

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

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

N° :...../ME/2022



DOMAINE : SCIENCES ET
TECHNOLOGIE

FILIERE : ÉLECTRONIQUE

OPTION : MICROELECTRONIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme
de Master Académique

Par: BEN AICHE Anis et

BOUHALI Rofida

Intitulé

Etude numérique d'une nanostructure de piégeage de lumière
d'une cellule solaire à pérovskite sur un substrat d'or

Soutenu devant le jury composé de:

Dr. BENNACER Hamza
Dr. BOURAS Mounir
Dr. HADJAB Moufdi

Université de M'sila
Université de M'sila
Université de M'sila

Président
Encadrent
Examineur

Année universitaire : 2021 / 2022

Remerciements

*Nous remercions, en premier lieu, **ALLAH** qui m'a donné la force et la patience pour réaliser ce travail.*

*Le sujet de cette thèse m'a été proposé par **Dr. Bouras Mounir** que nous remercions très sincèrement, pour ses conseils et suivis continus pendant ces années de réalisation de ce travail.*

*Nous tiens à remercier **Dr. Bennacer Hamza** de l'université de M'sila pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury.*

*Nous remercions aussi vivement **Dr. Hadjab Moufdi** de l'université de M'sila,*

Dédicace



Je dédie ce projet :

A ma chère mère,

A mon cher père,

*Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir
et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.*

A ma chère sœurs Maria, Maroua et Hadil

Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

A ma collègue binôme ,Anis ben aïche

à mon partenaire pour sa compréhension et sa sympathie.

A Tous ceux que j'ai rencontrés à l'université m'ont appris des leçons de vie.

A mes chères amies[Imane, Wafa , Wissal , Amira]

Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

A toute ma famille,

A tous mes autres amies,

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

Prénom : Bouhali Rofida



Dédicace

A ma chère mère

A la personne devant laquelle toutes les paroles de l'univers ne peuvent exprimer mon amour et mon affection pour elle, à la personne qui m'est la plus chère, à ma douce mère.

Maman, si tu sais combien je t'aime.

À mon cher père, même si vous n'étiez pas d'accord avec nous, votre soutien est resté.

A mes chers frères et sœurs (Ahmed Abla Yousef Selsabil).

En particulier, Bohali Rafida, si Thanksgiving est pour te faire honte parce que tu es tellement plus grande qu'elle, tu es un grand honneur pour moi, donc tant que tu restes à mes côtés, et que tu me soutiens dans toutes les situations, tu es celle qui m'a remonté le moral quand j'ai presque perdu ma confiance, vous avez tous les remerciements et la reconnaissance.

*À mes amis à droite. (ELHadj. Oussama. Khaled. Abd Raufe aymen .imad)
je souhaite le bonheur et le succès.*

À tous ceux qui, loin et près, ont contribué à la réalisation de ce modeste travail.

Prénom : Ben aiche Anis

Sommaire

Introduction générale	2
Chapitre 1 : L'énergie photovoltaïques	5
1. Introduction.....	5
1.1 Les types d'énergies renouvelables	6
1.1.1 Le solaire thermique et photovoltaïque	6
1.1.2 La géothermie	6
1.1.3 La biomasse	7
1.1.4 L'hydraulique	7
1.1.5 L'éolien	8
1.2 L'énergie Solaire Photovoltaïque.....	8
1.2.1 Historique de l'énergie photovoltaïque.....	8
1.2.2 Principe de la conversion photovoltaïque	8
1.2.3 Technologies des cellules photovoltaïques	9
1.2.4 Modélisation et circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque	11
1.2.5 Paramètres et caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	12
1.3 Conclusion	16
Chapitre 2 : Généralités sur les cellules photovoltaïque	18
2 Introduction.....	18
2.1 Générateur photovoltaïque et ses performances	18
2.1.1 Caractéristiques I(V) et P(V) du module SP75	20
2.1.2 Influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques	21
2.2 Les principes de conversion dans les systèmes PV.....	23
2.2.1 Couplage direct d'un générateur PV et une charge résistive	23
2.3 Les différentes filières photovoltaïques.....	25
2.3.1 La filière silicium.....	26
2.3.2 La filière couches minces.....	26
2.3.3 La filière de troisième génération.....	26
2.3.4 Cellule photovoltaïques a pérovskites	27
2.4 Avantages et inconvénients des systèmes PV.....	28

2.4.1 Avantages	28
2.4.2 Inconvénients.....	28
2.5 Conclusion	29
Chapitre 3 : simulation et résultats.....	31
3 Introduction.....	31
3.1 Logiciel utilisé « Rsoft CAD »	31
3.2 Design et description de la cellule utilisée	31
3.2.1 Structure étudié.....	31
3.2.2 Mécanisme de transport	32
3.3 Résultats et discussions	33
3.3.1 Effet du matériau de transport d'électrons (ETM).....	33
3.3.2 Effet du matériau de transport d'étrous (HTM).....	36
3.4 Conclusion	39
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	40
<i>Références</i>	41

Liste des figures

Figure 1.2 : Modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque	11
Figure 1.3 Courbe caractéristique $I = f(V)$ d'une cellule PV.....	13
Figure 1.4 : Courbe caractéristique $P = f(V)$ d'une cellule PV.....	13
Figure 1.5 : Évolution des records de rendements de chaque filière de cellules photovoltaïques [NREL : Laboratoire nationale de l'énergie renouvelable]	26
Figure 2.1 : Module solaire SP75 [16].....	19
Figure 2.2 : Circuit équivalent pour extraire la caractéristique expérimentale.....	20
Figure 2.3 : : Caractéristiques théoriques et pratiques (expérimentales) : (a) I-V et (b) P-V.....	21
Figure 2.4 : Caractéristique P-V pour différents niveaux de rayonnement.....	21
Figure 2.5 : Caractéristique I-V pour différents niveaux de rayonnement.....	22
Figure 2.6 : Caractéristique P-V pour différentes température	22
Figure 2.7 : Caractéristique I-V pour différentes températures.....	23
Figure 2.8 : Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau [19].....	23

Figure 2.9 : Caractéristique I-V d'un GPVet chdcn d'une charge résistive.....	24
Figure 2.10 : Points de fonctionnement pour différents niveaux de rayonnement	25
Figure 2.11 : structure hybride de la pérovskite CH ₃ NH ₃ PbI ₃	27
Figure 3.1 : la forme initiale de la Structure de la cellule solaire	32
Figure 3.2 : présente la cellule solaire à base de pérovskite(CH ₃ NH ₃ PbI ₃)	32
Figure 3.3 : Schéma de la structure du dispositif et alignement du diagramme de bande d'énergie entre perovskite et différents candidats ETM.....	33
Figure 3.4 : représente le changement de densité de courant par rapport la tension	33
Figure 3.5 : représente le spectre pour les matériaux de transport d'électrons (ETM) ZnO , ZnS, SnO ₂ , ZnSe, ITO et TiO ₂ OÙ on remarque le meilleure couche est couche TiO ₂	34
Figure 3.6 : Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes épaisseur de la couche ZnO , ZnS, SnO ₂ , ZnSe,ITO et TiO ₂	35
Figure 3.7 : Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes épaisseur de la couche TiO ₂	36
Figure 3.8 : Schéma de la structure du dispositif et alignement du diagramme de bande d'énergie entre perovskite et différents candidats HTM.....	36
Figure 3.9 : spectre solaire pour les matériaux de transport d'électrons (HTM).....	38
Figure 3.10 : Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes épaisseur de la couche P3HT,PTB7,Cu ₂ O,SiN,Spiro-OMATD	38
Figure.1.2 : Modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque	11
Figure.1.3 Courbe caractéristique I = f(V) d'une cellule PV.....	13
Figure.1.4 : Courbe caractéristique P = f(V) d'une cellule PV.	13
Figure.1.5 : Évolution des records de rendements de chaque filière de cellules photovoltaïques [NREL : Laboratoire nationale de l'énergie renouvelable]	26
Figure.2.1 : Module solaire SP75 [16].....	19
Figure.2.2 : Circuit équivalent pour extraire la caractéristique expérimentale	20
Figure.2.3 : : Caractéristiques théoriques et pratiques (expérimentales) : (a) I-V et (b) P-V.	21
Figure.2.4 : Caractéristique P-V pour différents niveaux de rayonnement.....	21
Figure.2.5 : Caractéristique I-V pour différents niveaux de rayonnement.....	22
Figure.2.6 : Caractéristique P-V pour différentes température	22
Figure.2.7 : Caractéristique I-V pour différentes températures.....	23
Figure.2.8 : Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau [19].....	23
Figure.2.9 : Caractéristique I-V d'un GPVet chdcn d'une charge résistive.....	24

Figure.2.10 : Points de fonctionnement pour différents niveaux de rayonnement	25
Figure.2.11 : structure hybride de la pérovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$	27
Figure.3.1 : la forme initiale de la Structure de la cellule solaire	32
Figure.3.2 : présente la cellule solaire à base de pérovskite($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$)	32
Figure.3.3 : Schéma de la structure du dispositif et alignement du diagramme de bande d'énergie entre perovskite et différents candidats ETM	33
Figure.3.4 : représente le changement de densité de courant par rapport la tension	33
Figure.3.5 : représente le spectre pour les matériaux de transport d'électrons (ETM) ZnO , ZnS , SnO_2 , ZnSe , ITO et TiO_2 Où on remarque le meilleure couche est couche TiO_2	34
Figure.3.6 : Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes épaisseur de la couche ZnO , ZnS , SnO_2 , ZnSe , ITO et TiO_2	35
Figure.3.7 : Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes épaisseur de la couche TiO_2	36
Figure.3.8 : Schéma de la structure du dispositif et alignement du diagramme de bande d'énergie entre perovskite et différents candidats HTM.....	36
Figure.3.9 : spectre solaire pour les matériaux de transport d'électrons (HTM).....	38
Figure.3.10 : Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes épaisseur de la couche P3HT,PTB7, Cu_2O , SiN ,Spiro-OMATD	38

Liste de Tableaux

Tableau.1.1 Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques	10
Tableau.2.1 : Spécifications du module solaire SP75.....	19
Tableau.3.1 Résultat du simulation pour les matériaux de transport d'électrons (ETM)	34
Tableau.3.2 : Résultat de la simulation pour les matériaux de transport de trous (HTM)	37

Introduction générale

Introduction générale

Portée par un contexte économique et social favorable, la recherche dans le domaine de l'énergie cellule solaires photovoltaïques (PV) s'est intensifiée depuis plus de deux décennies, avec pour fil conducteur la volonté de créer une technologie mature et compétitive. Dans ce contexte, l'optimisation des matériaux et des procédés technologiques employés a longtemps été mise au premier plan. Avec le développement des cellules solaires en couches minces, une étape importante a été franchie dans la réduction des coûts grâce à la diminution de l'épaisseur de la couche active. Cependant, la faible absorption de la lumière, en particulier pour les longueurs d'onde situées près du gap du matériau absorbant, a rapidement été identifiée comme la limitation principale de ces cellules. Une attention particulière s'est donc portée sur ces pertes optiques, qui sont encore plus critiques lorsqu'on considère des couches ultraminces dont les épaisseurs sont de l'ordre du micromètre, voire moins.

Les pérovskites sont un choix intéressante pour les applications les cellules solaires, principalement liées à ses performances optiques et électriques remarquables, en termes de bande interdite directe, d'absorption de la lumière panchromatique, de mobilité élevée des porteurs, d'énergie de liaison des excitons de l'ordre de 2 meV et longue longueur de diffusion [1].

De plus, la contrôlabilité possible de la qualité du film de pérovskite le rend avantageux par rapport à d'autres matériaux, ce fait est assuré par plusieurs méthodes qui peuvent minimiser la densité de défauts conduisant à une performance améliorée [2,3]. De nombreux chercheurs ont effectué une analyse théorique sur les performances optiques et électriques de la pérovskite solaire cellules utilisant l'approche de la matrice de transfert [4] ou la méthode du domaine temporel des différences finies [5]. Les méthodes susmentionnées prouvent leur efficacité dans la modélisation précise des performances des cellules solaires à pérovskite lorsqu'elles traitent des structures complexes, notamment les formalismes de piégeage de la lumière et la plasmonique de surface [6].

Une structure conventionnelle a été construite en utilisant des matériaux pérovskites pénétrés (région absorbante) dans la feuille d'oxyde métallique mésoporeux (matériau de transport d'électrons ETM) et coiffé au sommet par une autre couche (matériau de transport de trous HTM) [7]. Pour tenir compte de ce dernier, une approche combinée optique-électrique basée sur le simulateur Rsoft CAD est proposée pour modéliser l'efficacité de conversion de puissance PSC (power conversion efficiency) n-i-p étudié.

L'objectif de ce mémoire une étude optique-électrique proposée sert principalement pour la recherche de candidats ETM et HTM appropriés qui répondent aux exigences de conception en termes de bon alignement de bande et de caractéristiques optiques appropriées.

Les résultats obtenus indiquent clairement que notre conception PSC optimisée utilisant le ZnO comme ETM et NiO comme HTM surpasse considérablement la PSC utilisant d'autres candidats ETM et HTM.

La structure étudiée permet de mieux comprendre les propriétés optiques et électriques de ces structures et met en évidence leur haute qualité en termes de performances des cellules solaires. Ce résultat fait une option intéressante pour l'optimisation des cellules solaires.

Notre mémoire est organisée en trois chapitres. Dans le premier chapitre nous nous intéressons à la description générale des énergies renouvelables, le deuxième chapitre présente la modélisation de la cellule photovoltaïque et ses caractéristiques. Ensuite, dans le troisième chapitre, l'outil de simulation utilisé dans ce travail est présenté. Il est consacré à présenter et discuter des résultats obtenus par Rsoft CAD.

Enfin, nous terminons cette étude par une conclusion générale résumant ce travail qui a été fait.

Chapitre 1 : L'énergie renouvelable photovoltaïque

1.1 Introduction

Sur notre planète la terre, il existe des sources d'énergie inépuisables, des sources d'énergie naturelle qui ne s'épuisent jamais à l'échelle du temps humain, on les appelle les énergies renouvelables, telles que l'énergie du soleil (photovoltaïque et thermique), du vent, des cours d'eau, de la terre, et de la biomasse. En revanche il y a des sources non renouvelables qui sont les énergies fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz dont les gisements limités peuvent être épuisés.

Les énergies dites renouvelables et propres, constituent une alternative aux énergies fossiles sur plusieurs points :

- Elles respectent l'environnement (sont propres) ne dégagent pas de gaz à effet de serre, ni de déchets toxiques.
- Elles sont comme leurs noms l'indiquent « inépuisables ».
- Elles permettent une production décentralisée adaptée aux besoins locaux.

Dans notre travail nous nous intéresserons aux énergies solaires photovoltaïques qui sont parmi les sources les plus exploitées.

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancée sur le plan technologique et industriel, en effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

Dans ce chapitre, nous présentons le principe de la conversion photovoltaïque (PV), les paramètres et les caractéristiques électriques d'une cellule PV, ainsi le module PV qui est constitué d'un ensemble de cellules élémentaires montées en série et/ou en parallèle. Ce dernier est utilisé pour construire un générateur photovoltaïque (GPV), qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire et présentant un point de puissance maximale. Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV, nous introduisons un étage d'adaptation entre le générateur et la charge pour coupler les deux éléments le plus parfaitement possible. A la fin de ce chapitre les avantages et les inconvénients des systèmes PV sont cités.

1.2 Les types d'énergies renouvelables

Il existe différents types d'énergies renouvelables parmi ces types nous citons :

Le solaire thermique et photovoltaïque, la géothermie, la biomasse, l'hydraulique et l'éolien.

1.2.1 Le solaire thermique et photovoltaïque

L'énergie solaire est l'une des ressources renouvelables les plus abondantes sur terre. Le flux d'énergie solaire reçu annuellement sur la surface de la terre représente environ 15000 fois la consommation d'énergie [8].

L'énergie solaire est actuellement exploitée selon deux techniques :

➤ La conversion du rayonnement solaire en chaleur par des capteurs thermiques c'est le solaire thermique qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

➤ La conversion directe du rayonnement lumineux en électricité par des capteurs (cellule photovoltaïque), c'est le solaire photovoltaïque qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon.

1.2.2 La géothermie

Le terme de géothermie est formé à partir des mots grecs Gê (la Terre) et thermos (chaud). Il recouvre l'ensemble des techniques qui permettent de récupérer la chaleur naturellement présente dans le sous-sol terrestre, en particulier dans les aquifères (réservoirs rocheux renfermant des eaux souterraines). Cette énergie calorifique provient en part à peu près égale de la chaleur résiduelle produite par les phénomènes de formation de la planète (il y a 4,5 milliards d'années) et de la radioactivité naturelle.

La température des eaux géothermales augmente avec la profondeur, selon le gradient thermique de chaque région (hausse moyenne de la température en fonction de la profondeur). Le gradient a une valeur mondiale moyenne de 3 °C pour 100 m de profondeur. Il s'échelonne ensuite entre 1 °C pour 100 mètres et 10 °C pour 100 mètres, selon les conditions physiques et géologiques de la région.

Les techniques géothermiques diffèrent selon la température des eaux géothermales, laquelle définit aussi l'usage que l'on fait de ces eaux :

- entre 20 °C et 90 °C, la chaleur et l'eau géothermales sont utilisées pour le chauffage géothermique. C'est la géothermie basse énergie;
- entre 90 °C et 160 °C, l'eau est employée à la surface sous forme liquide. Elle transfère sa chaleur à un autre liquide, qui se vaporise à basse température et actionne une turbine pour la production d'électricité. C'est la géothermie de moyenne énergie;
- au-delà de 160 °C, cette eau se trouve alors sous forme de vapeur quand elle atteint la surface du sol. Elle fait tourner des turbines dont le mouvement génère également de l'électricité. C'est la géothermie de haute énergie.

Les frontières des intervalles de températures ainsi définis sont indicatives, et les usages peuvent varier selon les conditions économiques des lieux considérés [9].

1.2.3 La biomasse

Le terme biomasse désigne au sens large l'ensemble de la matière vivante.

Depuis le premier choc pétrolier, ce concept s'applique aux produits organiques végétaux utilisés à des fins énergétiques.

La biomasse désigne donc l'ensemble des végétaux capables par le biais de diverses transformations, de restituer l'énergie solaire qu'ils ont stockés, cette énergie solaire est convertie en différentes sources énergétiques tel que :

- Chaleur et électricité
- Biocarburant
- Carburants bio gazole

1.2.4 L'hydraulique

L'hydraulique première des énergies renouvelables au monde, se distingue par sa souplesse d'utilisation, ses atouts écologiques et économiques.

Comme les ancestrales roues entraînées par le débit d'un cours d'eau, les turbines des centrales hydrauliques sont activées par la force de l'eau passant d'un niveau supérieur à un niveau inférieur. Plus la hauteur de la chute d'eau et le débit sont importants plus la puissance électrique développée sera élevée.

1.2.5 L'éolien

L'énergie éolienne est la transformation de l'énergie du vent en énergie électrique ou mécanique avec divers types d'application, dont la production d'électricité et le pompage de l'eau.

Les aérogénérateurs sont principalement utilisés pour la production d'électricité. Selon leur taille, elles peuvent alimenter des sites non reliés au réseau ou devenir de véritables centrales de production d'électricité.

- Dans ce qui suit nous nous intéressons à la filière d'énergie solaire photovoltaïque.

1.3 L'énergie Solaire Photovoltaïque

1.3.1 Principe de la conversion photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque « PV » est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière (photons). La tension générée peut varier entre 0.3 et 0.7V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule.

La figure 1.1 illustre une cellule PV typique.

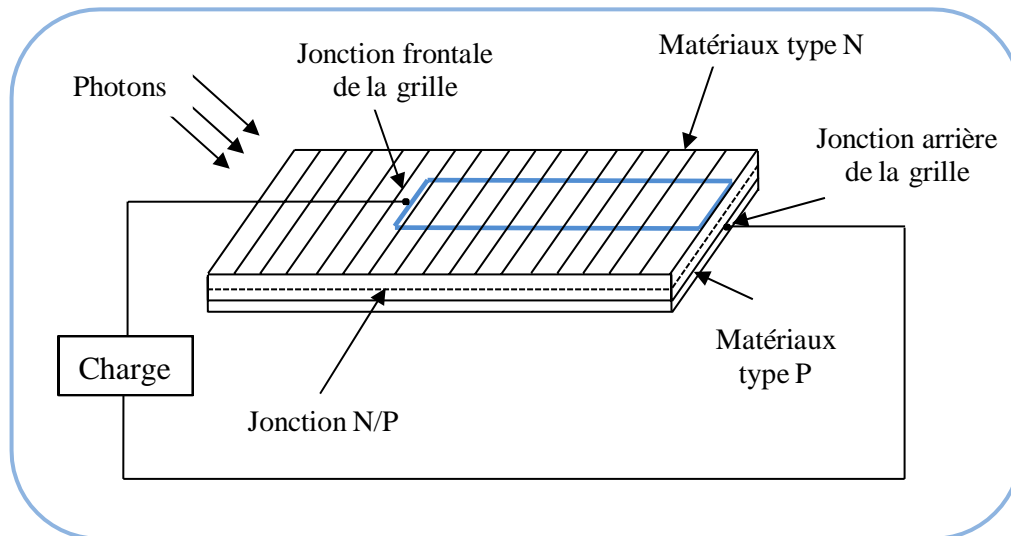


Figure 1.1 : Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque.

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au Bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore), créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel.

Lorsque les photons sont absorbés par les semi-conducteurs, ils transmettent leurs énergies aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons (charges N) et des trous (charges P) créent alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positive et négative de la cellule.

1.3.2 Technologies des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité, elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs.

L'énergie photovoltaïque fait appel généralement à une des technologies suivantes:

- la première technologie photovoltaïque recourt aux cellules de silicium monocristallin ou polycristallin ont la meilleure efficacité, qui varie généralement de 13 à 18 %. Leur durée de vie est habituellement de plus de 25 à 30 ans et pour le monocristallin l'efficacité est de 12 à 15 %.
- La deuxième technologie qui fait appel aux cellules de silicium amorphe est la deuxième technologie utilisée. L'efficacité est moindre, variant de 6 à 10 %. Leur durée de vie est généralement inférieure à 20 ans.

- La troisième technologie fait appel à d'autres matériaux semi-conducteurs, tels que le Tellure de Cadmium (*CdTe*), Cuivre Indium Sélénium (*CIS*) et les jonctions à base d'Arséniure de Gallium (*GaAs*), cette technologie des multicouches est en voie de développement car chacune d'entre elles est sensible à des photons d'énergies différentes.

Nous allons récapituler les différents types de technologie dans le tableau 1.1 suivant :

Tableau 1.1 Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques

Type de cellules	Rendement de cellules(%)			Domaines d'application
	théorique	en labo.	disponible	
silicium monocristallin	27	24.7	14-16	modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Silicium poly cristalline	27	19.8	12-14	modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
silicium amorphe	25	13	6-8	appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre.) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
d'Arséniure de Gallium (GaAs)	29	27.5	18-20	systèmes de concentrateur, espace (satellites).
CIS	27.5	18.2	10-12	appareils de faibles puissances, modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Tellure de Cadmium (CdTe)	28.5	16	9-11	modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)

D'autres technologies prometteuses comme les matériaux organiques, les matériaux nanocristallins ou les structures multi-jonctions laissent présager d'excellentes performances futures et sont aujourd'hui au stade de la recherche.

1.3.3 Modélisation et circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Dans la littérature, il existe plusieurs modèles de cellule photovoltaïque, dont le but est l'obtention de la caractéristique courant-tension I-V pour l'analyse et l'évaluation des performances des modules photovoltaïques. Ces modèles diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul courant-tension.

Le modèle à une diode est le plus classique [10], il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule.

Le modèle d'une cellule est ce lui représenté dans la figure 1.2 suivante :

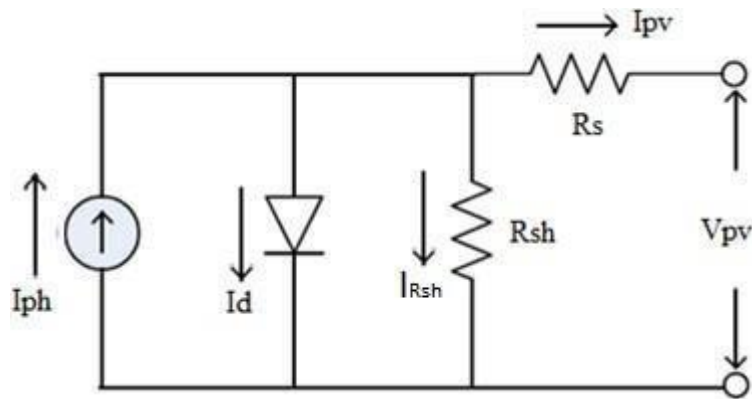


Figure 1.1 : Modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque

La résistance série traduit le phénomène de résistance de contact (métallisation de la grille avant et la face arrière), de la couche de base et de la zone avant de la cellule solaire [11].

La résistance shunt rend compte d'effets tels que le courant de fuite par les bords de la cellule.

Ce circuit peut être utilisé aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules.

A partir de la figure 1.2, la loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_{ph} = I_d + I_{Rsh} + I_{pv} \quad (1.1)$$

A partir de ce circuit, on tire les équations qui nous permettent d'obtenir la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque. Le courant de jonction I_d est donné par :

$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + I R_s)}{A K_b T} \right) - 1 \right] \quad (1.2)$$

Le courant qui traverse la résistance shunt R_{sh} est donnée par :

$$I_{R_{sh}} = \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (1.3)$$

A partir de l'équation (1.1), on obtient l'expression de la caractéristique I-V du modèle choisi:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + I R_s)}{AK_b T} \right) - 1 \right] \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (1.4)$$

Avec :

V : tension de sortie de la cellule ($V = V_{pv}$). I : courant de sortie de la cellule ($I = I_{pv}$).

I_{ph} : courant photo-généré par la cellule PV sous éclairage donné [A].

I_0 : Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité [A].

R_s : Résistance série de la cellule [Ω]. R_{sh} : Résistance parallèle ou shunt [Ω]. A : Facteur d'idéalité de la diode.

K_b : Constante de Boltzmann ($1,3854 \cdot 10^{-23}$ [J/K]). q : charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ [C]).

T : Température de la cellule [$^{\circ}$ K].

1.3.4 Paramètres et caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

1.3.5.1 Caractéristique courant-tension

La caractéristique courant-tension, illustrée sur la figure 1.3 décrit le comportement de la cellule photovoltaïque sous l'influence des conditions météorologiques (niveau d'éclairage et température ambiante).

La courbe de la cellule solaire $I = f(V)$ passe par trois points importants qui sont :

- Le courant de court-circuit I_{cc} en B ;
- La tension de circuit ouvert V_{oc} en E ;
- La puissance maximale en A.

La figure 1.3 montre bien qu'une cellule photovoltaïque ne peut être assimilée à aucun générateur classique (générateur de courant ou générateur de tension).

En effet, sa caractéristique se divise en trois parties :

- la zone BC où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'ensoleillement
- la zone DE où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{oc}
- la zone CD où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

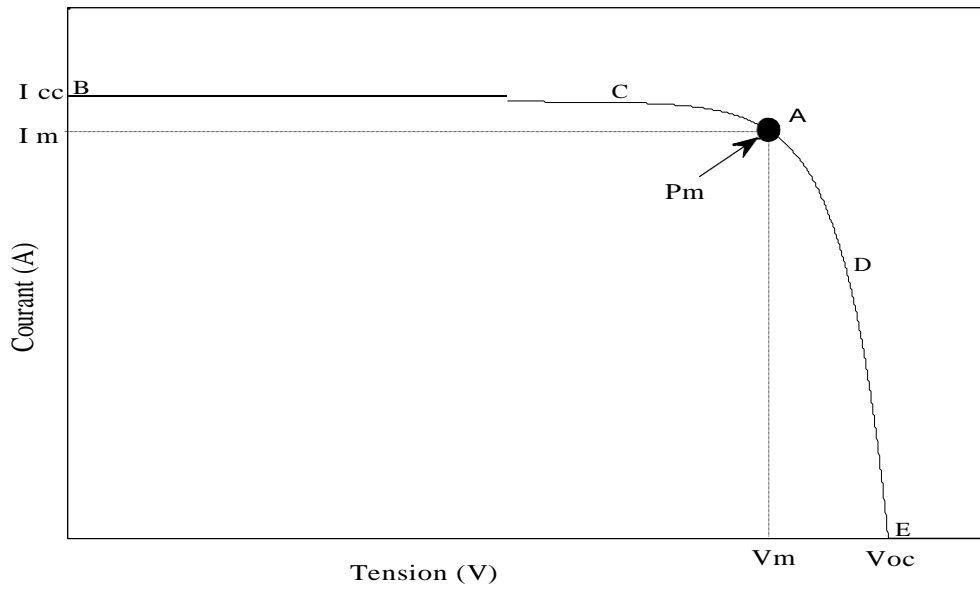


Figure 1.2 : Courbe caractéristique $I = f(V)$ d'une cellule PV.

1.3.5.2 Caractéristique puissance-tension

La puissance délivrée par la cellule a pour expression $P = VI$. Pour chaque point de la courbe précédente, on peut calculer la puissance P et tracer la courbe $P = f(V)$.

Cette courbe a l'allure suivante :

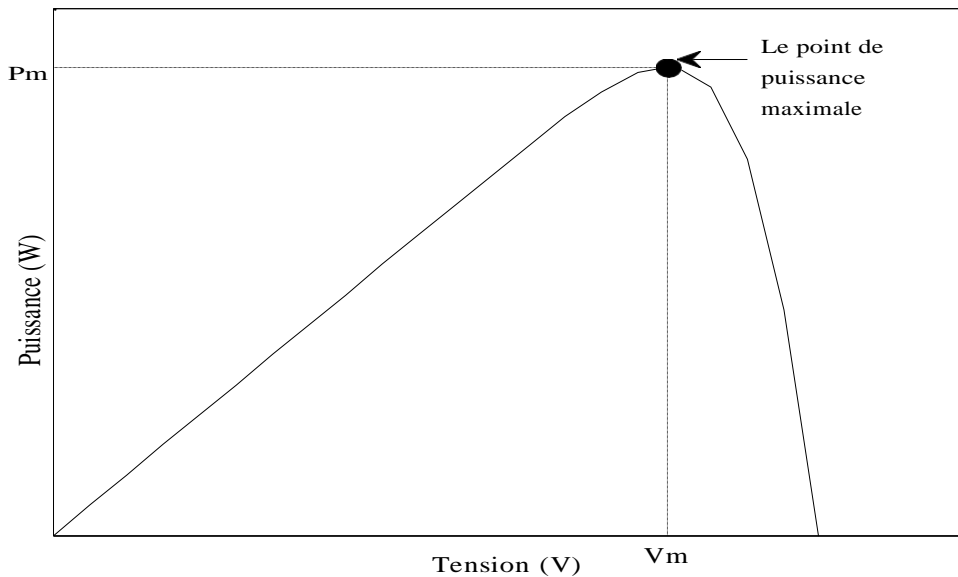


Figure 1.3 : Courbe caractéristique $P = f(V)$ d'une cellule PV.

Cette courbe passe par un maximum de puissance (P_m). A cette puissance correspond, une tension V_m et un courant I_m que l'on peut aussi repérer sur la courbe $I = f(V)$.

1.3.5.3 Les paramètres d'une cellule photovoltaïque

Les paramètres externes d'une cellule photovoltaïque peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes [12] :

- Courant de court-circuit I_{cc}

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} , dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (1.2), on obtient:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + I R_s)}{AK_b T} \right) - 1 \right] - \frac{I_{cc} R_s}{R_{sh}} \quad (1.5)$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_0 \left[\exp \left(\frac{q(I_{cc} R_s)}{AK_b T} \right) - 1 \right]$ devant I_{ph} .

L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (1.6)$$

- Tension de circuit ouvert

C'est la tension V_{oc} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q V_{oc}}{AK_b T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (1.7)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{oc} = \left(\frac{AK_b T}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} - 1 \right) \quad (1.8)$$

- Le Point de Puissance Maximale

Est le point de fonctionnement $P_m (V_m, I_m)$ sur la figure 1.4, pour lequel la puissance dissipée dans la charge résistive est maximale, elle est donnée par la relation : $P_m = I_m V_m$

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale $P_{m \text{ idéale}}$ correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{oc} multipliée par le courant de court-circuit I_{cc} : $P_{m \text{ idéal}} = V_{oc} I_{cc}$ où:

$P_{m \text{ idéale}}$: Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV idéale [W].

V_{oc} : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV [V]. I_{cc} : Intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellule PV [A].

Par simplification, les professionnels caractérisent un module PV par sa puissance nominale aux conditions de fonctionnement standard (STC : en général un ensoleillement de 1000W/m² et une température de 25°C).

- Facteur de forme

Le facteur de forme FF « en anglais : *Fill Factor* », est défini comme le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ($P_{max} = V_m I_m$) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit $I_{cc} * V_{oc}$ (c'est à dire la puissance maximale d'une cellule idéale) :

FF : Facteur de forme.

$$FF = \frac{P_m}{I_{CC} V_o} = \frac{I_m V_m}{I_{cc} V_{Oc}} \quad (1.9)$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70%

- Rendement énergétique

Le rendement (η), des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in}

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{oc}}{S \times E} \quad (1.10)$$

Ou :

P_{in} : Puissance incidente.

S : surface de la cellule (m^2)

E : l'éclairement (W/m^2)

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

1.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur les énergies renouvelables en générale. Nos études centrée sur l'énergie photovoltaïque, c'est l'énergie la plus intéressante elle est disponible avec un immense potentiel. Ce potentiel favorise sons utilisation pour l'alimentation électrique, en particulier les sites isolé dans les diverses régions mondiales et nous avons détaillé le principe de la cellule photovoltaïque afin de mieux comprendre l'ensemble du mécanisme de conversion en énergie électrique.

Chapitre 2 : Généralités sur les cellules photovoltaïques

2 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables la plus utilisée.

Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique (solaire ou autre) en Électricité. Cette dernière est l'une des formes non polluantes et silencieuses de conversion de L'énergie solaire, elle se produit au moyen d'un dispositif de conversion appelée « panneau Solaire » basé sur l'effet photovoltaïque.

2.1 Générateur photovoltaïque et ses performances

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance

désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement.

Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle la nuit.

Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu.

Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est converti à l'aide d'un onduleur en courant alternatif.

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que: la puissance, le courant de court-circuit I_{cc} ou la tension en circuit ouvert V_{oc} .

Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules PV en série et / ou en parallèle pour obtenir une puissance, un I_{cc} et un V_{oc} désirés.

Pour notre présente étude, on a choisi le module photovoltaïque du type SP75 dont les caractéristiques électriques sont données dans le tableau 2.1 suivant :

Tableau 2.1 : Spécifications du module solaire SP75.

Spécifications du module solaire SP75	
Temperature (T_{ref})	25 °C
Eclairement (E_{ref})	1000 W/m ²
Tension du circuit ouvert (V_{oc})	21.7 V
Courant du court-circuit (I_{sc})	4.8 A
Tension du point de puissance maximale (V_m)	17 V
Courant du point de puissance maximale (I_m)	4.4 A
Puissance maximale (P_m)	75 W

Le module SP75 est un module solaire en silicium monocristallin. Il est constitué de 36 cellules solaires connectées en série (figure 2.1). La surface de chaque cellule solaire est de l'ordre de 125mm x 125mm. Les dimensions de ce module sont:120cm x 52.7cm. Le SP75 peut produire une puissance de 75 Watts à 17 Volts en conditions de fonctionnement standard (STC) [13].

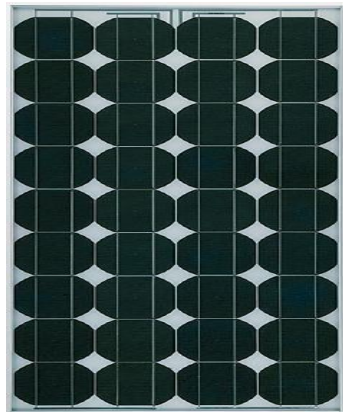


Figure .2.1 : Module solaire SP75 [16]

2.1.1 Caractéristiques I(V) et P(V) du module SP75

Pour montrer les caractéristiques électriques expérimentales (courant-tension et puissance-tension) nous avons réalisé le montage suivant (figure 2.2) :

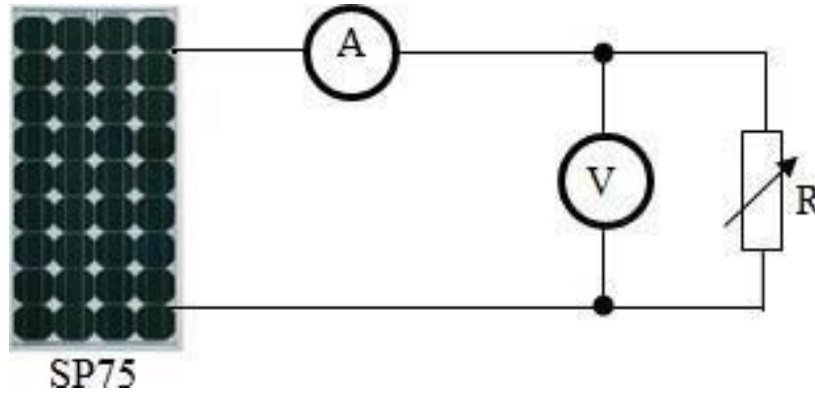
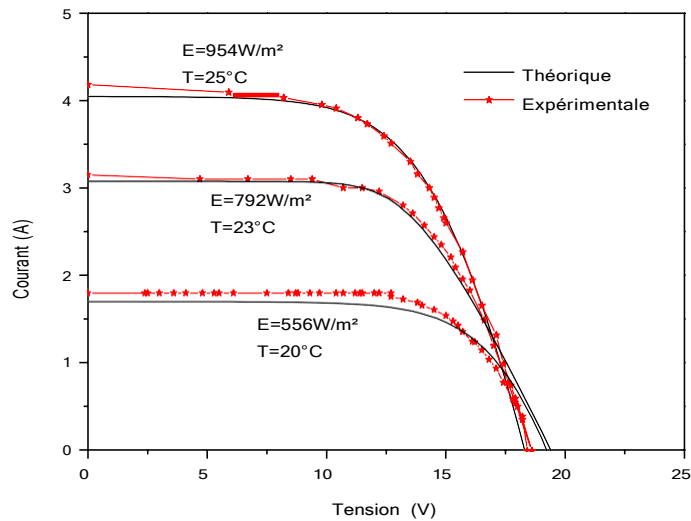
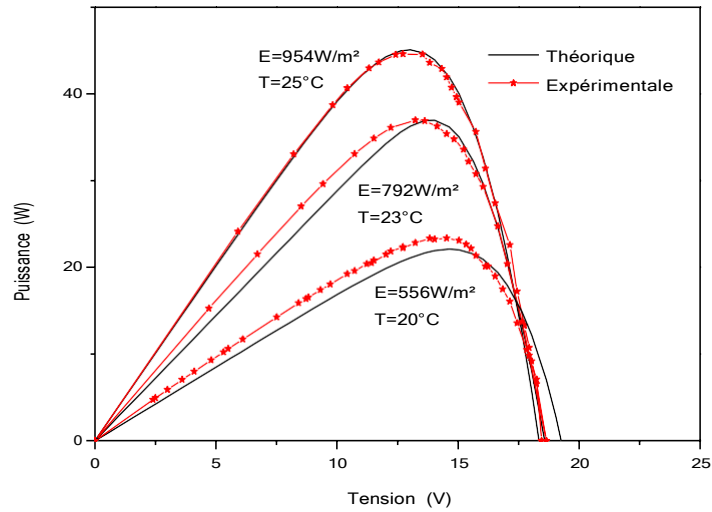


Figure 2.2 : Circuit équivalent pour extraire la caractéristique expérimentale.

Sur la figure 2.3 nous avons représenté les caractéristiques théorique (simulation) et pratique (expérimentale) du module solaire à différents niveaux d'éclairement (E) et à diverses températures (T).



(a)



(b)

Figure 2.3 : Caractéristiques théoriques et pratiques (expérimentales) : (a) I-V et (b) P-V.

2.1.2 Influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques

2.1.2.1 Influence de l'éclairement

L'augmentation d'ensoleillement (flux lumineux) se traduit par un déplacement de la caractéristique

$I = f(V)$ suivant l'axe des courants.

L'augmentation du courant de court-circuit est beaucoup plus importante que celle de la tension à circuit ouvert étant donné que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique [14].

L'influence du flux lumineux, à une température constante $T = 25\text{ °C}$, sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur les figures 2.4 et 2.5.

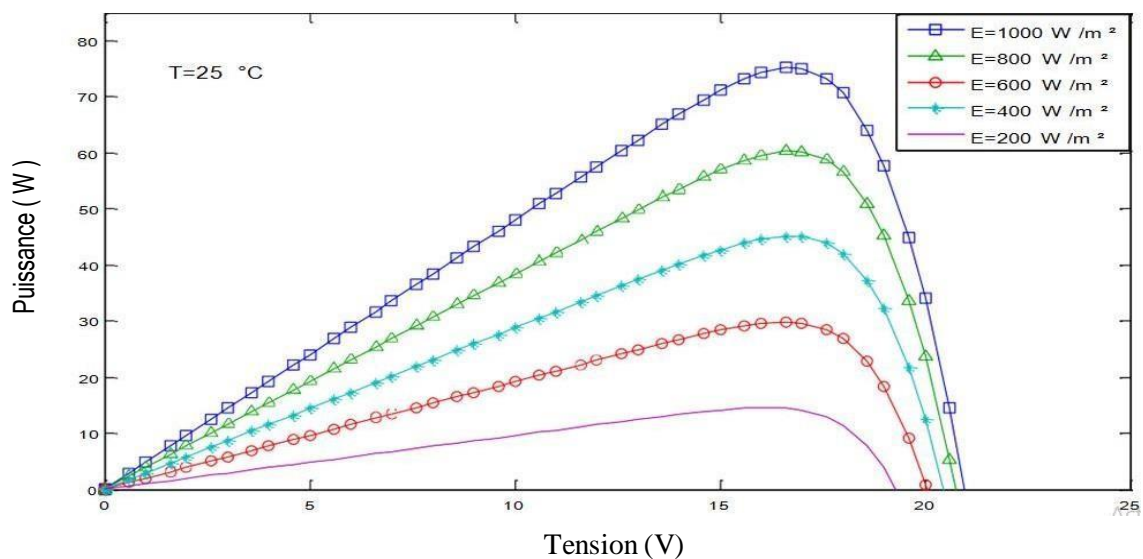


Figure 2.4 : Caractéristique P-V pour différents niveaux de rayonnement

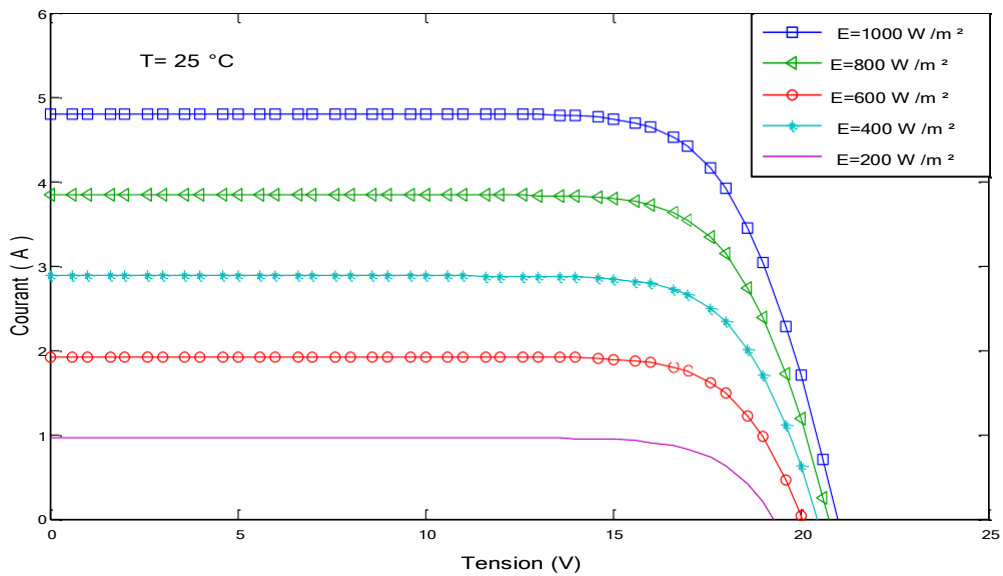


Figure 2.5 : Caractéristique I-V pour différents niveaux de rayonnement.

2.1.2.2 Influence de la température

Si la température de la cellule augmente, le photo-courant I_{ph} augmente également. Cette augmentation due principalement à la diminution de la largeur de la bande interdite du matériau et est de l'ordre de 0,1% par degré °C. Le courant direct de la jonction augmente aussi, mais beaucoup plus vite en entraînant une diminution de la tension de circuit ouvert de l'ordre de 2mV par cellule.

La diminution de la puissance fournie est estimée à environ de 0,5% par degré pour un module.

L'influence de la température, pour un éclairage fixe $E = 1000W/m^2$, sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur les figures 2.6 et 2.7.

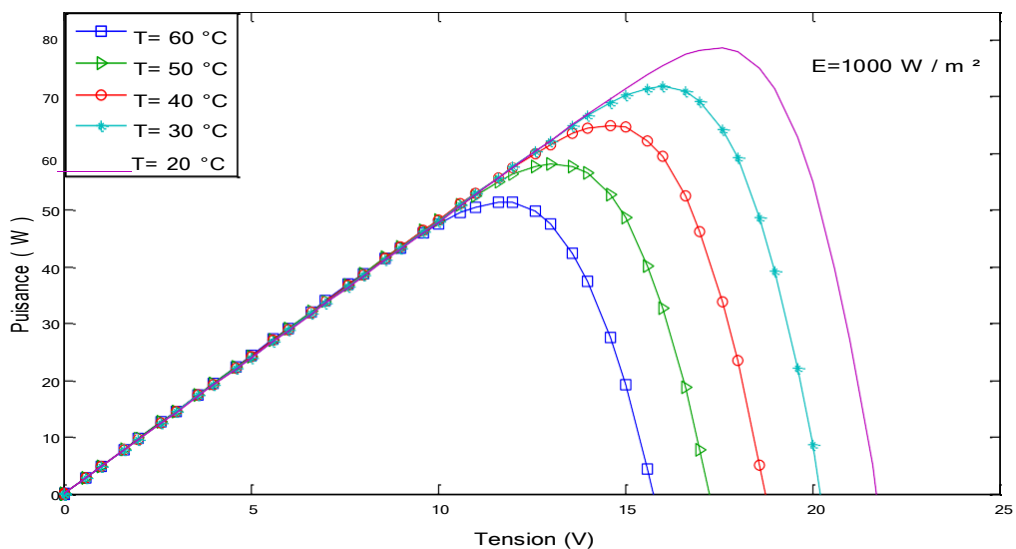


Figure 2.6 : Caractéristique P-V pour différentes température.

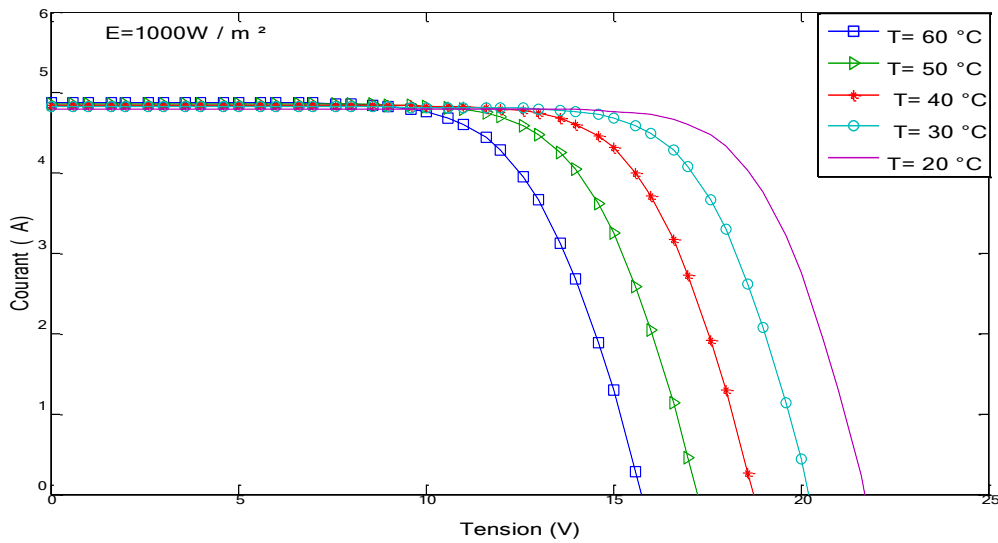


Figure 2.7 : Caractéristique I-V pour différentes températures

2.2 Les principes de conversion dans les systèmes PV

Le générateur PV est le cœur d'un système PV. Cependant, pour une application pratique, d'autres éléments sont nécessaires, par exemple pour le stockage de l'énergie, pour la régulation de la circulation du flux d'énergie ou pour l'alimentation du réseau alternatif. Ces composants supplémentaires représentent une part considérable du coût, provoquent la réduction du rendement et influencent considérablement le comportement et les performances de tout le système.

2.2.1 Couplage direct d'un générateur PV et une charge résistive

Dans le cas où une charge résistive est directement connectée à une source linéaire, les valeurs du courant et de la tension pour chaque point de fonctionnement sont facilement calculées en utilisant la loi d'Ohm. Par contre, lorsque la source est de nature non linéaire, comme c'est le cas pour le GPV, une méthode graphique est nécessaire. Le point de fonctionnement est alors déterminé par l'intersection de la caractéristique I-V du GPV et la courbe de la charge.

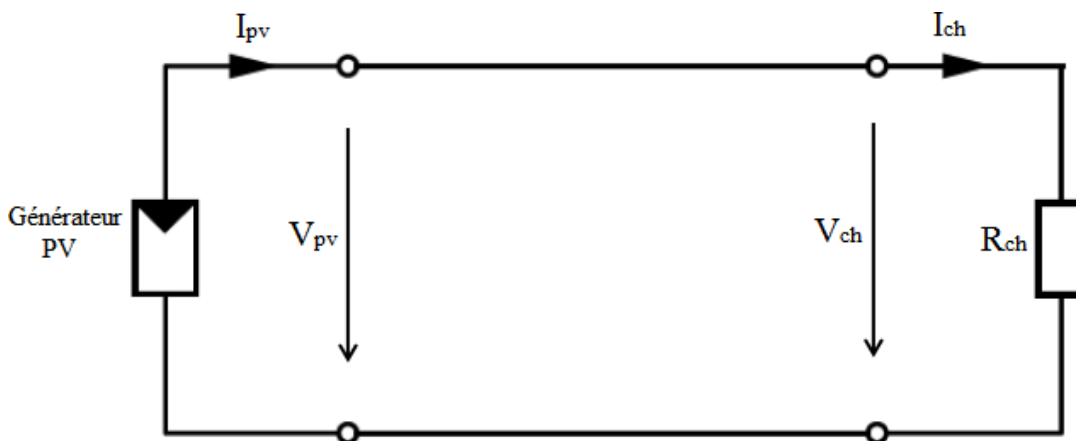


Figure 2.8 : Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau [19].

La figure 2.9 montre les caractéristiques I-V d'un GPV et d'une résistance. Pour une charge résistive, la caractéristique I-V est une droite de pente $1/R$. Par conséquent, si la résistance R_{ch} est petite, le point de fonctionnement est situé dans la région AB de la courbe. Le courant I_{pv} varie peu en fonction de la tension et est presque égal au courant de court-circuit. Le GPV se comporte comme un générateur de courant. D'autres part, si la résistance R_{ch} est grande, le GPV fonctionne dans la région CD. Dans cette zone, la tension du GPV varie peu en fonction du courant et est presque égale à la tension de circuit ouvert. Le GPV se comporte comme une source de tension. Dans la région BC sur la courbe, le GPV ne peut être caractérisé ni par une source de courant, ni par une source de tension. C'est dans cette zone que se trouve le point de puissance maximale (en anglais Maximum Power Point : MPP) pour des conditions atmosphériques fixées. La valeur de la résistance correspondante à ce point est notée R_{opt} [15].

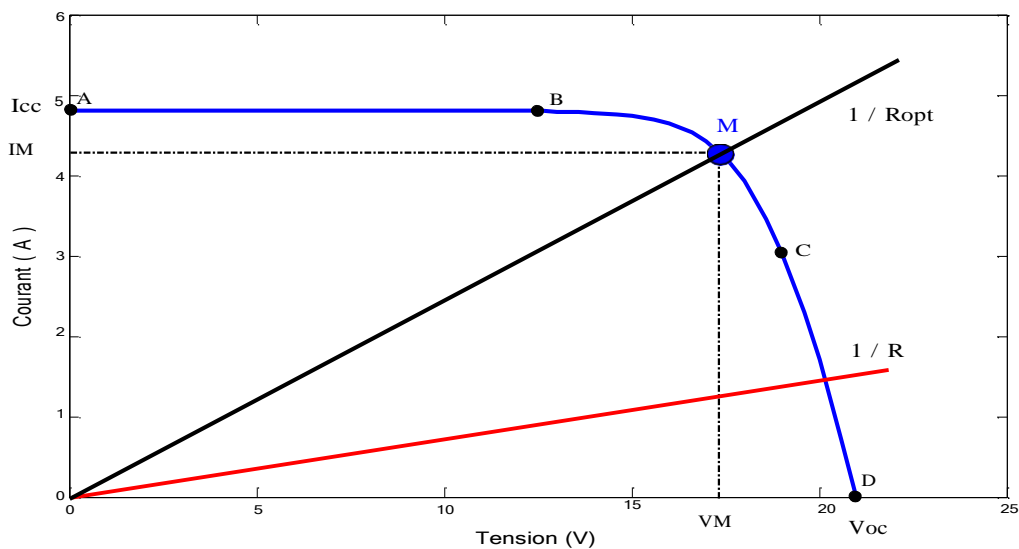


Figure 2.9 : Caractéristique I-V d'un GPV et d'une charge résistive

Les courbes caractéristiques d'un GPV pour différents niveaux de rayonnement, ainsi que celles de deux charges résistives sont représentées sur la figure 2.10. L'intersection des courbes indique le point de fonctionnement (la température est supposée constante). Il est clair que l'impédance de la charge impose les conditions de fonctionnement du GPV.

Pour la charge 2, la puissance transmise est optimale pour un niveau de rayonnement de 1000W/m^2 , car le point de fonctionnement dans ce cas est très proche du MPP. À mesure que le niveau de rayonnement baisse, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP. La puissance transmise n'est alors plus optimale. La charge 2 est donc plus appropriée pour des niveaux de rayonnement élevés.

Par contre, la charge 1 est plus adaptée pour de faibles niveaux de rayonnement. Dans les deux cas, il y a pertes de puissance lors de la variation de l'irradiation. On peut conclure que lors d'un couplage direct d'un GPV et la charge, le point de fonctionnement coïncide rarement avec le MPP. Pour palier à ce problème, un étage d'adaptation entre la source et la charge s'avère nécessaire.

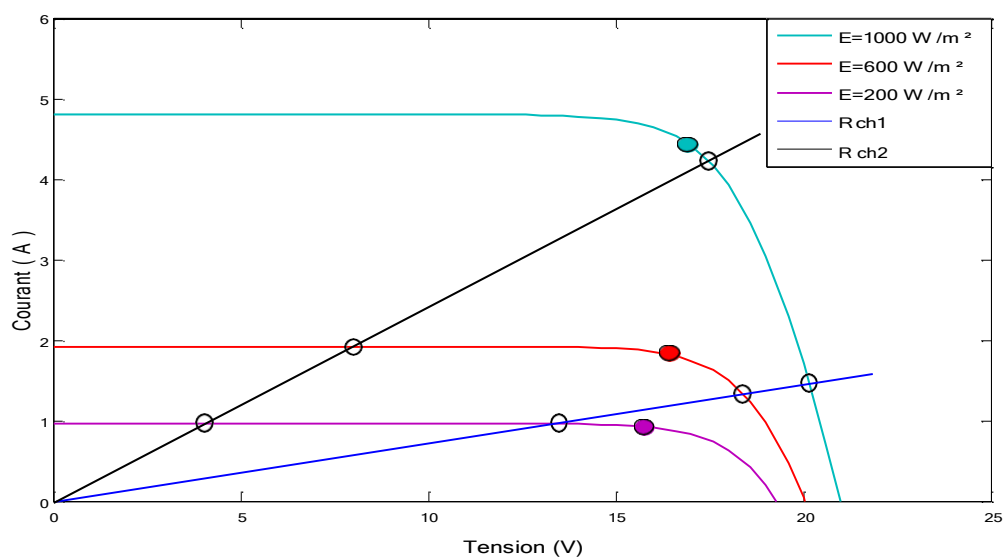


Figure 2 10 : Points de fonctionnement pour différents niveaux de rayonnement

2.3 Les différentes filières photovoltaïques :

Il existe plusieurs technologies de cellules qui ont toutes des propriétés différentes. Classifiées en fonction de la nature des matériaux absorbants, les cellules photovoltaïques PV sont réalisées à partir de nombreux matériaux semi-conducteurs qui peuvent être inorganiques, organiques ou hybrides. Il existe à ce jour trois principales filières qui se partagent le marché de manière inégale [16].

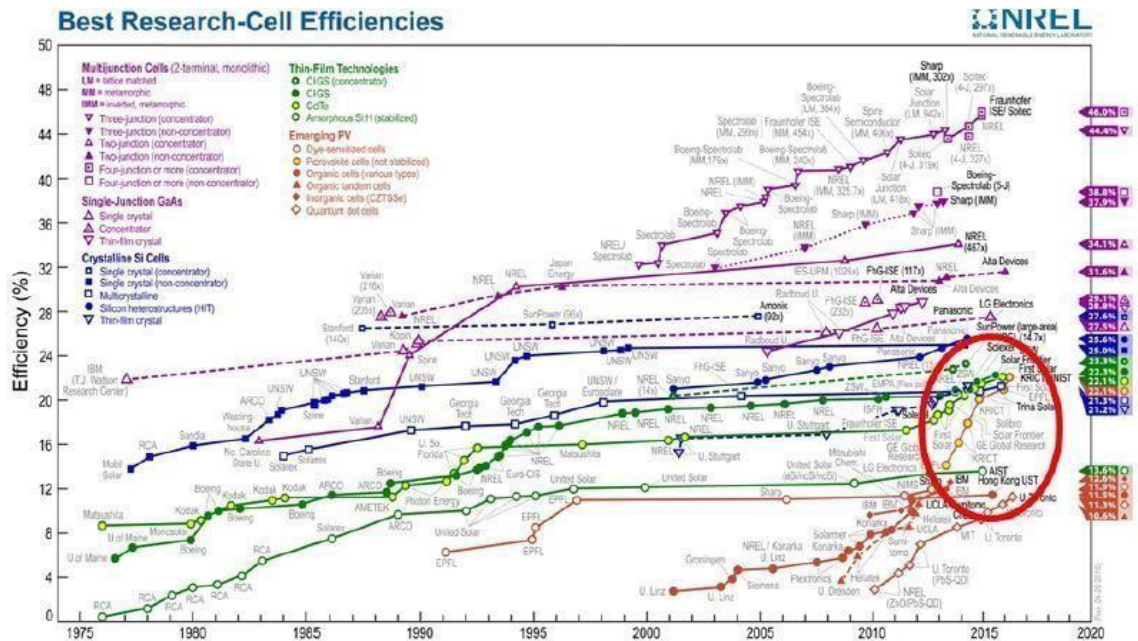


Figure 1 4 : Évolution des records de rendements de chaque filière de cellules photovoltaïques [NREL : Laboratoire nationale de l'énergie renouvelable]

2.3.1 La filière silicium

La première génération de cellules solaires qui comprend la technologie silicium, domine le marché du PV en raison de leurs rendements élevés

Il existe deux types de technologies au silicium : le silicium monocristallin et le silicium polycristallin.

2.3.2 La filière couches minces

La technologie couches minces correspond à la deuxième génération de cellules solaires dont les trois principales filières sont :

- Le silicium amorphe
- Le tellure de cadmium (CdTe)
- Le diséléniure de cuivre indium gallium (CIGS)

2.3.3 La filière de troisième génération

Les technologies PV de troisième génération sont développées dans le but de poursuivre les hautes performances de conversion, voire dépasser la limite de Schokley-Queisser, ou le développement d'architectures innovantes à des prix bas. Elles incluent les cellules sous concentration, les multi-jonctions, les cellules photovoltaïques organiques (OPV), les cellules solaires à colorants (DSSCs) et les cellules solaires pérovskite (PSCs).[16]

2.3.4 Cellule photovoltaïques à pérovskites :

2.3.4.1 Pérovskite

La pérovskite est un composé minéral, constitué de calcium et de titane. Sa formule chimique est CaTiO_3 , elle a été découverte par le minéralogiste russe Lev Alexeïevitch Perovski (1792–1856). La structure la plus simple de la pérovskite et la structure cubique simple de formule ABX_3 (Figure 2.11) avec l'ion A dans les coins, l'ion B au centre et l'ion négatifs occupe la position centrée de la face. La pérovskite possède des propriétés physiques impressionnantes, elle a une très grande absorption de la lumière et une grande longueur de diffusion des charges. En effet, la pérovskite hybride $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (MAPbI_3) a un grand coefficient d'absorption $1.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ à 550 nm, elle se caractérise par une grande longueur de diffusion des électrons et des trous (plus de 1 μm et potentiellement 100 μm) et finalement d'une grande mobilité des porteurs de charges .

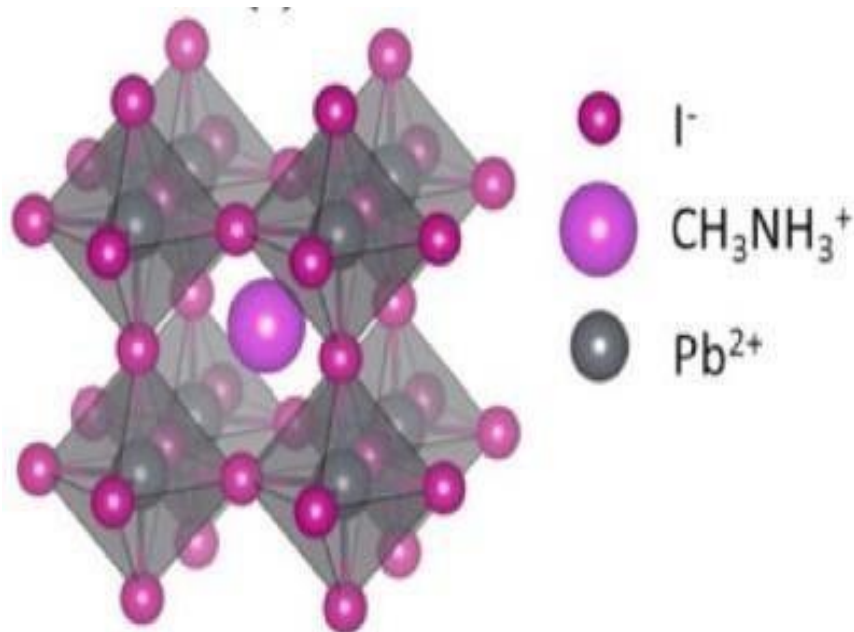


Figure 2 11 : structure hybride de la pérovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

2.3.4.2 Historique cellules solaires à pérovskites

La dernière décennie a été témoin du développement rapide d'une nouvelle classe de cellules solaires à base des matériaux pérovskites organique-inorganique halogénures (pérovskites hybrides) (figure I. B. 1). En 2009, date de première introduction d'une pérovskite hybride dans une cellule photovoltaïque, Gratzel et al. ont publié les premières études sur des pérovskites tri halogénures organométalliques utilisés en tant que sensibilisateurs au colorant à base d'électrolyte liquide (dyesensitized Solar cells (DSSCs)). Ces cellules solaires (DSSC) ont atteint un photo-voltage élevé proche de 1 V et une efficacité de conversion de puissance (PCE) $\approx 3\%$.

2.4 Avantages et inconvénients des systèmes PV

2.4.1 Avantages :

Les systèmes photovoltaïques présentent les avantages suivants:

D'abord une haute fiabilité. Le système PV ne comporte pas de pièces mobiles qui le rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Ensuite le caractère modulaire des panneaux solaires permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.

Leurs coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions. Malgré tous ces avantages il y a aussi des inconvénients.

2.4.2 Inconvénients

Les systèmes PV présente les inconvénients suivants :

La fabrication du module PV relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de l'ordre de 28%.

Tributaire des conditions météorologiques.

Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation du principe de la conversion photovoltaïque, la modélisation, les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque PV ainsi que les différents types de systèmes PV.

Une étude détaillée du principe de conversion d'énergie entre le GPV et la charge a montré la nécessité d'insérer un étage d'adaptation afin d'optimiser le transfert de puissance.

Les différentes techniques de recherche du point de puissance maximale dont l'objet est d'effectuer une recherche permanente du point de puissance maximale feront l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 3

Résultats de discusion

3 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude et la simulation de la cellule solaire sous l'utilisation du logiciel RsoftCad. Nous allons d'abord étudier la structure de la cellule solaire et ensuite afficher le mécanisme de son travail après un changement dans l'installation de la cellule solaire et de ses matériaux avec des dimensions nanométriques.

3.1 Logiciel utilisé « Rsoft CAD ».

RSoft CAD est un programme de base de RSoft Photonique qui permet aux chercheurs et aux ingénieurs de créer des systèmes pour la conception de divers dispositifs tels que des antennes sur puce , des cavités résonnantes et des circuits optiques .Il sert de programme de gestion pour les modules de simulation RSoft BeamPROP, FullWAVE, BandSOLVE, GratingMOD et DiffractMOD qui ne sont pas actifs . Le processus de conception et de modélisation est entièrement paramétrable, permettant des simulations de lots .

Une fois que les concepteurs ont créé et analysé la structure de diffraction dans DiffractMOD, le même dispositif de conception peut être directement simulé en double alternance et BandSOLVE pour une variété d' autres applications. RSoft CAD est un programme de base de RSoft Photonique qui permet aux chercheurs et aux ingénieurs de créer des systèmes pour la conception de divers dispositifs tels que des antennes sur puce , des cavités résonnantes et des circuits optiques .

Il sert de programme de gestion pour les modules de simulation RSoft BeamPROP, FullWAVE, BandSOLVE, GratingMOD et DiffractMOD qui ne sont pas actifs.

Le processus de conception et de modélisation est entièrement paramétrable, permettant des simulations de lots .Une fois que les concepteurs ont créé et analysé la structure de diffraction dans DiffractMOD, le même dispositif de conception peut être directement simulé en double alternance et BandSOLVE pour une variété d' autres applications.

3.2 Design et description de la cellule utilisée

3.2.1 Structure étudié

Le modèle choisi pour notre étude est une cellule solaire à mono jonction à base de la pérovskite ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$). Telle qu'elle est schématisée sur la figure 3.1 à l'aide du simulateur numérique Rsoft,

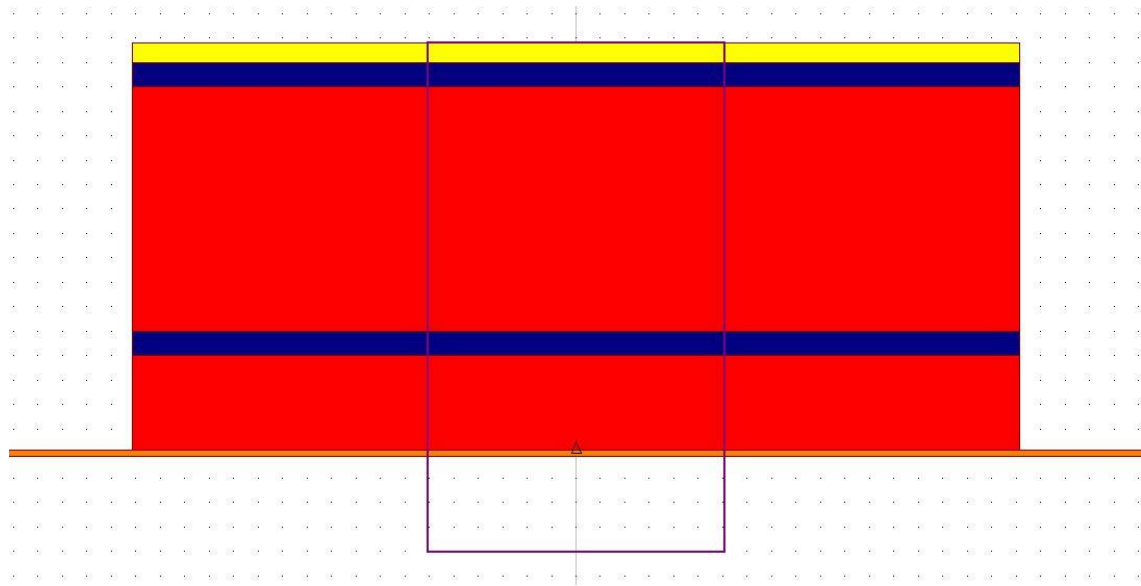


Figure .3.1 : la forme initiale de la Structure de la cellule solaire

3.2.2 Mécanisme de transport

De haut en bas, il se compose d'un contact métallique (Au), un matériau HTM de type matériel p (P3HT), un matériau pérovskite intrinsèque qui fonctionne comme un absorbeur et matériau de type n ETM (ITO). La pérovskite (région i) est un site de création de sorties (électron et état lié au trou) lorsque la cellule solaire est éclairée. Les photogénèses (électrons et trous) sont collectés dans les régions ETM et HTM. Le mécanisme de collecte des électrons (trous) est lié à leur longueur de diffusion et à leurs propriétés électriques ETM (HTM). La séparation des sorties se produit aux interfaces ETM/pérovskite et pérovskite/HTM. Les électrons migrent vers la région ETM (n) et les trous se déplacent vers la région HTM (p). Les mécanismes de dissociation et de migration sont causés par le champ électrique entre l'ETM et le HTM.

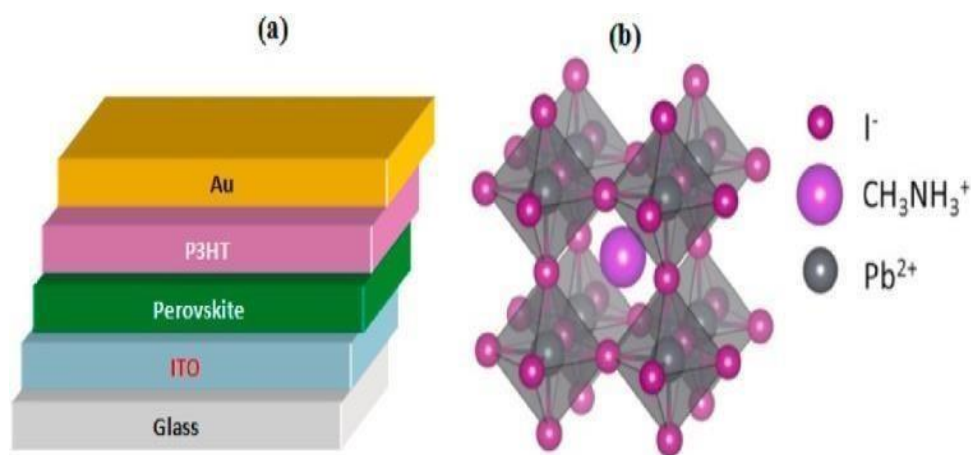


Figure .3.2 : présente la cellule solaire à base de pérovskite($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$)

3.3 Résultats et discussions

3.3.1 Effet du matériau de transport d'électrons (ETM).

Le diagramme schématique de la structure de l'appareil avec différents candidats ETM et leur alignement des bandes est représenté à la Fig. 3.3 . Nous supposons une épaisseur de 0,05 μm pour les candidats ETM, où les structures de cellules solaires à base de perovskite utilisant comme ETM : sulfure de zinc (ZnS), sélénure de zinc (ZnSe), l'étain dioxyde (SnO_2), le titane dioxyde (TiO_2) et le zinc oxyde (ZnO) sont examinés par rapport à la structure classique qui utilise l'ITO comme ETM.

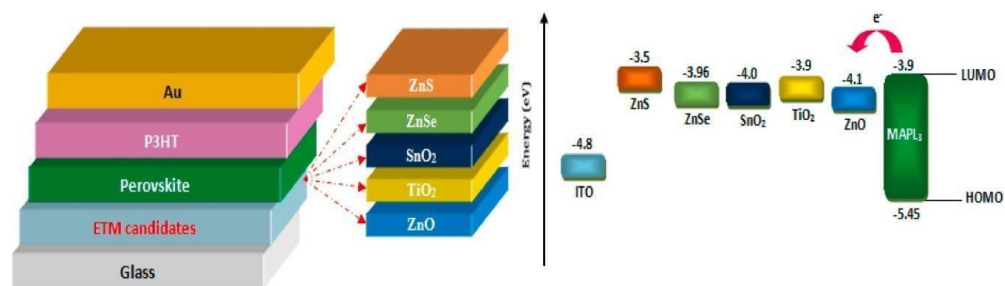


Figure .3.3 : Schéma de la structure du dispositif et alignement du diagramme de bande d'énergie entre perovskite et différents candidats ETM

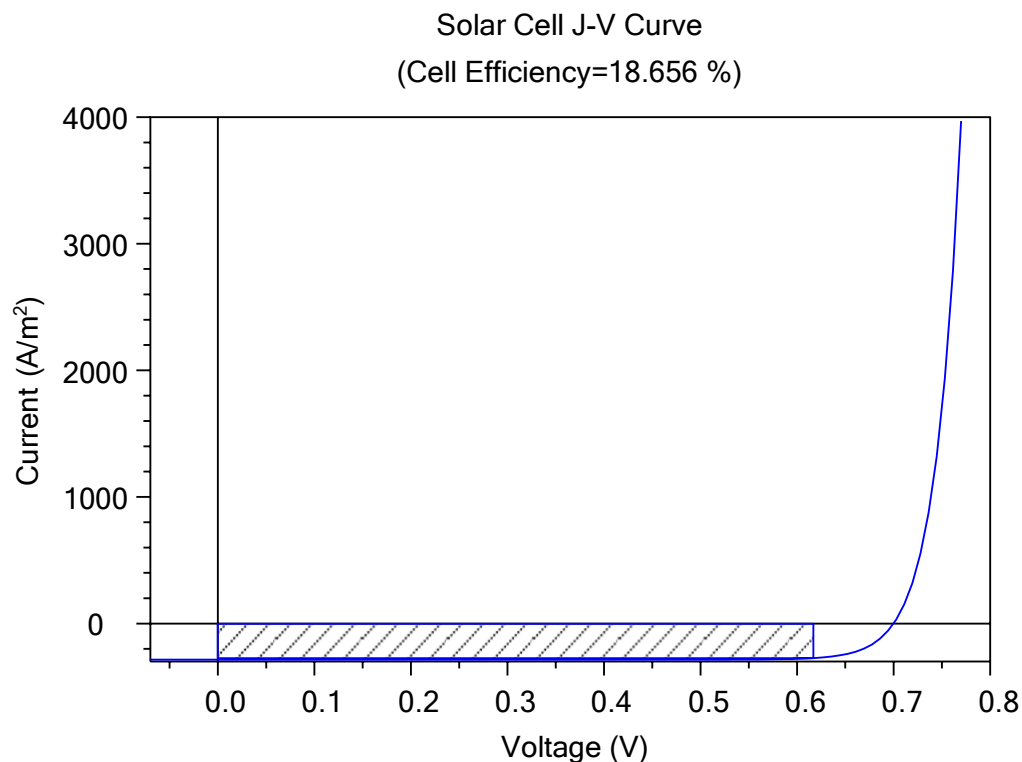


Figure .34. : représente le changement de densité de courant par rapport la tension

Le tableau 3.1 résume les valeurs des matériaux utilisés dans la cellule solaire en utilisant les données suivantes :

Tableau.3.1: Résultat du simulation pour les matériaux de transport d'électrons (ETM)

Parametre	Cell Efficiency (%)	Filling Factor (%)	Open circuit voltage (v)	Short Circuit Current(A/m ²)	Opt.Bias Voltaig V	Opti. Bias current (A/m ²)
ITO	18.65	84.58	0.7	-283.62	0.616	-272.21
SnO ₂	18.63	84.58	0.7	-283.28	0.616	-271.89
TiO ₂	21.99	84.58	0.7	-334.36	0.616	-320.94
ZnO	18.53	84.58	0.7	-281.73	0.616	-270.40
ZnSe	18.29	84.58	0.7	-278.13	0.616	-266.94
ZnS	21.12	84.58	0.7	-321.08	0.616	-308.17

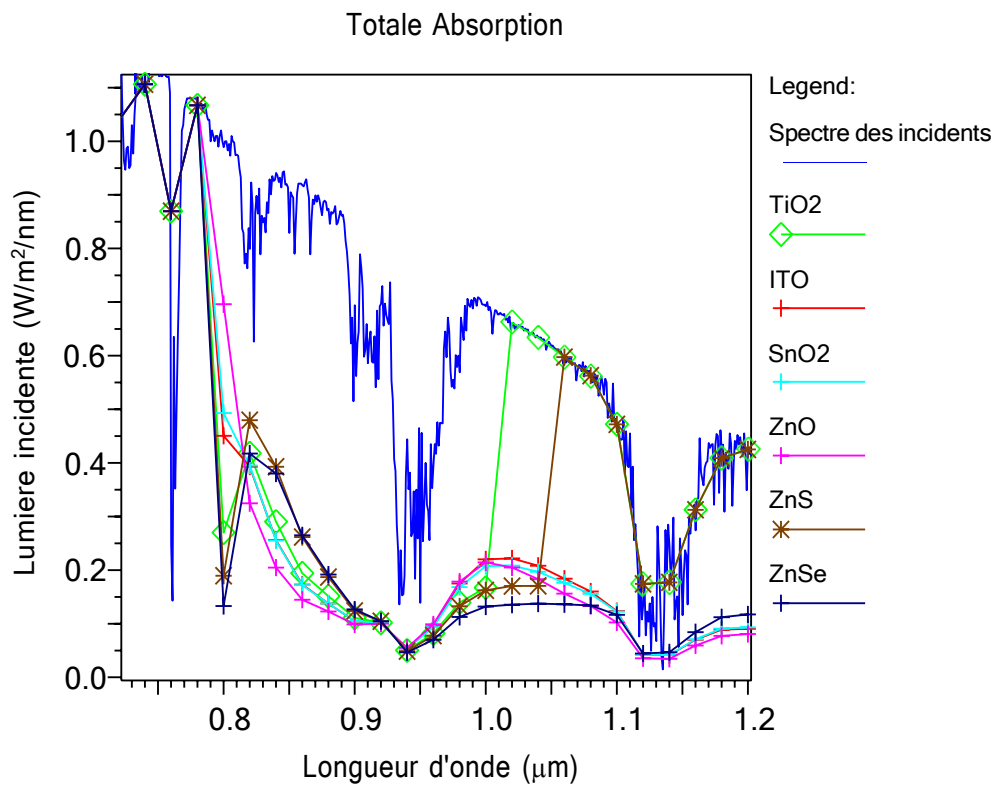


Figure .3.5 : le spectre pour les matériaux de transport d'électrons(ETM) ZnO , ZnS, SnO₂, ZnSe, ITO et TiO₂ où on remarque le meilleure couche est couche TiO₂.

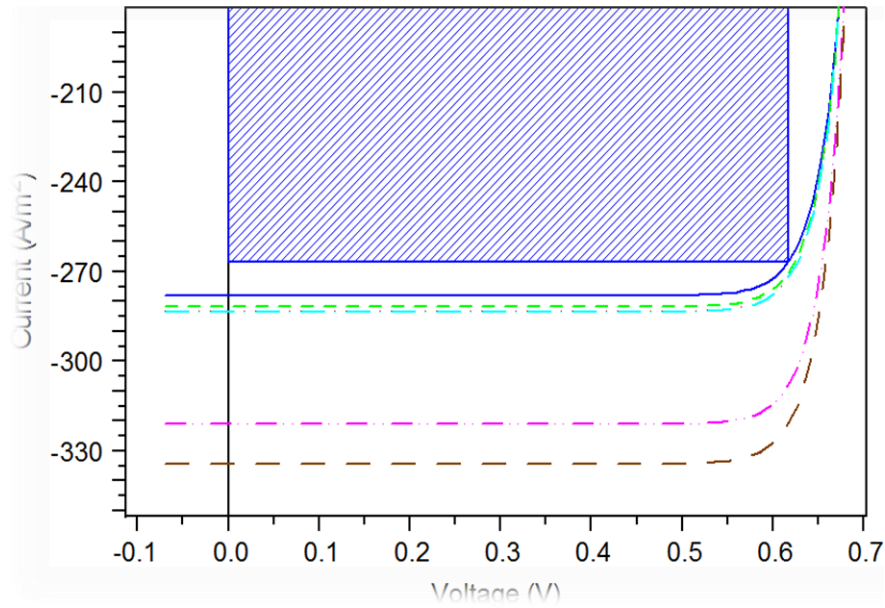


Figure .3.6 : Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes épaisseur de la couche ZnO , ZnS, SnO₂, ZnSe,ITO et TiO₂

Nous avons noté que les données d'entrée SnO₂, TiO₂, ZnO, ZnSe et ZnS sont extraites de l'un des éléments clés dans le choix du bon matériau ETM pour atteindre un équilibre délicat entre la conductivité électrique et le transport optique.

L'amélioration de la conductivité électrique comprend une augmentation potentielle du trafic porteur car nous avons constaté que TiO₂ est le meilleur pour ETM. (*Figure 3.7*).

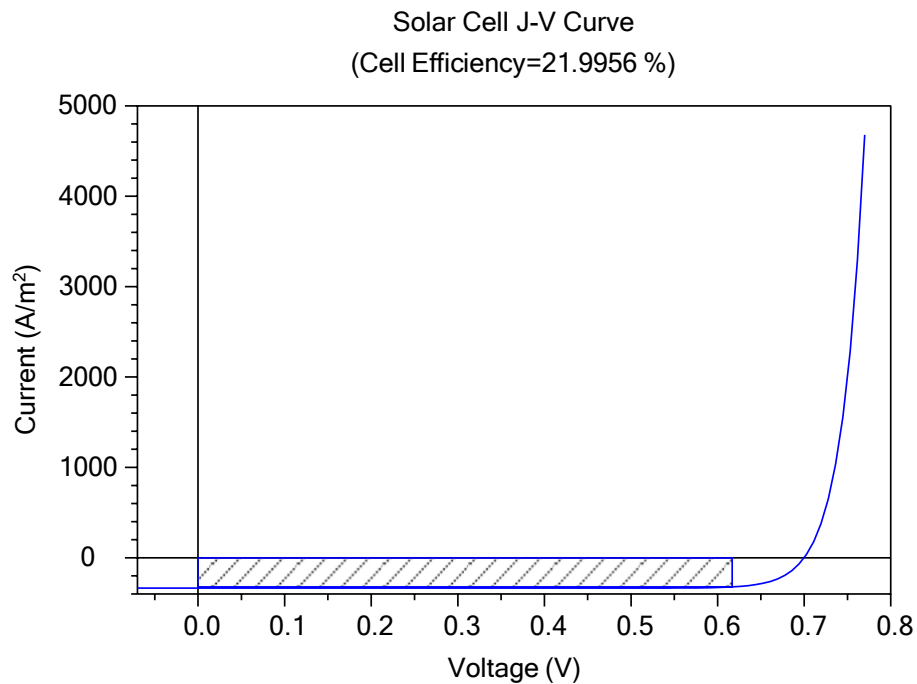


Figure .3.7 : Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes épaisseur de la couche TiO_2 .

3.3.2 Effet du matériau de transport de trous (HTM)

Dans ce qui suit, nous nous concentrons sur TiO_2 comme principal candidat ETM. De la même manière que précédemment, nous étudions dans cette section différents matériaux organiques et inorganiques comme HTM. Le diagramme schématique de la structure du dispositif avec différents candidats HTM et leur alignement des bandes est tracé à la Fig. 3.7

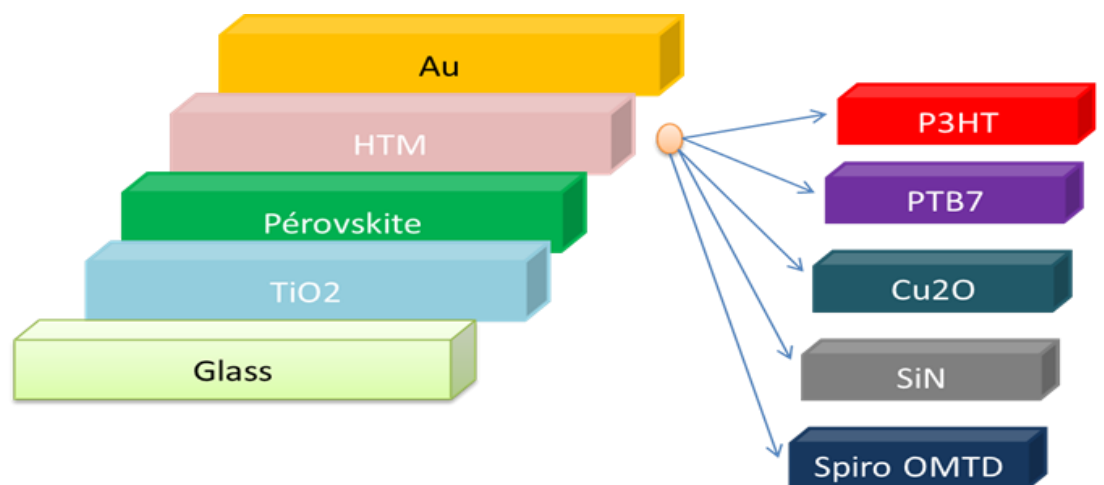


Figure 3 8 : Schéma de la structure du dispositif et alignement du diagramme de bande d'énergie entre perovskite et différents candidats HTM.

Un HTM effectue principalement deux tâches importantes, à savoir accélérer le transport des trous photogènes vers la contre-électrode ; et éviter l'interaction directe entre l'électrode et la couche active. Les tâches susmentionnées sont essentielles pour atteindre une efficacité et une stabilité élevées. L'absorption de HTM est toujours ignorée mais la réflexion est considéré comme contribuant à la génération de porteurs.

Pour étudier l'effet des propriétés optiques des candidats HTM sur les performances des cellules solaires, nous insérons les propriétés calculées dans le simulateur RsoftCAD. Le tableau 3.2 montre les performances optiques des cellules solaires examinées à l'aide de divers HTM

Tableau .3.2 : Résultat de la simulation pour les matériaux de transport de trous (HTM).

Parametre	Cell Efficiency (%)	Filling Factor (%)	Open circuit voltage(v)	Short Circuit Current(A/m ²)	Opti Bias Volt. (V)	Optimale Bias cur. (A/m ²)
P3HT	21.99	84.58	0.7	-334.36	0.616	-320.94
PTB7	22.01	84.58	0.7	-334.70	0.616	-321.24
Cu ₂ O	22.30	84.58	0.7	-339.03	0.616	-325.40
SiN	22.02	84.58	0.7	-334.77	0.616	-321.30
Spiro-OMeTAD	21.99	84.58	0.7	-334.36	0.616	-320.94

Divers candidats HTM sont étudiés, en supposant une épaisseur de 0,05 μm de TiO₂ ETM. Les figures 3.9 et 3.10 montrent les caractéristiques de JV et l'efficacité quantique, respectivement. A partir de ce graphique, on peut voir que l'absorption des candidats HTM n'affecte pas les performances de la cellule solaire. Ce fait est principalement dû à l'emplacement de ce matériau à l'arrière de l'appareil.

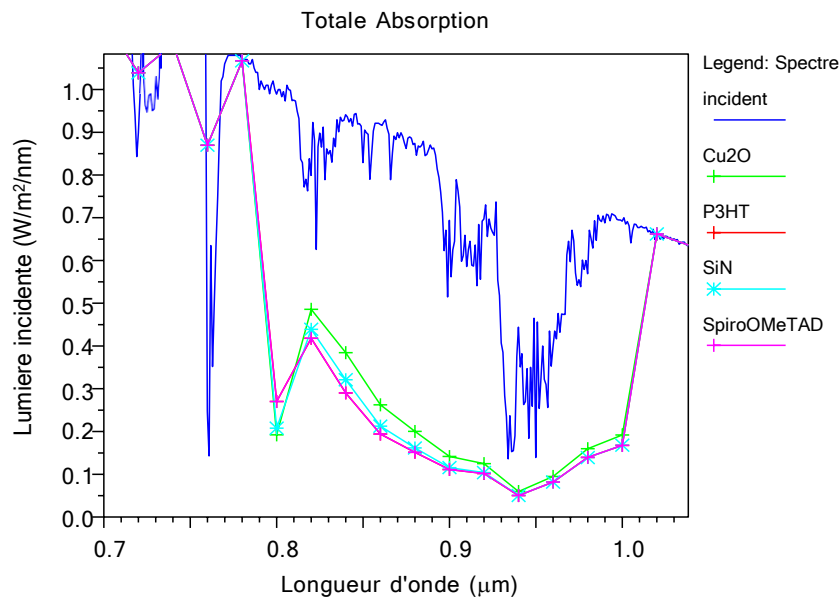


Figure 3.9 : spectre solaire pour les matériaux de transport de trous (HTM)

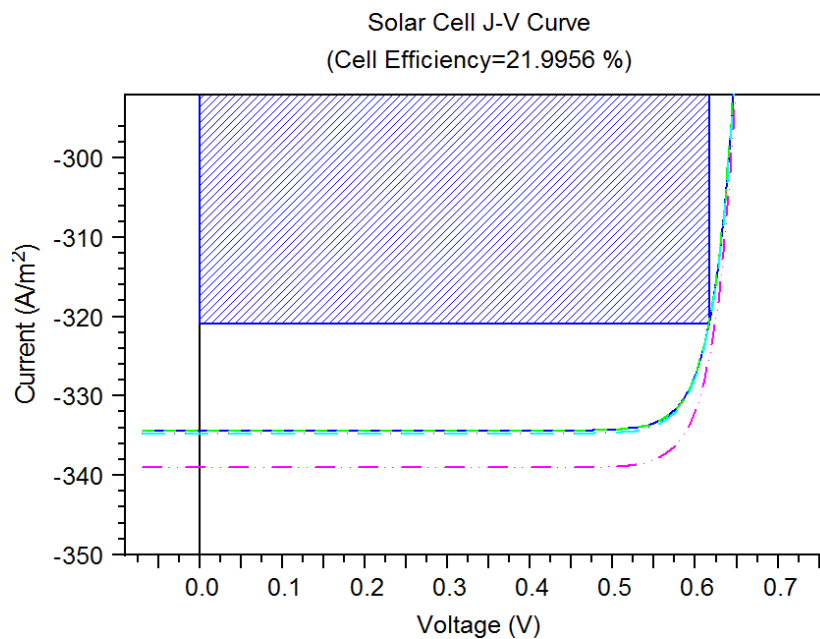


Figure 3.10 : Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes épaisseur de la couche P3HT,PTB7,Cu2O,SiN,Spiro-OMeTAD

Les valeurs de mérite obtenues en utilisant TiO₂ comme ETM et Cu₂O comme HTM sont :

$$V_{oc} = 0.7 \text{ V}, J_{sc} = -339.03 \text{ A/m}^2, FF = 84,58 \% \text{ et } \eta = 22.30 \%$$

Ces résultats prouvent l'avantage de la structure optimisée par rapport à la structure conventionnelle configuration utilisant ITO comme ETM et P3HT comme HTM, où une amélioration d'environ 3.65% en efficacité de conversion de puissance et environ de 11.62% en FF est atteinte.

3.4 Conclusion

Le but de ce travail était l'étude d'un système optimisé conception de cellules solaires à base de pérovskite n-i-p au moyen d'une approche optique et électrique combinée.

Les propriétés de transport de l'électron porteur de charge (trou) sont étudiées afin de déterminer le rôle des principaux facteurs qui améliorent le rendement de la cellule solaire. Un optimisé structure avec de le titane dioxyde (TiO_2) comme ETM et de cuivre (Cu_2O) comme HTM surpasse la cellule solaire conventionnelle.

Les matériaux ETM et HTM proposés satisfont aux exigences en termes de performances optiques élevées et de bon alignement des bandes, ce qui améliore le rendement électrique des cellules solaires.

Bien que l'approche proposée se soit avérée fiable pour une cellule solaire à base de pérovskite particulière, il est en principe approprié pour différentes cellules solaires en tandem. Le modèle couplé proposé peut être étendu en utilisant des méthodes artificielles intelligentes pour l'optimisation globale afin d'obtenir les paramètres optimaux qui affectent l'efficacité des cellules solaires tels que l'épaisseur et les concentrations de dopage de la couche absorbante.

CONCLUSION GENERALE

Nous avons présenté la nouvelle génération de cellules solaires à base de matériaux pérovskite. Différents paramètres influents sur les performances de ces cellules tels que l'architecture, le type du matériau utilisé pour la couche active, les techniques de fabrication et préparation des différentes couches.

Les cellules solaires à base de matériau pérovskite ayant connu le développement le plus rapide de l'histoire cependant avec un potentiel encore important d'amélioration de la performance et des coûts de produits faibles, les cellules à base de pérovskite sont devenu commercialement attractive.

Le but de ce travail était l'étude d'un système optimisé conception de cellules solaires à base de pérovskite n-i-p au moyen d'une approche optique et électrique combinée. Les propriétés de transport de l'électron porteur de charge (trou) sont étudiées afin de déterminer le rôle des principaux facteurs qui améliorent le rendement de la cellule solaire. Un optimisé structure avec de le titane dioxyde (TiO₂) comme ETM et de l'oxyde de cuivre (Cu₂O) comme HTM surpasse la cellule solaire conventionnelle. Les matériaux ETM et HTM proposés satisfont aux exigences en termes de performances optiques élevées et de bon alignement des bandes, ce qui améliore le rendement électrique des cellules solaires.

Le modèle couplé proposé peut être étendu en utilisant des méthodes artificielles intelligentes pour l'optimisation globale afin d'obtenir les paramètres optimaux qui affectent l'efficacité des cellules solaires tels que l'épaisseur et les concentrations de dopage de la couche absorbante.

Référence

- [1] S. Kazim, M.K. Nazeeruddin, M. Grätzel, S. Ahmad, Perovskite as light harvester: a game changer in photovoltaics, *Angew. Chem. Int. Ed.* 53 (2014) 2812–2824,
- [2] Q. Sun, X. Gong, H. Li, S. Liu, X. Zhao, Y. Shen, M. Wang, Direct formation of I³⁻ ions in organic cation solution for efficient perovskite solar cells, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 185 (2018) 111–116,
- [3] M. Wang, Z. Zang, B. Yang, X. Hu, K. Sun, L. Sun, Performance improvement of perovskite solar cells through enhanced hole extraction: the role of iodide concentration gradient, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 185 (2018) 117–123,
- [4] J.M. Ball, S.D. Stranks, M.T. Horantner, S. Hüttner, W. Zhang, E.J. Crossland, H. J. Snaith, Optical properties and limiting photocurrent of thin-film perovskite solar cells, *Energy Environ. Sci.* 8 (2) (2015) 602–609,
- [5] Y. Zhang, Y. Xuan, Comprehensive design of omnidirectional high-performance perovskite solar cells, *Sci. Rep.* 6 (2016) 29705,
- [6] O.A. Abdelraouf, N.K. Allam, Nanostructuring for enhanced absorption and carrier collection in czts-based solar cells: coupled optical and electrical modeling, *Opt. Mater.* 54 (2016) 84–88,
- [7] T. Ibn-Mohammed, S.C.L. Koha, I.M. Reaney, A.G. Acquayed, K.B. Mustapha, R. Greenough, Perovskite solar cells: an integrated hybrid lifecycle assessment and review in comparison with other photovoltaic technologies, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 80 (2017).
- [8] A. Mirecki, "Etude comparative des chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance," Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, Avril 2005.
- [9] <http://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/qu-est-ce-que-la-geothermie>.
- [10] O. Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couple au réseau et associé à un accumulateur," Thèse de doctorat, Ecole supérieure normale de

Cachan, Décembre 2002.

[11] Y. Pankow, " Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque", Thèse de Doctorat de L'Ecole Doctorale de L'ENSAM ED432, 2004.

[12] <http://www.topekobat.fr/production-electrique/auto-production/>

[13] <http://www.abcsolar.com/pdf/sp75.pdf>.

[14] R. Leyva, I. Queinnec, C. Alonso, A. Cid-Pastor, D. Lagrange and L. Martinez-Salamero, "MPPT of photovoltaic systems using extremum seeking control," IEEE Trans. On aerospace and Electronic Systems, Vol. 42, No. 1, Jan. 2006, pp. 249-258.

[15] Lionel Vechiu, "Modélisation et Analyse de l'Intégration des Énergies Renouvelables dans un Réseau Autonome", Thèse de doctorat, Université du Havre, 2005, Lien : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00179164>.

[16] Figure 2.1.1/ Figure 1.4 Etude et simulation d'une cellule solaire à pérovskite hybride a base de germanium par le simulateur SCAPS1-D Memoir Master Université BBA 2021

[17] H.Warda, « Etude de l'utilisation du ZnO comme contact de type n dans des dispositifs photovoltaïques à base de pérovskite hybride », These de doctorat. Université PARIS-SACLAY, 2017 .

[18] Figure 3.2 T. Minemoto, M. Murata, Impact of work function of back contact of perovskite solar cells without hole transport material analyzed by device simulation, Curr. Appl. Phys. 14 (11) (2014) 1428–1433, <https://doi.org/10.1016/j.cap.2014.08.002>.

[19] Figure 3.3 Combined optical-electrical modeling of perovskite solar cell with an optimized design, Invited Article T. Bendib a, b,*, H. Bencherif c, d, M.A. Abdi b, c, F. Meddour b, c, L. Dehimi e, f, M. Chahdi b, f Faculty of Technology, University of M'sila, 28000, Algeria.

Résumer

Dans ce travail, nous avons réalisé une cellule solaire à mono jonction à base des matériaux pérovskite dans le but d'optimiser le rendement en agissant sur quelques éléments constituant la cellule.

Mots-clés cellules solaires au silicium, l'énergie renouvelable , Pérovskite, photovoltaïque

ABSTRACT

In This wok, we have produced a mono Junction Solar cell based on perovskite materials in order to optimize the efficiency by acting on a few elements constituting the cell.

Keywords silicon solar cells, renewable energy, Perovskite, photovoltaic.

ملخص

من أجل تحسين الكفاءة من خلال بيروفسكايت في هذا العمل أن تجنى خلية شمسية أحادية الوصلة تعتمد على مواد على عدد قليل من العناصر التي تشكل الخلية. الكلمات المفتاحية الخلية الشمسية السيليكونية، طاقة متجددة، بيروفسكايت، الخلايا الضوئية.