

**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/ 2021**



**DOMAINE: SCIENCES ET**  
**TECHNOLOGIE**  
**FILIERE: ÉLECTRONIQUE**  
**OPTION: MICROELECTRONIQUE**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Par: BADREDDINE Rihab et CHERIKI Dalila**

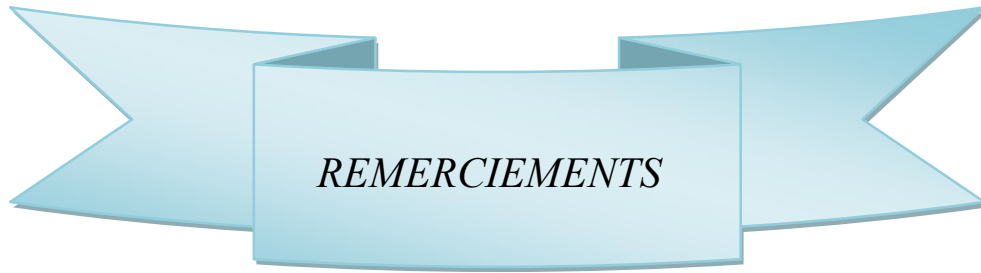
**Intitulé**

**Amélioration de la caractéristique optique et**  
**électrique d'une cellule photovoltaïque à base de**  
**pérovskite**

**Soutenu publiquement le : 20 /06/ 2021 devant le jury composé de:**

<b>Dr. BENNACER Hamza</b>	<b>Université de M'sila</b>	<b>Président</b>
<b>Dr. BOURAS Mounir</b>	<b>Université de M'sila</b>	<b>Encadreur</b>
<b>Dr. KHENNOUF Salah</b>	<b>Université de M'sila</b>	<b>Co-Encadreur</b>
<b>Dr. HADJAB Moufidi</b>	<b>Université de M'sila</b>	<b>Examineur</b>

**Année universitaire: 2020/2021**



*Nous remercions avant tout Allah le tout puissant pour son aide, sa bénédiction et pour tout ce qu'il nous a donné.*

*Un grand merci à nos encadreurs Dr. BOURAS Mounir et Dr. KHENNOUF Salah à qui nous devons beaucoup, pour leurs attentions, leurs disponibilités, leurs conseils et leurs sympathies.*

*Nos remerciements vont également aux membres du jury, chacun par son nom, pour avoir accepté de faire partie du jury d'évaluation de ce modeste travail.*

*Nous remercions tous les enseignants du département d'électronique qui ont contribué à notre formation, ainsi que tous les membres du cadre administratif.*

*Nous tenons à remercier, enfin, tous ceux qui ont aidés de près ou de loin lors de ce projet de fin d'études.*

*R. BADREDDINE & D. CHERIKI*

## **DEDICACE**

*A l'a personne devant laquelle tous les mots de l'univers  
sont incapables d'exprimer mon amour et mon affection pour  
elle, à l'être qui m'est le plus cher, à ma douce mère.*

*Mère, si tu savais combien je t'aime.*

*A mon cher père*

*(Amel, Ahmed).*

**"وَإِخْفِضْ لَهُمَا جَنَاحَ الذُّلِّ مِنَ الرَّحْمَةِ وَقُلْ رَبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيَانِي صَغِيرًا"**

**"اللهم ادخلهم فسيح جناتك يا رب"**

*A mes chers frères et sœur (Hala, Rahim, Hadil) .*

*A mes amis (Dalila, Bothaina, Hind, Ahmed, Mounir, Smail) à  
qui je souhaite bonheur et réussite.*

*A tous ceux qui, de loin ou de près, ont contribué à la  
réalisation de ce modeste travail.*

**Rihab BADREDDINE**





**DEDICACE**

*Tout d'abord, je remercie Dieu le Tout-Puissant de m'avoir  
donner du courage et de la patience pour y arriver à terminer ce  
travail*

*Je dédie cet humble travail :*

*A mes chers parents (avec toute ma gratitude).*

*A mes frères et sœurs (Asala, Mohamed, Oussama, Aissa, Hamza)*

*A mes amies (Khawla, Rihab, Hind, Abdelkader, Hanane*

*Mounir, Smail et tous mes chers amis..*

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

*Pour tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à  
la finalisation de ce travail.*

**Dalal CHERIKI**

# Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>2</b>
<b>CHAPITRE-1GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES</b>	
<b>1.1 Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Présentation et avantages de l'énergie renouvelable .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Historique des énergies renouvelables .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4 Energies renouvelables .....</b>	<b>7</b>
<b>1.4.1 Définition .....</b>	<b>7</b>
<b>1.4.2 Quelles les sources d'énergie renouvelable.....</b>	<b>8</b>
<b>1.4.3 Caractéristiques des énergies renouvelables.....</b>	<b>9</b>
<b>1.4.4 Utilisation des énergies renouvelable .....</b>	<b>10</b>
<b>1.4.5 Différents type d'énergie renouvelable.....</b>	<b>11</b>
<b>1.4.5.1 Energie éolien.....</b>	<b>11</b>
<b>1.4.5.2 Energie hydraulique .....</b>	<b>12</b>
<b>1.4.5.3 Energie géothermique.....</b>	<b>13</b>
<b>1.4.5.4 Biomasse.....</b>	<b>14</b>
<b>1.4.5.5.Energie solaire.....</b>	<b>16</b>
<b>1.5 CONCLUCTION.....</b>	<b>18</b>
<b>CHAPITRE 2 : SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE</b>	
<b>2.1 Introduction.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 Cellules solaires photovoltaïques.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.1 Définition.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.2 Principe général du fonctionnement d'une cellule solaire.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.3 Module photovoltaïque.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.4 Semi-conducteurs.....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.5 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.6 Effet photovoltaïque.....</b>	<b>27</b>

2.2.7 Rendement d'une cellule.....	27
2.3 Panneau solaire.....	29
2.4 Filières technologiques des cellules photovoltaïques.....	30
2.4.1 Jonction p-n.....	31
2.4.2 matériaux Pérovskite.....	32
2.4.3 Filière silicium.....	34
2.4.3.1 Silicium monocristallin.....	34
2.4.3.2 Silicium multi cristallin.....	34
2.4.3.3 Silicium amorphe.....	35
2.4.4 Filière couches minces.....	35
2.4.4.1 Dopage .....	36
2.4.4.2 Dopage de type N.....	37
2.4.4.3 Dopage de type P.....	37
2.5 Paramètres d'une cellule solaire.....	37
2.5.1 Tension à circuit ouvert $V_{oc}$ .....	37
2.5.2 Courant de court-circuit $I_{sc}$ .....	37
2.5.3 Puissance maximale $P_{max}$ .....	38
2.5.4 Factor de qualité .....	38
2.5.5 Facteur de forme $ff$ .....	38
2.5.6 Rendement énergétique maximum $\eta$ .....	38
2.6 Circuits électriques équivalentes d'une cellule photovoltaïque .....	39
2.7 Utilisation des systèmes solaires.....	40
2.8 Avantages et Inconvénients de l'énergie Photovoltaïque.....	41
2.8.1 Avantage sdu photovoltaïque.....	41
2.8.2 Inconvénients du PV.....	41
2.9 CONCLUSION.....	42
<b>CHAPITRE 3 : SIMULATION ET RESULTATS (PAR RSOFT)</b>	
3.1 Introduction .....	44
3.2 Logiciel utilisé « Rsoft CAD».....	44
3.3 Première Structure étudié.....	45
3.3.1 Si_ amorphous ou Pérovskite .....	46

3.3.2 Matériau de transport d'électrons (ETM).....	47
3.3.3 Spectre solaire pour ETM .....	48
3.3.4 Matériau de transport de trous (HTM) .....	49
3.3.5 Spectre solaire pour HTM .....	50
3.4 Deuxième Structure étudié.....	51
3.5 Forme texturé (sin).....	52
3.5.1 Nombre de période (pour couche Ag) .....	52
3.5.2 Crête-crête (pour couche Ag).....	53
3.5.3 Nombre de période (pour couche Au) .....	54
3.5.4 Crête-crête (pour couche Au) .....	55
3.6 Remarque.....	56
3.7 CONCLUSION.....	57

# Liste des figures

Figure 1.1 : Structure de la production d'électricité mondiale en 2005.....	7
Figure 1.2 : Structure de la production d'électricité mondiale en 2005.....	8
Figure 1.3 : La part de l'énergie renouvelable dans la production mondiale.....	9
Figure 1.4 : Photo d'une centrale éolienne.....	11
Figure 1.5 : Centrale hydroélectrique.....	13
Figure 1.6 : Photo d'une centrale Biomasse.....	15
Figure 1.7 : Photo d'une centrale solaire.....	16
Figure 2.1: Cellules solaires photovoltaïques.....	21
Figure 2.2: 1a Système photovoltaïque.....	22
Figure 2.3: Système photovoltaïque plus détaillé.....	23
Figure 2.4: Circuit équivalent de la cellule solaire.....	23
Figure 2.5: Caractéristiques $I=f(V)$ d'une cellule PV.....	23
Figure 2.6: Les trois grandes familles des matériaux.....	24
Figure 2.7: Caractéristiques $I=f(V)$ sous obscurité et éclairage d'une cellule PV .....	25
Figure 2.8: Principe de la conversion photovoltaïque dans la cellule photovoltaïque.....	26
Figure 2.9: Panneau solaire.....	27
Figure 2.10: Parts de marché des différentes technologies solaires.....	29
Figure 2.11: la jonction p-n. diode.....	30
Figure 2.12: Structure hybride du pérovskite Tirée (Gheno, Vedraïne, Ratier, Bouclé) ...	31
Figure 2.13: Cellules du silicium monocristallin et multi cristallin.....	31
Figure 2.14 : Cellules du silicium amorphe en couche mince.....	32
Figure 2.15 : Représenter le dopage (n et p).....	33
Figure 2.16 : Caractéristiques électriques d'une cellule élémentaire.....	34
Figure 2.17 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode.....	36
Figure 3.1 : La forme initiale de la Première Structure de la cellule PIN.....	39
Figure 3.2 : Structure convergente de la cellule solaire à base de pérovskite structure en cristal ( $\beta$ ).....	45
Figure 3.3 : Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes épaisseurs	

de la Si_ amorphous B et pérovskite A.....	45
Figure 3.4 : Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes épaisseurs de la couche ZnO, ZnS, SnO2 et ZnSe.....	46
Figure 3.5 : Spectre solaire pour les matériaux de transport d'électrons.....	47
Figure 3.6 : Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes épaisseurs de la couche P3HT, Spiro-OMeTAD et PEDOT: PSS.....	48
Figure 3.7 : Spectre solaire pour les matériaux de transport d'électrons.....	49
Figure 3.8 : La forme initiale de la Deuxième Structure de la cellule PIN.....	50
Figure 3.9 : Caractéristiques le rendement de la structure pour la pour différentes Nombre de période pour couche Ag.....	51
Figure 3.10 : Caractéristiques le rendement de la structure pour la pour différentes L'amplitude pour couche Ag.....	52
Figure 3.11 : Caractéristiques le rendement de la structure pour la pour différentes Nombre de période pour couche Au.....	53
Figure 3.12 : Caractéristiques le rendement de la structure pour la pour différentes L'amplitude pour couche Au.....	54
	55

# Liste de Tableaux

Tableau 2.1	Le différent type des cellules avec leur rendement .....	27
Tableau 3.1	Résultat de la simulation pour les matériaux de transport d'électrons.....	47
Tableau 3.2	Résultat de la simulation pour les matériaux de transport trous.....	49
Tableau 3.3	Résultat de la simulation pour couche Ag.....	52
Tableau 3.4	Résultat de la simulation pour différentes l'amplitude (couche Ag).....	53
Tableau 3.5	Résultat de la simulation pour différentes Nombre de période (couche Au)	54
Tableau 3.6	Résultat de la simulation pour différentes l'amplitude (couche Au).....	55

# Lise d'Abréviations

**CO<sub>2</sub>**: D'ixode de carbone.

**Si**: Silicium.

**PV**: Photovoltaïque.

**Ge**: Germanium.

**GaAs**: Arsenic de gallium

**Ag** : Argent ou

**Au** : Or

**ZnO** : Oxide zinc

**Zn Se** : Solénidé zinc

**Zn S**: Sulfur- zinc

**SnO<sub>2</sub>**: Tin dioxide

**P3HT**: Polymer Sal

**Spiro-OMeTAD**: Spirobifluorene

**PEDOT: PSS**: Est matériaux les données pour ces matériaux sont tirée de la littérature [22–25,30]

# Liste des symboles

$I_{PH}$ : Densité de courante photo générée.

$I_{opsc}$ : Densité de courant d'obscurité.

$I_s$ : Courant des au ration de la diode.

$q$ : Charge élément aire.

$k$ : Constante de Boltzmann.

$T$ : Température.

$I_{cc}$ : Courant de court- circuit (obtenu pour  $V=0$ ).

$V_{co}$ : Tension en circuit ouvert (obtenu pour  $I=0$ ).

$I_m$ : Courant à la puissance maximale de fonctionnement de cellule

$V_m$ : Tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule Photovoltaïque.

$\eta$ : Rendement de conversion.

$FF$ : Facteur de forme.

$I_s$ : Courant de saturation de la diode [A], dépendant de la température [A]

$A$ : Facteur de qualité de la diode.

$I$ : Courant fourni par la cellule.

$V$ : Tension à la borne de la cellule [V].

$ETM$ : matériau de transport d'électrons

$HTL$ : matériau de transport de trous



# **Introduction Générale**

## Introduction Générale

---

Les technologies photovoltaïques à base de pérovskite de troisième génération se sont avérées une évolution remarquable dans la conversion de l'énergie solaire depuis leur premier emploi en 2009 [1]. En raison de leurs caractéristiques électro-optiques supérieures et ajustables, les pérovskites aux halogénures organiques et inorganiques ont acquis une attention considérable parmi les différentes technologies, résultant en de meilleures performances dans les dispositifs optoélectroniques et photovoltaïques [2,3]. Depuis 2009, des matériaux pérovskites ont été utilisés comme absorbeur de cellules solaires [1].

Les pérovskites sont une option intéressante pour les applications de 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 m eV et longue longueur de diffusion [4].

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 [5]. L'efficacité de conversion de puissance (PCE) approuvée de 25,2 % a été obtenue grâce à ces caractéristiques spécifiques [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. 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 [8] ou la méthode du domaine temporel des différences finies [9]. Un simulateur COMSOL tridimensionnel (3D) utilisant la méthode des éléments finis (FEM) est également suggéré [10]. 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.

## Introduction Générale

---

L'objectif de cette 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 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 du système 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**  
**GENERALITES SUR LES**  
**ENERGIES RENOUVELABLES**

## **CHAPITRE-1**

### **GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES**

#### **1.1 Introduction**

Ce chapitre présente des généralités sur les énergies. Nous aborderons ainsi en premier lieu quelques notions sur l'énergie renouvelable, et son histoire. Nous décrirons ensuite son différents types, quel que soit primaire ou secondaire. En fin, nous abor différentes sources d'énergie, et ses avantages.

#### **1.2 Avantages des énergies renouvelables**

Le développement économique et industriel s'accompagne d'un besoin croissant en énergie. L'utilisation massive des ressources fossiles conduit non seulement à leur épuisement certain dans le temps mais aussi à la libération du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) qui contribue par l'effet de serre au réchauffement de la planète.

Pour subvenir à ce besoin croissant en énergie et limiter les émissions des gaz à effet de serre, la solution des énergies renouvelables est la seule voie connue aujourd'hui pour assurer un développement durable et une économie saine [3].

#### **1.3 Historique des énergies renouvelables**

Le terme « énergie renouvelable » est relativement récent « apparition en 1970 », mais la totalité des énergies qui existent depuis quasiment l'origine de la terre et leur utilisation par l'homme remonte à plusieurs centaines voire à plusieurs milliers d'années. La biomasse fut utilisée notamment pour se chauffer, et développer l'industrie des métaux. L'énergie thermique solaire fut mobilisée pour sécher les aliments, les céréales ou le foin. Les sources géothermales furent à l'origine de nombreuses implantations humaines. L'énergie éolienne fut utilisée par les civilisations égyptienne et minoenne pour propulsion des navires ; L'énergie hydraulique fut utilisée en perse et dans l'empire romain il y a plus de deux millénaires.

L'Europe du moyen âge redécouvrit les techniques et les utilisa à grande échelle (moulins à vent, moulins à marée, moulins hydrauliques) pour moulinier les céréales, pomper de l'eau en trainant des martins et pour fabriquer du papier par exemple et avec le progrès des machines thermiques, les puissances croissantes de génératrices alimentées par les concentrations industrielles et les impératifs de productivités allaient rendre obsolètes ces générateurs mécaniques à faible puissance.

Les réflexions engagées dans les pays développés quelque année avant le premier choc pétrolier firent toutefois prendre conscience à l'opinion que l'accroissement exponentiel de la consommation d'énergie fossile risquait d'engendrer, dans l'échelle de temps d'une vie humaine, les pénuries d'approvisionnement et conduire à des situations environnementales irréversibles du fait de la saturation des mécanismes de restaurations des équilibres naturels.

C'est dans tel contexte que l'étude et le développement de convertisseurs susceptibles de capter le potentiel des énergies provenant directement ou indirectement de l'énergie solaire et géothermique furent lancés ou réactivés. On leur donna pour l'occasion le nom d'énergies renouvelables et on les présenta comme étant une alternative à la domination hégémonique des sources fossiles dans le bilan énergétique mondial[4].

## **1.4 Energies renouvelables**

### **1.4.1 Définition**

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20 à 30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur soit en électricité, selon les besoins. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant,

Le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie. La figure(1.1) présente la production mondiale d'électricité en 2005 et la figure (1.2) fait un zoom sur les énergies renouvelables [5].

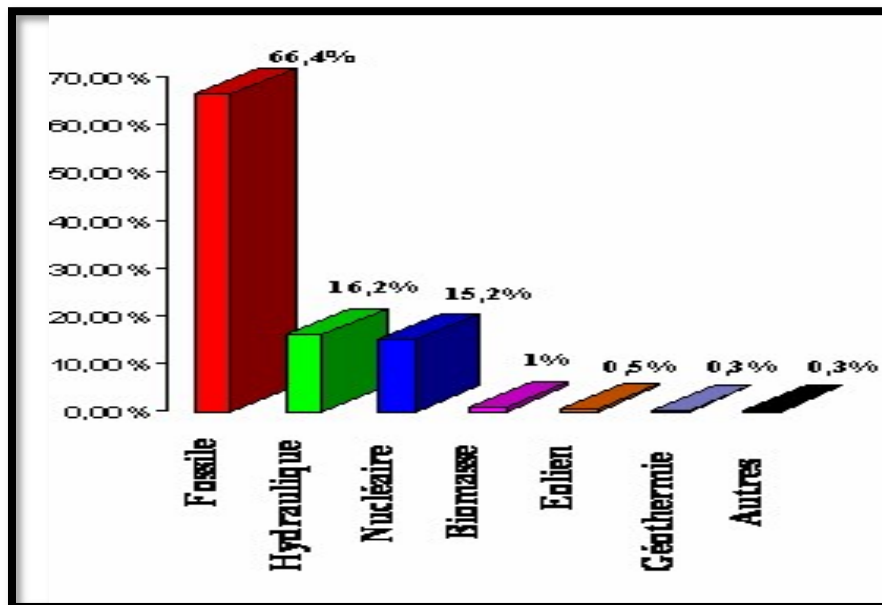


Figure 1.1: Structure de la production d'électricité mondiale en 2005.

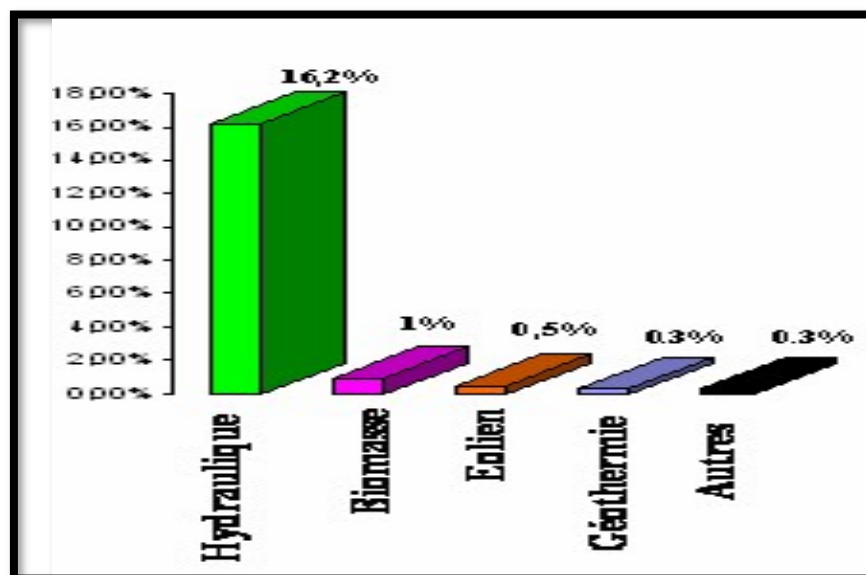


Figure 1.2: Structure de la production d'électricité mondiale en 2005

### 1.4.2 Quelles sont les sources d'énergie renouvelables

En effet les sources d'énergies renouvelables sont les moyens de production privilégiés, les principales utilisées sont les panneaux solaires photovoltaïques et les éoliennes. Ces deux énergies ont connu un essor important lors des 30 dernières années, de part leurs importants potentiels énergétiques.

D'autres moyens de production peuvent être employés selon les ressources présentes dans la région comme la géothermie, exploitant la chaleur du sous-sol. La biomasse, quant à elle, permet de produire de l'électricité et de la chaleur par cogénération grâce à la combustion des déchets ménagers, agricoles et autres.

Un élément tout aussi important, et qui représente un enjeu majeur dans le développement des micro-réseaux, est le stockage de l'énergie. C'est le rôle des batteries, qui peuvent être employées de deux manières différentes. Tout d'abord comme unités de stockage, en absorbant le surplus d'énergie sur le réseau afin de conserver un bon équilibre entre production et consommation et également en tant que réserve dans le but de soutenir la production dans le cas où la demande en énergie augmente rapidement ou que la production diminue due aux conditions environnementales [6].

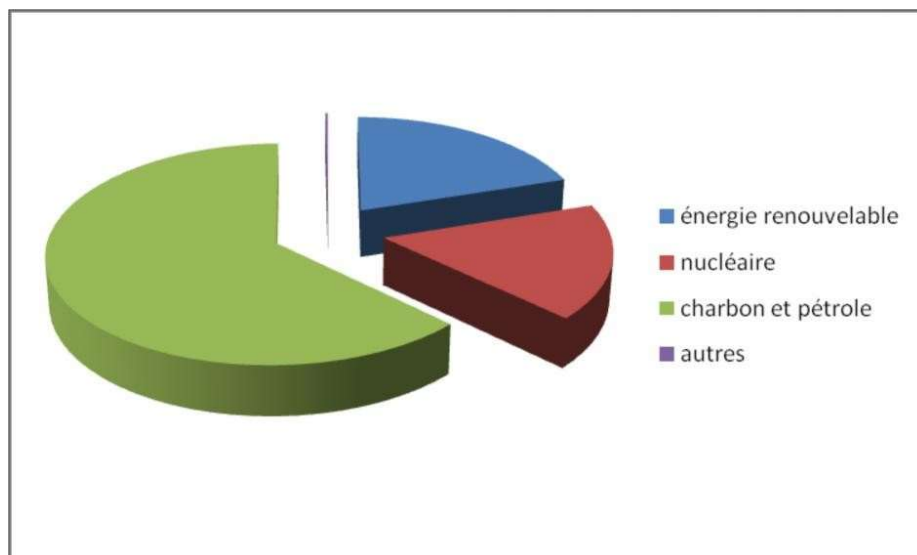


Figure 1.3: La part de l'énergie renouvelable dans la production mondiale[4].

### 1.4.3 Caractéristiques des énergies renouvelables

- Disponible dans tous les pays du monde.
- C'est une source locale non transférable et adaptée au développement des besoins et des réalités des villes et des zones rurales.
- Moyens économiques aux avantages et usages multiples, et constituent un revenu économique énorme pour les pays.

- Maintient un environnement propre et ma santé publique, et ne contient aucun résidu polluant.
- Source garantie à des prix raisonnables et réglementes.
- Disponibilité des technologies utilisées pour leur fabrication dans les pays en développement.
- Il soutient les économies des pays sur les plans industriel, agricole et social, et contribue au développement de l'environnement.

#### **1.4.4 Utilisations des énergies renouvelables**

L'importance des énergies renouvelable vient de sa multiplicité d'utilisation dans différents domaines de la vie humaine, et de son rôle dans la satisfaction des dessins humains et des exigences quotidiennes, qui sont les suivants

- L'énergie solaire est utilisée pour faciliter les tâche ménagères telles que le bain, les nettoyages le lavage, car c'est l'un des types d'énergie renouvelable les moins chers disponibles.
- Distillation de l'eau.
- Éclairage des voies de navigation et alarmes de navigation.
- Utilisé dans les haut-parleurs du système d'exploitation.
- L'énergie solaire est utilisée dans les usines alimentaires, les plastiques, les boulangeries automatisées et la teinture, ainsi que dans les processus de chauffage et d'évaporation.
- Ils sont utilisés pour stoker les réfrigérateurs à médicaments dans les centres de santé et les hôpitaux, et pour faire fonctionner les téléviseurs dans les cours ouvertes et spacieuses.
- Utilisé pour charger les batteries et les générateurs.
- Générer de l'énergie électrique pour éclairer les villages et les endroits éloignés.

## 1.4.5 Différents types d'énergie renouvelable

Il existe différentes sources d'énergie renouvelables disponibles sur la planète dont les principales sont l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, la biomasse et énergie géothermique. Elles peuvent être converties, selon les besoins en électricité ou en chaleur.

### 1.4.5.1 Energie éolienne

Parmi toutes les énergies renouvelables l'éolien est l'une des plus prometteuses, l'évolution technologique (augmentation de la taille et de la puissance des installations, optimisation des matériaux) alliée à la baisse continue des coûts de production (effet de série) font actuellement de l'éolien l'une des énergies renouvelables les plus compétitives. Pour toutes ces raisons l'énergie issue du vent fait déjà partie intégrante du paysage et la tenaces annonce irréversible [7].

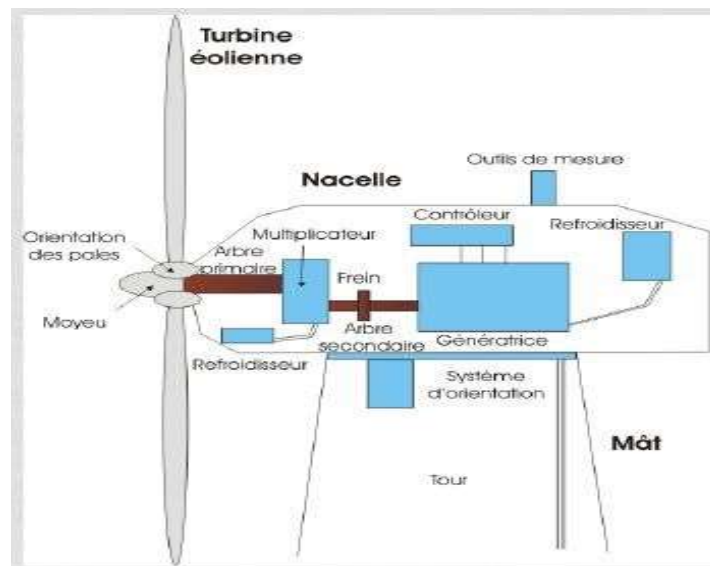


Figure 1.4: Photo d'une centrale éolienne

#### ❖ Avantages et Inconvénients

On peut citer comme avantages

- Pas de pollution.
- Attraction touristique.
- Source d'énergie gratuite et inépuisable.
- Source d'énergie pour les endroits difficile (ne nécessite pas de transport de combustibles).
- Energie renouvelable.

Come inconvénients on peut citer

- Couplages nécessaire (Il faut combiner cette source d'énergie avec une autre).
- Energie difficile a emmagasiné.
- Nature intermittente de la source.
- Surface occupée importante.
- Sites terrestres limités.

### **1.4.5.2 Energie hydraulique**

L'Energie hydraulique est parmi les première types d'énergies renouvelables au monde. Elle se distingue par sa souplesse d'utilisation et 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. Chaque ouvrage hydraulique est donc adapté à la typologie des lieux pour atteindre un rendement optimal.

On peut noter aussi, dans le domaine de l'énergie hydraulique, les ressources marémotrices de la houle et celles des courants marins qui sont très importants. De nombreux travaux dans le monde ont montré la faisabilité de l'exploitation des ressources de la houle. La plus grande usine marémotrice au monde se trouve en France (la Rance) avec une puissance de 240 MW. Le développement attendu de l'énergie éolienne offshore pourrait être avantageusement couplé à une production par les vagues où l'on pourrait mettre en commun les coûteuses infrastructures de génie civil [5].

Il est a noté que l'énergie hydraulique est en fait cinétique dans le cas des marées et cours d'eau, et potentielle dans le cas des chutes.

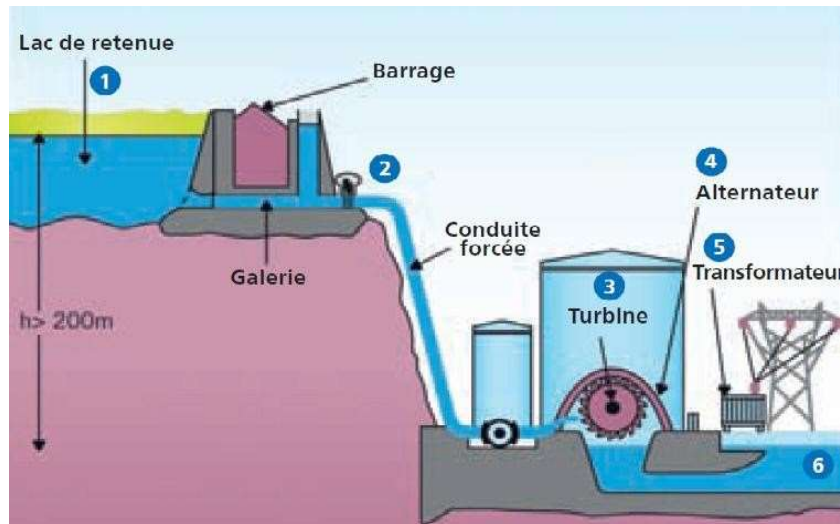


Figure I.5: Centrale hydroélectrique [4]

#### ❖ Avantages et inconvénients

Parmi les avantages, qu'on peut citer pour ce type de centrale on a

- Réseau Potentiel de développement très important.
- Outils de régulation des cours d'eau accessible.
- Pas de pollution ni de rejet de gaz à effet de serre.
- Technologie maîtrisée.
- Adaptation fine à la demande possible

Les inconvénients que les experts ont constatés sont

- Déplacement de la population en amont.
- Perturbation de l'équilibre écologique.
- Coût de fabrication important.

#### 1.4.5.3 Energies géothermique

La géothermie consiste à capter la chaleur de la croûte terrestre pour produire du chauffage ou de l'électricité. Le sous-sol est naturellement chaud surtout à grande profondeur, plus on s'enfonce dans les entrailles de la terre, plus les températures augmentent, 3 à 4°C tous les 100 m. Cette eau chaude est utilisée pour le chauffage des maisons et autres immeubles. L'exploitation des eaux souterraines et le développement des pompes à chaleurs pourraient faire de la géothermie une des grandes énergies durables de demain.

Le principe de la pompe à chaleur est comme suit un capteur prélève de la chaleur du sol à l'extérieur (par exemple sous une pelouse, son origine se trouve d'ailleurs dans le rayonnement solaire), ensuite cette chaleur est transmise dans la maison via un plan chauffant. La géothermie s'est développée au 20ème siècle dans de nombreux pays pour la production d'électricité, avec des eaux de très hautes températures transformées en vapeur (exemple la centrale bouillante en GUADLOUPE Française). Une vingtaine de pays produisent de l'électricité à partir de la géothermie.

La capacité de production des installations géothermiques dans 18 pays à travers le monde, était d'environ 5800 MW en 1990, elle atteint aujourd'hui les 8700 MW. La géothermie joue un rôle essentiel pour les pays en développement 22% de l'électricité produite aux Philippines, 12% au Salvador et 15% en Islande. Le Japon est le premier producteur mondial des équipements géothermiques [5].

#### ❖ **Avantages et Inconvénients**

Parmi les avantages, qu'on peut citer pour ce type de centrale on a :

- Sources d'énergie gratuite et renouvelable.
- Bas coût.
- Installations non polluantes de l'atmosphère.
- Cogénération c'est-à-dire production d'électricité en même temps que la chaleur.

Les inconvénients que les experts ont constatés sont

- Transport difficilement.
- Utilisation localisée (sur place).
- Investissements pour pomper l'eau chaude parfois importants.

#### **1.4.5.4 Biomasse**

Le terme biomasse désigne 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 la chaleur et l'électricité.

Cette énergie est produite par le bois et les déchets agricoles (paille), déchets urbains, ordures ménagères et déchets industriels du secteur agroalimentaire. Ces déchets subissent des transformations thermochimiques (combustion, pyrolyse, gazéification) permettant principalement de créer de la chaleur et de l'électricité (Bio carburant).

**Carburant bioéthanol** L'amidon et le glucose extraits des cultures sucrières (betterave, canne à sucre) et céréalières (blé, maïs) produisent de l'éthanol par procédé de fermentation alcooliques.

**Carburant bio gazole** Il comprend les végétaux riches en huile (colza, tournesol et soja) l'huile extraite de leurs graines permet de produire du bio gazole qui peut remplacer le gazole actuel pour moteur diesel [5].

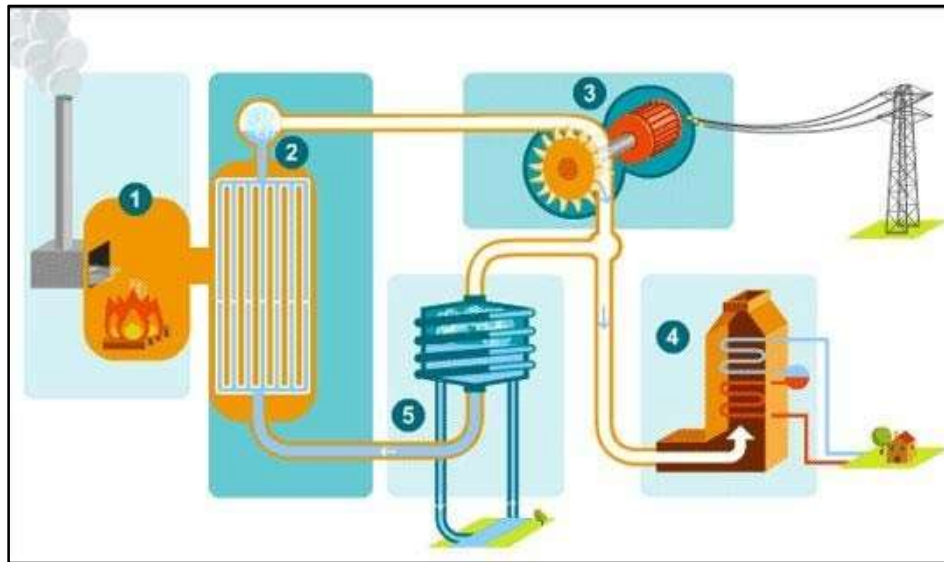


Figure 1.6 Photo d'une centrale Biomasse [6]

#### ❖ Avantages et Inconvénient

- C'est une source d'énergie renouvelable à condition de bien gérer les forêts.
- C'est une énergie dont le coût est compétitif et dont le prix varie peu.
- C'est une énergie moins polluante que les énergies fossiles.
- Il n'y a pas de rejets de soufre dans les fumées.
- Il n'y a pas d'impact sur l'effet de serre Le CO<sub>2</sub> rejeté dans l'atmosphère correspond à la quantité de CO<sub>2</sub> absorbée par les arbres pendant leur croissance.
- C'est une énergie dont la valorisation est créatrice d'emplois locaux.

### 1.4.5.5 Energie solaire

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. 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. Il est utilisé dans les chauffe-eau solaires qui sont très répandus en Europe, plus de familles ont en équipé leurs habitations. Il est aussi utilisé dans les planchers thermiques.
- ✚ La conversion directe du rayonnement lumineux en électricité par des capteurs (cellule photovoltaïque) c'est le solaire photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques composés de cellules à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons.

La technique photovoltaïque est entrée en forte croissance, en 2001 on comptait en Europe environ 250 MW installés et en 2003 ce chiffre est monté à 560MW. La production d'électricité par générateur photovoltaïque est liée à l'intensité, la durée de l'ensoleillement et à l'orientation du panneau par rapport au soleil [5].

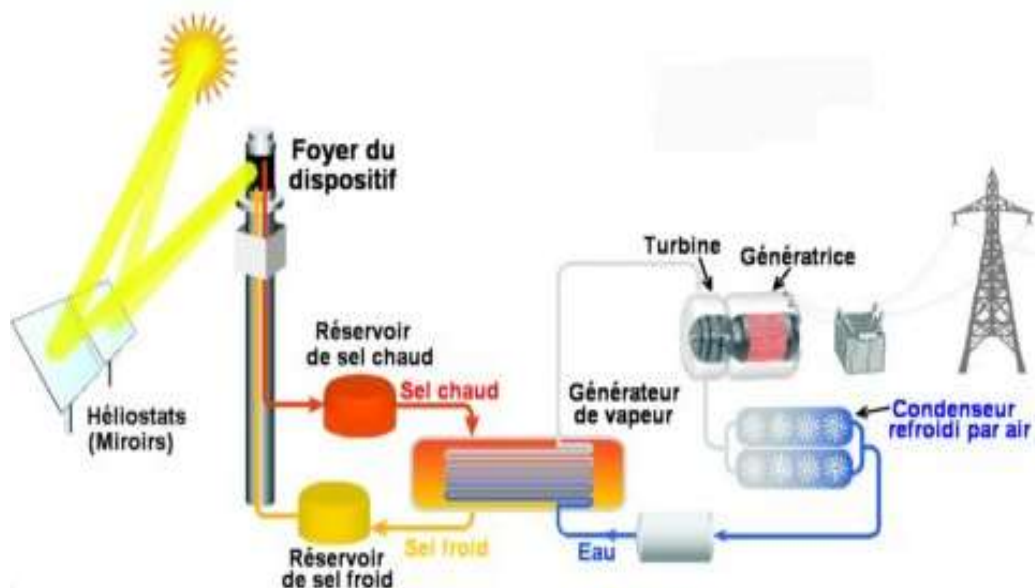


Figure 1.7 Photo d'une centrale solaire.

## ❖ Avantages et Inconvénients

Parmi les avantages, qu'on peut citer pour ce type de centrale on a :

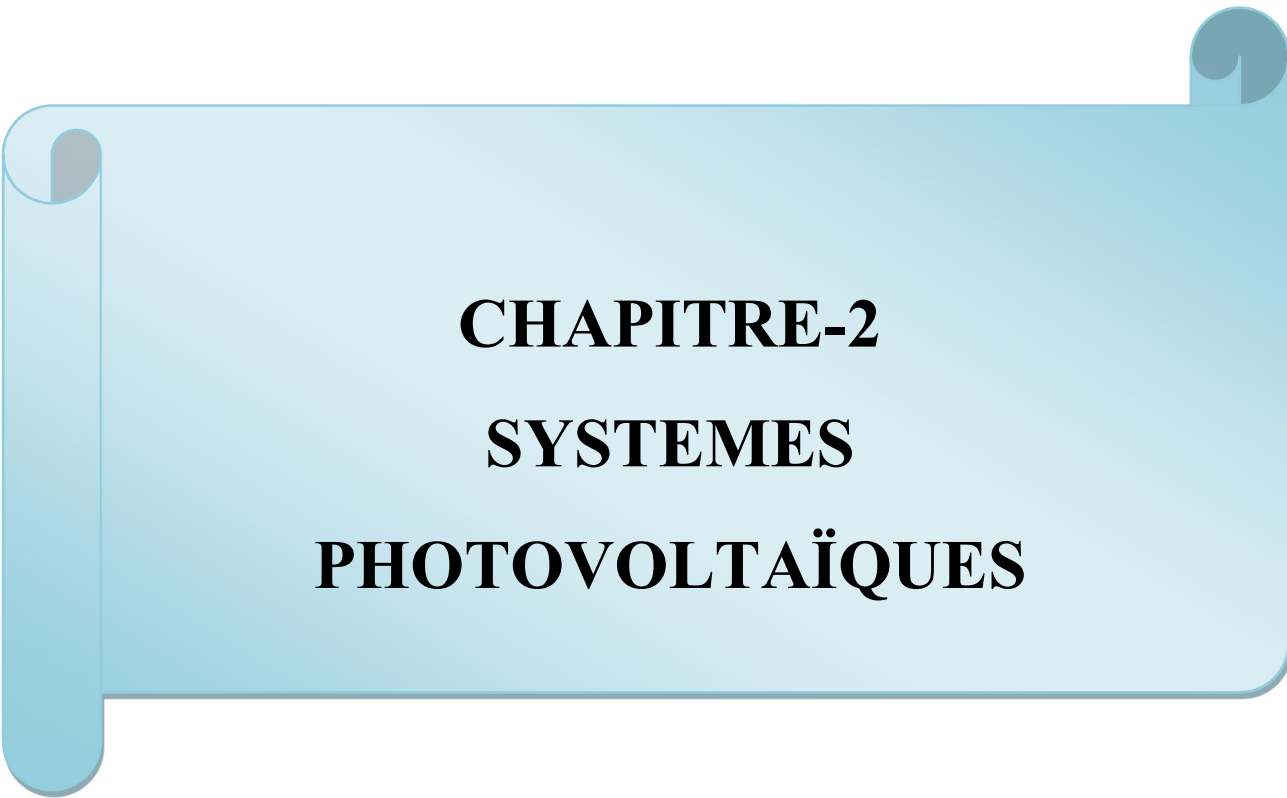
- ✚ Potentiel de développement important.
- ✚ Fiabilités et modularité.
- ✚ Pas de pollution ni de rejet de gaz à effet de serre en fonctionnement.
- ✚ Coûts d'installation pas très élevés pour la production d'eau chaude sanitaire et pour le chauffage.
- ✚ Source d'énergie gratuite et Inépuisable.

Les inconvénients que les experts ont constatés sont :

- ✚ La nuit, la source d'énergie n'existe plus, il faut donc prévoir des systèmes de stockage.
- ✚ Pour la production d'électricité par les installations photovoltaïques est très élevés.

## Conclusion

À la fin de ce chapitre, dans lequel nous avons expliqué ce qui est lié aux énergies renouvelables en termes de définition, de sources, d'avantages et d'utilisations, ainsi que les formes d'énergies renouvelables. L'énergie dans l'environnement est l'une des choses très importantes qui sont indispensables à toute personne. Dans le prochain, nous allons détailler les différentes caractéristiques de systèmes photovoltaïques.



**CHAPITRE-2**  
**SYSTEMES**  
**PHOTOVOLTAÏQUES**

## **CHAPITRE-2**

### **SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES**

#### **2.1 Introduction**

Dans Ce chapitre, présente étude théorique d'une cellule solaire photovoltaïque et l'itérât de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique. Plusieurs matériaux à caractères semi-conducteur sont utilisés dans cette conversion photovoltaïque tel que ; le Silicium (Si), Germanium (Ge) et la pérovskite.

#### **2.2 Cellules solaires photovoltaïques**

##### **2.2.1 Définition**

Cellule solaire et photopile sont des termes équivalents qui désignent généralement des capteurs de petite taille, utilisés soit tels quels soit en assemblage dans un panneau solaire ou module photovoltaïque, ce dernier terme est un composant composée de matériau semi-conducteur qui convertie l'énergie qui produit de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière.

Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possède une bande interdite, qui joue le rôle de la barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le des soussous anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multi couches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

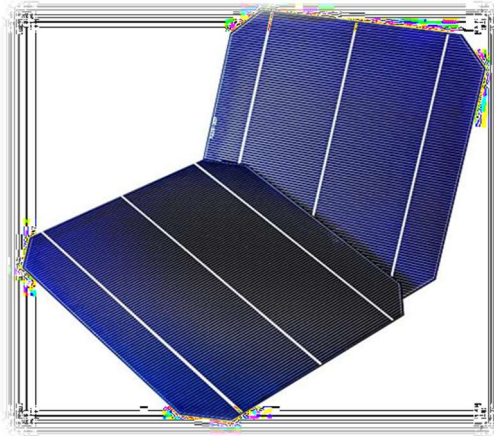


Figure 2. 1 Cellules solaires photovoltaïques [7]

### 2.2.2 Principe général du fonctionnement d'une cellule solaire

La conversion photovoltaïque est basée sur trois principes : L'absorption du maximum de l'énergie lumineuse (photons), la conversion, de cette énergie absorbée, en charges électriques libres et la collecte sans perte de ces charges dans un circuit électrique extérieur. Par conséquent, une cellule solaire doit être composée d'un matériau absorbant ayant une bande interdite (gap) convenable dans la bande du spectre solaire (**1-1.5 eV**) afin de transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique, donc de créer des charges électriques. Ces dernières doivent être séparées par un champ électrique permanent et indestructible, puis collectée cette énergie à l'aide d'une structure de collecte de faible résistance.

En effet, pour comprendre le fonctionnement de la cellule solaire, nous étudierons la physique du semi-conducteur et la structure de base d'une cellule solaire qui est la jonction P-N [8].

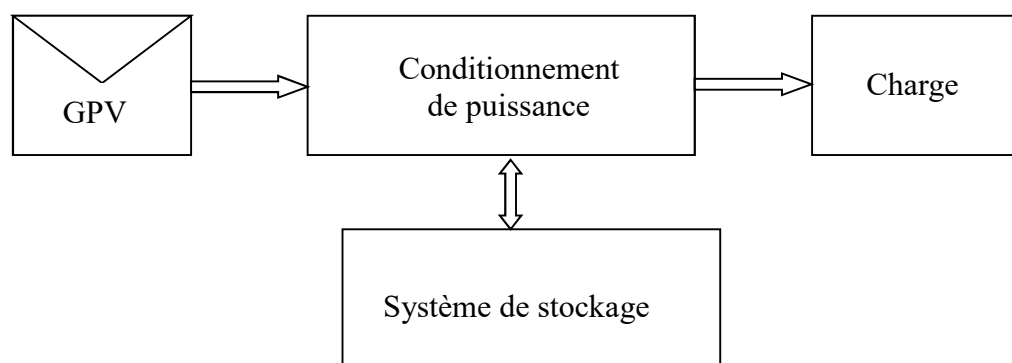


Figure 2.2: Schéma bloc d'un système photovoltaïque

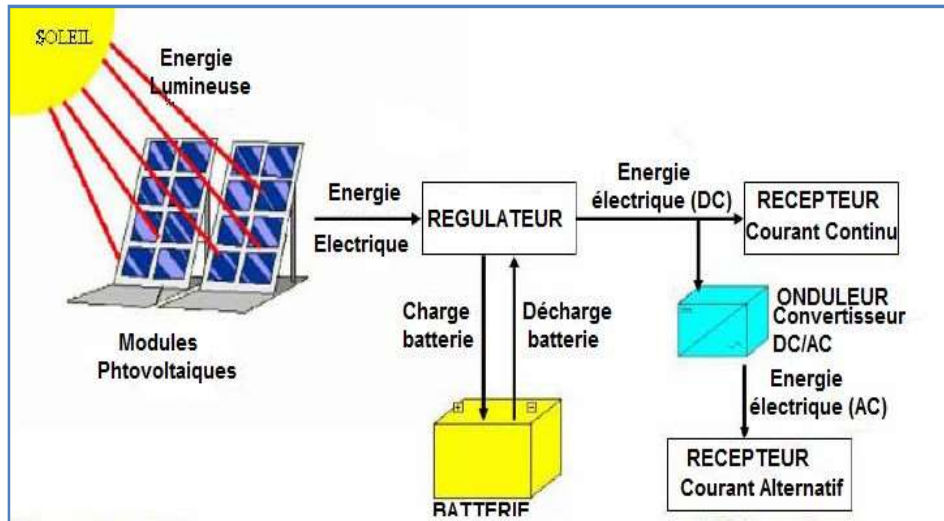


Figure 2. 3 : Système photovoltaïque plus détaillé

### 2.2.3 Module photovoltaïque

Le photovoltaïque (PV) est définie comme la science ou la technologie qui convertie la lumière en électricité, la forme la plus courante étant l'utilisation de la lumière du soleil. Un module PV est un système d'alimentation électrique, constitué principalement d'un générateur photovoltaïque composé d'un ou plusieurs panneaux solaires, d'une ensemble de batteries pour le stockage d'énergie électrique, d'un ou de plusieurs convertisseurs continu-continu pour fournir les tensions d'alimentation adéquates pour les batteries, les charges continues et un convertisseur continu-alternatif pour l'alimentation des autres appareils à courant alternatif [9].

Une cellule photovoltaïque peut-être illustrée par son schéma équivalent comme montre la figure ci-dessous.

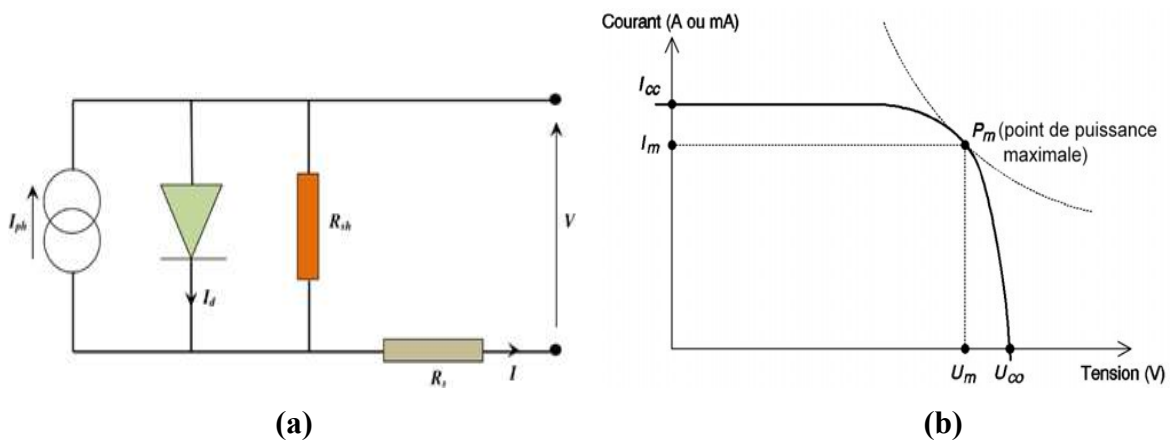


Figure 2.4 : Circuit équivalent (a) et caractéristiques f(V) (b) d'une cellule solaire

## 2.3 Généralités sur les semiconducteurs

Dans un atome isolé, les électrons prennent des niveaux d'énergie discrets (théorie de Niels Bohr en 1914). Lorsque, les atomes sont rassemblés pour former un solide, les niveaux discrets de chaque atome se différencient pour former des bandes continues d'énergie. Cette structure électronique de bandes nous permet de classer les matériaux en trois grandes familles les métaux, les isolants et les semi-conducteurs (Figure 2.5)

Pour un métal, tous les niveaux supérieurs au niveau de Fermi étant autorisés et la quasi totalité de ces niveaux étant inoccupés à température ambiante, toutes les longueurs d'onde peuvent être alors absorbées, mais cette énergie absorbée est convertie en phonons (thermalisation des électrons).

Dans un isolant, le rayonnement solaire ne peut être absorbé par ce dernier car le gap (8-10eV) est plus grand que les énergies de ces spectres. Par contre, un semi-conducteur a un gap plus faible que celui d'un isolant (0.6-2 eV). A titre d'exemple, le silicium cristallin (Si) a un gap de 1.12eV, le germanium (Ge) de 0.7 eV, l'arsenic de gallium (GaAs) de 1.42 eV. Par conséquent, le spectre solaire absorbé par les semi-conducteurs fournit de l'énergie aux électrons et les libère dans le cristal pour participer à la conduction [8].

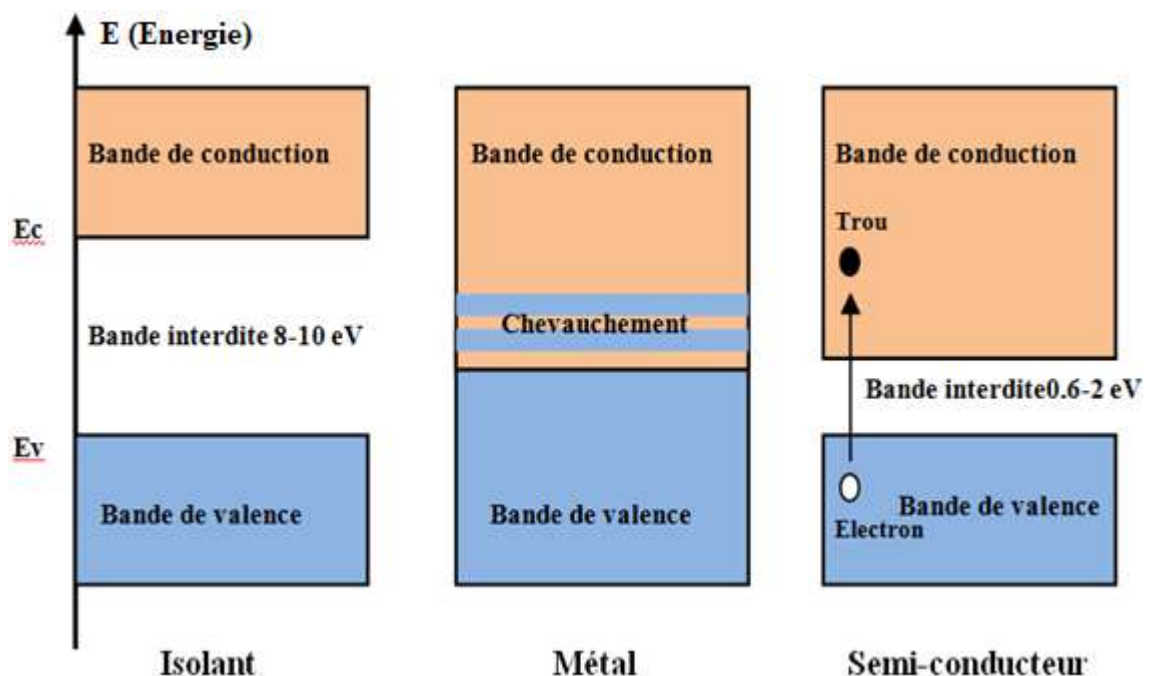


Figure 2.5 : Les trois grandes familles des matériaux [8].

### 2.3.1 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit :

$$I(V) = I_{PH} - I_{obsc} \quad (2.1)$$

Avec :

$I_{PH}$ : Densité de courante photo générée

$I_{opsc}$ : Densité de courant d'obscurité.

Pour une cellule photovoltaïque idéale, l'équation (2.1) peut être écrite de la forme suivante:

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (2.2)$$

Avec :

$I_s$ : Courant de la maturation de la diode,

$q$  : charge élémentaire,

$k$  : constante de Boltzmann,

$T$ : température.

Ainsi, dans une cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent le courant d'éclairement et un courant de diode appelé courant d'obscurité qui résulte de la polarisation du composant. La caractéristique d'une cellule on obscurité est identique à celle d'une diode [10]. (Voir figure (2.6))

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

$I_C$ : Courant de court-circuit (obtenu pour  $V=0$ );

$V_{co}$  : Tension en circuit ou vert (obtenu pour  $I=0$ );

$I_m$  : Courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ;

$V_m$  : Tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

$\eta$  : Rendement de conversion

$FF$  : Facteur de forme.

$\eta = (\text{Puissance électrique maximale fournie}) / (\text{Puissance solaire incidente})$

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_i S} = \frac{FF V_{co} I_{cc}}{P_i S} \quad (2.3)$$

Avec

$P_i$  : Puissance d'éclairement reçue par unité de surface ;

$S$  : surface de la cellule photovoltaïque.

$FF$  : (Puissance maximale délivrée sur la charge)/( $V_{co} * I_{cc}$ ):

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (2.4)$$

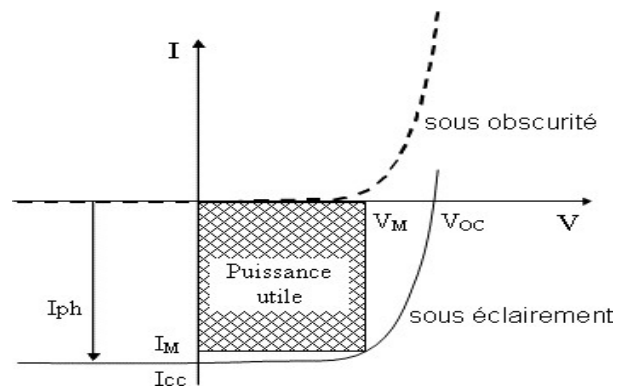


Figure 2.6: Caractéristiques  $I=f(V)$  sous obscurité / éclairement d'une cellule PV[10].

### 2.3.2 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaire sert à convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par la production et le transport, dans le semi-conducteur, de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière [11]

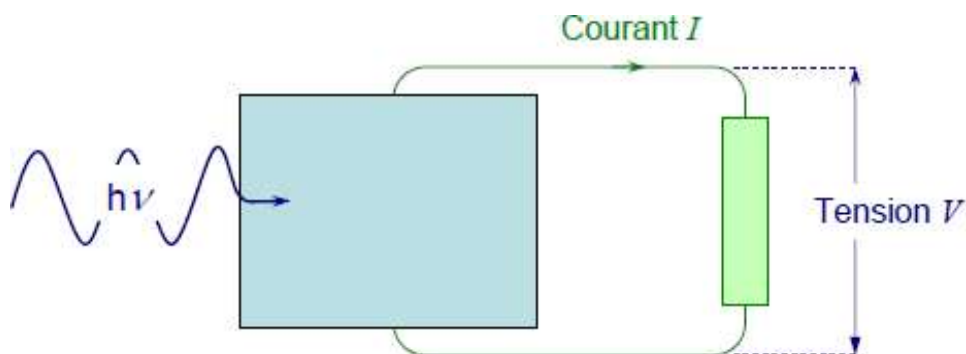


Figure 2.7 : Principe de la conversion photovoltaïque dans les cellules photovoltaïques

### 2.3.3 Rendement d'une cellule

Le tableau suivant (2.1) présente les différents types de cellules avec leur rendement :

**Tableau 2.1 : Les différents types de cellules avec leur rendement.**

Technologie de cellules	Rendement en laboratoire	Rendement production
Silicium amorphe (a-Si)	13 %	5-9 %
Silicium poly cristallin (p-Si)	19,8 %	11 à 15 %
Silicium monocristallin(m-Si)	24,7 %	13 à 17 %

Le rendement d'une cellule solaire dépend de plusieurs facteurs :

- Réflexion à la surface.
- Température de jonction des cellules.
- Type de matériau utilisé et technique de fabrication.
- La résistance écrite parallèle responsables des pertes par effet Joule.
- Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés

### 2.3.4 Panneau solaire

Le panneau solaire est constitué d'un certain nombre de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle (en série augmente la tension et en parallèle augmente le courant) afin de produire la puissance requise. Ces modules sont monté sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [9] .

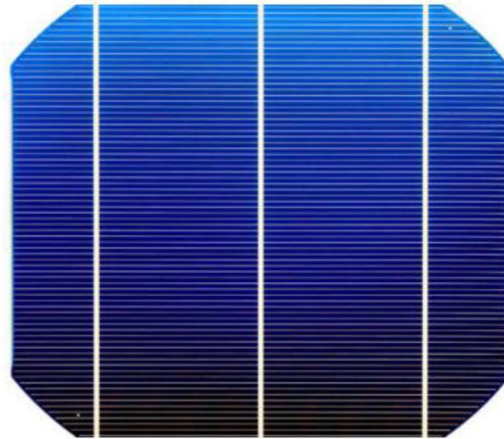
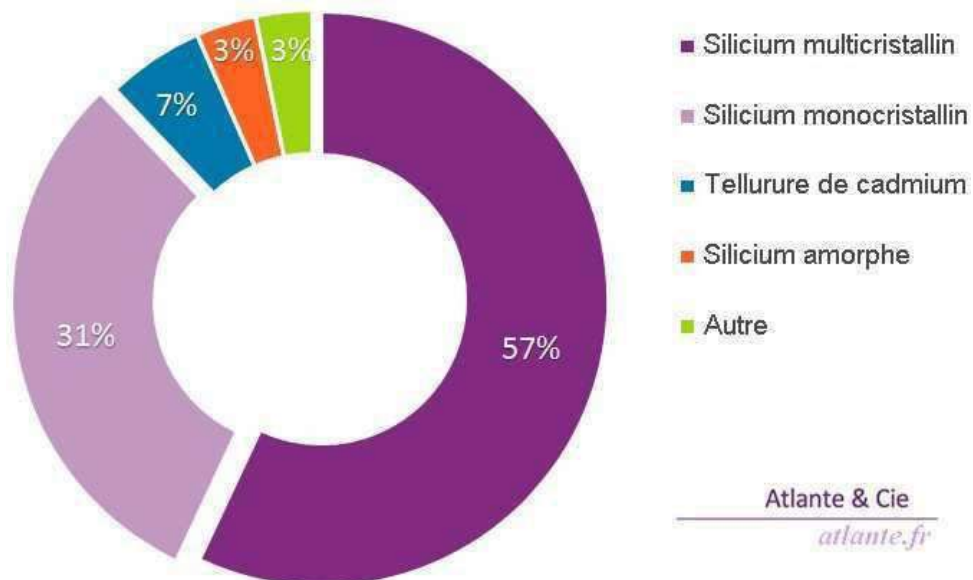


Figure 2.8 : Panneau solaire

## 2.4 Filières technologiques des cellules photovoltaïques

Il existe différentes filières technologies (figure2-11). On distingue la filière base de silicium cristallin comprenant le mono et le multicristallin, elle couvre de l'ordre de 88 % de la production mondiale. La filière des couches minces comprenant les cellules au silicium amorphe, multicristallin ou monocristallin ; cellules multi jonction. Il y a aussi la filière des cellules organique encens dernières années, à partir de 2009, il y a eu naissance d'une nouvelle filière appelé filière pérovskite qui reste encore dans les laboratoires de recherche [11].



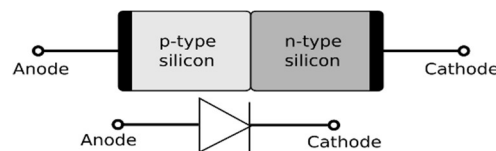
Figures 2.9 : Parts de marché des différentes technologies solaire.

### 2.4.1 Jonction p-n

Une jonction p-n est la juxtaposition de deux zones dopées pour améliorer la conductivité du matériau : Une zone de type p qui possède un excès de trou soit la présence d'atome de la colonne III du tableau périodique (typiquement le bore), où la conduction s'effectue par les trous. Une zone de type n qui possède un excès d'électron soit la présence d'atome de la colonne V du tableau périodique (typiquement le phosphore), où la conduction s'effectue par les électrons.

A la jonction des zones p et n, crée une zone de charges d'espace de quelques micro mètres avec une zone n chargée positivement et une zone p chargée négativement. Il se crée donc un champ électrique qui repousse les électrons dans la zone n et les trous dans la zone p.

En ajoutant des contacts électriques à la jonction p-n, on aura une diode stérilisée. Si on polarise la diode en sens inverse (borne (+) du générateur raccordé à la zone n), le courant qui parcourt la jonction est très faible car les taux porteurs minoritaires. Si on polarise la diode en direct (borne (+) du générateur raccordée à la zone p), la différence de potentiel aux bornes de la jonction doit être suffisamment élevé pour annuler la différence de potentiel présente dans la jonction à l'équilibre [12].



**Figure 2.10 : Jonction p-n d'une diode**

## 2.4.2 Pérovskite

La pérovskite est un composé minéral, constitué de calcium et de titane. Sa formule chimique est  $\text{CaTiO}_3$ , elle a été découverte par le minéralogiste russe Lev Alexeïevitch Petrovski (1792–1856). La structure la plus simple de la pérovskite et la structure cubique simple de formule  $\text{ABX}_3$  avec l'ion A dans les coins, l'ion B au centre et l'ion négatifs occupe la position centrée de la face (Roth, 1957).

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  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ( $\text{MAPbI}_3$ ) a un grand coefficient d'absorption  $1.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$  à 550 nm, elle se caractérise par sa longueur de diffusion des électrons et des

trous (plus de 1  $\mu\text{m}$  et potentiellement 100  $\mu\text{m}$ ) et finalement d'une grande mobilité des porteurs de charges (Nazeer uddin & Snaith, 2015). Cette structure hybride une fois dopée au chlore devient  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ , c'est une structure équivalente à  $\text{MAPbI}_3$  et ayant presque la même mobilité. Cependant, son dopage au chlore lui permet d'avoir une cristallinité élevée grâce aux joints de grains plus petits.

De plus, la taille des grains représente un facteur qui limite la conduction des porteurs de charge, même dans les couches minces de meilleure qualité (Herz, 2017). Par contre, le dopage du chlore rend la mobilité des charges de  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$  légèrement inférieur par rapport à celle de sa voisine  $\text{MAPbI}_3$  (Motta, El-Mellouhi, & Sanvito, 2015).

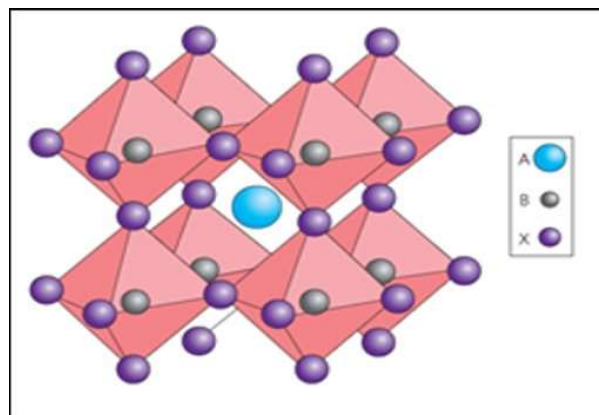
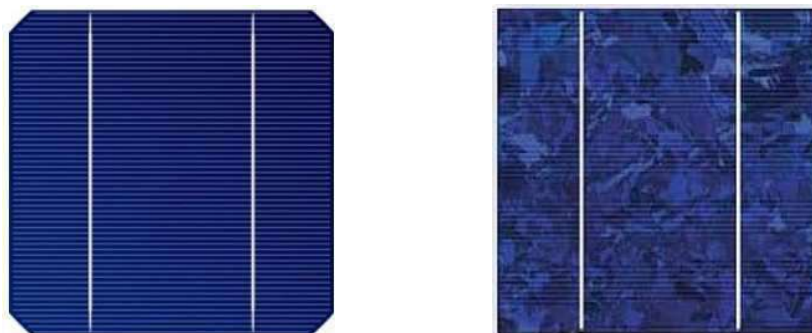


Figure 2.11 : Structure hybride de la pérovskite Tirée de (Gheno et al., 2016)

### 2.4.3 Filières silicium

C'est la filière dominante. L'élément du silicium est le plus abondant dans la croûte terrestre après l'oxygène, il a l'avantage de pouvoir être produit à partir d'une ressource naturelle quasi inépuisable, la silice, un composant de granit, des sables et des grès [11].



Figures 2.12 : Cellules du silicium mono cristalline multi cristallin

Il a été étudié pendant plus de 30 ans afin d'en améliorer le rendement, la première cellule solaire au silicium a été fabriquée en 1954 aux laboratoires Bell aux Etats-Unis avec un rendement de 6% [5]. Cette filière à base de silicium cristallin comprend le monocristallin et le multi cristallin.

#### 2.4.3.1 Silicium monocristallin

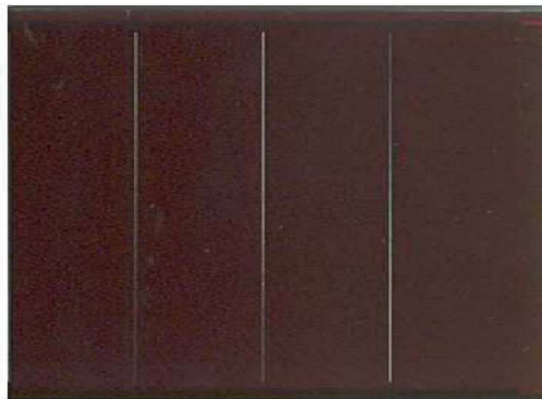
Il est obtenu par croissance outrege d'un lingot cylindrique à partir d'un monocristal « souche » selon le procédé Czochralski (CZ). Les cellules à base de Si monocristallin ont un bon rendement mais la méthode de production est laborieuse et coûteuse [11].

#### 2.4.3.2 Silicium multicristallin

Il est obtenu par coulage en lingotière dans laquelle s'opère un refroidissement lent, de l'ordre de quelques dizaines d'heures. Sa mise au point est moins énergivore. C'est un matériau moins pur. Par comparaison entre les deux, on trouve que la cellule de silicium monocristallin a un rendement de conversion des cellules légèrement supérieur à celui du multi cristallin, mais le coût est élevé pour le premier par rapport au deuxième et le plus utilisé est le Si multi cristallin [10].

#### 2.4.3.3 Silicium amorphe

Matériau composé de silicium hydrogéné (état non-cristallin) déposé sur un substrat de verre. D'un rendement moins bon que le cristallin. Les Cellules solaires en silicium amorphe sont apparues en 1976. Le silicium amorphe est souvent appliqué à des appareils de petite puissance (calculatrices, lampes ou horodateurs), mais des firmes comme Solarex, Phototronic, Canon ou Fortum proposent des modules détaillée qui valent à celle des modules cristallins [11].



Figures 2.13 : Cellules du silicium amorphe en couche mince [11].

## 2.4.4 Filières couches minces

La définition la plus répandue d'une couche mince est un revêtement, ou plus précisément, est une mise en forme d'un matériau dont la dimension ou l'épaisseur a été fortement réduite, et qui peut varier de quelque angström à une dizaine de micromètres. Cette fine couche sera déposée sur un autre matériau, qu'on appelle généralement «substrat» [13].

Le but de la couche mince est de donner des propriétés nouvelles à la surface de l'élément avec l'avantage de garder des propriétés massives du substrat, cette perturbation des propriétés physiques est due à la faible distance entre les deux surfaces limites (quasi bidimensionnel) [13].

Grâce aux couches minces la conductivité électrique peut être maîtrisée de façon précise ainsi que la réflexion optique ce qui rend l'application des couches minces dans le photovoltaïque vraiment intéressante, car ces deux propriétés sont fondamentales pour obtenir un meilleur rendement [13].

Il est évident que l'effet de bidimensionnelle est inversement proportionnel à l'épaisseur de la couche c'est-à-dire que cet effet sera important chaque fois que l'épaisseur sera de plus en plus faible. En revanche, cet effet de bidimensionnelle perd tout son importance si l'épaisseur de la couche dépassera un seuil connu et le matériau retrouvera ces propriétés normales celles du matériau massif [13].

### 2.4.4.1 Dopage

Le dopage a pour but d'augmenter la quantité d'électrons ou bien de trous dans un matériau en introduisant dans ce dernier des atomes d'une autre nature qui vont se substituer aux atomes originaux, ainsi introduire les porteurs libres. Le rôle du dopage consiste à modifier les caractéristiques du matériau comme par exemple contrôler la conductivité électrique du matériau à travers la création d'une jonction.

Généralement, le dopage se fait de trois différentes manières ; le dopage par diffusion, le dopage par implantation ionique et le dopage par transmutation nucléaire. Cependant, poudres composants semiconducteurs réalisés par la méthode de dépôt chimique en phase vapeur le dopage par diffusion est la technique la plus utilisée et la plus adéquate.

Il existe deux sortes de dopage, si on augmente la densité d'électrons dans ce cas il s'agit d'un dopage de type N, qui se caractérise avec une conduction électrique par les électrons. Dans l'autre cas, on aura un dopage de type P dont la conduction électrique est favorisée par les trous[13].

#### 2.4.4.2 Dopage de type N

Ce type de dopage présente un excès d'électrons donc il sera chargé négativement. Les composants de structure V-III sont naturellement de type N car ils ont plus d'électrons, ce qui facilite ce type de dopage. En outre, on utilise plusieurs dopants de type N pour ces matériaux comme l'hydrogène, l'oxygène, le germanium ou le silicium. Mais le plus souvent est le silicium avec une concentration de l'ordre de  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , vu sa grande efficacité [13].

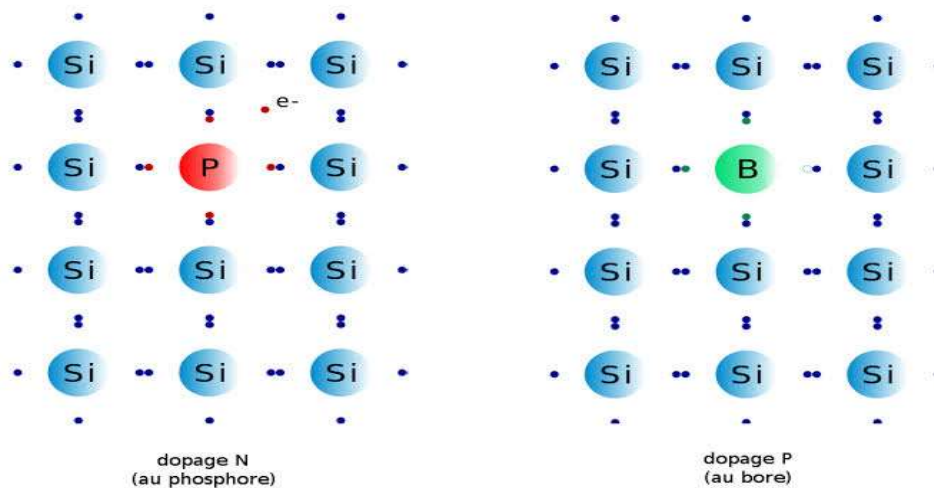


Figure 2.14 : Représentation des types de dopage (n et p)

#### 2.4.4.3 Dopage de type P

Ce type de dopage présente un excès de trous donc il sera positivement chargé. Contrairement au dopage de type N, ce dopage est beaucoup plus compliqué à réaliser vu que les nitrures sont intrinsèquement de type N, donc il faut d'abord créer un équilibre entre les électrons et les trous dans le matériau pour pouvoir créer par la suite un excès de trous.

En outre, le magnésium est le dopant de type P le plus utilisé pour le dopage des nitrures avec une concentration allant de  $10^{18}$  à  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . La concentration très élevée du dopant va créer une dispersion des porteurs et ainsi réduire leur mobilité [13].

## 2.5 Paramètres d'une cellule solaire

### 2.5.1 Tension à circuit ouvert $V_{oc}$ :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

$$V_{co}(I=0) = V_t \log(1 + I_{sc})_o$$

### 2.5.2 Courant de court-circuit $I_{sc}$

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant  $V=0$  dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteur set de la température [15].

On peut écrire :  $I_{sc} = I_p$

### 2.5.3 Puissance maximal $P_{max}$

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale  $P_{max}$ , correspondrait donc à la tension de circuit ouvert  $V_{max}$  multipliée par le courant de court-circuit [15].

$$P_{max} = I_m * V_m$$

Le produit ( $V_{max} * I_{max}$ ) donne la puissance maximale qui représente 80% environ du produit ( $V_{co} I_{sc}$ ).

### 2.5.4 Factor de qualité

C'est le facteur d'idéalité de la cellule qui dépend des mécanismes de recombinaison dans la zone de charge d'espace (compris entre 1 et 2) [15].

### 2.5.5 Facteur de forme $ff$

C'est le rapport entre la puissance maximale, que peut fournir une cellule, et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (la puissance optimale) :

$$ff = \frac{V_m * I_m}{V_{co} * I_{sc}}$$

### 2.5.6 Rendement énergétique maximum $\eta$ :

Le rendement de la cellule qui correspond au rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule et la puissance solaire incidente

$$\eta = \frac{V_m \times I_m}{P_{incidente}}$$

La droite passant par l'origine et le point de puissance maximale a une pente qui correspond à la charge optimale de la photopile comme le montre la figure suivante [15].

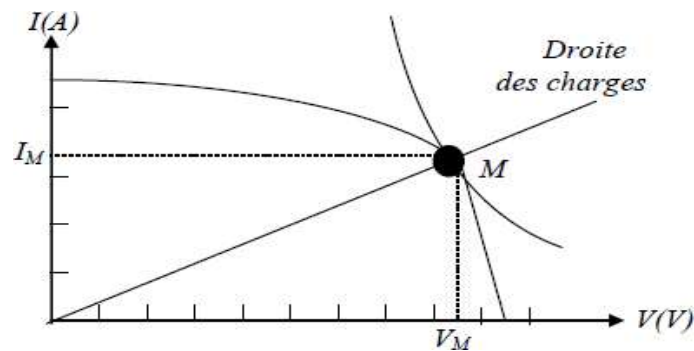


Figure 2.15 : Caractéristiques électrique d'une cellule élémentaire.

### 2.6 Circuits électriques équivalentes d'une cellule photovoltaïque

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle standard pour une diode. Il est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellule si den tiqués branchées en série ou en parallèle. Ce modèle comprend une diode.

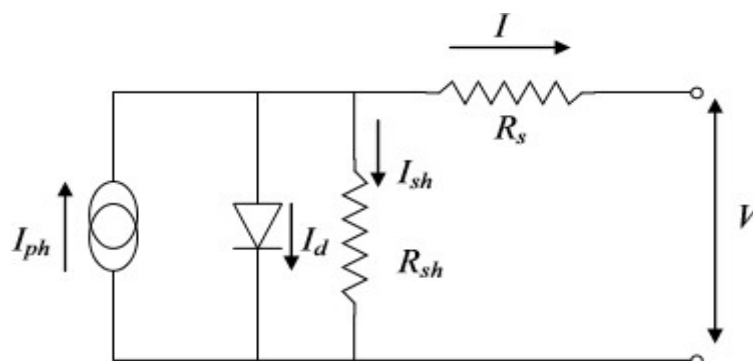


Figure 2.16 : Schéma qui valent d'une cellule PV Modèle à une diode

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation :

$$I = -I_{ph} \frac{V - R_s I}{R_{sh}}, I_s \left[ \exp \left( \frac{q(V - R_s * I)}{AKT} \right) - 1 \right]$$

**I<sub>s</sub>**: Courant de saturation de la diode [A], dépendant de la température [A]

**A**: Facteur de qualité de la diode, normale ment compris entre 1 et 2.

**I**: Courant fournit par la cellule.

**V**: Tension à la borne de la cellule [V].

Il faut noter que ces deux résistances sont liées à la technologie d'élaboration des électrodes. Il faut minimiser  $R_s$  de telle sorte que  $R_{sh}$  soit très important.

## 2.7 Utilisation des systèmes solaires

- L'éclairage (autoroutes, arrêts d'autobus, ...).
- Les communications (Stations de relais de téléphone, bornes d'appel d'urgences sur autoroutes, téléphones mobiles, ...).
- La fourniture d'électricité pour des sites éloignés du réseau normal (Forêts, montagnes...).
- Capteurs isolés (Infos météorologique, enregistrements sismiques, recherche scientifique...).
- Pour de petites stations de pompage ou d'irrigation.
- Chargement des batteries de voitures (les batteries normales, ou de voitures électriques...) [14].

## 2.8 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

En tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients.

### 2.8.1 Avantages du photovoltaïque

- Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité, peu sujettes à l'usure, elles demandent peu d'entretien.
- Le montage des installations photovoltaïques est simple les installations sont adaptées aux besoins de chaque projet.

- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement inépuisable qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets [14].

### 2.8.2 Inconvénients du PV:

- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 23.4%
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût est élevé.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1% [14].

## 2.9 Conclusion

L'énergie photovoltaïque est le meilleur choix pour fournir de l'électricité, et donc il est très efficace pour atteindre les dimensions et les stratégies de développement durable. Actuellement le silicium, monocristallin ou amorphe, reste le matériau le plus utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïques.

Dans ce deuxième chapitre nous avons présenté les filières technologiques existantes, ainsi que le panneau solaire, puis nous avons fait une étude détaillée (de la cellule solaire photovoltaïque, en passant au principe de fonctionnement pour la compréhension de cette technologie comme sa structure, ensuite nous avons parlé des modules photovoltaïques, et des caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque, l'effet photovoltaïque et le rendement d'une cellule. Enfin, nous avons parlé des équations physiques qui régissent le phénomène photovoltaïque et les circuits électriques équivalents d'une cellule PV. Dans le prochain chapitre nous allons présenter les travaux de simulation et discuter les résultats obtenus.



**CHAPITRE-3**  
**SIMULATION ET RESULTATS**

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter une description du logiciel de simulation que nous avons employée dans notre travail à **solar cells utility** de Rsoft, nous donnerons aussi la structure et les matériaux utilisés pour un panneau solaire, en notant que les axes essentiels pour l'étude d'une cellule photovoltaïque en couche mince à base de matériaux ayant des dimensions de l'ordre du nanomètre.

### 3.2 Logiciel utilisé « Rsoft CAD »

Le RSoft CAD est un programme de base de RSoft Photonique, il permet aux chercheurs et ingénieurs de créer des systèmes pour la conception des différents dispositifs tels que des guide d'ondes, des cavités résonantes, des circuits optiques. Il agit en tant que programme de gestion pour les modules passifs de simulation du dispositif de RSoft BeamPROP, FullWAVE, BandSOLVE, GratingMOD et DiffractMOD. Les résultats optimisés peuvent être trouvés rapidement le processus de conception et de modélisation est entièrement paramétrable permettant des simulations de lots. Un avantage important d'une interface de CAD partagée est qu'une fois que les concepteurs et de crée et d'analyser la structure de diffraction dans DiffractMOD, la même dispositif de conception peut être directement simulé en double alternance et BandSOLVE pour d'autres aspect de la même structure comme réponse dans le domaine temporel avec finie temps de différence de méthode de domaine ou l'analyse de structure de bande avec la méthode d'extension d'onde plane. DiffractMOD peut aussi être facilement utilisé avec BeamPROP. BandSOLVE, double alternance et GratingMOD pour la simulation hybride d'un module à composant multiples. [15]

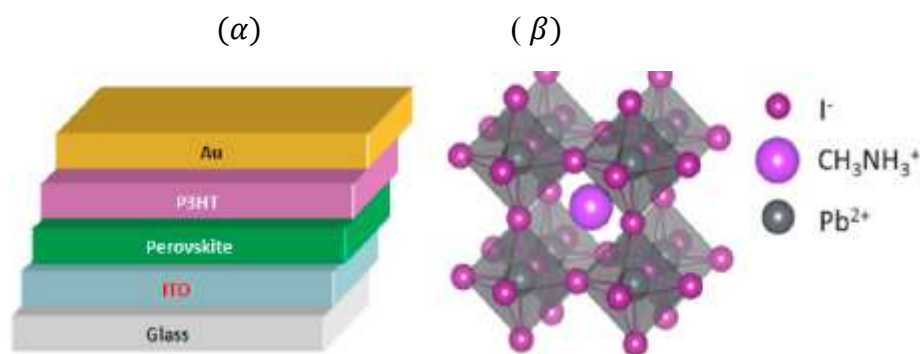
### 3.3 Structure de cellule et mécanisme de transport

La figure ci-dessous (Figure. 3.1) présente la cellule solaire à base de pérovskite ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ) étudiée en considérant la structure n-i-p. De haut en bas, il se compose d'un contact métallique (Au), d'un matériau HTL de type p (P3HT), d'un matériau pérovskite intrinsèque qui fonctionne comme un absorbeur et d'un matériau ETL de type n (ITO). La pérovskite (région i) est un site de création d'excitons (état lié à un électron et à un trou)

lorsque la cellule solaire est illuminée. Les porteurs photogénérés (électrons et trous) sont collectés dans les régions ETL et HTL.

Les matériaux utilisés dans cette structure

- Couche 1 Le verre, pour le passage du soleil et protection
- Couche 2 ETM (matériau de transport d'électrons)
- Couche 3 HTL (matériau de transport de trous)
- Couche 4 Pérovskite
- Couche 5 Argent (Ag) ou Or (Au)



**Figure 3. 2 Structure convergente de la cellule solaire à base de pérovskite (a) structure en cristal (  $\beta$  ).**

Le mécanisme de collecte des électrons (trous) est lié à leur longueur de diffusion et à leurs propriétés électriques ETL (HTL). La séparation des excitons se produit aux interfaces ETL/pérovskite et pérovskite/HTL. Les électrons migrent vers la région ETL (n) et les trous se déplacent vers la région HTL (p). Les mécanismes de dissociation et de migration sont provoqués par le champ électrique entre l'ETL et le HTL. Nous effectuons la simulation en considérant le spectre solaire. Où, les paramètres d'entrée des données des pérovskites sont tirés de la littérature [10].

Le modèle choisi pour notre étude est une cellule solaire à mono jonction à base d'alliage'' Pérovskite''. Telle qu'elle est schématisée sur la figure (3.1) à l'aide du simulateur numérique Rsoft

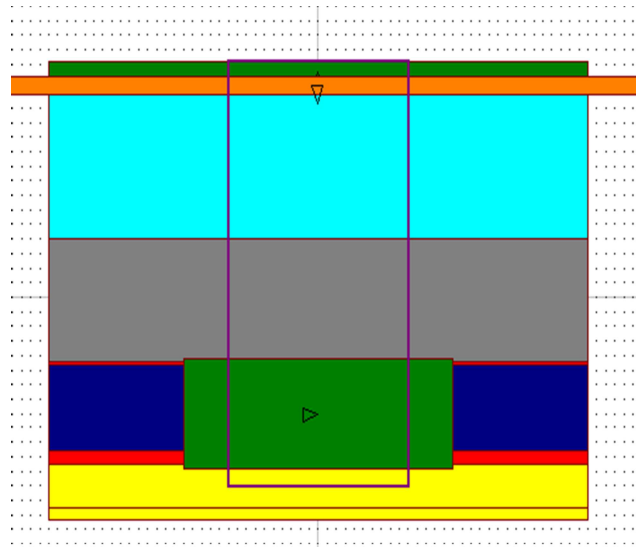


Figure 3. 2 la forme initiale de la Structure de la cellule PIN.

La figure 3.3 représente le changement de densité de courant par rapport la tension pour le pérovskite.

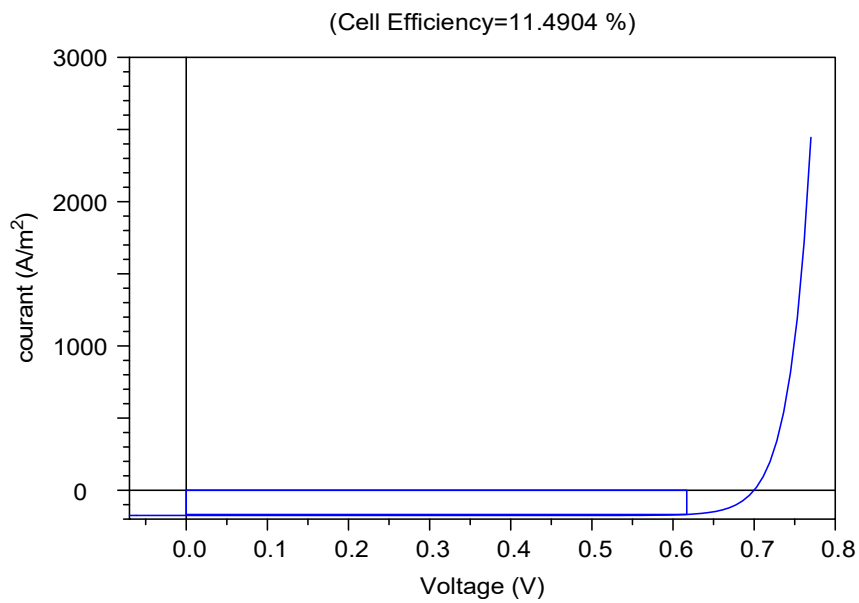
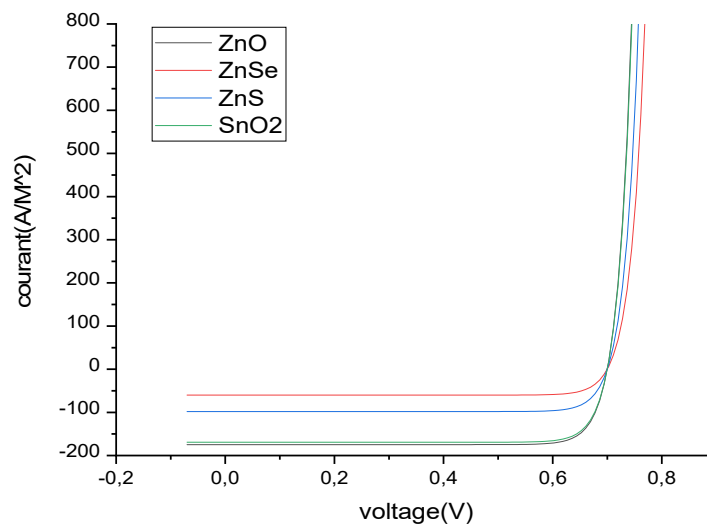


Figure 3.3 Caractéristiques courant-tension.

#### 4. Résultats et discussions

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

Dans cette section, nous proposons un certain nombre d'ETM à étudier pour obtenir des cellules solaires à base de pérovskite (CSP) hautes performances. Le diagramme schématique de la structure du dispositif avec différents candidats ETM et l'alignement de leurs bandes sont représentés sur la Fig. 3. Nous supposons une épaisseur de 0,05 m pour les candidats ETM, où les structures de cellules solaires à base de pérovskite utilisent comme ETM le sulfure de zinc (ZnS), Le séléniure de zinc (ZnSe), le dioxyde d'étain (SnO<sub>2</sub>) et l'oxyde de zinc (ZnO) sont examinés par rapport à la structure conventionnelle qui utilise l'ITO comme ETM.



**Figure 3.4** Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes épaisseurs de la couche ZnO, ZnS, SnO<sub>2</sub> et ZnSe.

La figure 3.4 montre les caractéristiques J-V où les paramètres de sortie extraits sont récapitulés dans le tableau 3.1. A partir de cette figure, il est clairement observé que l'ZnSe affiche une faible densité de courant  $J_{sc}$  de 59,728 A/m<sup>2</sup> par rapport aux autres matériaux ainsi qu'un La valeur de l'efficacité quantique (QE) est indiquée sur la figure 3.5.

	Cell Efficiency (%)	Filling Factor (%)	Short Circuit Current(A/m <sup>2</sup> )	Optimale Bias current (A/m <sup>2</sup> )
ZnS	6.44	84.58	-98.0381	-94.0952
ZnSe	3.93	84.58	-59.8914	-57.4827
SnO2	11.12	84.58	-169.198	-162.393
ZnO	11.49	84.58	-174.688	-167.662

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

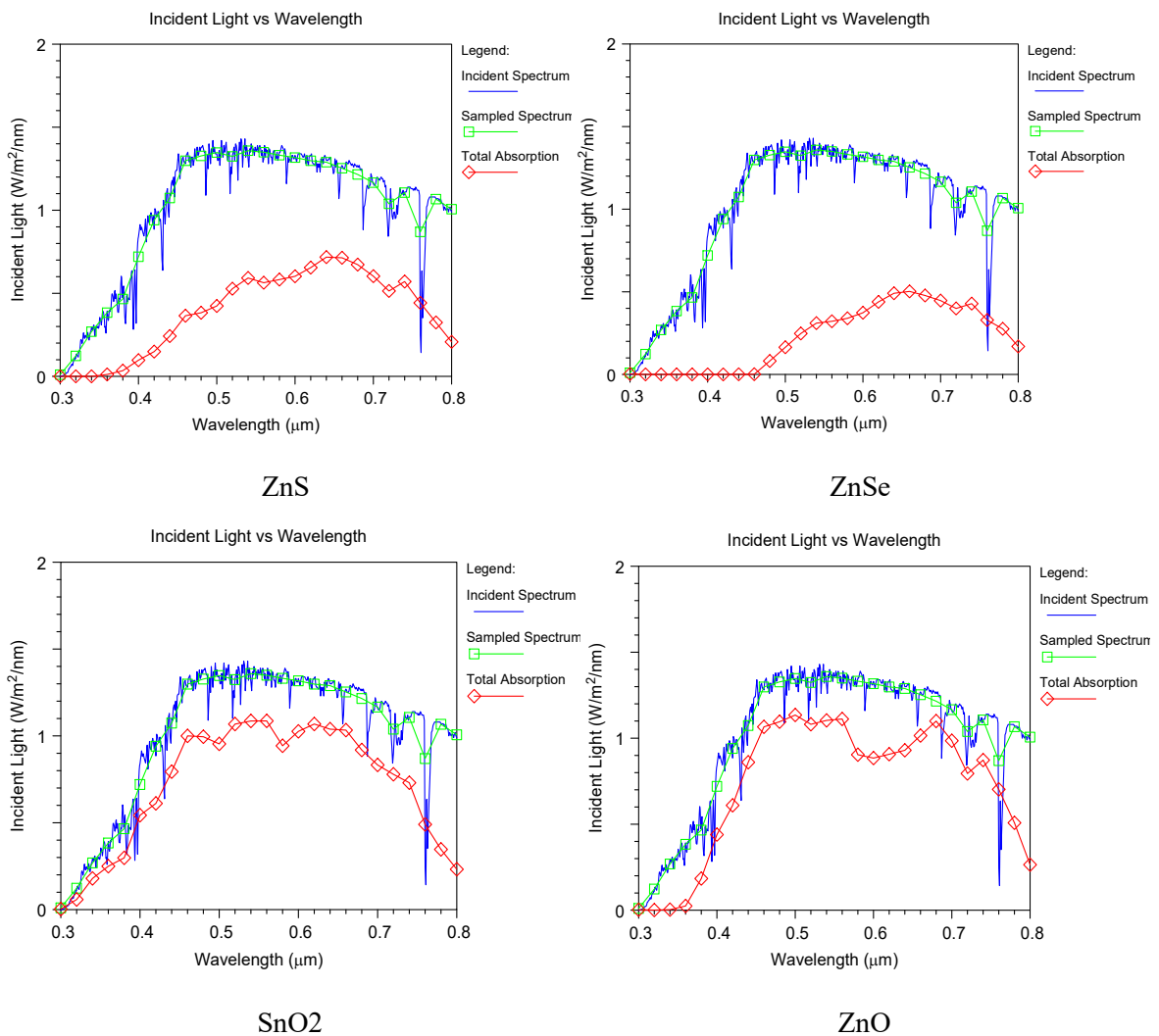


Figure 3.5 spectre solaire pour les matériaux de transport d'électrons (ETM)

La Figure 3.5 représente le spectre pour les matériaux de transport d'électrons (ETM) ZnO , ZnS, SnO2 et ZnSe., Où on remarque le meilleure couche est couche ZnO ,

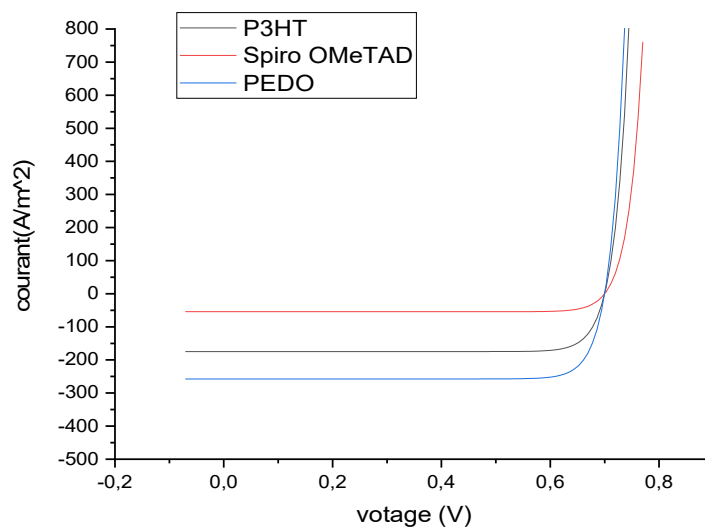
La meilleure conversion d'efficacité enregistrée pour le dioxyde d'étain (ZnO) qui semble être un choix intrigant en tant qu'ETM avec une efficacité de conversion allant jusqu'à 20,95 %. Cela peut être attribué à l'alignement approprié de la bande de conduction de ZnO avec le LUMO du matériau pérovskite. Aussi les propriétés exceptionnelles de ce matériau telles que la haute transparence, la mobilité élevée des porteurs et l'indice de réfraction approprié le placent tous au sommet des matériaux ETL. Les résultats du tableau 3 sont estimés pour P3HT/Perovskite/différents matériaux ETL.

Le résultat réduit peut être attribué aux mobilités réduites des électrons et des trous ( $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ), qui influencent la collecte des charges. En revanche, l'oxyde de zinc (ZnO) présente les rendements maximaux en termes de tension de circuit ouvert et de facteur de remplissage ( $V_{oc} = 1,266\text{V}$ ,  $FF = 71,49\%$ ), ce qui permet d'atteindre un rendement de conversion de puissance de 12 %. (SnO<sub>2</sub>) et (ZnS) ont montré un QE amélioré et des valeurs d'efficacité élevées analogues (11,12 % et 7 %, respectivement). Ces matériaux présentent des valeurs de mérite approximativement similaires ( $V_{oc} = 1,27 \text{ V}$ ,  $J_{sc} = 23,08 \text{ mA/cm}^2$ ,  $FF = 71,5 \%$  et  $= 20,9 \%$ ). La figure 3 montre différents alignements de bandes ETM avec un absorbeur de pérovskite.

#### 4.1. Effet du matériau de transport des trous (ETM)

Dans ce qui suit, nous nous concentrons sur ZnO comme principal candidat ETM car les résultats des autres candidats ne sont pas disponibles. De la même manière que précédemment, nous étudions dans cette section différentes matières organiques et matériaux inorganiques comme HTM.

Un HTM effectue principalement deux tâches importantes, à savoir accélérer le transport des trous photogénérés 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.



**Figure 3.6** Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes épaisseur de la couche P3HT, Spiro-OMeTAD et PEDOT PSS

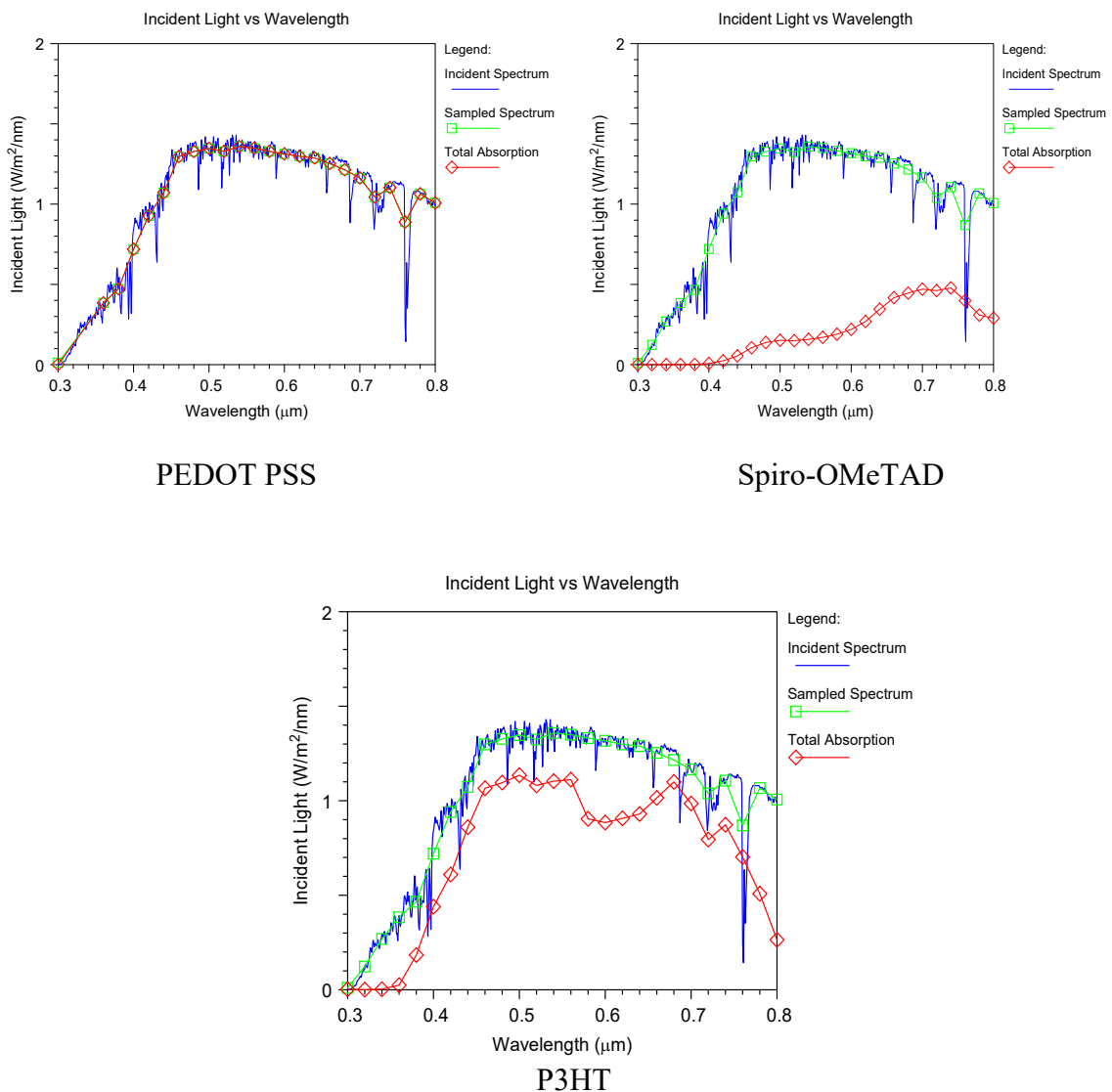
Afin d'étudier l'effet des propriétés optiques des candidats HTM sur les performances des cellules solaires, une méthode TMM est adoptée et les propriétés calculées sont insérées dans le simulateur Scaps 1D. La figure 3.6 montre les performances optiques de la cellule solaire étudiée avec différents HTM.

	Cell Efficiency (%)	Filling Factor (%)	Collection Efficiency (%)	Open Circuit Voltage (V)	Short Circuit Current(A/m <sup>2</sup> )	Optimal Bias Voltaige (V)	Optimale Bias current (A/m <sup>2</sup> )
Spiro-OMeTAD	<b>3.57</b>	84.58	100	0.7	-54.3287	0.616928	52.1438
PEDOT PSS	<b>15.71</b>	84.58	100	0.7	-238.959	0.616928	-229.349
P3HT	<b>11.12</b>	84.58	100	0.7	-169.198	0.61692	-162.393

**Tableau 3.2** Résultat de la simulation pour les matériaux de transport d'électrons (HTM)

En supposant une épaisseur de ZnO ETL de 0,05  $\mu\text{m}$ , différents candidats HTM seront examinés. La figure 3.6 et 3.7 montre la caractéristique J-V et l'efficacité quantique, respectivement. À partir de ce graphique, on peut voir que l'absorption des candidats HTM n'influence pas les performances des cellules solaires. Ce fait est principalement dû à l'emplacement de ce matériau à l'arrière de l'appareil. Une autre constatation concernant la

courbe J-V est l'amélioration remarquable des performances du PSC en termes de courant de court-circuit et de facteur de remplissage.



**Figure 3.7** spectre solaire pour les matériaux de transport d'électrons (HTM)

Cependant, un courant de court-circuit réduit est remarqué pour Spiro-OMeTAD. Une diminution de l'efficacité de conversion est observée pour une cellule solaire utilisant P3HT comme HTM, ce fait est principalement dû à la forte différence entre les niveaux HOMO de P3HT qui est d'environ 0,5 eV. D'autre part, une efficacité améliorée est obtenue en utilisant PEDOT PSS (15,74 %) avec un facteur de remplissage égal à 83,77 % comme récapitulé dans le tableau 3.2.

### **3.7 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 l'oxyde de zinc (ZnO) comme ETM et de l'oxyde de nickel (II) (PEDOT PSS) 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**

## CONCLUSION GENERALE

Aujourd'hui, une transition énergétique est nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques croissants et atténuer les risques liés à la tendance à la baisse des réserves d'énergies fossiles affectant les marchés et réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, cette frontière très étroite, devrait nous obliger à recourir à d'autres modes de production d'énergie.

Nous avons vu au cours de ces travaux que les énergies renouvelables sont devenues nécessaires, au niveau mondial, et les investissements dans ces énergies continuent de croître malgré le contexte économique et financier. Ce mémoire avait pour objectif principal la modélisation d'une cellule solaire à base de pérovskite .

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 l'oxyde de zinc (ZnO) comme ETM et de l'oxyde de nickel (II) (PEDOT:PSS) 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.



## **Références Bibliographiques**

**Références**

- [1] A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, T. Miyasaka, Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells, *J. Am. Chem. Soc.* 131 (2009)
- [2] W.J. Yin, J.H. Yang, J. Kang, Y. Yan, S.H. Wei, Halide perovskite materials for solar cells: a theoretical review, *J. Mater. Chem.* 3 (17) (2015) 8926–8942,
- [3] Z. Wang, P. Li, Z. Liu, J. Fan, X. Qian, J. He, P. Gao, Hole selective materials and device structures of heterojunction solar cells: recent assessment and future trends,
- [4] 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,
- [5] Q. Sun, X. Gong, H. Li, S. Liu, X. Zhao, Y. Shen, M. Wang, Direct formation of I<sup>3-</sup> ions in organic cation solution for efficient perovskite solar cells, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 185 (2018) 111–116,
- [6] 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,
- [7] T. Ibn-Mohammed, S.C.L. Koha, I.M. Reaney, A.G. Acquay, 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] 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,
- [9] Y. Zhang, Y. Xuan, Comprehensive design of omnidirectional high-performance perovskite solar cells, *Sci. Rep.* 6 (2016) 29705,
- [10] 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,

- [11] M. S. Fateh, "Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique," 2011.
- [12] D. R. Béchir, "Etude des propriétés optiques, électriques et structurales de nanoparticules de silicium insérées dans une matrice diélectrique et étude de leur intégration pour des cellules photovoltaïques à haut rendement," 2010.
- [13] "[https //www.fichier-pdf.fr/2014/04/11/production-er-individuelle.](https://www.fichier-pdf.fr/2014/04/11/production-er-individuelle)"
- [14] "Wenham S. R., Green M. A. And Watt M. E, «Applied Photovoltaic», Bridge."
- [15] S. Belakehal, "Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables," p. 147, 2010.
- [16] A.-M. IMOKRANE, "INTÉGRATION DES COMMANDES DE STATISME AUX SOURCES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES DÉCENTRALISÉES," 2015.
- [17] A. Lilia, "Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens - Evaluation de l'Impact des Energies Renouvelables sur l'Environnement," *Constibution À L'Amélioration Des Performances Des Générateurs Eoliens- Evaluation L'Impact Des Energies Renouvelables Sur L'Envirennement*, 2012.
- [18] L. U. Abdel, H. Ibn, and B. De Mostaganem, "Docteur en Physique Mekemeche Abdelkader de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n .," 2017.
- [19] Ahdibi Souhila, "Etude et simulation des cellules solaires photovoltaïques à base de "Si "et 'GaAs.'"
- [20] N. Oleksiy, "Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités," 2005.
- [21] Z. El Jouad, Z. El, and J. Réalisation, "Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques," 2017.
- [22] J. Degoulange, "Purification et caractérisations physico-chimiques et électriques de silicium d'origine métallurgique destiné à la conversion photovoltaïque," 2009.
- [23] C. E. Partielle and M. Mimoune, "ÉTUDE DES CAPTEURS PHOTOVOLTAÏQUES BASÉS SUR LES NANOTECHNOLOGIES," 2016.

- [24] Debili.N, “Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d’unsystème de pompage Photovoltaïque,” pp. 138–143, 2015.
- [25] Roguiya chendi Amélioration de l’absorption dans les cristaux photonique (CP) 2D Application aux cellules. Université de M’sila. Mmoire de magister 2015

## ملخص

الخلية الكهروضوئية هي مكون إلكتروني ضوئي يحول الضوء إلى كهرباء عن طريق التأثير الكهروضوئي. على وجه الخصوص بفضل الابتكارات التكنولوجية. تم اتخاذ خطوة مهمة في هذا الاتجاه من خلال إنشاء نظام باستخدام أغشية رقيقة، مما يقلل بشكل كبير من كمية المادة الفعالة المطلوبة. اليوم، أدت هذه الجهود إلى ظهور أفلام رقيقة للغاية من أشباه الموصلات. نظرًا لسمكها المنخفض، فإن هذه الطبقات تعاني من انخفاض امتصاص الضوء، مما يحد من كفاءة تحويل الخلايا. في هذا العمل، أنتجنا خلية شمسية أحادية الوصلة تعتمد على مواد بيروفسكايت من أجل تحسين الكفاءة من خلال العمل على عدد قليل من العناصر التي تشكل الخلية.

**الكلمات المفتاحية :** خلايا شمسية سيليكونية، طاقة متجددة، بيروفسكايت، خلايا الكهروضوئية.

## Résumé

Une cellule photovoltaïque est un composant optoélectronique qui convertit la lumière en électricité par effet photoélectrique. Notamment grâce aux innovations technologiques. Un pas important dans cette direction a été franchi grâce à la création d'un système utilisant des films minces, qui réduit considérablement la quantité de substance active requise. Aujourd'hui, ces efforts ont donné naissance à des couches extrêmement minces de semi-conducteurs. Du fait de leur faible épaisseur, ces couches souffrent d'une faible absorption lumineuse, ce qui limite l'efficacité de conversion des cellules. 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 Si, Energie Renouvelable, Pérovskite, Photovoltaïque

## Abstract

A photovoltaic cell is an optoelectronic component that converts light into electricity by photoelectric effect. In particular thanks to technological innovations. An important step in this direction has been taken with the creation of a system using thin films, which significantly reduces the amount of active substance required. Today, these efforts have given rise to extremely thin semiconductor films. Due to their low thickness, these layers suffer from low light absorption, which limits the cell conversion efficiency. In this work, 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, Photovoltaics