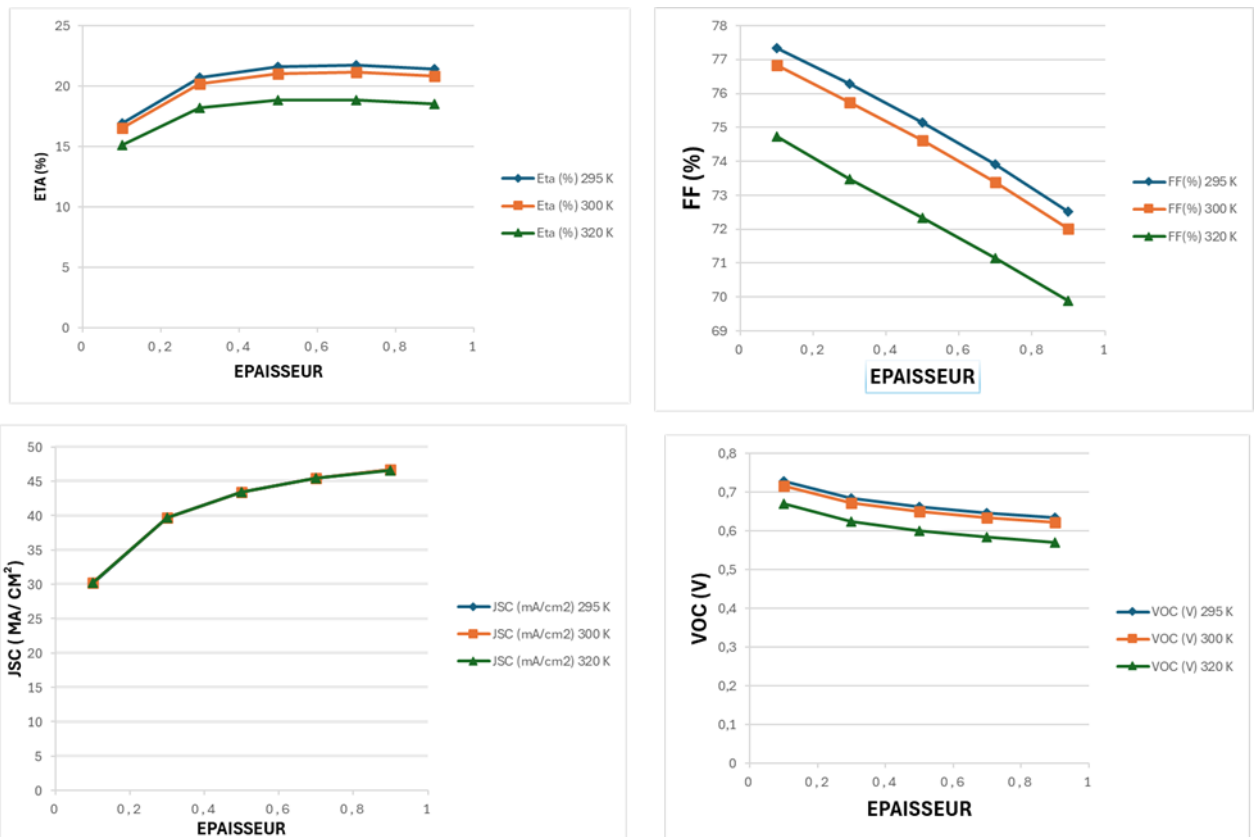


Figure 4-6 : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de $CH_3NH_3SnI_3$ et de la température.

D'après les schémas de la figure (Figure 4-6), on observe que plus la couche absorbante est épaisse, plus la tension en circuit ouvert V_{OC} et le facteur de forme FF sont faibles. Alors que, la variation du rendement avec ce paramètre de la couche montre qu'il y a une augmentation de η et de la densité de courant de court-circuit J_{SC} avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante.

Comme on peut le voir sur la figure (Figure 4-6), les valeurs de V_{OC} , FF, J_{SC} et le rendement décroissent avec l'augmentation de la température.

4-4-1-b Effet de l'épaisseur de la couche ETL (TiO₂) : T = 300 K, épaisseur de la couche absorbante = 0.1 μ m

<i>Épaisseur (μm)</i>	<i>Eta (%)</i>	<i>FF(%)</i>	<i>J_{SC} (mA/cm²)</i>	<i>V_{OC} (V)</i>
0.02	16.66	76.84	30.271742	0.7164
0.04	16.65	76.84	30.247150	0.7163
0.08	16.62	76.84	30.198935	0.7162
0.12	16.59	76.83	30.153682	0.7162
0.16	16.57	76.83	30.111150	0.7161
0.2	16.54	76.83	30.070974	0.7160

Tableau 4-3 : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de TiO₂

D'après le tableau 4-3, on observe que l'épaisseur de la couche TiO₂ n'a pas d'influence sur les performances de la cellule.

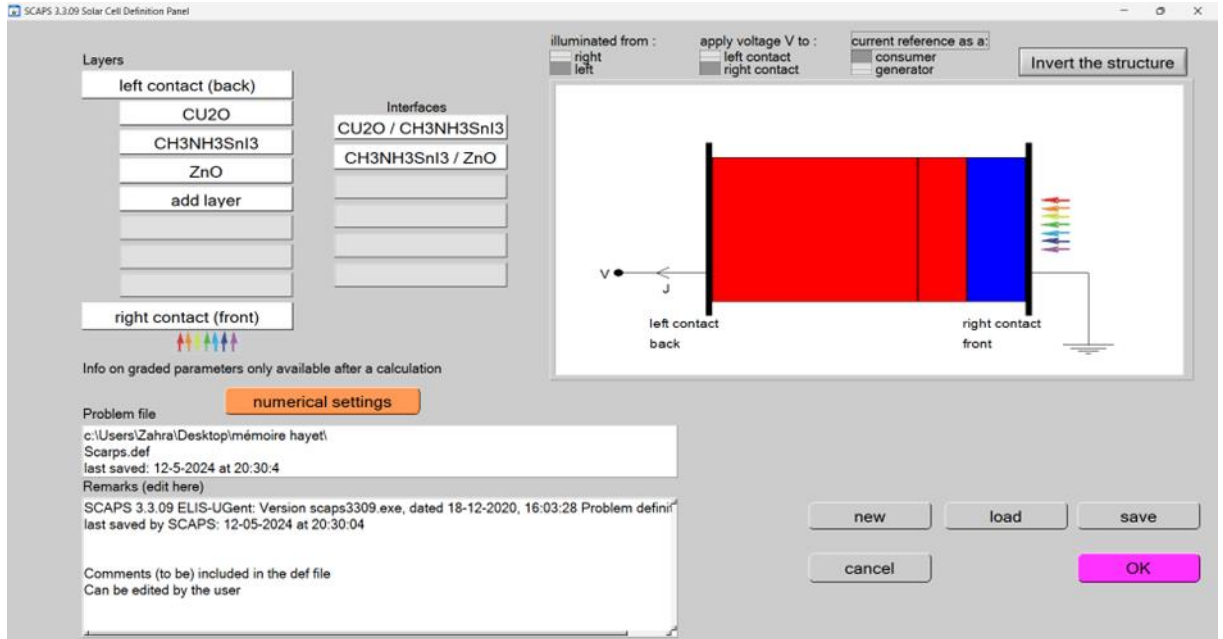
4-4-1-c Effet de l'épaisseur de la couche HTL (Cu₂O) : T = 300 K, épaisseur de la couche absorbante = 0.1 μ m

<i>Épaisseur (μm)</i>	<i>Eta (%)</i>	<i>FF(%)</i>	<i>J_{SC} (mA/cm²)</i>	<i>V_{OC} (V)</i>
0.02	16.57	76.83	30.122470	0.7161
0.04	16.58	76.83	30.125788	0.7161
0.08	16.58	76.83	30.131398	0.7161
0.12	16.58	76.83	30.135938	0.7161
0.16	16.58	76.83	30.139674	0.7161
0.2	16.59	76.83	30.142796	0.7162

Tableau 4-4 : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de Cu₂O.

D'après le tableau 4-4, nous remarquons que l'épaisseur de la couche HTL de Cu₂O n'a presque aucune influence sur les performances de la cellule

4-4-2 **Partie II : ZnO/CH₃NH₃SnI₃/CuO₂**



Le tableau 4-5 résume les propriétés des différentes couches de la cellule (ZnO/CH₃NH₃SnI₃/Cu₂O). Ces propriétés sont sélectionnées à partir de la littérature [6]

Paramètres	ZnO	CH ₃ NH ₃ SnI ₃ (absorbante)	Cu ₂ O (HTL)
Epaisseur (nm)	120	450	420
E _g (eV)	3.3	1.3	2.17
χ (eV)	4.0	4.17	3.2
ε _r	9.0	8.2	7.1
N _c (cm ⁻³)	2.2 x 10 ¹⁸	1 x 10 ¹⁸	2 x 10 ¹⁷
N _v (cm ⁻³)	1.8 x 10 ¹⁹	1 x 10 ¹⁸	1.1 x 10 ¹⁹
μ _n (cm ² /Vs)	100	2000	200
μ _p (cm ² /Vs)	25	300	80
N _D (cm ⁻³)	1 x 10 ¹⁸	0	0
N _A (cm ⁻³)	0	1 x 10 ¹⁴	1 x 10 ¹⁸
σ _n (cm ⁻²)	3.7 x 10 ¹⁸	2.5 x 10 ⁻¹³	1 x 10 ⁻¹⁵
σ _p (cm ⁻²)	1.8 x 10 ¹⁹	8.5 x 10 ⁻¹⁵	1 x 10 ⁻¹⁵

Tableau 4-5 : Propriétés électriques et optiques des différentes couches de la cellule.

4-4-2-a Effet de l'épaisseur de la couche absorbante et de la température

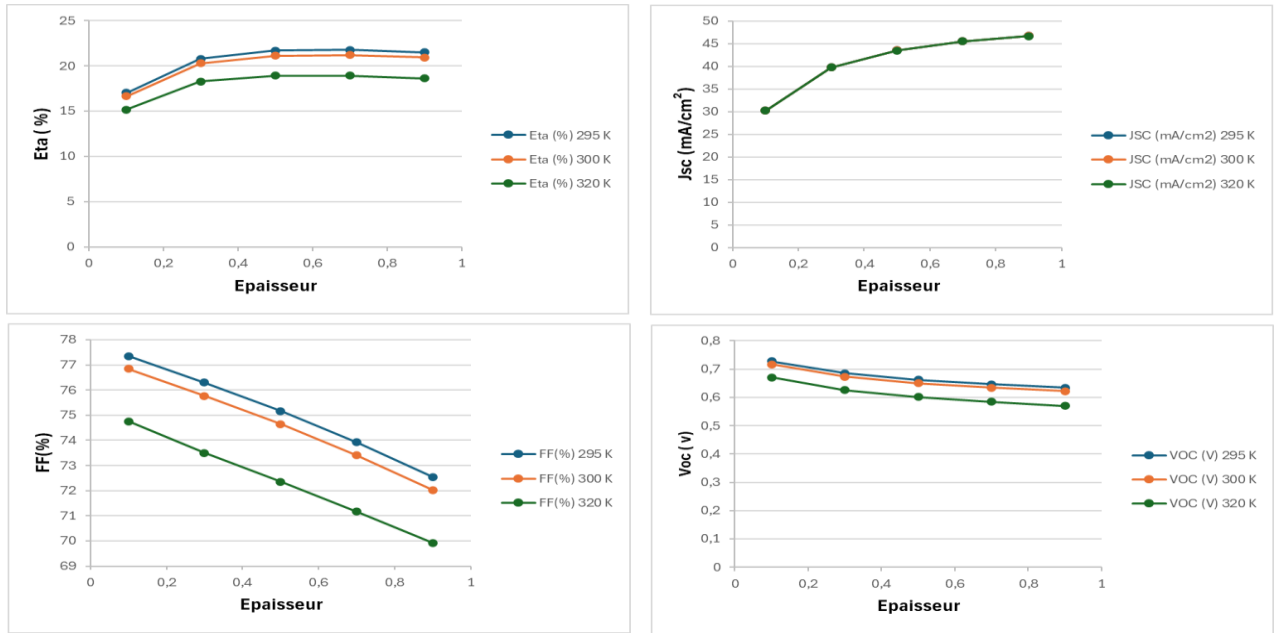


Figure 4-7 : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de CH₃NH₃SnI₃ et de la température

Selon les résultats tirés de la figure (Figure 4-7), il est observé que lorsque l'épaisseur de la couche absorbante augmente, les valeurs de la tension en circuit ouvert V_{OC} et le facteur de forme FF diminuent. Alors que les valeurs du rendement (η) ainsi que de la densité de courant de court-circuit (J_{sc}) révèle une augmentation avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante.

Les données présentées dans la figure 4-7 indiquent une diminution des valeurs de V_{OC} , FF, J_{sc} et du rendement avec l'augmentation de la température.

4-4-2-b Effet de l'épaisseur de la couche ETL (ZnO) T = 300 K, épaisseur de la couche absorbante = 0.7 μ m

Epaisseur (μ m)	Eta (%)	FF (%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)
0.02	21.23	73.41	45.611629	0.6341
0.04	21.23	73.41	45.604793	0.6341
0.08	21.21	73.41	45.581800	0.6340
0.12	21.20	73.41	45.554960	0.6340
0.16	21.19	73.41	45.527713	0.6340
0.2	21.17	73.41	45.501194	0.6340

Tableau 4-6 : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de ZnO

4-4-2-c Effet de l'épaisseur de la couche HTL (Cu₂O) T = 300 K, épaisseur de la couche absorbante = 0.7 μm épaisseur de la couche ETL (ZnO) = 0.12 μm

<i>Epaisseur (μm)</i>	<i>Eta (%)</i>	<i>FF(%)</i>	<i>Jsc (mA/cm²)</i>	<i>Voc (V)</i>
0.02	21.20	73.41	45.554957	0.6340
0.04	21.20	73.41	45.554958	0.6340
0.08	21.20	73.41	45.554959	0.6340
0.12	21.20	73.41	45.554960	0.6340
0.16	21.20	73.41	45.554961	0.6340
0.2	21.20	73.41	45.554961	0.6340

Tableau 4-7 : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de Cu₂O

Selon les données des deux tableaux ([4-6] et [4-7]), il est remarquable que le changement de l'épaisseur de la couche ETL (ZnO) et de la couche HTL (Cu₂O) ne semble avoir d'impact sur les performances de la cellule étudiée

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté et discuté les résultats de simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à base du matériau pérovskite CH₃NH₃SnI₃ en utilisant l'outil de simulation unidimensionnel SCAPS-1D.

Nous avons étudié l'effet de l'épaisseur de la couche absorbante et les couches de l'interface, ainsi que l'effet de la température sur les paramètres électriques.

Cette étude nous a permis de trouver les paramètres optimaux de la structure [TiO₂/CH₃NH₃SnI₃/CuO₂] [ZnO/CH₃NH₃SnI₃/CuO₂] et d'après cette étude nous pouvons dire que les paramètres de chaque couche jouent un rôle très important sur les paramètres de performances du dispositif étudié et en particulier dans l'amélioration du rendement de conversion.

Bibliographie du chapitre 4

- [1] Mr. ABDERREZEK Mahfoud Modalisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement thèse de doctorat en science université Sétif -1 soutenue le 18-02-2015
- [2] M. Burgelman, "SCAPS manuel," 2020.
- [3] P. K. Patel, "Device simulation of highly efficient eco-friendly $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$ perovskite solar cell," *Sci. Rep.*, vol. 11, pp. 1–11, 2021, doi: 10.1038/s41598-021- 82817-w.
- [4] P.Sun, Q.Li, and L.Yang, "Theoretical insights into a potential lead-free hybrid perovskite: substituting Pb^{2+} with Ge^{2+} ," *Nanoscale*, p. 10, 2015, doi: 10.1039/C5NR05337D.
- [5] BENNIA Imen et DERRADJ Sarra simulation numérique et optimisation des performances d'une cellule solaire à pérovskite mémoire de master filiere : électronique. université de mohamed el-bachir el-ibrahimi - bordj bou arreridj soutenu le : 22/06/2022
- [6] Dhuha E.Tareq, Samir M.AbdulMohsin and Hussein H. Waried " Perovskite solar cells based on $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$ Structure" 2nd International Scientific Conference of Al-Ayen University (ISCAU-2020) Conf. Series: Materials Science and Engineering 928 (2020) 072148 IOP doi:10.1088/1757-899X/928/7/072148

Conclusion générale

La conception des cellules solaires nécessite un ensemble de paramètres qui doivent être respecté afin de garantir que ces dernières atteignent le meilleur rendement électrique.

Dans ce travail nous avons optimisé les performances d'une cellule solaire pérovskite à base de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$, en utilisant le logiciel SCAPS-1D. Ce dernier, nous fournit les paramètres suivant V_{OC} , FF, J_{sc} ainsi que le rendement.

Le but fixé au cours de ce mémoire a été guidé par deux idées principales, d'une part la simulation des performances des trois couches de la cellule solaire étudiée **CH₃NH₃SnI₃**, **ETL** et **HTL (Cu₂O)** et d'autre part, l'optimisation des paramètres pour avoir un meilleur rendement.

En premier lieu, nous avons étudié l'influence du changement de la température et de l'épaisseur de la couche absorbante sur les paramètres photovoltaïques de la cellule.

Ensuite nous avons fait une comparaison entre deux matériaux pour la couche de l'interface ETL et l'influence du changement de leur épaisseur sur le fonctionnement de la cellule.

Les résultats obtenus ont montré que :

- À partir de l'analyse, il a été constaté aussi que le **ZnO** peut être utilisé comme couche **ETL** pour améliorer l'efficacité de la cellule solaire pérovskite.
- Une efficacité optimale peut être obtenue en prenant une couche absorbante d'épaisseur **0.7 μm**

Résumé :

Ce travail traite l'étude et la simulation d'une cellule solaire pérovskite à base de $CH_3NH_3SnI_3$ en utilisant le logiciel SCAPS-1D.

Le but de cette étude est d'optimiser les meilleurs paramètres [température, épaisseur, nature de couche d'interface] et leur effet sur les différents paramètres électriques de la cellule [le rendement (η), le facteur de forme (FF), la tension de circuit ouvert (V_{co}), la densité de courant de court-circuit (J_{sc})] afin d'aboutir au meilleur rendement de conversion photovoltaïque possible.

À partir de l'analyse, il a été constaté que les performances des cellules solaires peuvent être améliorées en ajustant l'épaisseur de la couche absorbante ($CH_3NH_3SnI_3$) et avec le choix d'un matériau adéquat de la couche ETL.

Mots clés : Energie Solaire, Cellules solaires, Pérovskite, $CH_3NH_3SnI_3$, SCAPS-1D.

Abstract:

This work deals with the study and simulation of a perovskite solar cell based on $CH_3NH_3SnI_3$ using the SCAPS-1D software.

The aim of this study is to optimize the best parameters [temperature, thickness, interface layer nature] and their effect on the different electrical parameters of the cell [efficiency (η), form factor (FF), open circuit voltage (V_{co}), short circuit current density (J_{sc})] to achieve the best possible photovoltaic conversion efficiency.

From the analysis, it was found that the performance of solar cells can be improved by adjusting the thickness of the absorbent layer ($CH_3NH_3SnI_3$) and with the choice of an adequate ETL layer material.

Keywords: Solar Energy, Solar cell, Perovskite, $CH_3NH_3SnI_3$, SCAPS-1D.

المخلص

يتناول هذا العمل دراسة ومحاكاة خلية شمسية بيروفسكايت بناءً على $CH_3NH_3SnI_3$ باستخدام برنامج SCAPS-1D.

الهدف من هذه الدراسة هو تحسين أفضل المعلمات [درجة الحرارة والسمك وطبيعة طبقة الواجهة] وتأثيرها على المعلمات الكهربائية المختلفة للخلية [الكفاءة (η)، عامل الشكل (FF)، جهد الدائرة المفتوحة (V_{co})، كثافة تيار الدائرة القصيرة (JSC)] لتحقيق أفضل كفاءة تحويل كهروضوئية ممكنة.

من خلال التحليل، وجد أنه يمكن تحسين أداء الخلايا الشمسية عن طريق ضبط سمك الطبقة الماصة ($CH_3NH_3SnI_3$) وباختيار مادة طبقة ETL كافية.

الكلمات الرئيسية: الطاقة الشمسية، الخلايا الشمسية، $CH_3NH_3SnI_3$ ، Pérovskite، SCAPS-1D.