



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche  
Scientifique



*Université Ahmed Daria - Adrar*  
*Faculté des Sciences et de la Technologie*  
*Département Sciences de la matière*

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme de master en physique énergétique

*SPECIALITE*: Physique énergétique et énergies renouvelables

## *Thème*

**Etude d'une cellule solaire par le simulateur  
SCAPs**

**Préparé par:**

❖ **AZIZI Rabiâa**

**Devant le jury composé de :**

<b>Président :</b>	<b>Dr Mehaoudj Rachid</b>	<b>URER/MS</b>
<b>Encadreur :</b>	<b>Dr Boudaoud Lahouaria</b>	<b>Université Adrar</b>
<b>Examineur :</b>	<b>Mme Benabdelkarim Bouchra</b>	<b>Université Adrar</b>

*Année Universitaire* :2019/2020

## Remerciements

J'exprime mes sincères remerciements, ma grande gratitude et ma profonde reconnaissance au superviseur Dr Boudaoud Lahouaria, pour le temps, les efforts, les conseils, les conseils et les encouragements qu'elle m'a accordés également. Je tiens à remercier mes estimés maîtres et tous ceux qui ont contribué à mon éducation. Je remercie également sincèrement les membres du comité de jury d'avoir accepté à valoriser ce mémoire, **Dr Mehaoudj Rachid** et **Mme Benabdelkarim Bouchra** . Je remercie également tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, même avec un mot ou une invitation valable.

## **Dédicaces**

A l'âme pure de mon père, que Dieu ait pitié de lui

Je dédie le fruit de mes efforts. C'est la femme la plus chère et la plus précieuse de ma vie, qui a éclairé mon chemin pour atteindre ce niveau. Ma chère mère que Dieu prolonge sa vie

A mes frères et mes sœurs

A toute ma famille

A tous mes amis

**Rabia Azzizi**

## Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	10
INTRODUCTION GENERALE.....	11
CHAPITRE I : RAYONNEMENT SOLAIRE .....	13
I-1 INTRODUCTION .....	14
I-2 ASPECTS GEOMETRIQUES DU RAYONNEMENT SOLAIRE .....	14
I-3 MOUVEMENTS DE LA TERRE.....	14
I-4 LES DIFFERENTS TYPES DE RAYONNEMENT .....	15
I-5 LE RAYONNEMENT SOLAIRE.....	16
I-6 LES COMPOSANTES DU RAYONNEMENT SOLAIRE .....	16
I-6-1 RAYONNEMENT DIRECT .....	16
I-6-2. RAYONNEMENT DIFFUS.....	17
I-6-3 RAYONNEMENT GLOBAL :.....	17
I-7 APPAREILS DE MESURE DU RAYONNEMENT SOLAIRE .....	18
I-7-1 L'HELIOGRAPHE .....	18
I-7-2 LE PYRANOMETRE.....	19
I-8 GISEMENT SOLAIRE EN ALGERIE.....	20
I-9 CONCLUSIONS.....	21
I-10 REFERENCE .....	21
[1] MEZIANI FARIAZA, "DETERMINATION DU GISEMENT SOLAIRE PAR TRAITEMENT D'IMAGES MSG", MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZIOUZOU, 2012.....	21
CHAPITRE II : CELLULE SOLAIRE.....	23
II-1. INTRODUCTION.....	24
II-2 LES CELLULES SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES.....	24
II-3. MATERIAUX SEMI-CONDUCTEURS .....	25
II-3-1. SEMI-CONDUCTEURS INTRINSEQUES .....	25
II-3-2 SEMI-CONDUCTEURS EXTRINSEQUES.....	25
II-4. DOPAGE .....	26
II-4-1. DOPAGE DE TYPE N : .....	26
II-4-2. DOPAGE DE TYPE P.....	26
II-5. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	27
II-6. STRUCTURE D'UNE CELLULE SOLAIRE .....	28
II-7. CARACTERISTIQUE D'UNE CELLULE SOLAIRE [7] .....	29
II-7-1. LE COURANT DE COURT CIRCUIT, $I_{sc}$ .....	29
II-7-2. LA TENSION DE CIRCUIT OUVERT, $V_{co}$ .....	29
II-7-3. LA REPOSE SPECTRALE, $SR(\lambda)$ .....	29
II-7-4. LA PUISSANCE MAXIMALE, $P_M$ .....	30

<b>II-8.DIFFERENTES FILIERES TECHNOLOGIQUES DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES</b>	<b>31</b>
.....	
<b>II. 8. 1. LE SILICIUM</b> .....	<b>31</b>
A). SILICIUM MONOCRISTALLIN.....	<b>31</b>
B). SILICIUM POLY CRISTALLIN .....	<b>32</b>
C). SILICIUM AMORPHE .....	<b>32</b>
<b>II. 8. 2. FILIERES CHALCOGENURES POLYCRISTALLINS</b> .....	<b>33</b>
A). MATERIAUX A BASE DE TELLURE DE CADMIUM (CdTe).....	<b>33</b>
B). MATERIAUX A BASE DE SELENIURE DE CUIVRE ET D'INDIUM.....	<b>33</b>
<b>II- 8- 3. LES CELLULES III-V MULTI-JONCTIONS</b> .....	<b>33</b>
<b>II- 8- 4. CELLULES A CONCENTRATION</b> .....	<b>34</b>
<b>II. 8. 5. LES CELLULES NANOCRISTALLINES A COLORANT OU CELLULES DE GRATZEL</b> .....	<b>34</b>
<b>II- 8- 6. LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES ORGANIQUES</b> .....	<b>35</b>
<b>II-9LES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES</b> .....	<b>35</b>
<b>II.10 ASSOCIATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES</b> .....	<b>36</b>
<b>II-10-1 ASSOCIATION EN SERIE</b> .....	<b>36</b>
<b>II.10.2 ASSOCIATION EN PARALLELE</b> .....	<b>37</b>
<b>II.11. AVANTAGES ET LIMITES DE L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE</b> .....	<b>37</b>
<b>II.11.1. AVANTAGES</b> .....	<b>37</b>
<b>II-11-2 LIMITES</b> .....	<b>38</b>
<b>II-12.CONCLUSIONS</b> .....	<b>38</b>
<b>II-13 REFERENCE</b> .....	<b>38</b>
<b>CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION</b> .....	<b>40</b>
<b>III-1 INTRODUCTION</b> .....	<b>41</b>
<b>III-2 DESCRIPTION DU SIMULATEUR</b> .....	<b>41</b>
<b>III-3 MATERIAUX UTILISEES</b> .....	<b>44</b>
<b>III-4 DONNEES INTRODUITES DANS LE SIMULATEUR SCAPS</b> .....	<b>44</b>
<b>III-5 SIMULATION DES CARACTERISTIQUES DE SORTIE DE DEUX CELLULES</b> .....	<b>45</b>
<b>III-6 INFLUENCE DU NIVEAU INTERMEDIAIRE SUR LES CARACTERISTIQUES DE SORTIE</b> .....	<b>47</b>
<b>III-7 EFFET DE LA CONCENTRATION DU DOPANT SUR LA CELLULE SOLAIRE</b> .....	<b>48</b>
<b>III-8 INFLUENCE DE LA RESISTANCE SERIE SUR LA CELLULE SOLAIRE</b> .....	<b>49</b>
<b>III-9 CONCLUSION</b> .....	<b>50</b>
<b>III-10 REFERENCE</b> .....	<b>50</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	<b>52</b>

# Liste des figures

## Chapitre I: rayonnement solaire

Figure I.1:schématisation du mouvement de la terre autour du soleil.....	15
Figure I.2 : classification des divers rayonnements électromagnétiques.....	15
Figure I.3.Répartition spectral du rayonnement solaire.....	16
Figure I.4.Rayonnement Direct.....	16
Figure I.5.Rayonnement Diffus.....	17
Figure I.6. composantes du rayonnement solaire.....	17
Figure I.7:Héliographe de campbell.....	19
Figure I.8:Pyranomètre muni d'apley.....	19
Figure I.9:Pyranomètre muni d'un cache.....	20
.Figure I.10:Pyrhéliomètre.....	20
Figure I.11:Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.....	21

## Chapitre II: Cellule Solaire

Figure II.1:cellule solaire photovoltaïque.....	24
Figure II.2:Diagramme de bande d'un semi-conducteur intrinsèque.....	25
Figure II.3:Dopage de type N.....	26
Figure II.4:Dopage de type P.....	27
Figure II.5:Schéma explicatif du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	28
Figure II.6:Structure la plus simple d'une cellule solaire.....	29
Figure II.7:Caractéristique courant tension d'une cellule solaire éclairée.....	30
Figure II.8:Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque.....	31
Figure II.9:Module photovoltaïque.....	36
Figure II.10:Association en série de $N_s$ cellules solaires.....	36
Figure II.11:Association en parallèle de $N_p$ cellules solaires identiques.....	37

## Chapitre III:Résultats et Discussion

Figure III.1:Fenêtre du logiciel SCAPs pour écrire les paramètres d'une cellule.....	42
--	----

Figure III.2:Exemple de simulation d'une cellule cdte/cds/sno2 dans SCAPs.....	43
Figure III.3:(a) bande intermédiaire dans une cellule solaire et le processus d'émission et d'absorption et d'absorption,(b) la cellule utilisée dans ce mémoire znte/znteo.....	45
Figure III.4:Courant-tension de deux cellules solaires znte et znteo.....	46
Figure III.5:Variation de la densité du courant et du $V_{oc}$ en fonction du niveau intermédiaire.....	47
Figure III.6:Variation du facteur de forme et du rendement en fonction du niveau intermédiaire.....	48
Figure III.7:Variation du rendement et du facteur de forme en fonction la concentration $N_t$ .....	49
Figure III.8:Variation du rendement et du FF en fonction de la résistance série.....	50

# Liste des tableaux

## **Chapitre III:Résultats et Discussion**

Tableaux III.1 :Illustration des paramètres d'entrés des matériaux étudiés.....	44
Tableaux III.2:Résultats obtenus par simulation comparer par ceux obtenus expérimentalement.....	46



# Nomenclatures

**$I_{sc}$ ,  $J_{sc}$** : Le courant de court circuit

**$V_{co}$** : La tension de circuit ouvert

**$SR(\lambda)$** : La réponse spectrale

**$P_m$** : La puissance maximale

**$FF$** : Le Facteur de forme

**$N_s$** : cellules solaires

**$N_p$** : cellules solaires identiques

**$SCAPs$** : le logiciel

**$Z_{nte}$** : cellule solaire-homo-jonction

**$\eta$** : le rendement

**$N_t$** : la concentration

# **Introduction Générale**

## Introduction Générale

L'énergie renouvelable est une énergie naturelle et permanente. Elle se forme constamment et sans fin. Les exemples sont la lumière du soleil, l'énergie géothermique, le vent ..... etc. Certaines sources d'énergie renouvelables sont considérées comme des énergies de remplacement qui sont actuellement utilisées et qui seront épuisées plus tard, comme les combustibles fossiles. Au lieu de cela, les gaz nocifs dans l'atmosphère peuvent être réduits. L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelables et la plus abondante au monde, et c'est un rayonnement solaire qui peut être utilisé dans plusieurs domaines, dont le plus important est la production de dégradations chimiques, la production de chaleur et la production d'électricité en plus de l'énergie du solarium répandue dans le monde entier, donc elle est considérée comme une source que nous ajoutons de la pollution et continuons donc à l'exploiter et à en profiter. De manière appropriée, il répondra à un grand pourcentage des besoins énergétiques mondiaux à l'avenir.

Et l'énergie lumineuse est convertie en énergie électrique grâce à un appareil appelé cellule.

Dans le présent mémoire, nous avons mené une étude théorique et des simulations à l'aide du logiciel par le simulateur SCAPs de deux cellules solaires homo-jonction, la première c'est une homo-jonction n-ZnTe/p-ZnTe et la deuxième c'est la jonction n-ZnTe/ p-ZnTe :O afin de déterminer l'influence de certain paramètres de ces cellule (épaisseur et concentration du dopage) sur les performances photovoltaïques : Tension de circuit ouvert  $V_{co}$  , Courant de court-circuit  $J_{sc}$ , Facteur de forme et le rendement de conversion  $\eta$ .

Le mémoire est organisé en trois chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les aspects géométriques du rayonnement solaire, mouvements de la terre, les différents types de rayonnement ainsi que le notions de rayonnement solaire et les appareils de rayonnement solaire, enfin gisement solaire en Algérie.

Dans le second, les notions des cellules solaires photovoltaïques, matériaux semi conducteurs, les caractéristique d'une cellule solaire et leurs les différents filières

technologique de cellule solaire, avec les avantages et les limites de l'énergie photovoltaïque.

Dans le dernier chapitre, des simulations à l'aide du logiciel SCAPs de deux structures de cellules solaires homo-jonction, la première c'est une homo-jonction n+ ZnTe/p ZnTe et la deuxième c'est la jonction n-ZnTe/p-ZnTe :O afin de déterminer l'influence de certain paramètres de ces cellule (épaisseur et concentration du dopage) sur les performances photovoltaïques : Tension de circuit ouvert  $V_{co}$  , Courant de court-circuit  $J_{sc}$ , Facteur de forme et le rendement de conversion  $\eta$ .

Finalement, une conclusion générale résumant notre travail est présentée

# **Chapitre I : Rayonnement Solaire**

### I-1 Introduction

La source du rayonnement solaire est le soleil âgé de 4,5 milliards d'années. Cet astre est situé à environ  $150.10^6$  km de la terre. Vue de notre planète, il se présente sous la forme d'un disque assez homogène. Son rayon qui est de 696 000km, est 100 fois supérieur que celui de la terre et sa masse est 333 000 fois celle de notre planète [1].

Dans ce chapitre, nous aborderons en premier aborderons en premier lieu en aspects géométriques du rayonnement solaire .ensuite quelques notions sur le rayonnement solaire et leurs différents types de rayonnement solaire avec leurs appareils de mesure du rayonnement solaire en algérien.

### I-2 Aspects géométriques du rayonnement solaire

Dans le but ultérieur de calculer le flux reçu par un plan incliné placé à la surface de la terre et orienté dans une direction fixée, notre intérêt va porter dans ce qui suit sur les aspects géométriques du rayonnement solaire intercepté par la terre. La connaissance de ce flux est la base du dimensionnement de tout système solaire [2].

### I-3 Mouvements de la terre

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'**écliptique**. L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/ Soleil ne varie que de  $\pm 1,7 \%$  par rapport à la distance moyenne qui est de 149 675 10 6 km.

La terre tourne également sur elle même autour d'un axe appelé l'axe des pôles et passant par le centre de la terre appelé l'**équateur**. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique en fait l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé **inclinaison** de l'ordre de  $23^{\circ}27'$ [2].

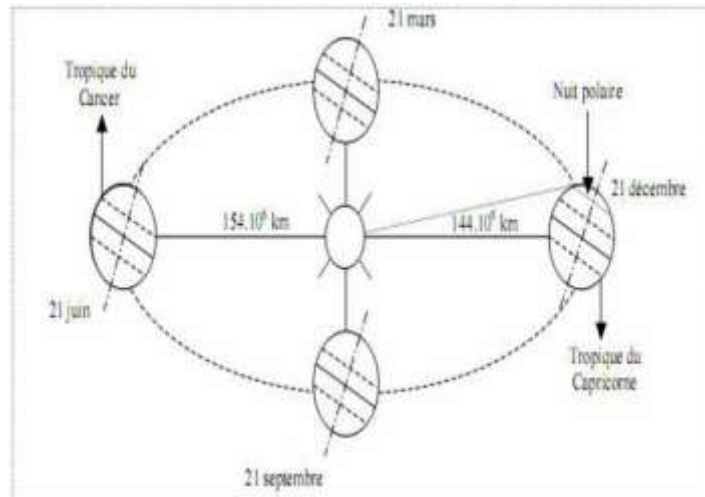


Figure I.1: Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil [2]

#### I-4 Les différents types de rayonnement

L'homme est exposé à une grande variété de sources d'énergie naturelles ou artificielles qui émettent un rayonnement sur plusieurs bandes du spectre électromagnétique.

Les rayonnements se déplacent dans le vide à grande vitesse. On peut les considérer comme des ondes ou des particules qui se déplacent en ligne droite.

Les rayonnements électromagnétiques se caractérisent par leur vitesse, leur fréquence et leur longueur d'onde. La figure (I.2), donne une classification de ces rayonnements en fonction de leur longueur d'onde.

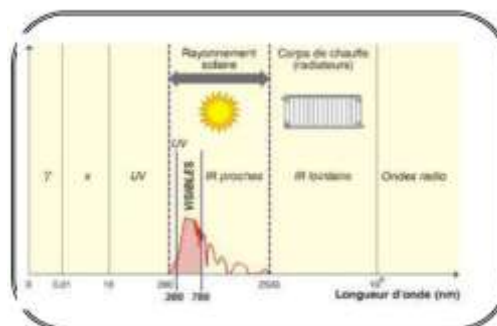
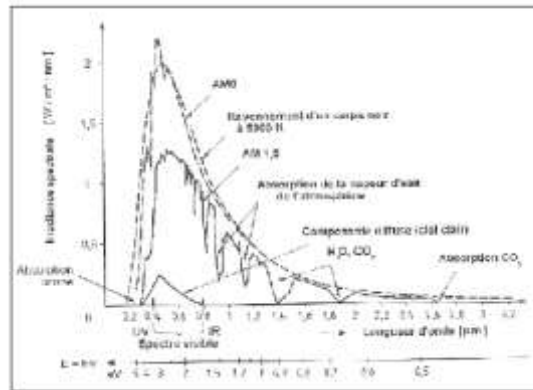


Figure I.2 : Classification des divers rayonnements électromagnétiques [2].

**I-5 Le rayonnement solaire**

C'est un rayonnement thermique qui se propage sous la forme d'onde Électromagnétique. En dehors de l'atmosphère terrestre, il donne un éclairement énergétique a peu près constant et égale à 1367w/m2, appelé de ce fait constante solaire [3].

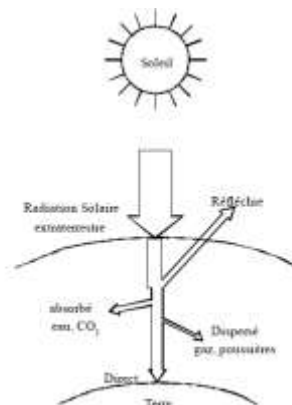


**Figure I.3 : Répartition spectrale du rayonnement solaire [3].**

**I-6 Les composantes du rayonnement solaire**

**I-6-1 Rayonnement direct**

Se définit comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire, il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages [4].



**Figure I.4 Rayonnement Direct [5]**

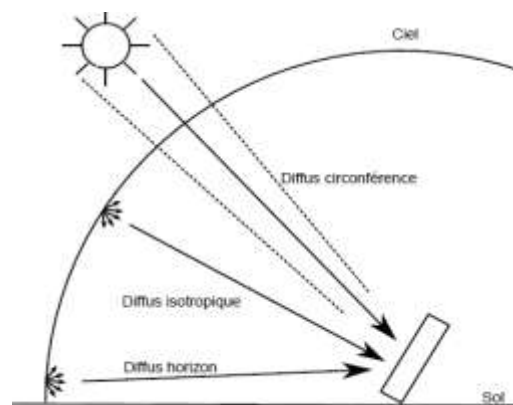


**I-6-2. Rayonnement diffus**

Dans sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est diffusé par les molécules de l'air et les particules en suspension. Le rayonnement solaire diffus n'est donc nul que la nuit [4].

On en distingue :

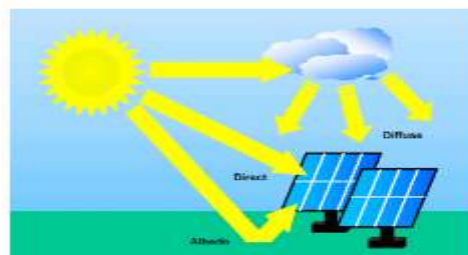
- Le rayonnement diffus isotopique provenant de toute la voûte céleste.
- Le rayonnement diffus circonférence provenant de la couronne solaire.
- Le rayonnement diffus horizon provient d'une mince bande d'horizon due à une Accumulation d'aérosols dans les basses altitudes [5].



**Figure 1.5.** Rayonnement Diffus [5]

**I-6-3 Rayonnement global :**

C'est la somme des deux types de rayonnements direct et Diffus [4].



**Figure I.6:** composantes du rayonnement solaire [4]

**I-7 Appareils de mesure du rayonnement solaire**

Le principe classique des mesures d'éclairements est l'effet thermoélectrique : un corps noir reçoit le rayonnement solaire, l'augmentation de sa température est mesurée par une série de couples thermoélectriques ; on enregistre donc une force électromotrice. Une mesure précise est toujours délicate d'autant plus que l'appareil est situé à l'extérieur [5].

**I-7-1 L'héliographe**

L'héliographe mesure les périodes de la journée pendant lesquelles l'intensité du rayonnement direct a dépassé un certain seuil. Tant que l'on peut observer des ombres sur le sol ( $E > 120 \text{ W/m}^2$ ), les météorologistes parlent de radiation directe à laquelle est sensible l'héliographe. La somme de ces périodes représente la durée d'insolation journalière permettant de définir la fraction d'insolation. Dans l'héliographe de Campbell-Stokes, une sphère de verre concentre le rayonnement direct en un point qui brûle un papier spécial. En se déplaçant, le point brûlé décrit le mouvement apparent du soleil en traçant une courbe dont la longueur est proportionnelle à la durée d'insolation. L'héliographe de Jordan utilise du papier photographique.

On utilise maintenant des héliographes automatiques constitués de cellules photovoltaïques disposées sur une bande cylindrique dont l'axe est perpendiculaire au plan de la trajectoire apparente du soleil. Un dispositif électronique totalise les intervalles de temps d'ensoleillement ; il faut veiller à ce que chaque héliographe ait le même seuil, c'est-à-dire l'éclairement direct minimal enregistré [6].





**Figure I.9. Pyranomètre muni d'un cache [6]**

### **I-7-3 Le pyréliomètre**

Les pyréliomètres mesurent le rayonnement direct. Ils comportent une ouverture réduite et une surface réceptrice qui doit être maintenue normale au rayonnement pas un système de poursuite automatiques. La surface sensible est un disque d'argent noirci placé à la base d'un tube muni d'un obturateur et d'un diaphragme limitant l'angle d'ouverture à  $5.7^\circ$  (le diamètre apparent du soleil et de  $0.5^\circ$ ). Le tube est fixé sur une monture équatoriale. On mesure la température du disque d'argent à intervalles réguliers en ouvrant et en occultant alternativement l'entrée de l'appareil [6].



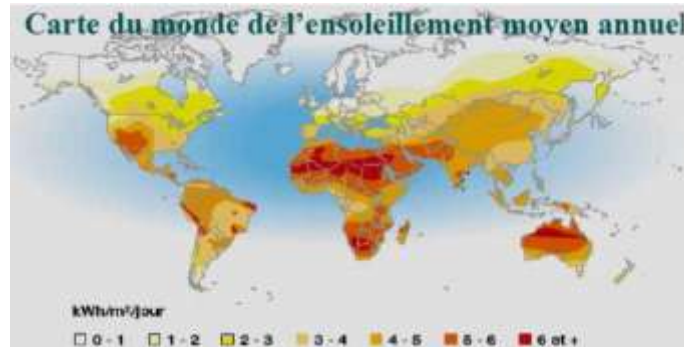
**Figure I.10. Pyréliomètre [6]**

### **I -8 Gisement solaire en Algérie**

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un

dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [1].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure I.10 :



**Figure I.11: Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [1]**

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hansi R'Mel[1].

## **I-9 Conclusions**

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelques notions de base sur le rayonnement solaire leurs les différents types, leurs les appareils de mesure du rayonnement solaire. Finalement nous avons présenté le rayonnement solaire en Algérie.

## **I-10 Référence**

- [1] Meziani Fariaza, "Détermination du gisement solaire par traitement d'images MSG", mémoire de magister, université Mouloud Mammeri de Tiziouzu, 2012.
- [2] Hadj Belkceci Mohamed, « Modélisation et étude Expérimentations d'un capteur solaire non vitré et perforé », mémoire de Master, université Abou berk belkaid de Tlemcen, 2011.

[3] khoudrque Ismail, « Etude d'un système de poursuite solaire pour les panneaux photovoltaïques » mémoire de Master, université kasdi Merbah Ouargla, 2014.

[4] Salaheddine Bensal " Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires " mémoire magister université ferhat abbas Sétif, 2011.

[5] Samira Mouhous Chaouchi, " Etude Statistique de rayonnement solaire sur un plan incline ", mémoire de magister, université Abou Bekr Belkaid, 2012.

[6] Merad Faiza, « conception d'un programme de calcul du rayonnement solaire cas particulier de la région de Mostaganem », mémoire de magister, 2013

## **Chapitre II : Cellule solaire**

## II-1.Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, elle pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis long temps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque. [1]

Dans ce chapitre présent des éléments importants liés al cellule photovoltaïque se vont présentes.

En premier lieu, on va le notion de cellule photovoltaïque. Évoquer ensuite les semi-conducteurs, la jonction P-N et le principe de fonctionnement d'une cellule solaire, leurs les caractéristiques électrique et les différents filières technologique de cellule solaire avec les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

## II-2Les cellules solaires photovoltaïques

Les cellules solaires photovoltaïques sont des dispositifs de conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique. [2].



**Figure II.1:** Cellule solaire photovoltaïque[2].



### II-3. Matériaux semi-conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin. Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique [3].

#### II-3-1. Semi-conducteurs intrinsèques

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge.

Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparé par une bande interdite. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon, ...) Mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. Ici le nombre de trous et d'électrons est égal [3].

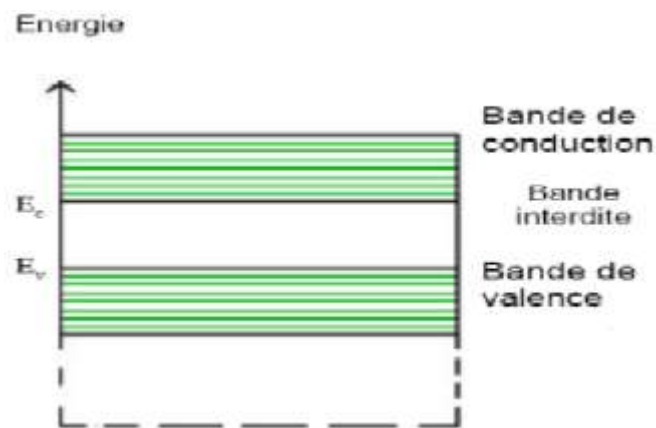


Figure II.2: Diagramme de bande d'un semi-conducteur intrinsèque [3]

#### II-3-2 Semi-conducteurs extrinsèques

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs, on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage [3].

## II-4.Dopage

Dans un semi-conducteur pur le nombre de porteurs étant faible à température ordinaire, la conductivité est médiocre [3].

### II-4-1.Dopage de type N :

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent. Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre. On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif) [4].

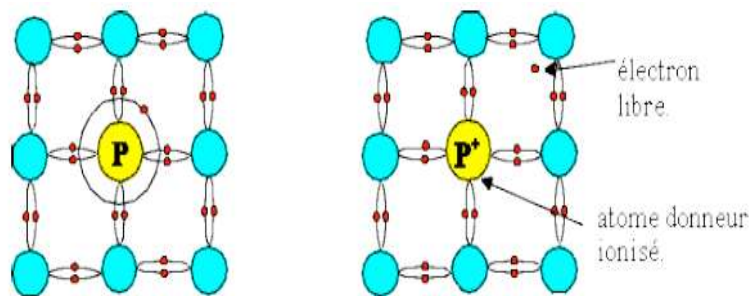


Figure II.3 dopage de type N[4]

### II-4-2.Dopage de type P

De la même façon, on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace dans le cristal pour créer un courant. Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore.

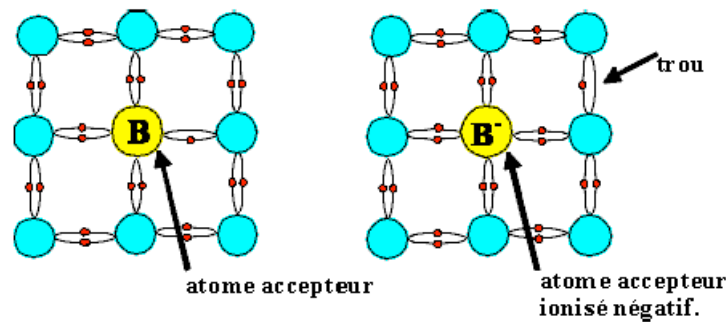


Figure II.4 dopage de type P [4]

## II-5. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule est l'élément de base d'un panneau photovoltaïque. C'est elle qui convertit l'énergie lumineuse des photons en énergie électrique par effet photoélectrique. L'effet photovoltaïque s'appuie principalement sur trois grands principes dont l'action combinée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

- L'absorption de photons.
- La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres.
- La collecte de ces particules dans un circuit électrique extérieur.

Le principe général du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est décrit par le schéma de la figure (II.5). Les dispositifs classiques sont généralement constitués d'un matériau semi-conducteur, comme le silicium, qui absorbe les photons de la lumière incidente (absorbeur ou base). Un semi-conducteur est constitué d'une bande de valence et d'une bande de conduction, dans lesquelles circulent les porteurs de charges, respectivement positives (les trous) et négatives (les électrons). On définit alors la bande interdite EG (ou gap) par la différence entre le haut de la bande de valence EV et le bas de la bande de conduction EC. Lorsque l'énergie des photons incidents  $h\nu$  est supérieure à la bande interdite EG du semi-conducteur, un électron de la bande de valence est excité dans la bande de conduction, il crée un trou : on dit qu'il y a photo-génération de paires

électron-trou. En conséquence, la concentration de porteurs dans les bandes d'énergies augmente. L'énergie absorbée en excès par rapport à  $E_g$  est perdue sous forme de chaleur par désexcitation des porteurs : c'est le processus de *thermalisation*. Ces porteurs photo-générés doivent ensuite se déplacer vers les contacts et être collectés, afin de générer un courant dans le circuit électrique connecté ; vu de l'extérieur de la cellule, les électrons proviennent du pôle négatif (n) et les trous du pôle positif (p). Pour réaliser cette séparation des porteurs, il est nécessaire que la structure du matériau soit dissymétrique. Il faut faire en sorte que les électrons (respectivement les trous) souhaitant circuler vers le côté p (respectivement le côté n) rencontrent une barrière. Concrètement, c'est un champ électrique au sein du matériau ou des interfaces, orienté de la zone n vers la zone p qui permet d'orienter le mouvement des porteurs. Par exemple, on peut créer un tel champ électrique en réalisant une jonction p/n par dopage de la surface du semi-conducteur, ou en réalisant une hétérojonction en associant deux matériaux de natures et de types différents [5].

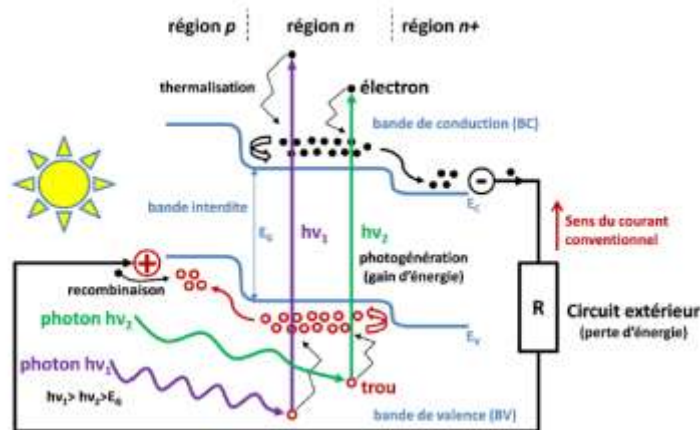


Figure II.5. Schéma explicatif du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [5]

## II-6. Structure d'une cellule solaire

La structure la plus simple d'une cellule solaire, représentée sur la figure (II.6), comporte une jonction entre deux zones dopées différemment (p-n) d'un même matériau (homo-jonction) ou entre deux matériaux différents

(hétérojonction), la moins épaisse étant soumise au flux lumineux. Chacune des régions est reliée à une électrode métallique au moyen d'un contact.

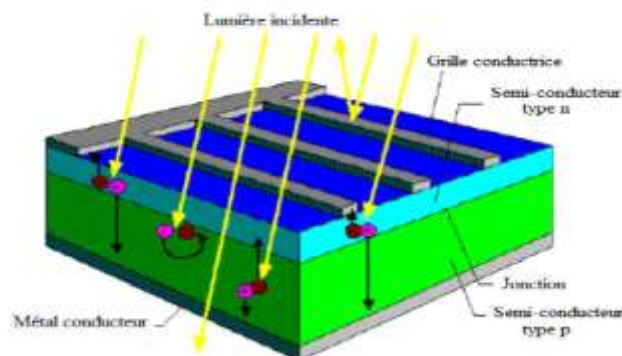


Figure II.6: Structure la plus simple d'une cellule solaire [6]

## II-7. Caractéristique d'une cellule solaire [7]

### II-7-1. Le courant de court circuit, $I_{sc}$

Le courant de court circuit est le courant amorcé par la cellule sous éclairement en court-circuitant sortie. C'est à dire que :  $I_{sc} = I(V=0)$ .

Pour une cellule solaire idéale le courant de court circuit est égal au courant de photo génération  $I_{ph}$ .

### II-7-2. La tension de circuit ouvert, $V_{co}$

La tension de circuit ouvert est la différence de potentiel mesurée aux bornes de la cellule lorsque la sortie est en circuit ouvert. C'est à dire :  $V_{co} = V(I=0)$ .

Pour une cellule solaire idéale la tension de circuit ouvert est donnée par

$$V_{co} = QU_t \ln \left[ \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right] \quad (II.1)$$

### II-7-3. La réponse spectrale, $SR(\lambda)$

La réponse spectrale d'une cellule solaire est le rapport du courant total généré par la cellule au courant qui peut être généré pour chaque longueur d'onde du spectre incident.

Elle renseigne sur la réaction de la radiation incidente et permet de fixer la gamme d'utilisation de la cellule.

$$SR = \frac{I_{ph}(\lambda)}{qF(\lambda)(1-R(\lambda))} \quad (II.2)$$

**II-7-4.La puissance maximale, Pm**

La puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand le produit (V.I) est maximum. Si  $V_m$   $I_m$  sont la tension et le courant pour lesquels on a ce maximum, la puissance maximum est la surface du plus grand rectangle de côtés  $V_m$  et  $I_m$  qu'on peut inscrire sous la courbe I(v).

$$P_m = (IV)_{max} = I_m V_m \quad (II.3)$$

**II-7-4.Le facteur de forme, FF**

On appelle facteur de forme, le rapport de la puissance maximale au produit  $I_{sc} V_{co}$ .

Le facteur de forme indique la qualité de la cellule, il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites  $R_s$  et  $R_{sh}$

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc} V_{co}} \quad (II.4)$$

**II-7-5.Le rendement de conversion, η**

Le rendement de conversion d'une cellule solaire est le rapport de la puissance maximale pouvant être extraite à la puissance du rayonnement incident.

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} \quad (II.5)$$

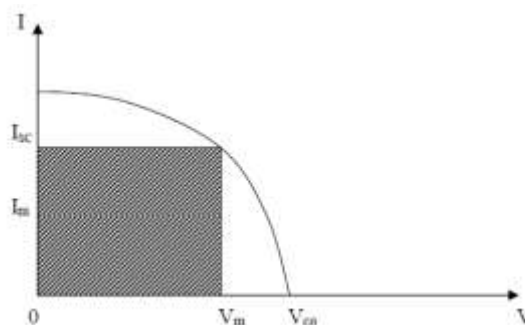


Figure II.7. Caractéristique courant tension d'une cellule solaire éclairée [7]

## II-8. Différentes filières technologiques des cellules photovoltaïques

### II. 8. 1. Le silicium

La filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques comme le montre la figure II.8 Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque silicium détaillées ci-après ; d'une part les cellules à base de silicium massif (monocristallin, poly cristallin, rubans) dites de première génération, et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques commercialisés et d'autre part la technologie à base de silicium en couche mince [8].

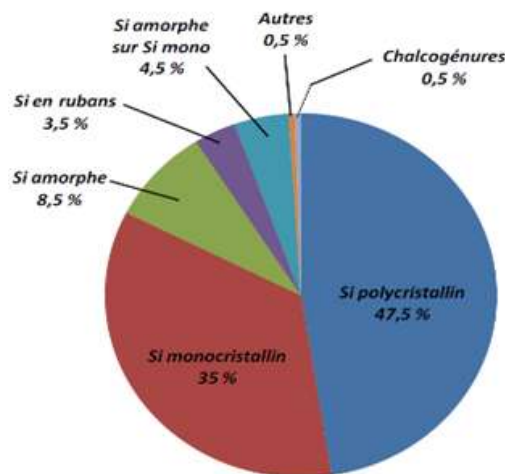


Figure II-8 Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque [8]

#### a). Silicium monocristallin

Il existe deux méthodes par lesquelles il est possible d'obtenir du silicium monocristallin de qualité microélectronique mais nécessitant cependant une dépense d'énergie considérable, proche du MWh. Les siliciums obtenus sont appelés Cz (méthode Czochralski) et FZ (Float Zone), et permettent d'obtenir des rendements de conversion records en laboratoire de l'ordre de 25% pour des cellules de 4 cm<sup>2</sup> (Université de New South Wales, Australie) soit supérieurs de huit points à ceux de l'industrie. Les inconvénients de cette technologie sont les rendements faibles obtenus sous un faible éclairage et surtout le coût prohibitif de production des matériaux [8].

**b). Silicium poly cristallin**

Le silicium poly cristallin est produit par des techniques de croissance qui assurent la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux (dénommé Silicium multi cristallin) afin de limiter les effets néfastes des joints de grains. Cependant, le matériau multi cristallin est d'une part contraint et disloqué, et d'autre part contaminé par des impuretés résiduelles de la matière première de silicium. Cette dernière est en partie constituée par des rebuts de l'industrie de la microélectronique, c'est-à-dire le silicium monocristallin Cz ou FZ. Les rendements de conversion industriels, qui étaient de l'ordre de 8 à 10% avant 1980, sont actuellement de 16 à 17% pour des grandes plaquettes de 200 cm<sup>2</sup>. Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché du photovoltaïque car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin [8].

**c). Silicium amorphe**

Depuis les années 1970 des recherches intensives ont été entreprises pour Utiliser du silicium non cristallisé, c'est-à-dire à l'état amorphe. Ce sont les cellules des calculatrices ou des montres.

Le silicium amorphe présente plusieurs avantages, en particulier son fonctionnement possible en intérieur sous faible éclairage contrairement au silicium cristallin, son fort coefficient d'absorption, sa faible consommation énergétique durant le cycle de production et son aptitude à être déposé sur des grandes surfaces (de l'ordre de 1 m<sup>2</sup>).

Cependant, les cellules photovoltaïques à base de silicium amorphe présentent de faibles rendements (inférieurs à 10% au niveau industriel) et une diminution assez rapide de performances au cours du temps.

L'avenir des couches de silicium amorphe passera probablement, par un mariage avec le silicium cristallin. En effet, les hétéro structures à base de silicium amorphe/silicium cristallin (Structure HIT de Sanyo présentent des rendements de laboratoire de plus de 21% et de 16% en production industrielle) [8].



**II. 8. 2. Filières chalcogénures polycristallins**

Nous citons deux types : CdS-CdTe et Cds-CIS.

**a). Matériaux à base de tellure de cadmium (CdTe)**

Jusqu'à une date récente, il était admis que la filière à base de sulfure de Cadmium et de Tellure de Cadmium (CdS-CdTe) représentait l'une des approches les plus prometteuses pour le photovoltaïque terrestre. La valeur de 1,45 eV de la bande d'énergie interdite du CdTe est idéalement adaptée au spectre solaire. En outre, son très grand coefficient d'absorption fait que la quasi-totalité du spectre est absorbé sur une profondeur de 2 $\mu$ m.

Les résultats de rendement de conversion sont très encourageants : près de 11% sur une surface de 4900 cm<sup>2</sup>. Cependant, les problèmes d'environnement associés à l'utilisation du Cadmium freinent les tentatives de développement de cette filière [8].

**b). Matériaux à base de sélénure de cuivre et d'indium**

Avec un coefficient d'absorption 100 à 1000 fois fort que celui du silicium cristallin (dans la gamme de 1,1 à 2,6 eV), le Disélénure de Cuivre et d'Indium (CIS) est un matériau très prometteur. Ce composé type I-III-VI de structure chalcopyrite a un rendement théorique de l'hétérojonction CdS(n)/CuInSe<sub>2</sub>(p) qui se situe autour de 25%. Les cellules à base de composés chalcopyrites quaternaires de type Cu(Ga,In)(Se,S)<sub>2</sub> ont récemment atteint des rendements de conversion record de 20% en laboratoire. Malgré les difficultés connues pour maîtriser cette filière à grande échelle, un rendement de 13% a été obtenu sur le plan industriel par ZSW.

**II- 8- 3. Les cellules III-V multi-jonctions**

Il est parfois difficile de trouver un matériau absorbant l'ensemble du spectre solaire avec un fort coefficient d'absorption. Les cellules multi-jonction III-V dites (de troisième génération) répondent à cette problématique. En effet, il s'agit de l'empilement de divers composants III-V, chacun est optimisé pour absorber

une partie du spectre solaire avec efficacité. L'empilement, obtenu par croissance épitaxiale, permet donc de capter une grande partie du spectre solaire, et mène à une cellule unique composée en réalité de plusieurs cellules en série.

De part le domaine de spectre solaire dont les photons sont récoltés et la minimisation des pertes dues à la thermalisation, ces cellules permettent d'atteindre les records connus à ce jour en matière de conversion photovoltaïques. Des rendements de plus de 40% ont ainsi été obtenus sous lumière concentrée. Le procédé de fabrication et les matériaux utilisés pour la fabrication de ces cellules entraînent un coût extrêmement élevé qui cantonne ces matériaux à des applications spatiales [8].

#### **II- 8- 4. Cellules à concentration**

Ces cellules sont constituées de deux éléments : une cellule solaire et un concentrateur. La cellule solaire peut être de n'importe quel type. Son rôle est bien entendu de produire de l'énergie. Le rôle du concentrateur est de capter des rayons du soleil sur une surface supérieure à la surface de la cellule. Ainsi, l'énergie reçue est plus importante, donc la production est plus importante.

Les records de rendement sont battus grâce à ce type de cellules : on atteint 40.7% en laboratoire avec une concentration de 296.

Des fabricant commencent à vendre des solutions comprenant de petits concentrateurs.

Cette solution a un défaut principal : la chaleur. En effet, l'augmentation de la température diminue le rendement des panneaux. Aussi les cellules doivent être refroidies soit activement soit passivement [8].

#### **II. 8. 5. Les cellules nanocristallines à colorant ou cellules de Gratzel**

Inspirée par la photosynthèse, l'équipe de Michael Gratzel a développé au début des années 1990 des cellules solaires fonctionnant selon un principe différent de celui décrit précédemment. Ces cellules sont composées d'un électrolyte, d'un colorant et d'un oxyde semi-conducteur inorganique. Le meilleur rendement certifié reporté est de 10,4% pour une cellule de 1cm<sup>2</sup> et est à

mettre au profit de la société Sharp. Des tests de stabilité effectués montrent que la durée de vie des cellules est de 20 ans en fonctionnement. Cependant, à cause de fuites possibles de l'électrolyte liquide, celui-ci est remplacé par des électrolytes solides pour lesquels les rendements chutent alors à 6,7% [8].

### **II- 8- 6. Les cellules photovoltaïques organiques**

L'effet photovoltaïque est observé depuis 30 ans dans les matériaux semi-conducteurs organiques. Les premières cellules présentaient des rendements de conversion en énergie très faibles (<10-5%). En 1986 l'équipe de Tang a montré que les rendements proches du 1% sont atteignables. Le rendement n'a pas été amélioré que début des années 2000, il a dépassé les quatre pourcent avec les travaux de J.Xue [8], après ça une valeur record de 7.9% est obtenue par la firme SOLARMER, utilisant des matériaux dérivés du fullerène (PCBM) et un copolymère alterne.

### **II-9 Les modules photovoltaïques**

Un module photovoltaïque est un ensemble de cellules solaires assemblées et exposées au rayonnement solaire pour générer une puissance électrique exploitable. En effet, une cellule élémentaire ne produit qu'une très faible puissance électrique moins de 3 W avec une tension de l'ordre d'un volt (1 V) : entre 0,5 et 1,5 V selon les technologies. Alors, les cellules sont associées en série et en parallèle pour former un module photovoltaïque avec une tension et un courant plus élevé afin de produire plus de puissance [9].



Figure II.9 : Module photovoltaïque [9]

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique.

## II.10 Association des cellules photovoltaïques

### II-10-1 Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné [9].

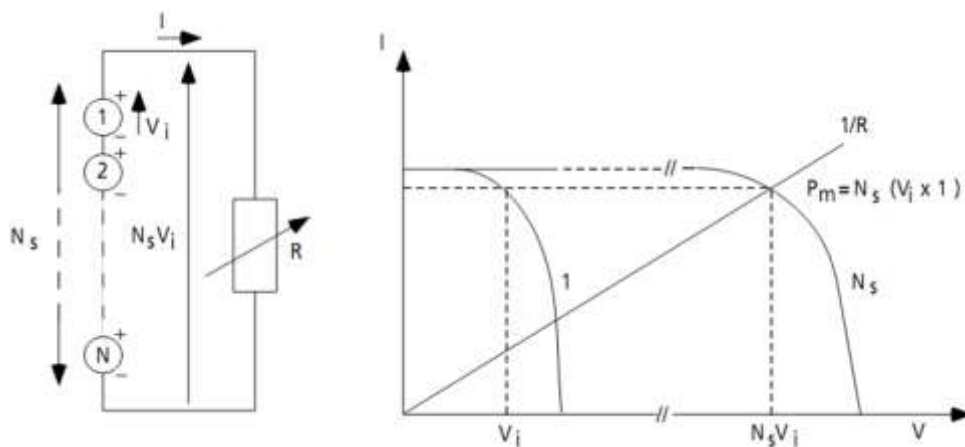


Figure II.10 : Association en série de  $N_s$  cellules solaires

## II.10.2 Association en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée [9].

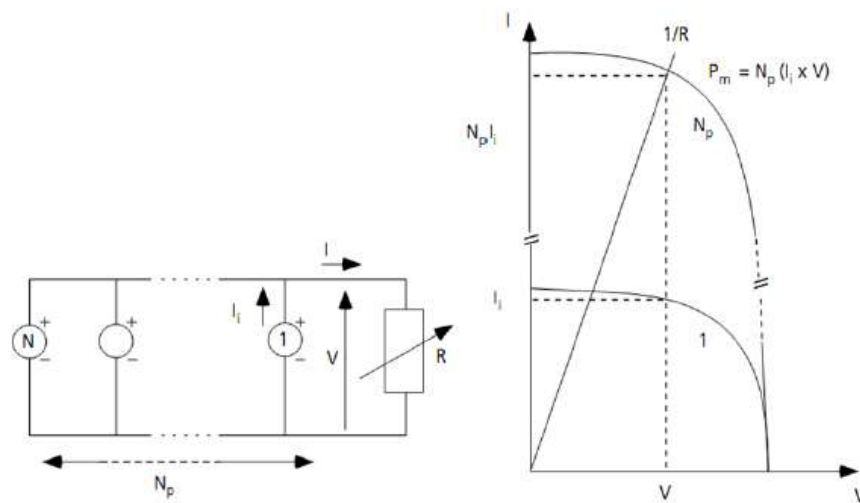


Figure II.11 : Association en parallèle de  $N_p$  cellules solaires identiques.

## II.11. Avantages et Limites de l'énergie photovoltaïque

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains Inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

### II.11.1. Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages à savoir :

- une haute fiabilité – elle ne comporte pas de pièces mobiles – qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. D'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt [10].

- le coût de fonctionnement est faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, 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.

### II-11-2 Limites

- la fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium est de 28%).
- les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis [10].

### II-12. Conclusions

Dans ce chapitre nous avons présenté leurs les caractéristiques électriques de la cellule solaire I-V et P-V, ainsi nous avons abordé l'association des cellules en série et en parallèle.

### II-13 Référence

[1] Benhaddouche Nesrine Fatima", La commande d'une système photovoltaïque d'une satellite", mémoire de master, université Abou Beker Belkaid, Tlemcen, 2014.

- [2] Beghdadi Souaad, "étude des performances d'une cellule solaire de type  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ (CIGS)" mémoire de master, université Abou Beker Belkaid Tlemcen, 2016.
- [3] Abaidia Abdelghafour et Dahman Abde Rahman, « Simulation d'une cellule solaire phonolitique à base d'hétérojonction : a-si:H(n)/c-si(p) », mémoire de master, université Kasdi Merbah Ouargla, 2016.
- [4] krim Med Iamane et Debbah Houssen Eddine, "étude par simulation générateur photovoltaïque", mémoire de master, université Badji Mokhtar Annaba, 2018.
- [5] Sonia Kartout, "propriétés physiques des composés ternaires par dépôts séquentiels des éléments  $[\text{Cu}\backslash\text{Ga}\backslash\text{Se}]$ ", mémoire de magister, université 20 aout1955- skikda, 2008.
- [6] Naima Touafek, "contribution à couches minces à base de  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ", mémoire de Doctorat, université des frères mentouri-constantine, 2015.
- [7] souisi fatma zohra", Modélisation d'une cellule solaire en couche mince à base de cuivre Indium sélénium", mémoire de magister, université Kasdi Marbah Ourgla, 2009.
- [8] Boufia Mounir et Deblaoui Laid, " Modélisation et simulation d'une cellule solaire couche mince à base di-séléniure de cuivre, d'indium et de Gallium [GIGS]", mémoire de master, université Kasdi Marbah Ourgla, 2012.
- [9] Ammar Filalil, Etude et identification des paramètres électriques des modules photovoltaïques, mémoire de master. Université Adrar, 2017.
- [10] Rahmani Abed Rahmane et Selmani kadda, Etude des performances d'une cellule photovoltaïque à hétérojonctions, mémoire de master, université Molay Tahar, Saida, 2017.

## **Chapitre III : Résultats et discussion**



### III-1 Introduction

La cellule étudiée dans ce mémoire, introduit un nouveau concept des cellules solaires, cellule solaire inter-bande. Où, on essaie d'introduire des atomes d'oxygènes dans le ZnTe et ces atomes vont introduire un niveau d'énergie intermédiaire.

### III-2 Description du simulateur

La simulation des cellules en couches minces est devenue de plus utilisée ces dernières années, ainsi, plusieurs logiciels de calcul et de simulation ont été développés par la communauté des chercheurs dans ce domaine. On peut citer les logiciels AMPS-1D, PC-1D, ASA, SCAPS-1D, SILVACO ....

SCAPS (solar cell capacitance simulator) est un logiciel de simulation numérique des cellules solaires en couches minces à hétérojonction. Il a été développé à l'université de Gent en Belgique avec LabWindows/ CVI de National Instruments par Marc Burgelman et al [1]. Il a été mis à disposition à l'université chercheuse dans la communauté photovoltaïque après la deuxième PV de la Conférence mondiale de Wine, 1998.

Le programme SCAPS 1-D résout les équations pour des structures contenant un certain nombre de couche semi-conducteur qui ont un profil de dopage arbitraire (comme fonction de la position), avec une distribution énergétiques arbitraires des niveaux profonds des donneurs ou des accepteurs sous différents types d'éclairement.

Des itérations de résolutions des équations sont faites jusqu'à convergence de l'algorithme. SCAPS 1-D a été introduit dans la littérature avec les articles [2, 3].

Alors que les algorithmes de SCAPS sont détaillés dans les références [4] SCAPS est originellement développé pour les structures de cellules de famille CuInSe<sub>2</sub> et CdTe. Cependant, plusieurs extensions ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour les cellules solaires cristallines (de la famille Si et GaAs), ainsi que les cellules solaires amorphes (a-Si et les micro-morphes

Si). Les applications de la simulation en utilisant SCAPS peuvent être consultées dans les références [5, 6].

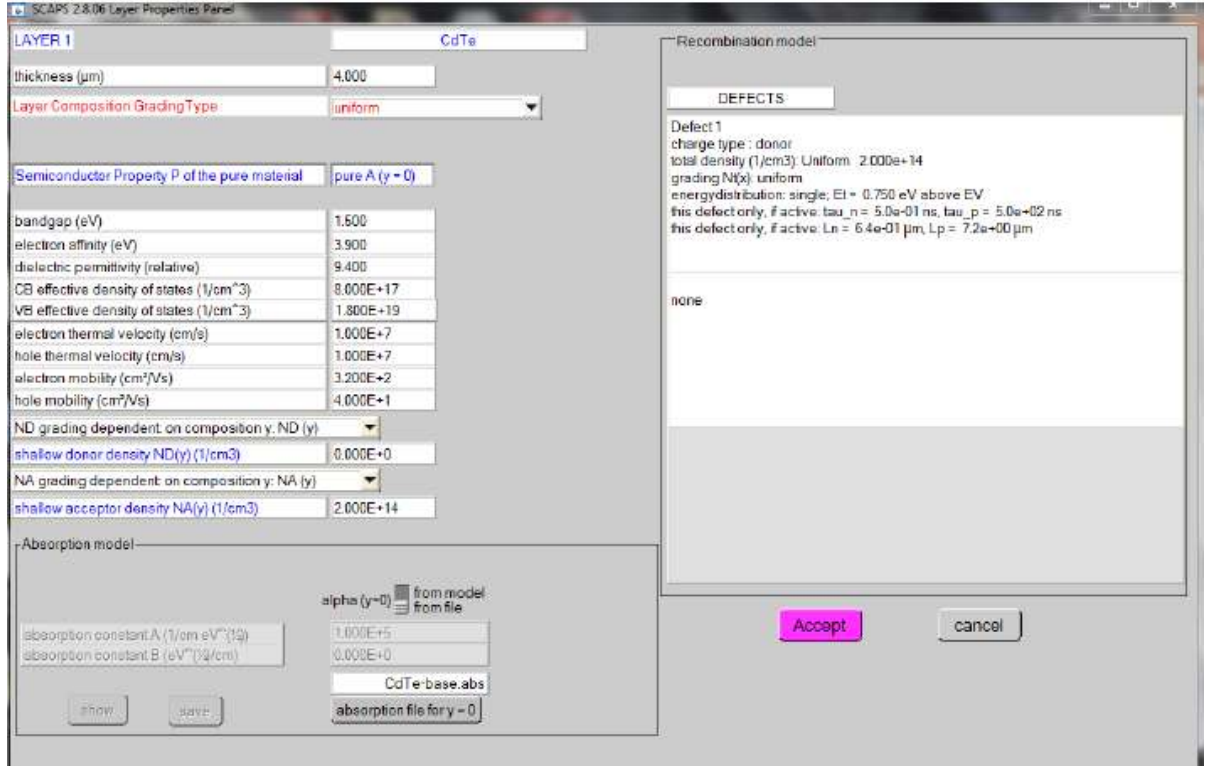


Figure III. 1 : Fenêtre du logiciel SCAPS pour écrire les paramètres d'une cellule

L'étude de la plus part des dispositifs à semi-conducteurs est basée sur la résolution simultanée de l'équation de Poisson (III.1) et de l'équation de continuité pour les électrons (III.2) et les trous (III.3) avec des conditions aux limites appropriées.

$$\frac{d^2}{dx^2} \Psi(x) = \frac{e}{\epsilon_0 \epsilon_r} (\rho(x) - n(x) + N_D - N_A + \rho_p + \rho_n) \quad (III.1)$$

$$\frac{d}{dx} J_n(x) - e \frac{\partial n(x)}{\partial t} - e \frac{\partial \rho_n}{\partial t} = G(x) - R(x) \quad (III.2)$$

$$\frac{d}{dx} J_p(x) + e \frac{\partial p(x)}{\partial t} + e \frac{\partial \rho_p}{\partial t} = G(x) - R(x) \quad (III.3)$$

Tel que  $\Psi$  ; est le potentiel électrique,  $e$  la charge électrique,  $\epsilon_r$  permittivité relative,  $\epsilon_0$  permittivité du vide,  $p$  et  $n$  concentrations de trous et électrons,  $N_D$  et  $N_A$  la charge des impuretés donneurs et accepteurs,  $\rho_n$  et  $\rho_p$  la distribution de trou et d'électron,  $J_p$  et  $J_n$  densité de courant de trou et électron,  $G(x)$  et  $R(x)$  la génération et recombinaison des charges [7] [8].

L'utilisation de SCAPS est très pratique, il permet de simuler n'importe qu'elle structure photovoltaïque, selon les matériaux disponibles en fichiers data, en jouant sur les paramètres variables (largeur, surface, dopage, etc...), la fenêtre du logiciel pour écrire ces paramètres est représenté sur la figure III.1. Les résultats de la simulation, sont très proches des résultats expérimentaux, donc c'est un gain de temps et d'argent.

On obtenu comme résultat les courbes I-V, C-V, C-f, Q ( ), mais aussi le diagramme de bande, densité de porteur, densité de courant, un exemple de résultat est donner dans la figure III.2.

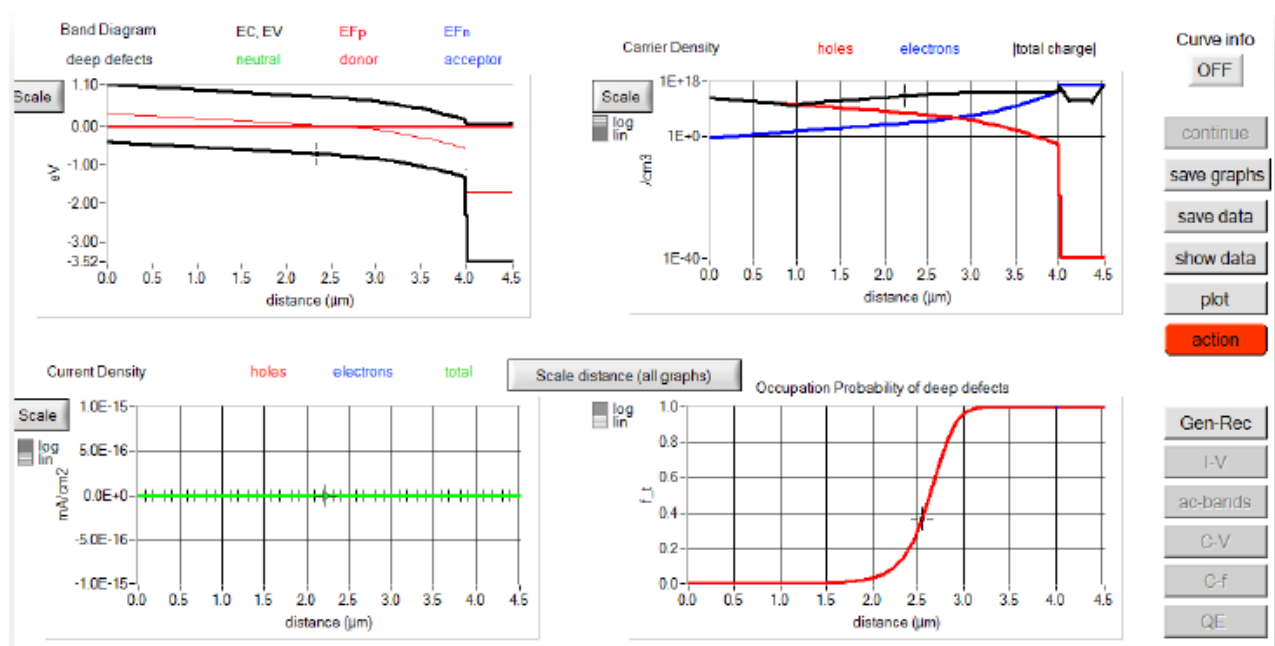


Figure III. 2 : Exemple de simulation d'une cellule CdTe/CdS/SnO<sub>2</sub> dans SCAPS

### III-3 matériaux utilisées

Le ZnTe possède la structure zinc blende à l'état d'équilibre. Il peut se trouver également dans les structures cristallines : le wurtzite (hexagonal) et le rocksalt (type NaCl). Il a large gap direct d'énergie 2,4 eV. Il est largement utilisé dans l'optique infrarouge, les cellules solaires. Le ZnTe est transparent aux photons inférieurs à 2.2 eV, ce qui lui positionne comme un bon candidat pour le contact arrière de la jonction tunnel de la cellule solaire tandem. Des rendements de 10 à 11% ont été obtenus pour les cellules solaires à base de CdTe dont le ZnTe est utilisé comme contact arrière [9]. En alliant le CdTe au ZnTe, la bande interdite et le paramètre de réseau peuvent être ajustés sur toute la gamme (de 0% à 100%) de la concentration chimique de l'alliage CdZnTe [9].

### III-4 Données introduites dans le simulateur SCAPs

On a calculé une cellule solaire homo-jonction  $n^+ \text{ZnTe}/p \text{ZnTe}:\text{O}$  par le simulateur SCAPs dont les épaisseurs et les concentrations des dopants de deux couches sont  $N_D = 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  et épaisseur  $d = 0.3 \mu\text{m}$  pour l'émetteur et  $N_A = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  et  $d = 1 \mu\text{m}$  pour la couche absorbante. Le tableau suivant Table III.1 illustre les données introduites dans le logiciel. La figure III.3 décrit la structure de bande d'un matériau dont on introduit des atomes donneurs pour créer un niveau d'énergie intermédiaire.

**Tableau III.1 illustration des paramètres d'entrées des matériaux étudiés [9, 13]**

Paramètres	ZnTe :O
Eg Energie du gap, (eV)	<b>2.29</b>
$\chi$ Affinité électronique, (eV)	<b>3.7</b>
$\epsilon_r$ Permittivité relative,	<b>10</b>
$\mu_n$ mobilité électronique ( $\text{cm}^2 / \text{Vs}$ )	<b>330</b>

$C_B$ Densité effective d'états (/cm <sup>3</sup> )	$2 \cdot 10^{18}$
$V_B$ densité effective des états (/cm <sup>3</sup> )	$2 \cdot 10^{18}$
vitesse thermique des électrons (cm / s)	$10^7$
Vitesse thermique du trou (cm / s)	$10^7$
$\mu_p$ mobilité des trous (cm <sup>2</sup> / Vs)	80
Concentration du dopant $N_t$ (/cm <sup>3</sup> )	$10^{19}$ - $10^{22}$
Energie de la bande intermédiaire ( $E_c$ - $E_i$ ) (eV)	0.3-0.7

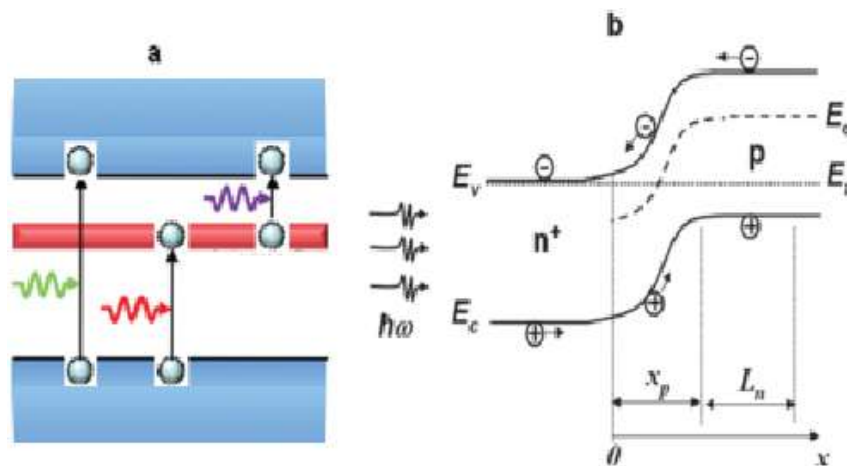


Figure III.3 (a) bande intermédiaire dans une cellule solaire et le processus d'émission et d'absorption, (b) la cellule utilisée dans ce mémoire ZnTe/ZnTeO

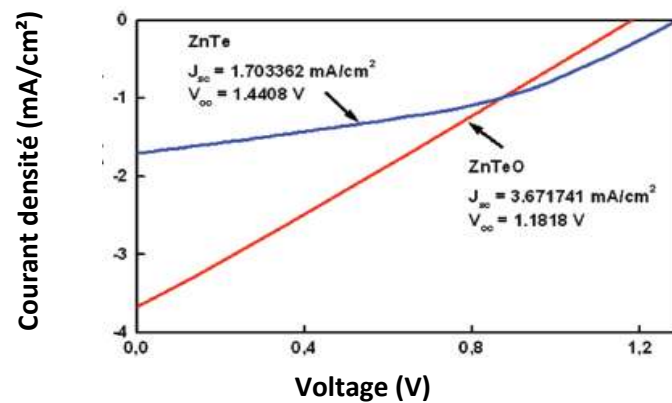
### III-5 Simulation des caractéristiques de sortie de deux cellules

On va présenter les résultats obtenus par le simulateur SCAPS. La Figure III.4 illustre une étude de deux cellules solaires homo-jonction, la première c'est une homo-jonction n<sup>+</sup> ZnTe/p ZnTe et la deuxième c'est la jonction n-ZnTe/p-ZnTe :O. D'après cette figure, on voit que l'introduction d'un niveau énergétique dans la bande interdite a amélioré le rendement de la cellule solaire de 0.97% à 1.26%. Tous les caractéristiques de sortie telle que la densité de courant en court

circuit ( $J_{sc}$ ), la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), le facteur de forme (FF), et le rendement ( $\eta$ ) sont rassemblés dans le Tableau III.2.

**Tableau III.2 résultats obtenus par simulation comparer par ceux obtenus expérimentalement**

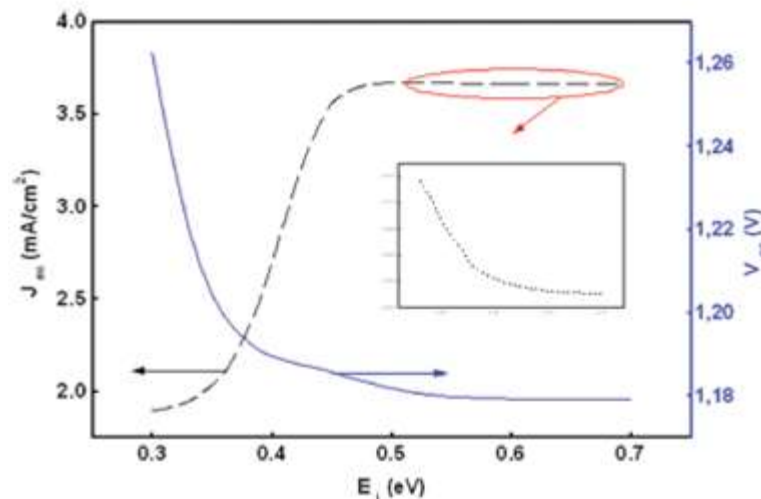
Cellule solaire	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF%	$\eta$ %
ZnTe notre résultat	1.70	1.44	35.61	0.97
Znte :O notre résultat	3.67	1.18	26.17	1.26
ZnTe (exp)[9]	1.8	0.45	45	0.36
ZnTe :O (exp)[9]	3.6	0.38	31	0.43



**Figure III.4 courant-tension de deux cellules solaires ZnTe et ZnTeO**

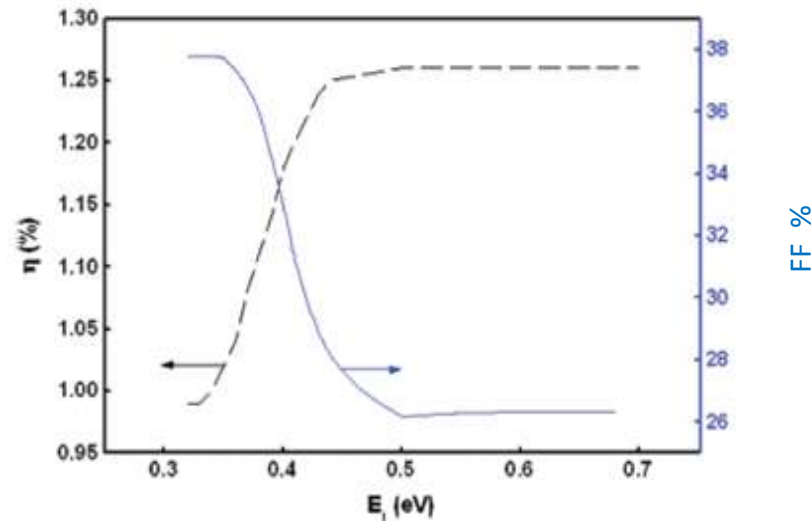
### III-6 Influence du niveau intermédiaire sur les caractéristiques de sortie

On a étudié la variation de ces caractéristiques de sortie en fonction du niveau intermédiaire ( $E_i$ ). D'après la figure III.5, on constate que la densité du courant augmente par l'augmentation du niveau énergétique intermédiaire par contre la tension  $V_{oc}$  diminue. La courbe a une forme exponentielle, elle se stabilise à partir de la valeur de  $E_i$  égale à 0.5 eV pour la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ . Pour le courant, on a une forme hyperbolique, d'où une augmentation rapide de la valeur 0.32 eV jusqu'à la valeur de 0.43 eV. Puis on obtient une crête avec une légère chute de la valeur 3.55 mA/cm<sup>2</sup> vers 3.501 mA/cm<sup>2</sup>.



**Figure III.5 variation de la densité du courant et du  $V_{oc}$  en fonction du niveau intermédiaire**

Dans la figure III.6, on a présenté la variation du rendement et facteur de forme aussi en fonction du niveau  $E_i$ . La même variation a été obtenue pour le facteur de forme décroît avec le niveau d'énergie intermédiaire  $E_i$  comme la tension en circuit ouvert. Et le rendement une variation hyperbolique comme le courant en court circuit ceci grâce aux équations qui lient ces caractéristiques de sortie entre eux.



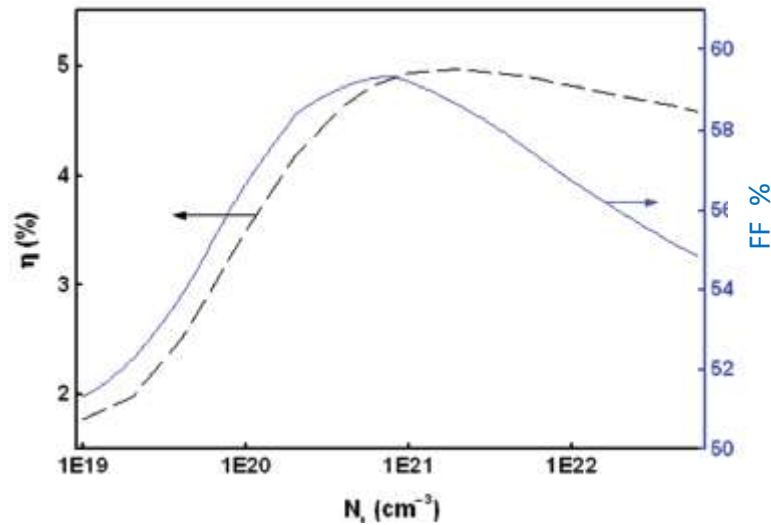
**Figure III.6** variation du facteur de forme et du rendement en fonction du niveau intermédiaire

### III-7 Effet de la concentration du dopant sur la cellule solaire

On vu qu'il est intéressant de voir la variation du rendement de la cellule ZnTe/ZnTeO avec la concentration des atomes d'Oxygène  $N_t$ , et d'après la figure III.7, on constate que le rendement et le facteur de forme sont influencés par ce paramètre.

Le rendement varie comme une fonction hyperbolique avec une crête pour la valeur de la concentration  $N_t$  est de  $9.5 \cdot 10^{20}/\text{cm}^3$ , on a obtenue un rendement de l'ordre de 4,89%. OÙ, cette valeur indique que la concentration  $N_t$  donne un rendement maximal. Et si on dépasse cette valeur, on a une diminution des valeurs du rendement. Pour le facteur de forme (FF), on a obtenue la même variation avec presque la même crête après cette crête, on a une chute des valeurs du facteur de forme.





**Figure III-7** Variation du rendement et du facteur de forme en fonction de la concentration  $N_t$

### III-8 Influence de la résistance série sur la cellule solaire

L'effet de la résistance série est indispensable sur les caractéristiques de sortie de la cellule solaire. La figure III-8 montre cette influence. Cet effet est grand quand on augmente la résistance série. D'après la figure, on constate que cette influence est très importante dès que la résistance série dépasse la valeur  $20 \Omega \cdot \text{cm}^2$ . Et cet effet devient moins important au moment que cette résistance dépasse la valeur de  $200 \Omega \cdot \text{cm}^2$ .

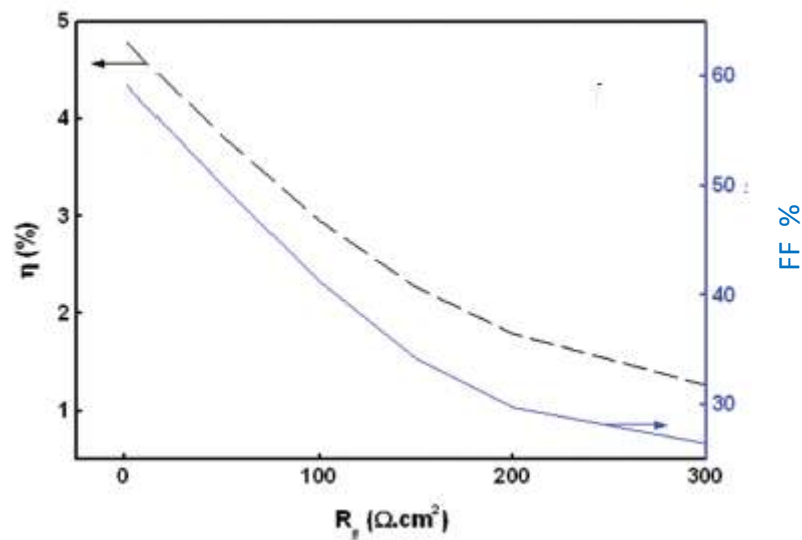


Figure III.8 variation du rendement et du FF en fonction de la résistance série

### III-9 Conclusion

D'après les résultats obtenus, on a obtenu une structure de cellule solaire avec un niveau d'énergie intermédiaire dans la bande interdite. L'introduction de l'oxygène dans la couche ZnTe a amélioré le rendement de la cellule de 45%.

### III-10 Référence

- [1] A. Niemegeers, M. Burgelman, K. Decock, J. Verchraegen, S. Degrave, "SCAPS 3201 Manual". ELIS, (2013).
- [2] A. Niemegeers M. Burgelman, "Numerical modelling of ac-characteristics of CdTe and CIS solar cells". In : Photovoltaic Specialists Conference, IEEE. p. 901-904, (1996).
- [3] M. Burgelman, P. Nollet, S. Degrave, "Modelling polycrystalline semiconductor solar cells". Thin Solid Films, vol. 361, p. 527-532, (2000).
- [4] A. Niemegeers, S. Gillis, M. Burgelman " A user program for realistic simulation of polycrystalline heterojunction solar cells: SCAPS-1D." In : Proceedings of the 2<sup>nd</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, JRC, European Commission,..p. 672-675, (1998).

- [5] A. Niemegeers, M. Burgelman “Effects of the Au/CdTe back contact on IV and CV characteristics of Au/CdTe/CdS/TCO solar cells”. *Journal of Applied Physics*, vol. 81, no 6, p. 2881-2886, (1997).
- [6] M. Burgelman, P. Nollet, S. Degrave “ Electronic behaviour of thin-film CdTe solar cells”. *Applied Physics A*, vol. 69, no 2, p. 149-153, (1999)
- [7] H. Movla, “Optimization of the CIGS Based Thin Film Solar Cells: Numerical Simulation and Analysis,” *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, Vol 125, no 1, p. 6770 (2014).
- [8] O.K. Simya, A. Mahaboobbatcha, K. Balachander, “A Comparative Study on the Performance of Kesterite Based Thin Film Solar Cells Using SCAPS Simulation Program,” *Superlattices and Micros-tructures*, Vol. 82, pp. 248261 (2015).
- [9] W. Wang, A. S. Lin, J. D. Phillips, and W. K. Metzger, Generation and recombination rates at Znte:O intermediate band states, *J. Appl. Phys. Lett.*95, 261107 (2009) .
- [10] A. S. Lin, W. Wang, and J. D. Phillips, Model for intermediate band solar cells incorporating carrier transport and recombination, *J. Appl. Phys.*105, 064512 (2009).
- [11]W. Wang, W. Bowen, S. Spanniga, S. Lin, and J. Phillips, Optical characteristics of ZnTeO thin films synthesized by pulsed laser deposition and molecular beam epitaxy, *J. Electronic. Materials* 38 (2009).
- [12] N. Amin, K. Sopiand, and M. Konagai, Numerical Modeling of CdS/CdTe and CdS/CdTe/ZnTe solar as a function of CdTe thickness, *J. Sol. Mater. Sol Cell*911202 (2007).
- [13] H. Mathieu and H. Fanet, *Physique des semiconducteurs et des Composants Electroniques*, 6<sup>ème</sup> Dunod, Paris (2009).

# Conclusion Générale

---

## Conclusion Générale

Dans ce mémoire, nous avons présenté une étude théorique et simulation des cellules solaires à base du ZnTe. Deux structures de cellules solaires homo-jonction, la première c'est une homo-jonction n-ZnTe/p-ZnTe et la deuxième c'est la jonction n-ZnTe/p ZnTe :O ont été simulées à l'aide du logiciel SCAPs-1D, afin de déterminer l'influence de certain paramètres de ces cellule (épaisseur et concentration du dopage) sur les performances photovoltaïques : Tension de circuit ouvert , Courant de court-circuit, Facteur de forme et le rendement de conversion. Les résultats obtenus après simulation de deux cellules permettent de dire que en prenant une structure qui combine les paramètres optimaux (épaisseur et dopage) de chaque couche, nous avons pu atteindre un rendement de conversion électrique de 45% avec un facteur de forme de 32%. Et les performances de la cellule initiale ont été amélioré par l'introduction d'un niveau énergétique dans la bande interdite.

## Résumé

Dans le contexte général de l'utilisation diversifiée des ressources naturelles, le retour aux énergies renouvelables, et en particulier à l'énergie solaire photovoltaïque, s'est renforcé. Et c'est pourquoi le développement d'une nouvelle génération de cellules photovoltaïques à base de (ZnTe) s'annonce prometteur en fait, le déjeuner de ces cellules a dépassé les 20% ces dernières années. Par conséquent, notre travail consiste à intégrer une cellule solaire basée sur (ZnTe) et (ZnTe :O), et notre objectif de cette étude est de s'améliorer les performances en fonction de l'épaisseur et impuretés afin d'obtenir le meilleur rendement électrique possible.

**Mots clés:** énergie renouvelable, énergie solaire, cellules photovoltaïques, informations physiques, impuretés

## Abstract

In the general context of diversified use of natural resources, the return to renewable energy, and in particular solar photovoltaic, has become stronger. And this is why the development of a new generation of photovoltaic cells based on (ZnTe) looks promising in fact, the lunch of these cells exceeded 20% in recent years. Therefore, our work consists of integrating a solar cell based on (ZnTe) et (ZnTe:O), and our goal of this study is to improve Physical parameters thickness and impurities in order to achieve the best possible electrical yield. The 1D-SCAPS pair is a very practical tool, recommended for this study.

**Key words:** renewable energy, solar energy, photovoltaics, physical information, impurities

ملخص

المتنوع الموارد الطبيعية الرجوع الى الطاقة المتجددة وبشكل خاص الطاقة الشمسية الكهروضوئية اصبح اقوى. ولهذا تطوير جيل جديد من الخلايا الضوئية القلنمة على اساس (ZnTe) تبدوا واعدة في الواقع فاق غداء هذه الخلايا 20% في السنوات الاخيرة. وبالتالي فان عملنا يتكون من نمذجة خلية شمسية القائمة على (ZnTe) et (ZnTe :O) وهدفنا من هذه الدراسة هو تحسين المعلمات الفيزيائية السمك والشوائب من اجل تحقيق افضل مردود كهربائي ممكن.

**الكلمات المفتاحية:** الطاقة المتجددة ، الطاقة الشمسية، الخلايا الضوئية، المعلومة الفيزيائية، الشوائب