



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

**UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEEN**

# MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

**MASTER EN PHYSIQUE**

Spécialité : Physique Computationnelle.

Par :

**M<sup>elle</sup> BENSAHLI Amel**

Sur le thème

---

## **Modélisation et résolution numérique de la caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque de nouvelle génération à base de nouveaux alliages semiconducteurs**

---

Soutenue publiquement le 25/06/2019 devant le jury composé de :

|                       |                                      |              |
|-----------------------|--------------------------------------|--------------|
| Mr AMARA Soufiane     | Professeur à l'Université de Tlemcen | Président    |
| Mme MAMOUN Souheyla   | MCB à l'Université de Tlemcen        | Encadreur    |
| Mr MERAD Abdelkrim    | Professeur à l'Université de Tlemcen | Co-Encadreur |
| Mme BENYELLES Souhila | MCB à l'Université de Tlemcen        | Examinatrice |

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## **Remerciement :**

Au nom de DIEU le Clément et le Miséricordieux Louange à **ALLAH** le Tout-puissant.

En tout premier lieu, je remercie le bon DIEU, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Le travail présenté dans ce projet de fin d'étude a été réalisé au Laboratoire d'Automatique de Tlemcen (LAT) et au Laboratoire de Physique Théorique, département de physique, Faculté des Sciences, Université de Tlemcen.

Je veux m'adresser à ma directrice de mémoire Madame *MAMOUN Souheyla*, Maître de Conférences à l'Université de Tlemcen, pour son bon encadrement, Vifs remerciements.

Un grand merci à mon co-encadreur *Mr MERAD Elhasanaine Abdelkrim*, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour sa disponibilité malgré son calendrier chargé, pour la confiance qu'il m'a accordé ainsi que pour ses précieux conseils qui m'ont permis de mener au bout ce travail.

Ma gratitude et mes respects à *Mr AMARA Sofiane*, Professeur à l'Université de Tlemcen, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury, Hommage respectueux.

A Madame *BENYELLES Souhila*, Maître de conférences à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté d'être membre du jury de ce mémoire, Sincères remerciement.

A *Mr BRAHMI Badr-Eddine Nabil*, *Mr CHIKAOUI Abdelhak*, *Mr CHABANE SAI Nasr-Eddine*, membres de l'équipe de formation du Master

« Physique Computationnelle » de l'Université de Tlemcen, Sincères remerciements.

Afin de n'oublier personne, nos remerciements s'adressent également à tous ceux qui nous ont aidés à la réalisation de ce modeste mémoire.

### **Hommage :**

Bien que les fleurs se fanent meurent et disparaissent, leurs précieux parfums demeurent toujours.

Un jour, notre cher professeur Tayeb Benouaz mort, mais il nous a jamais quitté, il vit au plus profond de nos cœurs.

## **Dédicace:**

Je dédie ce modeste travail :

***A mon très cher père :***

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu consenti pour mon éducation et ma formation.

***A ma très chère mère :***

Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

***Que dieu me les gardes.***

A mes chères sœurs Maghnia et Hadjer et mon petit neveu Aissam.

A mes chères frères Hamza et Rayan .

A toutes mes amies que j'ai eu le chance d'avoir à mes cotés, et qui m'on apporté leur aide en particulier Mohamedi Meriem et Radjai Aicha.

A toutes ma famille (BENSAHLI et DAHMANE).



# Liste des symboles

| Symbole      | Description                                                 | Unité             |
|--------------|-------------------------------------------------------------|-------------------|
| $\rho$       | Résistivité du matériau                                     | $\Omega\text{cm}$ |
| $n$          | Nombre d'électrons                                          |                   |
| $p$          | Nombre de proton                                            |                   |
| $E_c$        | Énergie de la bande de conduction                           | $\text{eV}$       |
| $E_v$        | Énergie de la bande de valence                              | $\text{eV}$       |
| $E_g$        | Énergie de gap                                              | $\text{eV}$       |
| $B^-$        | Atome d'accepteur négative                                  |                   |
| $e^-$        | Charge de l'électron ( $-1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$ ) | $\text{C}$        |
| $h$          | Constant de Planck ( $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ )     | $\text{J s}$      |
| $\nu$        | Fréquence d'onde                                            |                   |
| $\alpha$     | Coefficient d'absorption                                    |                   |
| $E_{ph}$     | Energie de photon                                           | $\text{eV}$       |
| $\lambda$    | Langueur d'onde                                             | $\text{m}$        |
| $b$          | bowing                                                      |                   |
| $J$          | densité                                                     | $\text{mA/m}^2$   |
| $x$          | fraction molaire                                            |                   |
| $d_1$        | Diode 1                                                     |                   |
| $d_2$        | Diode 2                                                     |                   |
| $E$          | Eclairement ou flux incident                                | $\text{W/m}^2$    |
| $FF$         | Facteur de forme                                            | $\%$              |
| $I$          | Courant fournit par la cellule photovoltaïque               | $\text{A}$        |
| $I_{cc}$     | Courant de court-circuit                                    | $\text{A}$        |
| $I_D$        | Courant inverse de diode                                    |                   |
| $\varphi_0$  | Eclairement de photons incidents                            | $\text{A}$        |
| $S(\lambda)$ | Sensibilité ou réponse spectral                             | $\text{A}$        |
| $I_m$        | Courant maximal                                             | $\text{A}$        |
| $I_{ph}$     | Photo-courant                                               | $\text{A}$        |
| $V_m$        | Courant qui circule dans la résistance shunt                | $\text{A}$        |
| $I_s$        | Courant inversé de saturation ou de fuite de la diode       | $\text{A}$        |
| $I_{s1}$     | Courant inversé de saturation ou de fuite de la diode 1     | $\text{A}$        |
| $I_{s2}$     | Courant inversé de saturation ou de fuite de la diode 2     | $\text{A}$        |
| $K_B$        | Constante de Boltzmann                                      | $\text{J/K}$      |
| $N$          | Indice de réfraction                                        |                   |
| $A$          | Facteur d'idéalité de la diode                              |                   |
| $I_{ph}$     | Photocourant                                                | $\text{A}$        |
| $P$          | Puissance fournit par la cellule                            | $\text{W}$        |
| $P_{inc}$    | Puissance lumineuse incidente                               | $\text{W}$        |

|           |                                      |          |
|-----------|--------------------------------------|----------|
| $P_{max}$ | Puissance maximale                   | $W$      |
| $PV$      | Photovoltaïque                       |          |
| $q$       | Charge de l'électron                 | $C$      |
| $T$       | Temperature                          | $K$      |
| $R_s$     | Résistance série                     | $\Omega$ |
| $R_{sh}$  | Résistance shunt (parallèle)         | $\Omega$ |
| $S$       | Surface de la cellule photovoltaïque | $m^2$    |
| $T$       | Température absolue                  | $K$      |
| $V$       | Tension aux bornes de la cellule     | $V$      |
| $V_{co}$  | Tension de circuit ouvert            | $V$      |
| $V_{max}$ | Tension maximale                     | $V$      |
| $V_t$     | Potentielle thermodynamique          |          |
| $\eta$    | Rendement                            | $\%$     |

# Liste des figures

---

## Chapitre I : Généralité sur les cellules photovoltaïques.

- Figure I.1 :** Comparaison entre les métaux, les semi-conducteurs et les isolants.  
**Figure I.2 :** Structure de bande d'un semi-conducteur dopé n et dopé p à  $T=0$  k et  $T=300$  k. Un électron est représenté par un cercle plein et un trou par un cercle vide.
- Figure I.3:** Jonction p-n.  
**Figure I.4 :** Le processus d'absorption.  
**Figure I.5:** Illustration d'un gap direct et d'un gap indirect.  
**Figure I.6 :** puissance spectrale du rayonnement solaire.  
**Figure I.7 :** Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.  
**Figure I.8 :** Spectre solaire.  
**Figure I.9 :** Circuit électrique de la cellule photovoltaïque.  
**Figure I.10:** Caractéristique  $I(V)$  de la cellule photovoltaïque (a) : dans l'obscurité et (b) : sous éclairnement.  
**Figure I.11 :** Meilleurs rendements de conversion mesurés en laboratoire pour les principaux types des cellules photovoltaïques.

## Chapitre II : Notions sur la modélisation de la cellule solaire.

- Figure II.1:** Schéma bloc d'une cellule solaire.  
**Figure II .2 :** Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale.  
**Figure II. 3 :** Schéma équivalent d'une cellule solaire à une diode.  
**Figure II. 4 :** Schéma équivalent d'une cellule solaire à une diode avec résistance série  $R_s$   
**Figure II.5:** Caractéristique  $I(V)$  d'un module pour différentes valeurs de résistance série.  
**Figure II.6 :** Schéma équivalent d'une cellule solaire à deux diodes.

## Chapitre III : Etas de l'art de la cellule solaire CZT

- Figure III. 1 :** Structure cristalline zinc blende de CdZnTe avec 25% du zinc. Cd (violet), Zn (bleu), Te (vert)
- Figure III. 2 :** (a) Micrographie XRD de pristine et le CdZnTe dans différentes atmosphères.  
(b) Image SEM avec EDAX de spectre des films traités dans Ar+O<sub>2</sub>
- Figure III. 3 :** (a) : L'absorbance et (b) : la transmittance du CdZnTe primitif et sous différentes atmosphères
- Figure III 4 :** Estimation de l'énergie du gap du CdZnTe à travers les courbes de Tauc
- Figure III.5 :** (a) Schéma de la cellule solaire CZT fabriquée.  
(b) Diagramme de l'énergie de gap correspondant à la cellule solaire.
- Figure III.6 :** Mesures électriques de la cellule solaire CZT. (a) Caractéristique I-V, (b) Caractéristique P-V

## Chapitre IV : Détermination théorique des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire CZT

- Figure IV. 1 :** Evolution de la tension  $V_{co}$  en fonction de l'énergie du gap  $E_g$  pour les alliages  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ .
- Figure IV.2 :** Caractéristiques I-V pour CdTe et ZnTe .
- Figure IV.3 :** Rendement de la cellule solaire  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  en fonction de l'énergie de gap
- Figure IV.4 :** La caractéristique I-V théorique de la cellule solaire CZT pour les différentes atmosphères.
- Figure IV.5 :** La caractéristique P-V de la cellule solaire CZT pour les différentes atmosphères.
- Figure IV.6 :** Facteur de Forme en fonction de la tension de la cellule solaire CZT Pour les différentes atmosphères.
- Figure IV.7 :** Le rendement théorique de la cellule solaire CZT pour les différentes atmosphères.

# Liste des tableaux :

---

## Chapitre I : Généralité sur les cellules photovoltaïques.

**Tableau I. 1 :** Les domaines spectraux du rayonnement solaire.

## Chapitre IV : Détermination théorique des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire CZT

**Tableau IV.1 :** Les paramètres physiques de CdTe et ZnTe utilisés dans le calcul.

**Tableau IV.2 :** Les valeurs calculées de courant de saturation de la cellule solaire CZT dans plusieurs atmosphères

**Tableau IV.3 :** Puissance maximale de la cellule solaire CZT sous différentes atmosphères

**Tableau IV.4 :** Les paramètres électriques de la cellule solaire CZT.

**Tableau IV.5 :** Le rendement théorique de la cellule solaire CZT comparé à l'expérience.

## Sommaire :

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| Introduction générale ..... | I  |
| Références .....            | IV |

## Chapitre I: Généralité sur les cellules photovoltaïques.....1

### I.1.Introduction ..... 2

### I.2. Notions sur les semi-conducteurs ..... 3

#### I.2.1. Semi-conducteurs ..... 3

##### *I.2.1.1. Semi –conducteur intrinsèque (ou pur) ..... 4*

##### *I.2.1.2. Semi –conducteur extrinsèque (dopé) ..... 4*

#### I.2.2. Dopage de type n (donneur) ..... 4

#### I.2 .3. Dopage de type p (accepteur) ..... 5

#### I.2.4. Jonction p-n ..... 6

#### I.2.5. Propriétés optiques ..... 7

##### I.2.5.1. Absorption des photons ..... 8

###### I.2.5.1.1 Absorption dans un semi-conducteur à gap direct ..... 9

###### I.2.5.1.2. Absorption dans un semi-conducteur à gap indirect ..... 9

##### I.2.5.2. Coefficient d'absorption ..... 10

##### I .2.5.3 . Indice de réfraction ..... 11

### I.3 .Notions sur les cellules photovoltaïques ..... 12

#### I.3.1. Rayonnement solaire ..... 12

##### I.3.2.1. Cellule photovoltaïque (PV) ..... 13

#### I.3.3. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ..... 13

#### I.3.4. Spectre solaire ..... 14

#### I.3.5. Générations des cellules solaires ..... 15

- 1<sup>ère</sup> génération : Cellules cristallines ..... 15

- 2<sup>ème</sup> génération : Cellules en couches minces ..... 16

- 3<sup>ème</sup> génération : Cellules complexes <sup>(1)</sup> ..... 16

### I.4 .Notions sur la physique des cellules photovoltaïques ..... 17

#### I.4.1. Les paramètres d'une cellule photovoltaïque ..... 17

## Sommaire

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| I.4.1.1.Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque .....             | 17 |
| I.4.1.2.Caractéristique I-V dans une cellule photovoltaïque .....        | 18 |
| I.4.1.3. Tension à circuit ouvert ( $V_{CO}$ ) .....                     | 20 |
| I.4.1.3. Courant de court circuit ( $I_{CC}$ ) .....                     | 20 |
| I.4.1.3. Puissance .....                                                 | 20 |
| I.4.1.4. Facteur de forme FF .....                                       | 21 |
| I.4.1.5. Rendement de conversion photovoltaïque $\eta$ .....             | 21 |
| I.4.1.6. Rendement quantique .....                                       | 21 |
| Conclusion .....                                                         | 24 |
| Références .....                                                         | 25 |
| <br>                                                                     |    |
| Chapitre II: Notions sur la modélisation de la cellule solaire .....     | 27 |
| Introduction.....                                                        | 28 |
| II.2. Modélisation des cellules photovoltaïque .....                     | 29 |
| II.2.1 : Modèle d'une cellule solaire idéale .....                       | 30 |
| II.2.2. Modèle d'une cellule solaire réelle .....                        | 31 |
| II.2.2.1. Modèle à une diode (à une seule exponentielle).....            | 31 |
| II.2.2.2. Modèle a une diode avec 4 paramètres ( $I_{sh} = 0$ ).....     | 33 |
| II.2.2.3. Modèle à deux diodes (à deux exponentielles) .....             | 34 |
| Conclusion .....                                                         | 36 |
| Références .....                                                         | 37 |
| <br>                                                                     |    |
| Chapitre III: Etat de l'art de la cellule solaire à base de CdZnTe.....  | 38 |
| III.1.Introduction .....                                                 | 39 |
| III.2.Quelques propriétés physiques principales du matériau CdZnTe ..... | 40 |
| • CdTe.....                                                              | 40 |
| • ZnTe .....                                                             | 40 |
| CdZnTe .....                                                             | 40 |
| III.3 Elaboration du CdZnTe .....                                        | 41 |
| III.4 Description de la méthode d'élaboration du CdZnTe .....            | 42 |
| • Préparation du substrat .....                                          | 42 |
| • Préparation de la chambre de dépôt .....                               | 42 |

## Sommaire

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| • Dépôt du matériau CdZnTe .....                                                                      | 42 |
| III.5 Description des caractérisations des échantillons de CdZnTe .....                               | 43 |
| III.6 Optimisation des propriétés microstructurales .....                                             | 43 |
| III.7 Optimisation des propriétés optiques .....                                                      | 44 |
| III.8 Fabrication de la cellule solaire CZT .....                                                     | 46 |
| III.9 Mesures électriques effectuées .....                                                            | 47 |
| Conclusion .....                                                                                      | 48 |
| Références .....                                                                                      | 49 |
|                                                                                                       |    |
| Chapitre IV:Détermination théorique des paramètres photovoltaïques de la cellule<br>solaire CZT. .... | 50 |
| IV.1 Introduction .....                                                                               | 51 |
| IV.3 : Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire CZT en couches minces .....                   | 56 |
| IV.3.1 : Caractéristique I-V .....                                                                    | 57 |
| IV.3.2 : Puissance P .....                                                                            | 59 |
| IV.3.3 : Facteur de Forme FF .....                                                                    | 61 |
| IV.3.4 : Rendement $\eta$ .....                                                                       | 62 |
| Références .....                                                                                      | 65 |
|                                                                                                       |    |
| Conclusion.....                                                                                       | 66 |
| Perspectives .....                                                                                    | 68 |

### Introduction générale :

L'énergie est présente partout dans notre vie quotidienne. Elle est indispensable pour toutes nos activités, Dans l'industrie, le transport, l'agriculture, la communication ...etc. Egalement, elle est le pilier de l'économie actuel.

Ses sources sont diversifiées au cours du temps, pour satisfaire les exigences des consommateurs et de l'industrie. La croissance démographique mondiale demande d'augmenter ces ressources énergétiques.

Présentement, plus de 85% d'énergie utilisée dans le monde provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon) dites « énergies non renouvelables », qui sont des ressources limités d'une part et leur combustion est polluante d'autre part. Par conséquent, l'énergie nucléaire est une alternative aux énergies fossiles, mais, elle peut amener à des conséquences dangereuses, par exemple : (accident de Fukushima et Tchernobyl), aussi elle est nocive à la santé.

La réduction des ressources énergétiques disponibles en combustibles fossiles classiques nécessite de trouver des solutions durables et des ressources énergétiques économiques et abordables.

Une des solutions prometteuse est de développer d'autres formes d'énergies dite « énergies renouvelables ». Ces énergies sont d'origine naturelle, non polluante, inépuisable. Parmi ces ressources renouvelables, il y a l'énergie solaire.

L'énergie solaire est l'une des meilleures ressources énergétiques librement disponibles, car elle provient directement du soleil. Une partie de ces ressources conventionnelles est le photovoltaïque. C'est une ressource potentielle énorme qui dépend essentiellement de la performance de la cellule photovoltaïque. La technologie de ces cellules solaires la plus commune est celle basée sur le silicium cristallin, mais son stock est limité et son coût élevé n'arrive pas à être réduit.

L'amélioration de l'efficacité des cellules solaires, dépend de l'amélioration des matériaux semiconducteurs existants et le développement de nouveaux matériaux.

Bien que, l'étude des matériaux semiconducteurs ait commencé au début de XIXe siècle [1], la limitation du rendement rencontré dans les cellules solaires à base de silicium, nécessite de trouver des solutions. L'une de ces solutions est les cellules solaires multi-jonctions (tandem)

qui représente un empilement de cellules solaires dans un ordre décroissant du gap dont chaque cellule exploite une partie du spectre adapté à son gap [2].

Cette catégorie des cellules solaires se base premièrement sur trois matériaux principaux (le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) , le tellure de cadmium (CdTe) et le di-séléniure de cuivre d'indium (CIGS) [3].

Un peu plus loin, le CdZnTe présente un candidat prometteur et concurrent pour les applications photovoltaïques. C'est un mélange de Tellure de Cadmium (CdTe) et le Tellure de Zinc (ZnTe), sa bande optique est entre [1.45, 2.26] eV [4].

Le présent travail consiste à traiter essentiellement par la modélisation et la résolution numérique de la caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque de nouvelle génération à base de nouveaux alliages semi-conducteurs. L'objectif principale de ce travail est de développer un programme numérique qui permet de déterminer la caractéristique I-V et déduire les paramètres photovoltaïques (la tension de circuit ouvert, le facteur de forme, le rendement,...) de la cellule solaire en fonction de la composition chimique du dopant et aussi sous différentes atmosphères.

Le mémoire est constitué de quatre chapitres organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présenterons les notions générales sur les semi-conducteurs et leurs propriétés optiques et les cellules photovoltaïques et leur principe de fonctionnement.

Le deuxième chapitre donnera une description générale sur la modélisation des cellules solaires, les modèles utilisés avec leurs circuits équivalents, ainsi que les équations nécessaires appropriées à chaque modèle.

Dans le chapitre trois, nous présenterons l'état de l'art des cellules solaires à base de CdZnTe (CZT) avec une présentation bibliographique de deux travaux différents afin d'illustrer l'importance de ces cellules. Le premier est un travail théorique sortie en 2007 et intitulé « *Theoretical determination of the efficiency of  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  single solar cell materials* » par : M Benganem et A E Merad,[5] et le deuxième est un travail expérimental sortie en 2019 et intitulé « *Towards CdZnTe solar cells: An evolution to post-treatment annealing atmosphere* » par : S. Chandra, A.K. Dea, M.S. Dhakab.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons notre résolution numérique basée sur notre programme écrit sous python, de la caractéristique I-V de la cellule solaire de type CZT. Nous

## Introduction générale

déterminerons la limite théorique maximale du rendement de cette cellule solaire sous l'effet de différentes atmosphères.

Le document se terminera par une conclusion générale et des perspectives.

## Références:

---

[1] : S M SZE and M K Lee, « Semiconducteurs devices , physics and technology »,3rd edition john and wiley & sons, 2012.

[2] : A E Mahfoud « Modélisation des cellules solaires tandem à couche minces et à haute rendement» univ Setif 1, thèse doctorat-page1 (2015).

[3] : M MELOUAH et S BAKHTI « Simulation d'une c.s à base de  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S,Se})_4$  »,mémoire de master univ-Kasdi Merbah Ouargla (2016).

[4] : C Chander, A K De, M S Dhaka "Towards CdZnTe solar cells: An evolution to post-treatment annealing atmosphere" Solar Energy **179**, 757-761 (2018)

[5] : M Benghanem, A E Merad "Theoretical determination of the efficiency of  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$  single solar cell materials", Internal Report, UNESCO-IAEA-ICTP, 1-8, Miramare –Trieste, (2007)

# Chapitre I:

## Généralités sur les cellules photovoltaïques.

## I.1.Introduction :

Le soleil est une source d'énergie quasiment inépuisable, qui envoie chaque jour à la terre un rayonnement solaire, que l'on peut convertir directement en électricité grâce à l'effet photovoltaïque, à travers des modules photovoltaïques formés par des cellules solaires. Ces dernières sont basées sur des semi-conducteurs. Dans ce chapitre nous présentons de façon générale, les différentes notions indispensables à la compréhension des semi-conducteurs et le photovoltaïque. Nous expliquons par la suite l'effet photovoltaïque et le fonctionnement des cellules solaires ainsi le schéma équivalent de système électrique et leurs paramètres.

### I.2. Notions sur les semi-conducteurs :

Si on classe les éléments chimiques à l'état solides en fonction de leurs résistivités  $\rho$  à température ambiante, on distingue deux groupes :

1<sup>er</sup> groupe : **Les conducteurs.**

Les conducteurs sont des matériaux qui conduisent couramment le courant électrique, leurs résistivité à température ambiante entre  $10^{-6} \Omega cm$  et  $10^{-4} \Omega cm$  [1]. Les meilleurs conducteurs sont des matériaux formés par un seul élément comme : l'argent, le cuivre et l'acier.

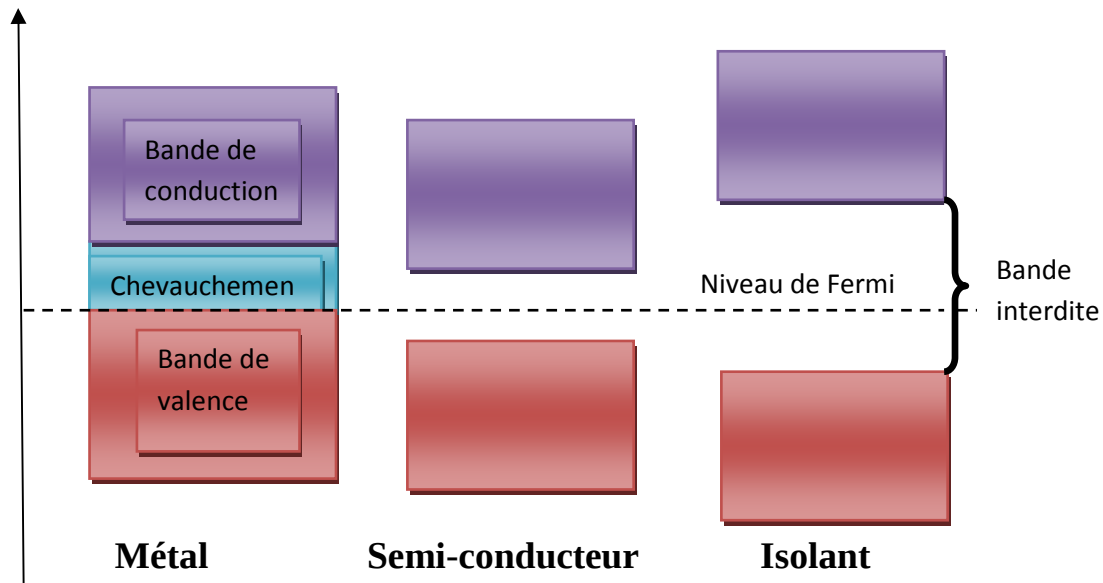
2<sup>ème</sup> groupe : **les isolants.**

Contrairement aux matériaux conducteurs, les isolants ne conduisent pas le courant électrique comme le papier, le verre et le bois. Leurs résistivité à température ambiante est typiquement comprise entre  $10^{11} \Omega cm$  et  $10^{19} \Omega cm$  [1], les bons isolants sont des matériaux composés de plusieurs éléments comme la silice ( $SiO_2$ )

#### I.2.1. Semi-conducteurs :

Les semi conducteurs sont des matériaux dont leur résistivité à température ambiante se situe entre celle des conducteurs et celle des isolants, ils se comportent comme des isolants mais ils conduisent de l'électricité dès que la température augmente. La **figure 1** représente comparaison entre le métal, l'isolant et le semi-conducteur. La seule différence entre le métal et l'isolant est la largeur de la bande interdite appelée aussi le gap. La largeur énergétique de ce gap est plus importante pour les isolants que pour les semi-conducteurs. C'est la distance entre le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence. La bande de valence est la dernière bande d'énergie complètement remplie d'électrons tandis que la bande de conduction est la première bande d'énergie entièrement vide d'électrons.

Quand il y'a un chevauchement entre ces deux bandes (ç.-à-d. absence du gap), on sera devant le cas d'un métal (conducteur).



**Figure I.1 :** Comparaison entre les métaux, les semi-conducteurs et les isolants.

On distingue deux catégories des semi-conducteurs :

### ***I.2.1.1. Semi –conducteur intrinsèque (ou pur) :***

C'est le cas où le nombre des électrons  $n$  dans la bande de valence égale au nombre des trous  $p$  dans la bande de conduction, il n'y a aucun atome dopant.

### ***I.2.1.2. Semi –conducteur extrinsèque (dopé) :***

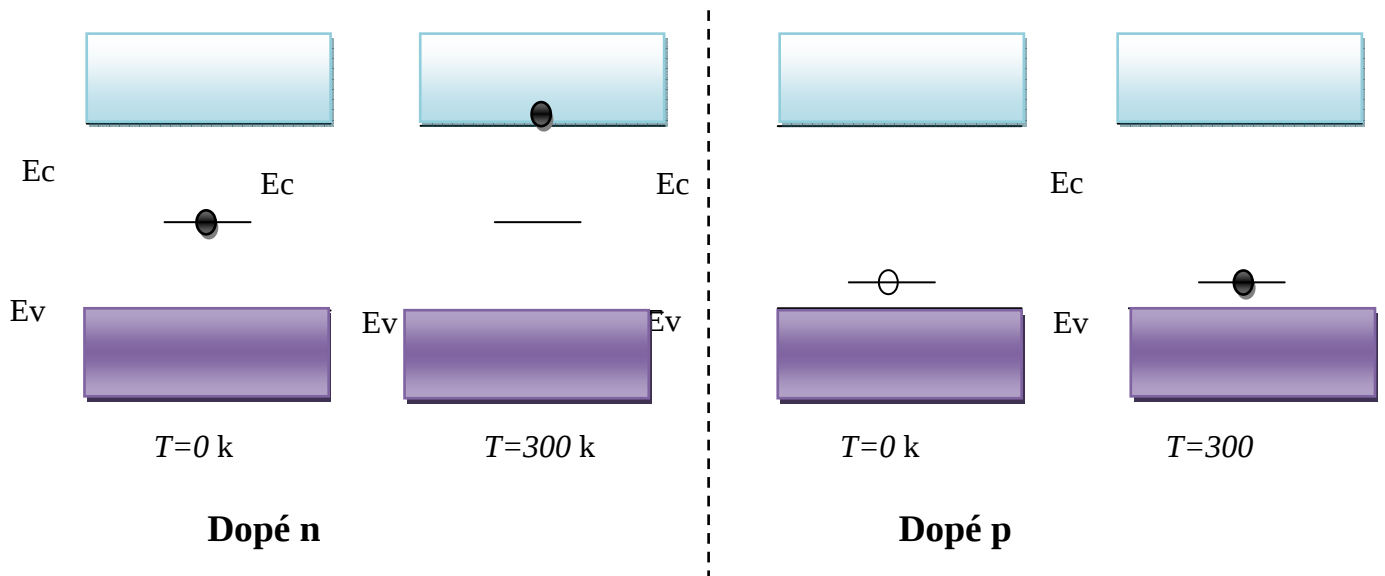
On l'obtient lorsqu'on peut ajouter à un semi-conducteur pur des faibles quantités d'atomes ou bien des impuretés choisies intelligemment. Selon la nature des atomes ajoutés et lorsque le nombre des électrons devient supérieur au nombre des trous, cela signifie qu'il y'a un excès des électrons et le dopage est de type  $n$ , sinon le dopage est de type  $p$ .

### **I.2.2. Dopage de type n (donneur) :**

Supposons que nous ayons remplacé dans un cristal de silicium, un atome de silicium par un atome d'arsenic. Ce dernier possède 5 électrons de valence alors que le silicium n'en possède que 4. Cet électron supplémentaire est sur un niveau d'énergie, situé dans la bande interdite, placé à  $54\text{ meV}$  au dessous du minimum de la bande de conduction " $E_c$ ", (figure 2). C'est une orbitale localisée au voisinage de l'atome d'arsenic qui n'est pas délocalisée dans tout le cristal comme c'est le cas des bandes d'énergie. Mais, comme ce niveau d'énergie est situé à  $54\text{ meV}$  au dessous de la bande de conduction, l'électron de ce niveau passe très vite dans la bande de conduction par excitation thermique. Il participe donc à la conduction dans

## Chapitre I : Généralités sur les cellules photovoltaïques.

le cristal. Le dopage est qualifié pour cette raison de *dopage de type n*. Le dopant, dans cet exemple d'arsenic, se comporte comme un donneur d'électrons et le semi-conducteur obtenu est dit de *type n*.



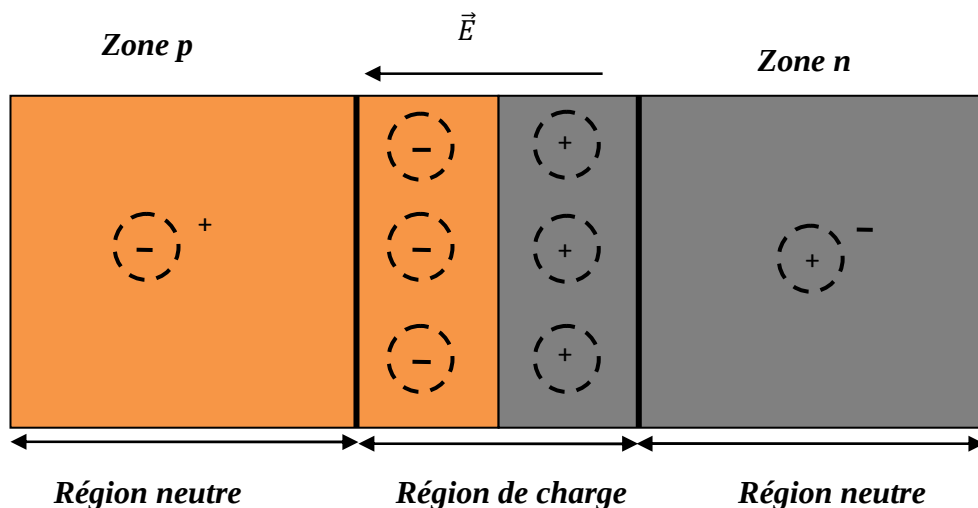
**Figure I.2 :** Structure de bande d'un semi-conducteur dopé n et dopé p à  $T=0\text{ K}$  et  $T=300\text{ K}$ . Un électron est représenté par un cercle plein et un trou par un cercle vide.

### I.2 .3. Dopage de type p (accepteur) :

Considérons le silicium et dopons-le avec des atomes de bore (élément de la colonne III). Comme le bore a un électron de valence de moins que le silicium, il se comporte comme un *accepteur d'électrons*. Une orbitale vide, localisée au voisinage de l'atome de bore se trouve à environ  $50\text{ meV}$  au dessus du maximum de la bande de valence " $E_V$ " (figure 2). Compte tenu de la proximité de la bande de valence, un électron de celle-ci va très vite occuper ce niveau d'énergie par excitation thermique. Il en résulte un trou dans la bande de valence qui va contribuer au processus de conduction électrique. La création d'un trou laisse un atome d'accepteur négatif,  $B^-$ , de charge  $-e$ , lié au réseau. Le dopage par des atomes accepteurs d'électrons est dit de *type p* [3].

### I.2.4. Jonction p-n :

Elle représente la mise en contact d'une surface de cristal de semi-conducteur dopé p avec une surface de cristal de semi-conducteur dopé n. Les trous dans la région de type p, se diffusent vers la région de type n et vice versa, comme il est montré dans la figure ci-dessous.



**Figure I.3 :** Jonction p-n

La diffusion des porteurs libres part et d'autre de la jonction fait apparaître une charge d'espace résultant de la présence des atomes des donneurs et accepteurs ionisés, dont ils ne sont plus intégralement compensés par celles des porteurs libres[4].

Lorsque le matériau semi-conducteur est le même pour les deux zones dopées, cette jonction est appelée homojonction, quand les matériaux sont différents on parle d'hétérojonction.

La jonction p-n a comme objectif de créer un champ électrique à l'intérieur du semi-conducteur, aussi elle peut fonctionner comme une diode. Il suffit donc de relier les deux bornes avec une tension dans le but de produire un courant électrique continue. Cette réalisation est valable quand la lumière existe.

### I.2.5. Propriétés optiques :

Les semi-conducteurs sont caractérisés par leur bande interdite ou gap. La nature du gap joue un rôle fondamental dans l'interaction du semi-conducteur avec un rayonnement électromagnétique.

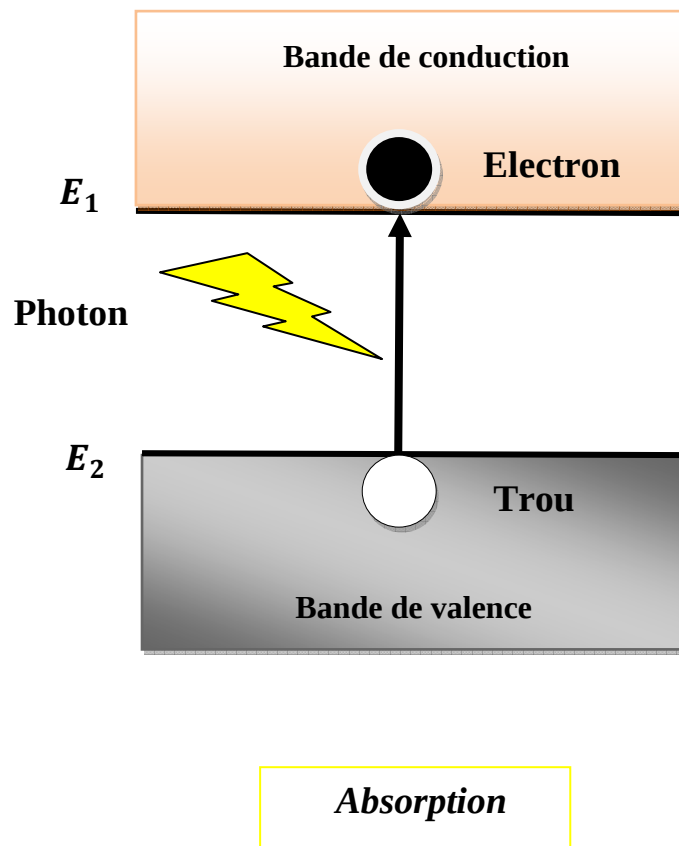
Les photons peuvent interagir avec les électrons des semi-conducteurs, ils peuvent être aussi créés lors de l'annihilation de paires électrons-trou. Ces propriétés permettent d'utiliser ces matériaux comme détecteurs de rayonnement ou comme sources lumineuses. L'interaction de la lumière (onde électromagnétique) avec le semiconducteur (électrons du semiconducteur) peut expliquer clairement les propriétés optiques de semiconducteur, à savoir : La fonction diélectrique, l'absorption et l'indice de réfraction. Ces propriétés trouvent leurs applications dans les domaines tel que l'électro-optique, l'optoélectronique et le photonique.

On classe les interactions du rayonnement avec les électrons d'un semi-conducteur en trois catégories :

- L'absorption radiative : dans laquelle un électron de la bande de valence passe dans la bande de conduction et le photon incident est absorbé.
- L'émission spontanée : dans laquelle un électron de la bande de conduction s'annihile avec un trou de la bande de valence en émettant un photon.
- L'émission stimulée : dans laquelle un photon induit la transition d'un électron de la bande de conduction vers un état vide de la bande de valence avec l'émission d'un photon de même énergie et de même phase [3].

### I.2.5.1. Absorption des photons :

Lorsque le photon absorbé provoque un saut d'électron d'un état occupé de la bande de valence vers un état vide de la bande conduction, c'est-à-dire, si cette énergie est au moins égale à celle de la largeur de la bande interdite, on dit qu'il y a absorption. Le phénomène est illustré sur la figure ci-dessous.



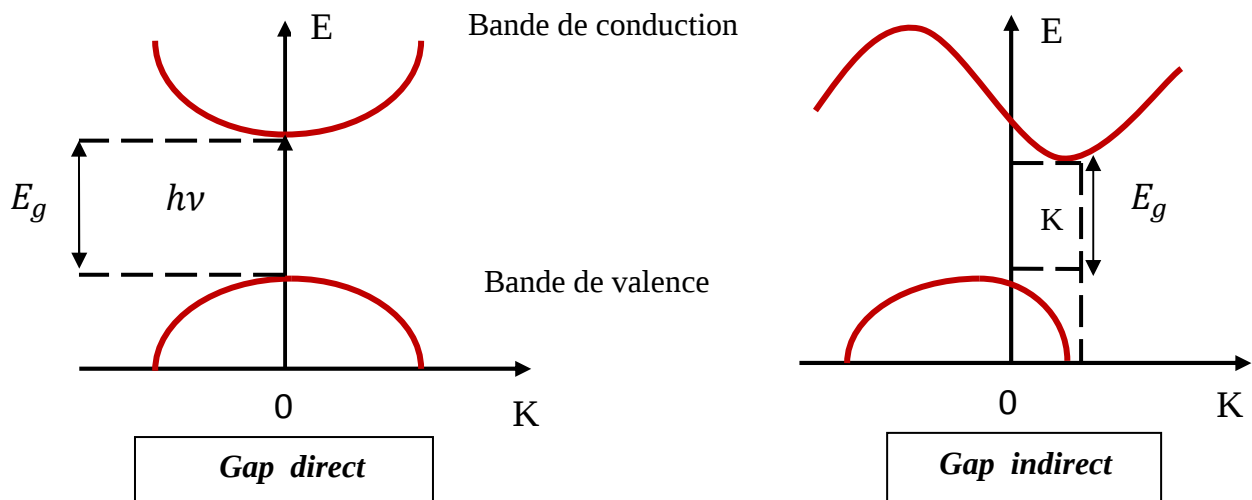
**Figure I.4 :** Le processus d'absorption.

### I.2.5.1.1 Absorption dans un semi-conducteur à gap direct :

Les semi-conducteurs à gap direct sont ceux, dans lesquels le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence ont le même vecteur d'onde  $\mathbf{K}$ . Les transitions inter-bandes se représentent verticalement, donc elles sont radiatives. Elles sont appelées transitions directs.

### I.2.5.1.2. Absorption dans un semi-conducteur à gap indirect :

Pour les semi-conducteurs à gap indirect, la largeur minimale de la bande interdite fait apparaître des électrons et des trous avec des vecteurs d'onde  $\mathbf{K}$  différents. Les transitions sont donc indirectes résultantes d'un vecteur phonon, traduisant la variation dans le vecteur d'onde  $\mathbf{K}$ , en addition au vecteur photon, traduisant la transition directe. Les mesures d'absorption optique permettent de déterminer l'énergie de gap ainsi celle des états localisés dans la bande interdite située entre la bande de valence et la bande de conduction [4,5].



**Figure I.5 :** Illustration d'un gap direct et d'un gap indirect

### I.2.5.2. Coefficient d'absorption :

L'excitation d'un électron directement de la bande de valence vers la bande de conduction, résulte de l'échange d'énergie est appelée absorption optique.

L'interaction entre les photons et les électrons se traduit par le coefficient d'absorption. Il est relié au nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur de matériau en fonction de la longueur d'onde. L'intensité de l'onde électromagnétique traversant le semi-conducteur est donnée par [6] :

$$I = I_0 e^{-\alpha Z} \quad (I.1)$$

Où :

$\alpha$  : Le coefficient d'absorption.

$I_0$  : L'intensité de faisceau incident.

$Z$  : La profondeur.

#### **Cas d'un semi-conducteur à gap direct :**

Le coefficient d'absorption relatif à l'absorption d'un photon :

$$\alpha(h\nu) = A^* \sqrt{(h\nu - E_g)} \quad (I.2)$$

$A^*$  : est une constante.

#### **Cas d'un semi-conducteur à gap indirect :**

Le coefficient d'absorption relatif à l'absorption d'un photon :

$$\alpha_a(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g + E_{ph})^2}{\exp\left(\frac{E_{ph}}{KT} - 1\right)} \quad (I.3)$$

Le coefficient d'absorption relatif à l'émission d'un photon :

$$\alpha_e(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g + E_{ph})^2}{1 - \exp\left(\frac{E_{ph}}{KT}\right)} \quad (I.4)$$

### I .2.5.3 . Indice de réfraction :

Les semi-conducteurs sont aussi des matériaux dits optiques au sens où ils sont dotés d'un indice de réfraction  $n$  spécifique. Ce dernier dépend du type du semiconducteur utilisé, qu'il soit monocristallin, poly-cristallin ou amorphe, et du taux d'impuretés impliquées. En général, l'indice de réfraction est lié au gap énergétique du semiconducteur. Plus le gap est grand, plus l'indice est petit [7][10].

L'estimation de ce paramètre est importante pour les guides d'ondes optiques dans les structures optoélectroniques comme les diodes lasers à hétérojonction, les amplificateurs optiques et les fibres optiques [8].

L'expression de l'indice de réfraction est donnée par la formule suivante [11]:

$$n = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} + \varepsilon_1} \quad (\text{I.5})$$

$\varepsilon_1$  : La composante réelle de la constante diélectrique complexe  $\varepsilon^*$ .

$\varepsilon_2$  : La composante imaginaire de la constante diélectrique complexe  $\varepsilon^*$ .

Où :

$\varepsilon^*$  : La constante diélectrique complexe est définie par la relation suivante :

$$\varepsilon^* = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \quad (\text{I.6})$$

Il existe plusieurs modèles empiriques décrivant la relation entre l'énergie de gap et l'indice de réfraction. A titre d'exemple, le modèle de Moss donné par l'expression suivante [9]:

$$n^4 = \frac{k}{E_g} \quad (\text{I.7})$$

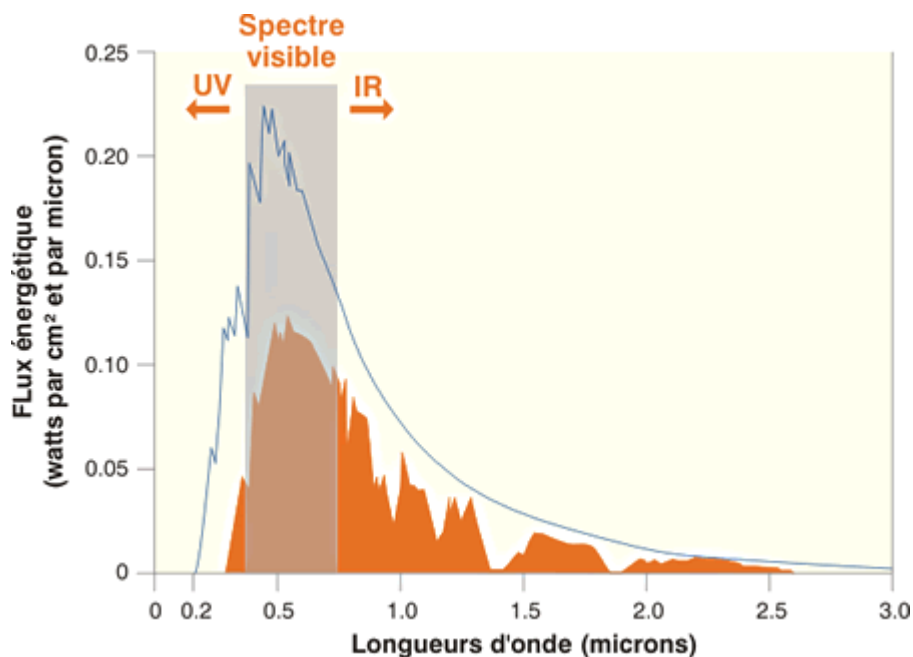
$k$  : est une constante est égale à 108 eV.

### I.3 .Notions sur les cellules photovoltaïques :

#### I.3.1. Rayonnement solaire :

Le soleil est l'étoile centrale de notre système solaire, c'est un réacteur à fusion nucléaire qui fonctionne depuis 5 milliards d'années. L'ensoleillement est un facteur climatique dont on doit profiter de manière active pour produire de l'énergie, qui est une énergie renouvelable et inépuisable à l'échelle humaine.

Par un processus de transformation d'hydrogène en hélium, le soleil émet ainsi d'énormes quantités d'énergie dans l'espace (sa puissance est estimée à  $63500 \text{ km/m}^2$ ). Ces radiations s'échappent dans toutes les directions à vitesse constant égale à  $300000 \text{ km/s}$ , dénommée vitesse de la lumière après avoir parcouru une distance d'environ 150 millions kilomètres sous forme des ondes électromagnétiques.



**Figure I.6 :** puissance spectrale du rayonnement solaire [11].

La figure 6 représente l'éclairement de ce rayonnement, il est défini comme un flux énergétique reçue par une surface pour une longueur d'onde donnée, il s'exprime en  $\text{Watt/cm}^2 \cdot \text{microns}$ . Avec sa température d'émission de  $5500^\circ\text{C}$ , le soleil rayonne la plus grande partie de son énergie dans les hautes fréquences, la lumière visible représente 46% de l'énergie émise par le soleil. Cependant, 49% du rayonnement se situe au delà du rouge

visible dans l'infrarouge, le reste, pour l'ultraviolet qui représente l'ensemble des radiations de longueur d'onde inférieure à celle de l'extrémité violette du spectre visible [12].

### ***I.3.2.Effet photovoltaïque :***

L'effet photovoltaïque est un processus qui permet de générer du courant électrique continu mesuré en watt ou kilowatt à travers l'absorption d'un rayonnement solaire. Ceci se produit grâce aux cellules photovoltaïques ou bien cellules solaires, lorsqu'elles sont éclairées par des photons. Cet effet est découvert par le physicien français « Edmond Bequerel » en 1839.

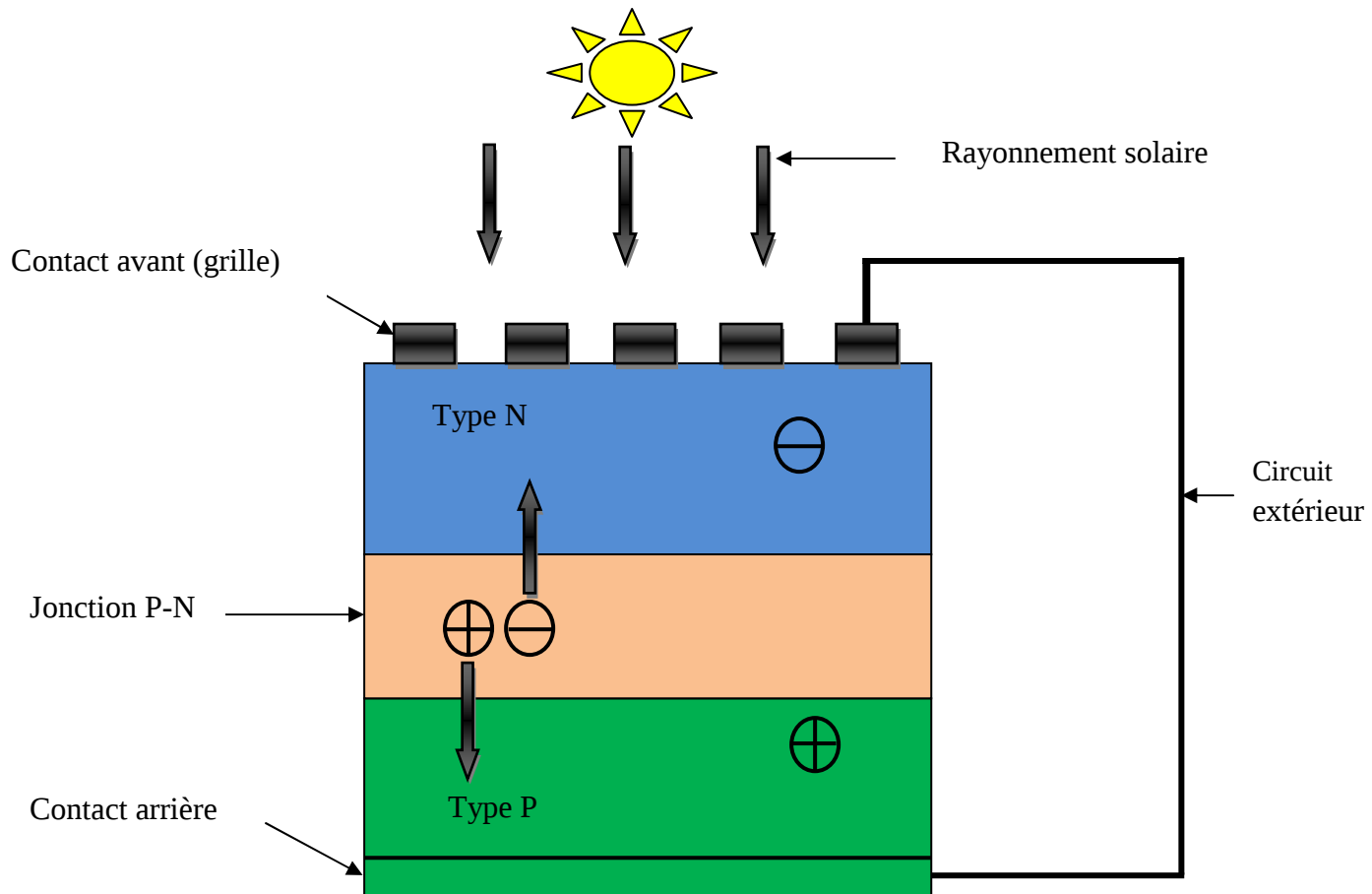
#### **I.3.2.1. Cellule photovoltaïque (PV) :**

Les cellules photovoltaïques sont des composants électroniques formés par des matériaux semi-conducteurs.

### **I.3.3. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :**

Le principe est illustré dans la figure 7. La structure la plus simple d'une cellule PV se compose de deux couches minces semi-conductrices dopées différemment, l'une est de type n et l'autre est de type p. C'est à la jonction de ces deux couches que la cellule produit de l'électricité. Cette jonction est la jonction p-n qui représente le cœur de la cellule photovoltaïque [13][14].

Lorsque la cellule photovoltaïque est exposée au rayonnement solaire, un photon incident dans la jonction p-n arrache un électron et crée ainsi une paire électron-trou libre. Sous l'effet du champ, les électrons s'accumulent dans la couche dopée n, alors que les trous s'accumulent dans la couche dopée p. Cette réaction entraîne alors une différence de répartition de charges créant ainsi une différence de potentiel électrique entre les deux couches de la cellule. C'est l'effet photovoltaïque [15]. Par conséquent le courant électrique peut circuler en connectant les bornes de la jonction à un circuit extérieur.



**Figure I.7:** Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

### I.3.4. Spectre solaire :

Le rayonnement solaire est un spectre de photons répartis sur une gamme d'énergie, ce spectre est observé en 1814 par le physicien allemand Joseph Fraunhofer.

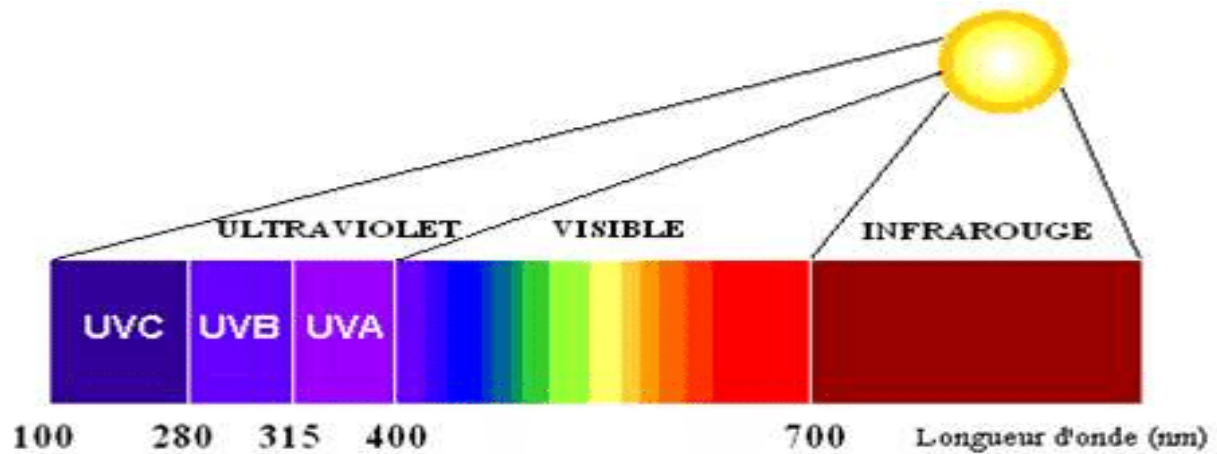
Chaque longueur d'onde peut être associée à un photon d'énergie :

$$E_{ph} = h\nu$$

Où :

$h$  : est la constante de Planck égale à  $6.62 \times 10^{-34} \text{ J.S}$ .

$\nu$  : est la fréquence correspondant à la longueur d'onde  $\lambda$  .( $\nu = \frac{1}{\lambda}, \text{S}^{-1}$ )



**Figure 8 :** Spectre solaire [16].

Le tableau suivant explique la figure 8 :

| Le domaine    | La longueur d'onde (nm) | Energie (%) |
|---------------|-------------------------|-------------|
| Ultra –Violet | 200 - 400               | 07.0        |
| Visible       | 400 - 800               | 47.0        |
| Infra – Rouge | 800 - 1400              | 45.5        |

**Tableau I.1 :** Les domaines spectraux du rayonnement solaire.

### **I.3.5. Générations des cellules solaires :**

Selon la technologie de fabrication, les cellules photovoltaïques se subdivisent en 3 générations :

#### **1<sup>ère</sup> génération : Cellules cristallines :**

Elles sont généralement formées par le silicium, constituant que d'une jonction p-n. La fabrication de ces cellules est basée sur la production des « wafers » (tranches fines) à partir de silicium pur monocristallin ou poly-cristallin.

### 2<sup>ème</sup> génération : Cellules en couches minces :

Elles sont formées par une ou plusieurs couches successives de semi-conducteurs, directement déposées par vaporisation sur un matériau support (substrat) comme le verre par exemple.

Cellule en couche mince ainsi nommée car leurs zone d'absorption ne fait que quelques micromètres d'épaisseur. Le tellure de cadmium (CdTe) , le silicium amorphe (a-Si) ,font partie de cette génération.

### 3<sup>ème</sup> génération : Cellules complexes <sup>(1)</sup>

Les cellules photovoltaïques de 3<sup>ème</sup> génération sont au sein de la recherche, elles varient selon la nature des matériaux utilisés, la complexité de leurs dispositions et les technologies utilisées:

**Cellules organiques :** La 1<sup>ère</sup> cellule photovoltaïque organique a été réalisée en 1986 par l'équipe de Tang [17], La cellule est composée alors d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteignant uniquement 0.95 % de rendement de conversion. L'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent l'avantage de pouvoir être déposée en grande surface, à grande vitesse, par des techniques d'impression classiques. Elles ouvrent également la voie aux applications légères, nomades et souples. Enfin, grâce à des coûts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient dans l'ensemble revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes.

**Cellules multi-jonctions :** Pour trouver un matériau qui absorbe l'ensemble du spectre solaire avec un fort coefficient d'absorption, des cellules multi-jonction sont introduites. Il s'agit de l'empilement de divers composés semiconducteurs, chacun optimisés pour absorber une partie du spectre solaire avec une efficacité donnée. 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. 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 [18].

**Cellules nanocristallines à colorant ou cellules de Graëtzl :** Reproduisant le phénomène de la photosynthèse, ces cellules, développées dans le début des années 90 par le Pr Graëtzl

---

<sup>(1)</sup> Il n'y a pas une définition précise pour les cellules de 3<sup>ème</sup> génération. Nous avons donné cette définition avec le mot « complexe » pour dire que c'est une cellule construite de plusieurs éléments différents.

## Chapitre I : Généralités sur les cellules photovoltaïques.

et son équipe à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, ont depuis connues de nombreux succès. Des rendements de plus de 10% certifiés ont été obtenus par Sharp grâce à ces cellules utilisant un oxyde semi-conducteur inorganique, un électrolyte et un colorant. Le principe de fonctionnement de ces cellules est le suivant : un colorant (ou sensibilisateur) est greffé sur une couche de fines particules d'oxyde métallique. Le rayonnement solaire excite ce sensibilisateur et le mettrait à un état excité, état qui lui permet de délivrer un électron directement à l'oxyde métallique, qui joue donc le rôle de cathode. Le sensibilisateur est régénéré grâce à un médiateur D, lui même régénéré à l'anode [19].

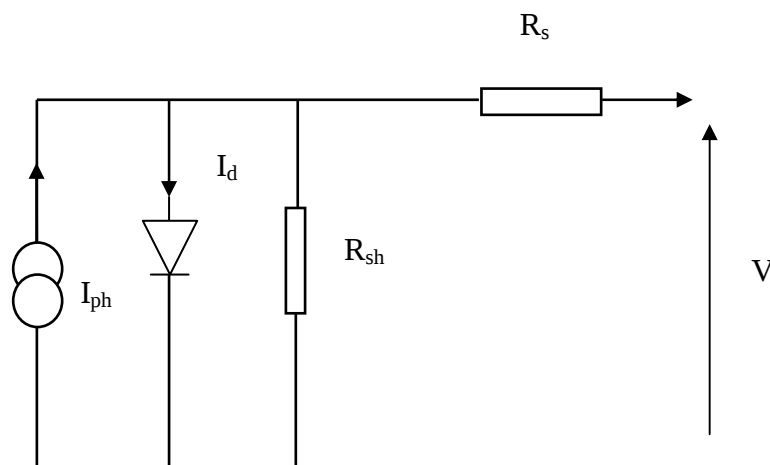
Toutes ces générations partagent le même principe de fonctionnement.

### I.4 .Notions sur la physique des cellules photovoltaïques :

#### I.4.1. Les paramètres d'une cellule photovoltaïque :

##### I.4.1.1.Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque :

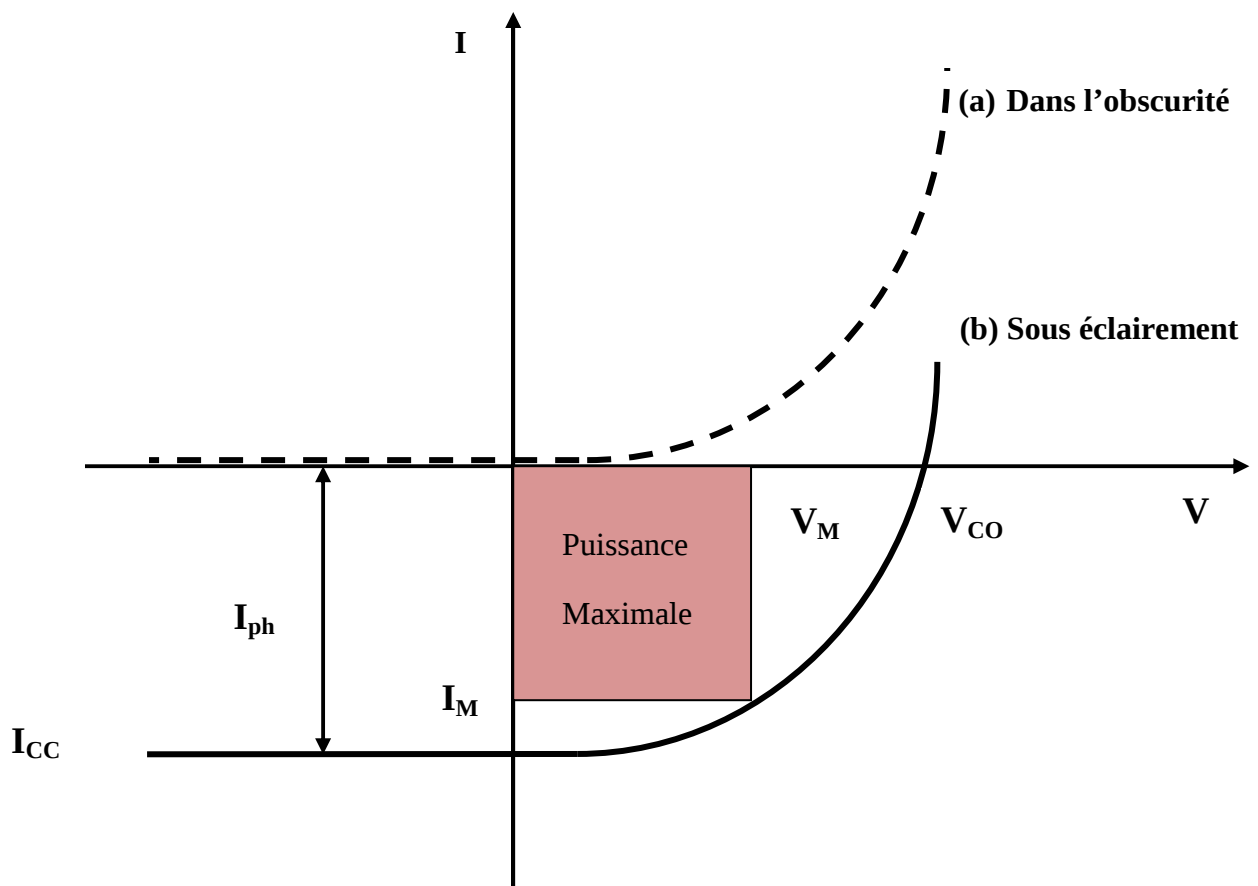
Les cellules solaires sont généralement associées en parallèle et en série. Considérons une cellule idéale soumise à un flux lumineux, son schéma électrique équivalent illustré dans la figure 9 est composé d'une diode montée en parallèle avec une source de courant, des résistances parallèles (shunt)  $R_{sh}$  et des résistances en série  $R_s$ .



**Figure I.9 :** Circuit électrique de la cellule photovoltaïque.

### I.4 .1.2.Caractéristique I-V dans une cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques possèdent deux caractéristiques courant–tension non linéaires selon que la cellule soit dans l’obscurité ou éclairée. Elles sont montrées dans la figure 10.



**Figure I.10 :** Caractéristique  $I(V)$  de la cellule photovoltaïque  
(a) : dans l’obscurité et (b) : sous éclairement.

## Chapitre I : Généralités sur les cellules photovoltaïques.

### -1<sup>ère</sup> caractéristique : cellule photovoltaïque dans l'obscurité (sans éclairement) :

Elle correspond au comportement de la diode illustrée par la courbe (a).

Le courant aux bornes d'une diode (Jonction p-n) est donné par l'équation suivante :

$$I_d = I_S(\exp(\frac{qv}{AK_BT}) - 1) \quad (\text{III-1})$$

Où :

$I_d$  : Le courant de la diode.

$I_S$  : Le courant de saturation.

A : Le facteur d'idéalité de la diode.

$q$  : La valeur absolue de la charge élémentaire égale à  $(1.602 \cdot 10^{-19} \text{C})$ .

$K_B$  : La constante de Boltzmann ( $K_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ).

T : La température absolue en kelvin.

### 2<sup>ème</sup> caractéristique : cellule photovoltaïque sous éclairement :

Dans ce cas, un courant supplémentaire inverse est ajouté, c'est le photo courant ( $I_{ph}$ ) qui est proportionnel au rayonnement solaire. Le courant total est donné par l'équation suivante :

$$I = I_S(\exp(\frac{qv}{AK_BT}) - 1) - I_{ph} \quad (\text{III.2})$$

A partir des courbes courant-tension présentées dans la figure 10, on peut tirer les différents paramètres photovoltaïques principaux caractérisant la cellule photovoltaïque et qui sont : la tension à circuit ouvert ( $V_{CO}$ ), le courant de court circuit ( $I_{CC}$ ), le facteur de forme (FF), la puissance (P) et le rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ).

### I.4.1.3. Tension à circuit ouvert ( $V_{CO}$ ) :

Graphiquement, c'est le point d'intersection avec l'axe de la tension lorsque le courant est absent dans la cellule photovoltaïque.

$$V_{CO} = \frac{kT}{q} \ln \left( 1 + \frac{I_{ph}}{I_S} \right) \quad (III.3)$$

Où  $I_S$  représente le courant de saturation donnée par :

$$I_S = \frac{I_{CC}}{\exp \left( \frac{V_{CO}}{nV_t} \right)} \quad (III.4)$$

Où,

$n$ : est le facteur d'idéalité de la diode.

$V_t$ : est le potentiel thermodynamique donné par:

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (III.5)$$

### I.4.1.3. Courant de court circuit ( $I_{CC}$ ) :

Il s'agit du courant qui se produit lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule et de la mobilité des porteurs. Il est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue [20].

$$I_{CC} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (III.6)$$

### I.4.1.3. Puissance :

C'est le produit entre le courant et la tension.

$$P = V.I \quad (III.6)$$

### I.4.1.4. Facteur de forme FF :

Le facteur de forme (en anglais : Fill Factor) est le rapport qui rend compte de la qualité de la forme de la caractéristique courant-tension. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{CC}V_{CO}} = \frac{I_m V_m}{I_{CC}V_{CO}} \quad (III.7)$$

### I.4.1.5. Rendement de conversion photovoltaïque $\eta$ :

Le rendement des cellules photovoltaïques est défini comme étant le rapport entre l'énergie maximale délivrée par la cellule  $P_{max}$  et l'énergie lumineuse incidente  $P_{inc}$ .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{CC}V_{CO}FF}{E.S} \quad (III.8)$$

où :

E : est l'éclairement ou le flux incident ( $W/m^2$ ).

S : la surface de la cellule photovoltaïque ( $m^2$ ).

L'augmentation des trois paramètres (le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert et le facteur de forme permettent d'obtenir un rendement élevé [20].

### I.4.1.6. Rendement quantique :

- **Rendement quantique externe EQE** : (external quantum efficiency) ou bien l'efficacité est le rapport du nombre de charges élémentaires collectées par la jonction p-n qui produisent le photo-courant  $I_{ph}$  au nombre de photons incidents.

Il est sans dimension et s'exprime sous la forme suivante :

$$EQE(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{q\varphi_0} = S(\lambda) \cdot \frac{E_\lambda}{q} \quad (III.9)$$

Où :

$\varphi_0$  : est le flux de photons incident ( $photons \cdot cm^{-2} \cdot S^{-1}$ )

$q$  : est la charge élémentaire ( $1.6 \cdot 10^{-19}C$ )

## Chapitre I : Généralités sur les cellules photovoltaïques.

- **Rendement quantique interne EQI :** (internal quantum efficiency) représente le rapport entre le nombre de charges élémentaires produisent par le photo-courant  $I_{ph}$  au nombre de photons absorbés. Il s'exprime sous la forme suivante :

$$EQI(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{q\varphi_0} = \frac{I_{ph}(\lambda)}{q(1-r(\lambda))\varphi_0} \quad (\text{III. 10})$$

$S(\lambda)$  : est la sensibilité ou la réponse spectrale :

Une cellule solaire peut transformer une puissance incidente en courant électrique. La sensibilité spectrale ou la réponse spectrale est le rapport entre le photo-courant génère  $I_{ph}$  et la puissance incidente  $P$ , pour chaque longueur d'onde  $\lambda$ .

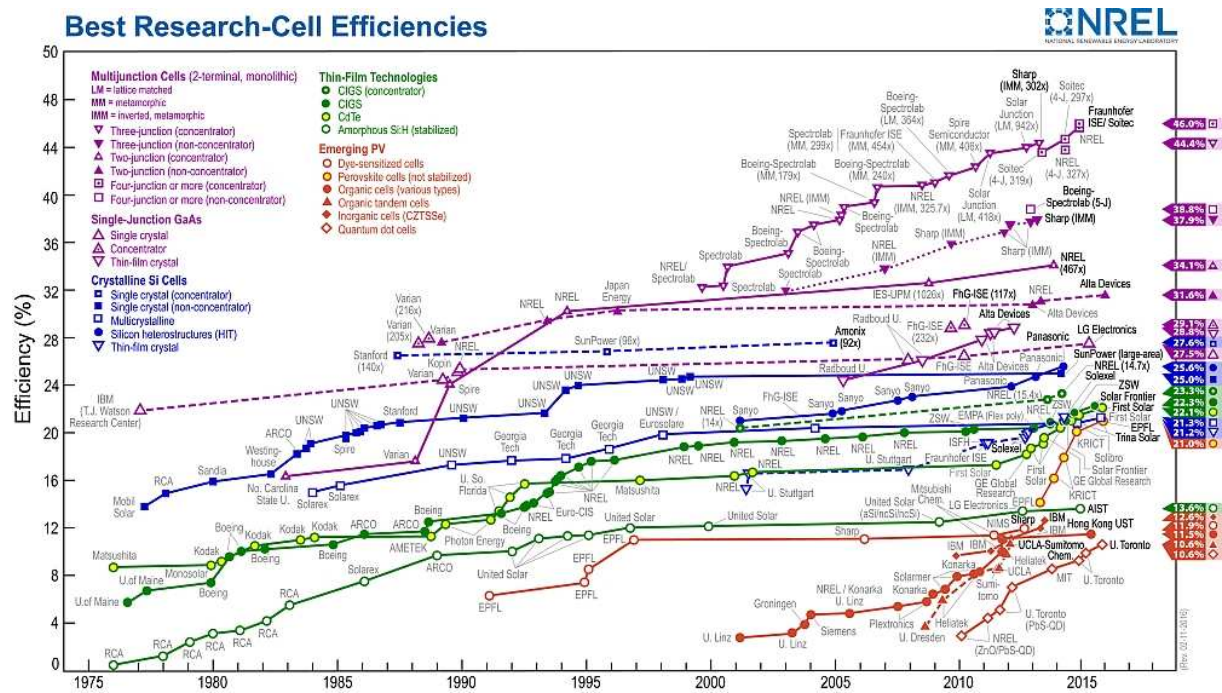
$$S(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{P(\lambda)} \quad \text{Unité : (A/W)} \quad (\text{III.11})$$

Avec l'énergie de photon donnée par :  $E = \frac{hc}{\lambda}$

$$\text{Donc :} \quad S(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{hc} \lambda \quad (\text{III.12})$$

Récemment, à la dernière conférence mondiale sur l'énergie solaire photovoltaïque en juin 2018, la communication out standing retenue par les experts avait comme objectif la mesure du rendement pour les cellules multi-jonctions de deux jonctions, triple et même à six jonctions superposées allant de l'UV à l'infrarouge, en primant les travaux du NREL [21].

# Chapitre I : Généralités sur les cellules photovoltaïques.



**Figure I.11 :** Meilleurs rendements de conversion mesurés en laboratoire pour les principaux types des cellules photovoltaïques [21].

### Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté des notions sur les semiconducteurs et les cellules photovoltaïques. Nous avons défini c'est quoi un semi-conducteur, qui est un matériau dont lequel les électrons peuvent transiter vers la bande de conduction à partir de la valence quand la température existe et lorsque la largeur du gap est favorable. D'un autre côté, comment la jonction P-N est réalisée. Ensuite, nous avons présenté des généralités sur le rayonnement et l'énergie solaire et nous avons expliqué l'effet photovoltaïque. Après, nous avons présenté brièvement la physique des cellules photovoltaïques en passant par les propriétés électroniques et optiques et les caractéristiques photovoltaïques ainsi que les différentes générations de ces cellules solaires. Ces dernières, peuvent être représentées par plusieurs modèles de circuits électriques que nous allons aborder dans le chapitre suivant.

## Références:

- [1] : <http://fr.slideshare.net/Omarbllaouhmou1/cours-master-physique-se-chapitre1> (2015)
- [2] : <http://openclassroom.fr/courses/724810-electronique-de-zero/724810-introduction-aux-semiconducteurs> .
- [3] : Ch.Ngo,H.Ngo « les Semi-Conducteurs de l'électron aux diapositifs» DUNOD ,UniverScience (page110-111) (2003).
- [4] : H.Mathieu & H Fanet « physique des semi-conducteurs et des composantes électroniques » livre édition Dunod Paris (2001)
- [5] : J L Polleux , C Rumelhard. « Modélisation physique et coefficient d'absorption optique de photodétecteursSiGe pour les applications opto-microondes ». Douzièmes Journées Nationales Microondes, JNM, Poitiers, France (2001).
- [6] : M Labidi « Etude des propriétés structurales, électronique des quaternaires » thèse doctorat .université Badji Mokhtar de Annaba (2011).
- [7] : <http://sfo.edpsciences.org/articles/sfo/pdd/1998/01/sfo19986p3.pdf>
- [8] : <http://ori-nuexo.univ-lyl1.fr/nuexo/site/esupversions/abb8a7a9-ae9fcaof5sf4>.
- [9] : H.Saheb « Etude des propriétés électroniques , optiques et diélectriques du semi-conducteur ternaire  $Al_xIn_{1-x}As$  », Faculté Tbesa (2012).
- [10] : W Kara Mohammed «les structures de bandes électroniques et les propriétés relatives aux semi-conducteurs quasi-binaires $(Gap)_{1-x}(ZnSe)_x$  » Facultés Mohammed khaydar Biskra (2012).
- [11] : S Adachi « Optical constants of cristallin and amorpheus semi conducteurs numerical data and garphical information » Springer sciences & Business Media (1999)
- [12]: Anne – Labouret .Pascal-cumunel – Jean –Paul –Braun –B (Book-See)
- [13] : S Aoufi « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïques » mémoire de Magister . Univ –Ferhet Abbas Sétif -1-(2014)
- [14] : S D Bensalah « Effet de température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaire »Mémoire de Magister-Univ Ferhat Abass Setif (2011).
- [15] : M Elsy « modélisation des panneaux photovoltaïques sur compact rio ». Projet fin d'étude université-Libanaise (2012).
- [16] : <https://substance.etsmtl.ca/panneaux-solaires-electricite-jour-nuit>.
- [17] : L Bailly « cellules photovoltaïques organiques souples a grande surface) Hal archives « thèse de doctorat » (2014).

## Chapitre I : Généralités sur les cellules photovoltaïques.

**[18]** : N D Souhane « Etat de l’art des cellules solaires conventionnelles» D’espace-univ-tlemcen .dz ) chapitre 1(2006).

**[19]**: D.Braquel ,L.Escoubas « caractérisations des matériaux et des dispositifs pour le photovoltaïque »,Hal-archives\_ouverts.fr Doctorat . France (2018).

**[20]** : A Brahmi « Modélisation ab-initio des propriétés électriques de quelques semi-conducteurs photovoltaïques »mémoire de master univ Abou bekr belkaid page 12 (2017)

**[21]** : [www.photoniques.com/articles/photon/pdf/2018/05/photon20/893p37.pdf](http://www.photoniques.com/articles/photon/pdf/2018/05/photon20/893p37.pdf)

## **Chapitre II :**

# **Notions sur la modélisation de la cellule solaire.**

### II.1. Introduction :

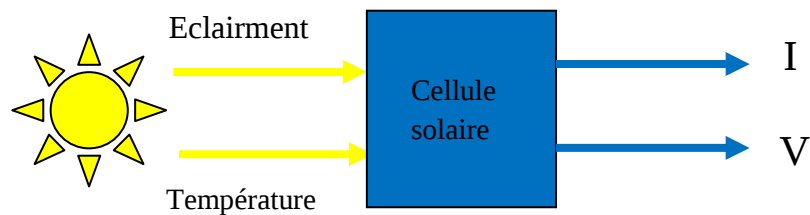
La conversion photovoltaïque est la transformation de l'énergie provenant des photons comprise dans le rayonnement solaire en énergie électrique. Les dispositifs capables d'effectuer cette transformation sont appelés cellules solaires.

Les cellules solaires sont formées à base des semi-conducteurs dont le modèle mathématique reste toujours basé sur un circuit électrique avec différents paramètres.

Dans ce chapitre, nous allons exposer les différents modèles existant dans la littérature correspondant aux cellules photovoltaïques.

### II.2. Modélisation des cellules photovoltaïque :

La modélisation des cellules solaires passe essentiellement par un choix raisonnable de circuits électriques équivalents. Généralement, on peut modéliser le circuit électrique équivalent du fonctionnement d'une cellule solaire par le schéma suivant :



**Figure II.1** : Schéma bloc d'une cellule solaire

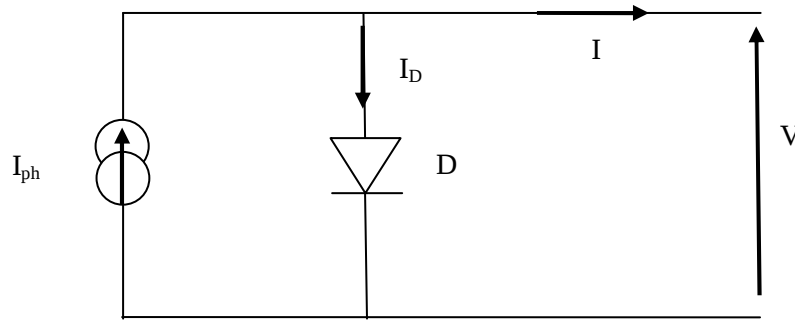
Dans la littérature on rencontre plusieurs modèles de la cellule photovoltaïque, ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du modèle photovoltaïque.

Rauschenbach (1980) et Townsend (1981) ont prouvé que des cellules photovoltaïques peuvent être modélisées par un circuit électrique équivalent qui contient des paramètres ayant des significations liées aux phénomènes physiques de la cellule. Rauschenbach (1980) et Green (1981) ont passé en revue plusieurs circuits équivalents et ils ont recommandé l'utilisation de circuit d'une seule diode à quatre paramètres. Roger (1984), Appelbaum (1987), Ekstein (1990), Duffie et Beckmann (1991) et Alghuwainem (1992) ont employé le modèle à quatre paramètres.

Dans ce qui suit on résume les différents modèles électriques des cellules photovoltaïques :

### II.2.1 : Modèle d'une cellule solaire idéale :

Une cellule photovoltaïque idéale peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode [1]. Le schéma suivant représente le circuit équivalent.



**Figure II.2 :** Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale

Le courant de la diode sous illumination est donné par l'application de la loi des nœuds sur le circuit :

$$I = I_{ph} - I_D \quad (\text{II.1})$$

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp \left( \frac{qV}{AkT} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$I$  : Courant fourni par la cellule [A].

$I_{ph}$  : Photocourant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident [A])

$I_D$  : Courant de la diode [A].

$V$  : Tension aux bornes de la cellule [V].

$A$  : Facteur d'idéalité de la jonction PN.

$I_s$  : Courant de saturation de la diode [A].

$q$  : Charge de l'électron [ $1,6 \cdot 10^{-19}$  C].

$K$  : Constant de Boltzmann [ $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K].

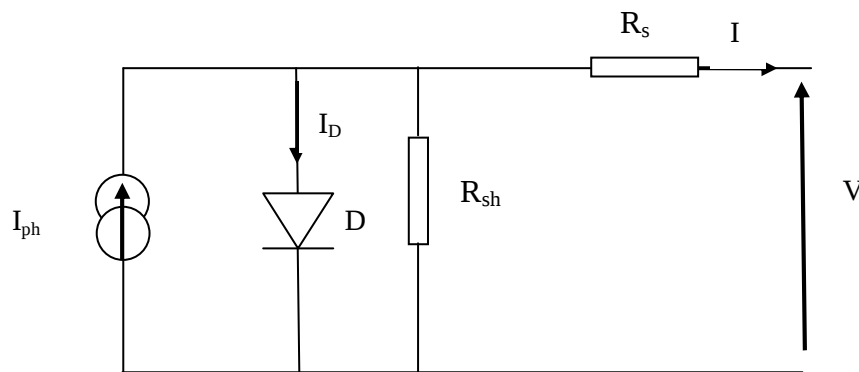
$T$  : Température effective de la cellule [K].

### II.2.2. Modèle d'une cellule solaire réelle :

On rencontre plusieurs modèles des cellules solaires qui sont différents entre eux par le nombre de paramètres intervenant pour le calcul de l'intensité du courant et la tension.

#### II.2.2.1. Modèle à une diode (à une seule exponentielle):

Connus sous le nom du modèle à cinq paramètres et représenté par le circuit suivant :



**Figure II.3 :** Schéma équivalent d'une cellule solaire à une diode .

La figure (II.3) présente le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle, où deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma, elles vont influencer sur la caractéristique I-V de la cellule [2].

C'est le modèle le plus classique présenté dans la littérature. Il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physiques de polarisation et deux résistances (résistance série et résistance shunt).

🌈 **Résistance série ( $R_s$ ) :** La résistance série est l'un des facteurs les plus importants qui influencent sur la performance de la cellule photovoltaïque, qui tient compte des pertes ohmiques des matériaux, des métallisations et du contact métal semiconducteur [3].

## Chapitre II : Notion sur la modélisation de la cellule solaire.

✚ **Résistance shunt ( $R_{sh}$ )** : La résistance shunt ou bien parallèle représente les pertes de photocourant à cause des recombinaisons de charge à l'intérieur de la cellule, particulièrement, au niveau des interfaces entre les différentes couches [4].

En appliquant les lois de Kirchhoff pour trouver l'expression du courant généré par la cellule photovoltaïque.

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (\text{II.3})$$

$$I_{sh} R_{sh} = I R_s + V \quad (\text{II.4})$$

Donc le courant qui circule dans la résistance shunt est donné par :

$$I_{sh} = \frac{I R_s + V}{R_{sh}} \quad (\text{II.5})$$

Avec le courant de la diode donné par :

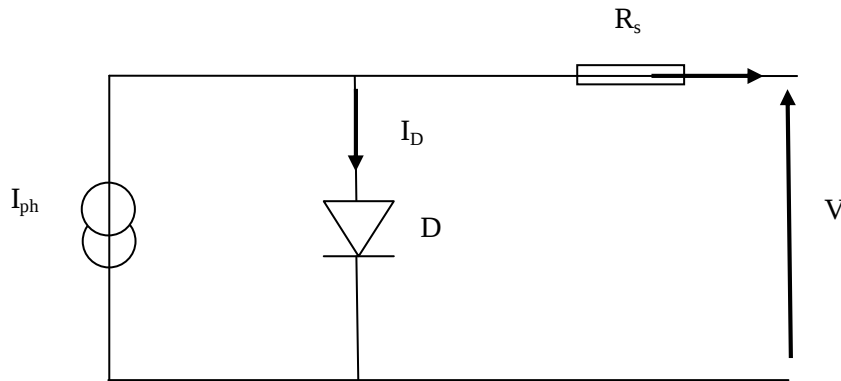
$$I_D = I_s \left( \exp \left( \frac{q(I R_s + V)}{A k T} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.6})$$

Finalement, l'expression de la caractéristique courant-tension de ce modèle s'écrit :

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp \left( \frac{q(I R_s + V)}{A k T} \right) - 1 \right) - \left( \frac{I R_s + V}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.7})$$

### II.2.2.2. Modèle à une diode avec 4 paramètres ( $I_{sh} = 0$ ):

Le circuit équivalent à ce modèle est le suivant :



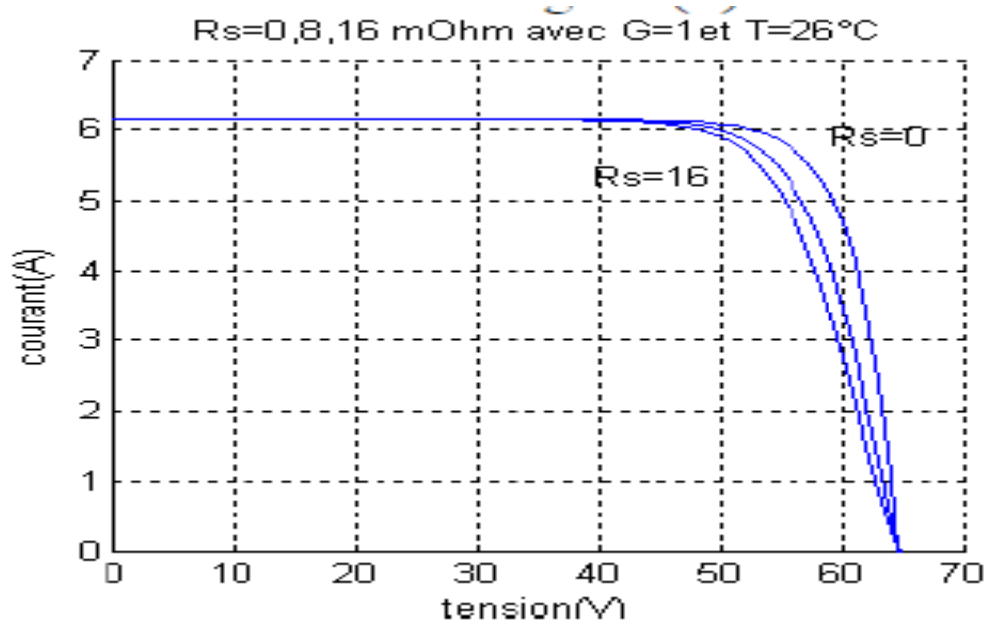
**Figure II.4 :** Schéma équivalent d'une cellule solaire à une diode avec résistance série  $R_s$

Ce modèle est caractérisé par une source de courant dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance  $R_s$ . Cette dernière représente les pertes ohmiques dues aux niveaux de contact. L'effet de cette résistance sur la caractéristique I-V a fait l'objet de plusieurs travaux théoriques et expérimentaux [5].

L'équation de la caractéristique  $I(V)$  s'exprime sous la forme suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp \left( \frac{q(IR_s + V)}{AkT} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.8})$$

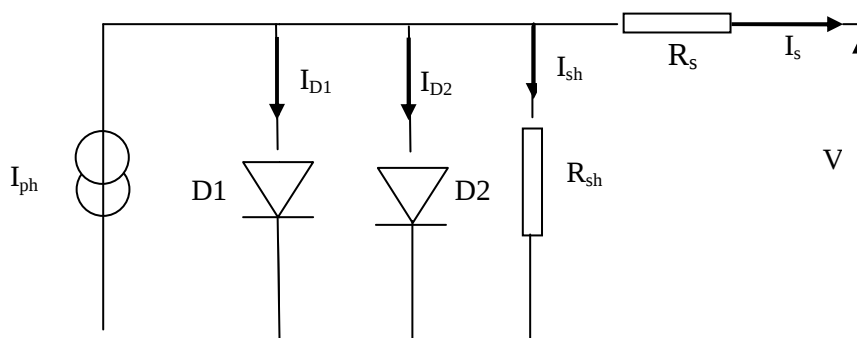
La figure II.5 montre la courbe de la caractéristique  $I(V)$  pour plusieurs valeurs de  $R_s = 0, 8, 16 \text{ m}\Omega$  à la température ambiante. On remarque que la résistance série agit sur la pente de la caractéristique  $I(V)$ . Par conséquent, la valeur de courant de court circuit diminue lorsque la valeur de  $R_s$  augmente.



**Figure II.5 :** Caractéristique I(V) d'un module pour différentes valeurs de résistance série [5].

### II.2.2.3. Modèle à deux diodes (à deux exponentielles):

Il est connu aussi par le nom 2M7P (Lumped, 2 Mechanism model with 7 Parameters). Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous (voir la figure II.6).



**Figure II.6 :** Schéma équivalent d'une cellule solaire à deux diodes.

## Chapitre II : Notion sur la modélisation de la cellule solaire.

D'après la figure II.6, le schéma du circuit électrique équivalent est réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes D1 et D2 ayant les courants de saturation  $I_{s1}$  et  $I_{s2}$  et les facteurs de diode  $n_1$  et  $n_2$ , avec une source de courant produisant un photo-courant  $I_{ph}$ , qui dépend de l'éclairement solaire. La résistance série  $R_s$  rend compte de la résistivité du matériau, de celle des électrodes et du contact semi-conducteur-Métal. Sa valeur est déterminée par l'inverse de la pente de la caractéristique  $I(V)$  pour une tension  $V$  égale à  $V_{co}$ . Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant le contact métal/semi-conducteur, et en diminuant la résistivité du matériau utilisé. Cependant, un dopage trop élevé entraîne une augmentation de la recombinaison des porteurs. La résistance parallèle (shunt) ou de court-circuit  $R_{sh}$  traduit relativement, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible. Le modèle à deux-diodes est représenté par une équation implicite du courant qui ne peut être résolue qu'à l'aide des méthodes itératives [6].

Lorsqu'on applique les lois de Kirchhoff, le courant sera obtenu par l'équation :

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{sh} \quad (II.8)$$

Les courants  $I_{D1}$  et  $I_{D2}$  des deux diodes sont données par les équations suivantes :

$$I_{D1} = I_{s1} \left( \exp \left( \frac{q(IR_s + V)}{n_1 KT} \right) - 1 \right) \quad (II.9)$$

$$I_{D2} = I_{s2} \left( \exp \left( \frac{q(IR_s + V)}{n_2 KT} \right) - 1 \right) \quad (II.10)$$

Telque le courant  $I_{sh}$  est donné par l'expression (II.5) :

En remplaçant les expressions des différents courants données par les équations II.5, II.9 et II.10 dans l'équation (II.8), la caractéristique  $I(V)$  de ce système devient comme suit :

(II.11)

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left( \exp \left( \frac{q(IR_s + V)}{n_1 KT} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left( \exp \left( \frac{q(IR_s + V)}{n_2 KT} \right) - 1 \right) - \left( \frac{IR_s + V}{R_{sh}} \right)$$

### Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents modèles caractérisant les cellules solaires, dans les cas idéal et réel avec une seule exponentielle et deux exponentielles. Dans ce qui suit, nous allons utiliser ces notions pour pouvoir modéliser et déterminer numériquement les caractéristiques photovoltaïques de la cellule solaire à base de CZT

## **Références:**

**[1] :** O benseddik, F Djaloud, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque », Univ-Ourgla (2012)

**[2] :** H Benchrifi « Etude et modélisation analytique d'une C.S à base de Si-Ge » Université Haj Lakhdar Batna (2011).

**[3] :** A Ouled Mohammed Yahya « Etude et modélisation d'une générateur photovoltaïque » Revue des Energies Renouvelables Vol 11.N°3, 473\_ 483 (2008)

**[4] :** K Hellali « Modélisation d'une cellule photovoltaïque Etude comparative », Université TIZI OUZOU (2012).

**[5] :** A ZERDOUDI , R CHENNI « Etude de l'influence des différents paramètres sur un module photovoltaïque » Faculté des sciences de la technologie, Université des frères Mentouri de Constantine, Sciences & Technologie A – N°41, 49-54 Juin (2015)

**[6] :** Z DJESSAS « Extraction des paramètres physiques d'une cellule solaire à deux exponentielles par la méthode des algorithmes génétiques» Université Ferhat Abbas–SETIF UFAS (ALGERIE) (2018).

## **Chapitre III :**

## **Etat de l'art de la cellule solaire à base de CdZnTe.**

### III.1.Introduction :

Les cellules solaires font actuellement l'objet de nombreuses recherches à la fois académiques et industrielles. Les axes d'amélioration principaux sont l'augmentation du rendement énergétique et la diminution du prix de revient. L'idée étant de démocratiser encore davantage leur utilisation auprès du grand public. .

Actuellement, les cellules solaires conçues en silicium ont un rendement moyen de 15%, ce rendement est intéressant. Néanmoins, le coût de fabrication encore élevé et leurs poids trop important représentent des freins majeurs à une utilisation à grande échelle .L'alternative de la photovoltaïque organique permet certes de réduire les coûts, mais le rendement moyen reste encore trop faible. Une piste prometteuse qui permettrait d'améliorer le rendement consiste à créer des cellules dites « tendum » (ou multi-cellules en cascade), ces nouvelles cellules comprenant l'équivalent de plusieurs cellules photovoltaïques de gaps différents, cela permet d'obtenir un spectre d'absorption de photons plus élevé et donc un meilleur rendement. Il y'a aussi des cellules solaires a base des semiconducteurs inorganiques qui peuvent donner des rendements encore plus important.

En particulier, le CdZnTe est un semiconducteur convenable pour atteindre cet objectif. En effet, son gap peut être modulé en fonction de la concentration chimique allant du CdTe jusqu'à ZnTe. Selon cette configuration, son gap optique varie entre 1.45-2.26 eV (CdTe-ZnTe) en contrôlant la concentration du zinc (Zn) de ces couches minces. Récemment, la cellule à base de CZT a été réalisée [1] mais pas encore en structure tendem.

Dans ce chapitre, nous présenterons l'état de l'art des cellules solaires à base de CdZnTe (CZT) avec une présentation bibliographique de deux travaux différents afin d'illustrer l'importance de ces cellules. Le premier est un travail théorique publié en 2007 et intitulé « *Theoretical determination of the effeciency of  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  single solar cell materials* » par : M Benganem et A E Merad, et le deuxième est un travail expérimental publié en 2018 et intitulé « *Towards CdZnTe solar cells: An evolution to post-treatment annealing atmosphere* » par : S. Chandra, A.K. Dea, M.S. Dhakab.

### III.2. Quelques propriétés physiques principales du matériau CdZnTe :

#### CdTe :

Le CdTe a une structure cristalline zinc blende à l'état d'équilibre. C'est un semi-conducteur à gap direct de 1,5 eV. Le CdTe peut être obtenu par différentes techniques d'élaboration comme le dépôt physique en phase vapeur, le dépôt électrolytique, la pulvérisation cathodique, la sublimation,.... Le CdTe monocristallin trouve des applications dans les cellules solaires, les détecteurs nucléaires ...etc.

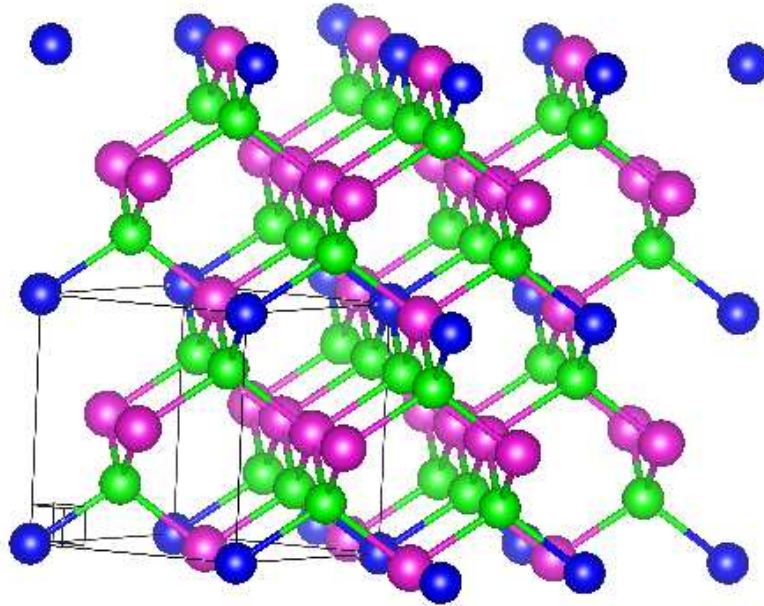
#### ZnTe :

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 un 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 tendue. 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 [2].

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 [2].

#### **CdZnTe :**

Le CdZnTe est un semi-conducteur très important dans les cellules solaires, car sa bande de gap est adaptée entre celle de ZnTe (1.51 eV) et de CdTe (2.26 eV). Il est composé du Cadmium, du Zinc et du Tellure à partir d'un alliage formé de Tellure de Cadmium (CdTe) et le Tellure de Zinc (ZnTe) cristallisé dans la structure zinc blende suivant la direction  $\langle 111 \rangle$ . La figure (III.1) montre la structure du CdZnTe pour 25% de Zn.



**Figure III. 1 :** Structure cristalline zinc blende de CdZnTe avec 25% du zinc.  
Cd (violet), Zn (bleu), Te (vert)

### III.3 Elaboration du CdZnTe :

**CdZnTe :** Ce matériau est un candidat prometteur et concurrent pour les applications photovoltaïques à la place des matériaux conventionnelles tel que le CdTe. Afin de réduire les problèmes mentionnés ci-dessus (l'énergie de gap, la stabilité, les propriétés de transport des électrons, le coefficient de ségrégation de zinc).

Il existe plusieurs techniques pour fabriquer des cellules solaires à base de CdZnTe, comme la pulvérisation par magnétron, dépôt de laser pulsé (PLD) (Yang et al 2016) vaporisation (Krypunav et al 2006) sublimation rapprochée (CSS)(Gao et al 2012) ,analyse moléculaire épitaxie par faisceau (MBE) (Zhao et al 2014) et dépôt en bain chimique (CBD)(Han et al 2011) . Le processus utilisé ici est la technique de procédé à la vapeur (faisceau – électron vaporisation).

### III.4 Description de la méthode d'élaboration du CdZnTe :

Il existe plusieurs méthodes d'élaboration des semiconducteurs comme le CdZnTe. Parmi lesquelles, MBE, MOCVD,... Mais dans ce qui suit, nous présentons la méthode d'élaboration du CdZnTe réalisée récemment par Chander et al [7].

- **Préparation du substrat :**

Avant le processus de dépôt, les substrats constitués de verre microscopique ayant une surface de  $6,45 \text{ cm}^2$  (soit  $1'' \times 1''$ ) sont traités par des ultrasons pendant 30 minutes à la température de  $60^\circ\text{C}$ , et sont nettoyés par l'acétone et l'isopropanol. Ensuite ils sont séchés par le nitrogène gazeux et conservé dans une boîte contenant du méthanol.

- **Préparation de la chambre de dépôt :**

La chambre de l'unité de revêtement sous vide (BC-300, HHV) a également été nettoyée par les deux agents chimiques (à savoir l'acétone et l'isopropanol) afin éliminer tout résidu de dépôt antérieur.

- **Dépôt du matériau CdZnTe:**

Après avoir placé les substrats de verre microscopique sur un support à l'intérieur de la chambre. Le matériau source qui est la poudre de  $\text{Cd}_{0,90}\text{Zn}_{0,10}\text{Te}$  a été mise en forme de palette par pression hydraulique et placée dans un pot creuset à une distance de 18 cm des substrats, puis des films ont été préparés par évaporation par faisceau d'électrons dans le vide de  $4 \times 10^{-6}$  mbar selon un processus de dépôt de films détaillé dans des travaux précédents [8].

Ici, le vide est obtenue par des pompes turbo et rotatives où les taux d'évaporation ont été mesuré par un moniteur à cristal de quartz et sont maintenu presque constants ( $4\text{-}5\text{\AA}/\text{s}$ ), tandis que l'épaisseur des couches de  $1,2 \mu\text{m}$  était vérifiée par un profilomètre à stylet (NanoMap 500ES, AEP Technology Inc.).

Pour obtenir une surface uniforme et homogène, les couches d'absorbant primitif (original) CdZnTe ont été soumises à un traitement thermique à  $400^\circ\text{C}$  pendant une heure dans le vide et dans différentes atmosphères comme l'hydrogène ( $\text{H}_2$ ), l'azote ( $\text{N}_2$ ) et l'argon plus oxygène ( $\text{Ar} + \text{O}_2$ ), où un microprocesseur numérique était utilisé pour maintenir les conditions de recuit. Ainsi, les échantillons primitifs et les échantillons traités dans différentes conditions de recuit sont obtenus.

### III.5 Description des caractérisations des échantillons de CdZnTe :

Les différents échantillons de CdZnTe obtenus sont donc passés par un processus de caractérisation afin de vérifier et extraire leurs propriétés physiques [8]. Pour cela :

- La structure cristalline a été analysée par la diffraction des rayons X (XRD) (Bruker: AXS Kappa Apex-II)
- Les propriétés optiques sont étudiées par un spectrophotomètre UV – Vis (Perkin Elmer).
- les morphologiques de surface sont étudiées par un microscope électronique à balayage (SEM) (Hitachi: S3400N) couplé au spectroscope à rayons X à dispersion d'énergie (EDAX).

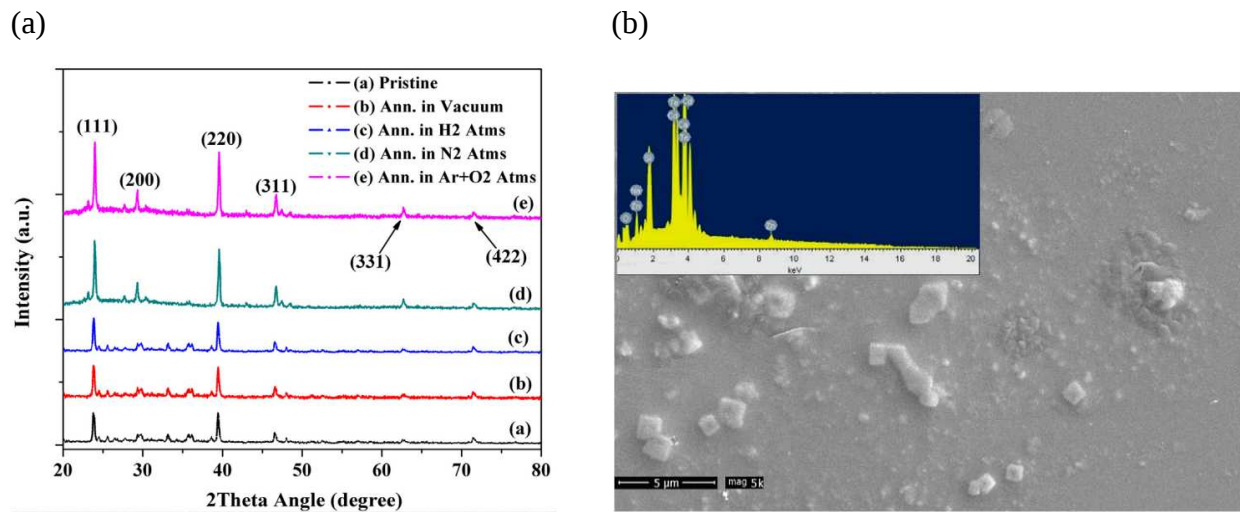
Les propriétés structurales et optiques ont été mesurées et explorées selon les méthodes décrites dans un rapport précédent [9].

### III.6 Optimisation des propriétés microstructurales :

La détermination structurale et l'identification de la phase des couches d'absorbeur CdZnTe ont été effectuées par diffraction aux rayons X [9]. Les micrographes XRD sont présentés dans la figure III. 2 (a) pour les films traités dans les différentes atmosphères de recuit. Les clichés XRD des films de CdZnTe traités sous vide et sous différentes atmosphères de recuit, à savoir : l'hydrogène ( $H_2$ ), l'azote ( $N_2$ ) et l'argon plus oxygène ( $Ar + O_2$ ) présentent plusieurs pics de distorsion correspondant aux réflexions (1 1 1), (2 0 0), (2 2 0) (3 1 1), (3 3 1) et (4 2 2) tels que normalisés par JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) qui révèle la structure cubique zinc blende et la nature poly-cristalline des films. L'intensité de la réflexion préférée (1 1 1) et des autres pics de dilatation augmente avec la variation des atmosphères de traitement post-recuit et est maximale pour les films traités dans l'atmosphère  $Ar + O_2$ , ce qui pourrait être attribué à une plus grande réorientation et à une recristallisation des grains. L'intensité du pic de diffraction (2 2 0) est maximale pour les films traités en atmosphère gazeuse vis-à-vis des films primitifs qui montrent des signes significatifs du processus de recristallisation du CdZnTe (1 1 1).

La micrographie SEM ainsi que le motif EDAX de la couche de CdZnTe traitée dans l'atmosphère  $Ar + O_2$  sont représentés sur la figure III. 2 (b), ce qui confirme que les grains ont une distribution uniforme et que certaines bosses ont également été observées lors

du post-traitement dans une atmosphère Ar + O<sub>2</sub> en raison de la recristallisation et de la passivation des limites de grains à la température de recuit de 400° C.

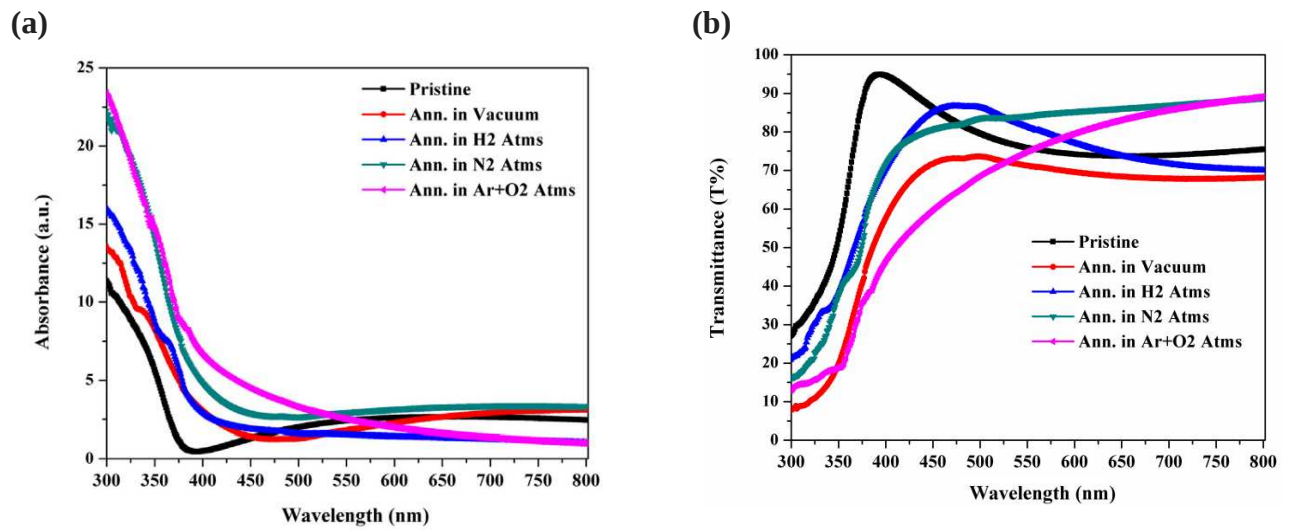


**Figure III. 2 :** (a) Micrographie XRD de pristine et le CdZnTe dans différentes atmosphères. (b) Image SEM avec EDAX de spectre des films traités dans Ar+O<sub>2</sub> [9].

### III.7 Optimisation des propriétés optiques :

L'absorbance et la transmittance des couches d'absorbeur CdZnTe ont été mesurés avec un spectrophotomètre UV-Vis dans une plage de longueurs d'onde comprise entre 250 et 800 nm, comme c'est indiqué dans le travail de Chander et al [9]. Les spectres concernés sont illustrés dans la figure III. 3.

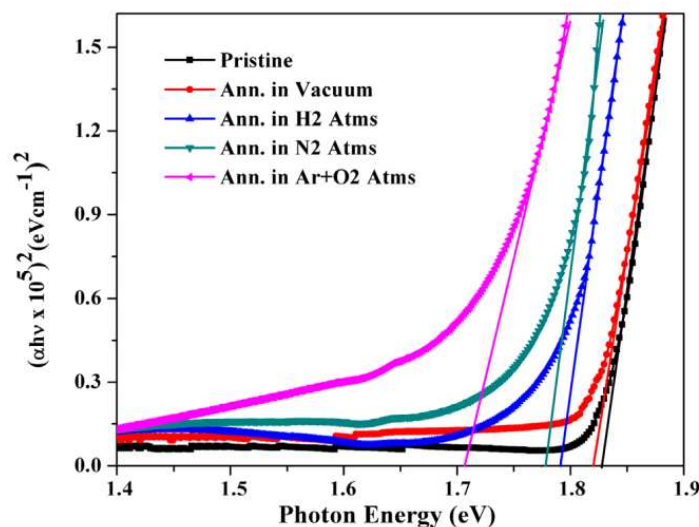
On peut constater que l'absorption optique augmente avec le post-traitement à partir du sous vide à l'atmosphère Ar + O<sub>2</sub> qui peut être due à l'augmentation de la mobilité des porteurs et à la concentration des porteurs de charge car il est sensible à la taille des grains et à leur répartition. On remarque aussi que l'absorbance est forte dans la région visible ce qui suggère que le CdZnTe est un bon matériau à couche absorbante, qui peut servir pour développer un dispositif de cellule solaire à haut rendement.



**Figure III. 3 :** (a) : L'absorbance et (b) : la transmittance du CdZnTe primitif et sous différentes atmosphères [9]

La bande interdite d'énergie directe a été estimée à l'aide de la relation de Tauc [9], en extrapolant la ligne droite de l'énergie des photons ( $h\nu$ ,  $h$  est la constante de Planck et  $\nu$  est la fréquence des photons) pour le coefficient d'absorption ( $\alpha$ ) nul. Les courbes concernées sont illustrées à la Fig. III. 4.

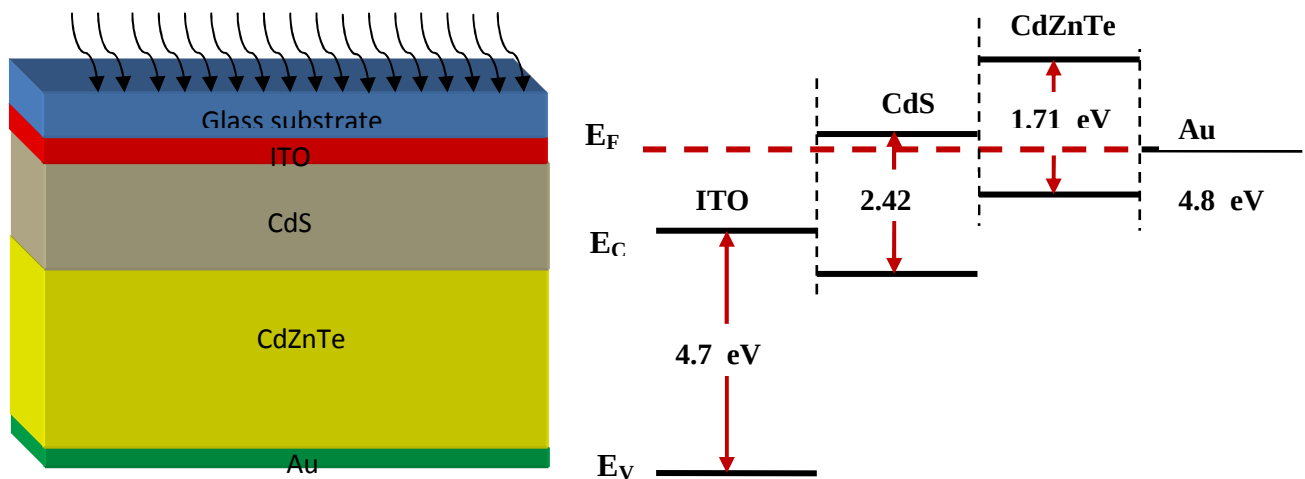
Le comportement presque linéaire des courbes de Tauc observé dans la figure III.4 confirme la nature semi-conductrice du CdZnTe avec une bande interdite à gap direct ayant des valeurs dans la gamme (1,71–1,83 eV) pour les couches d'absorbeur traitées dans différentes atmosphères de recuit. Ceci révèle au CdZnTe des applications prometteuses, en particulier pour la fabrication des cellules solaires.



**Figure III 4 :** Estimation de l'énergie du gap du CdZnTe à travers les courbes de Tauc [9]

## III.8 Fabrication de la cellule solaire CZT :

Les cellules solaires CZT ont été fabriquées avec une structure de dispositif en Verre / ITO / CdS / CdZnTe / Au [11]. Les étapes de fabrication sont expliquées comme suit : Initialement, la couche mince fenêtre au sulfure de cadmium (CdS) de 100 nm a été déposée sur un substrat de verre revêtu d'ITO sous vide poussé de  $4 \times 10^{-6}$  mbar en utilisant une évaporation à la vapeur par faisceau électronique (BC-300, HHV), puis une couche d'absorbeur CdZnTe d'une épaisseur de 1,2  $\mu\text{m}$  est déposée sur la couche fenêtre CdS suivi d'un traitement de recuit sous différentes atmosphères à 400 °C pendant 60 minutes. Des contacts en Au de 15 à 20 nm sur la surface de la couche d'absorbeur CdZnTe ont été réalisés par un évaporateur dans la boîte à gants ayant une atmosphère d'azote où la surface active du dispositif était de 0,126  $\text{cm}^2$ . Les taux d'évaporation de CdZnTe et de CdS ont été maintenus presque constants (5–6 Å/s). La figure III.5 montre la configuration de la cellule solaire CZT fabriquée.



**Figure III.5 :** (a) Schéma de la cellule solaire CZT fabriquée.

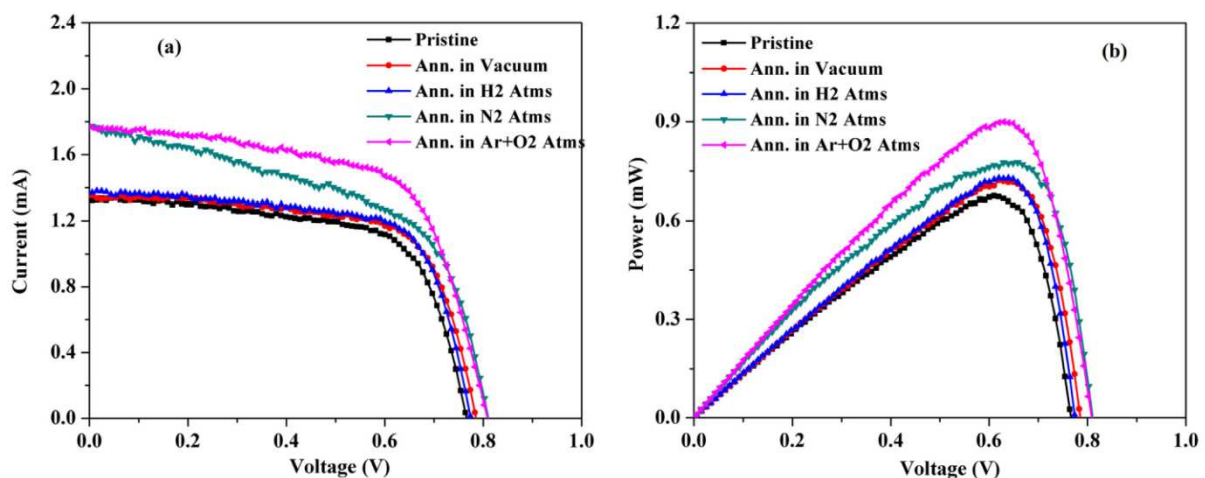
(b) Diagramme de l'énergie de gap correspondant à la cellule solaire. [10]

## III.9 Mesures électriques effectuées :

Les mesures courant-tension (I-V) ont été prises à l'intérieur d'une boîte à gants en faisant varier la tension (dans la plage requise) et en enregistrant le courant correspondant. Pour cela, une source-mètre Keithley 2400 sous l'éclairage du simulateur solaire de classe A (Newport, AM1.5G) ayant une intensité d'un solaire ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) a été utilisée [9].

Les dispositifs à cellules solaires ont été donc illuminés là où le faisceau de lumière était incident à l'avant du dispositif (comme l'indique la figure III.5). Pour effectuer des mesures électriques, deux sondes ont été utilisées à l'aide d'une cellule de silicium cristallin standard étalonnée ayant un courant de court-circuit de  $1,67 \text{ mA}$  comme référence. Un compteur source de Keithley (modèle: 4200-SCS) a été utilisé pour déterminer les caractéristiques capacité-tension présentant une fréquence de sonde de  $20 \text{ KHz}$  afin de déterminer la largeur de la couche d'appauvrissement et la densité de dopant. Un total de huit dispositifs de cellules solaires ont été fabriqués dans des conditions de fabrication identiques et tous les dispositifs ont des performances presque similaires. La reproductibilité de ces dispositifs a également été réalisée par un processus de dépôt séquentiel et s'est révélée excellente avec un écart  $<10\%$ .

La courbe III.6 (a,b) montre la caractéristique courant-tension (I-V) et la puissance-tension (P-V) issus de ces mesures électriques.



**Figure III.6 :** Mesures électriques de la cellule solaire CZT.(a) Caractéristique I-V, (b) Caractéristique P-V

#### Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'état de l'art des cellules solaires à base de CdZnTe (CZT) avec une présentation bibliographique de deux travaux différents afin d'illustrer l'importance de ces cellules. Le premier est un travail théorique sorti en 2007 et intitulé « *Theoretical determination of the efficiency of  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  single solar cell materials* » par : M Benghanem et A E Merad, et le deuxième est un travail expérimental sorti en 2019 et intitulé « *Towards CdZnTe solar cells: An evolution to post-treatment annealing atmosphere* » par : S. Chandra, A.K. Dea, M.S. Dhakab ou ils ont fabriqué une structure de dispositifs verre / ITO / CdS / CdZnTe / Au et déposés ces derniers en différentes conditions atmosphériques dans le but d'améliorer les performances de cette structure .

## Références:

---

- [1] : G Sivaraman « Characterization of cadmium zinc tellured solar cells » Univ of south Florida (2003).
- [2] : S Ricq « Etude de détecteurs en CdTe:Cl et CdZnTe pour la tomographie X médicale multicoupes », Thèse Doctorat UNIVERSITE GRENOBLE I - Joseph Fourier Soutenue le 28 Septembre (1999).
- [3] : X Yang, B Liu, B Li, J Zhang, W Li, L Wu, L Feng, Applied. Surface Sciences. **367**, 480–484 (2016).
- [4] : G Khrypunov, A Romeo, F Kurdesau, D L Batzner, H Zogg, A N Tiwari, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **90**, 664–677 (2006).
- [5] : J Gao, W Jie, Y Xie , X Zheng , H Yu, T Wang, G Pan, Mater. Lett. “Characterization Of Cadmium Zinc Telluride Solar Cells” **78**, 39–41 (2012).
- [6] : X Zhao, M J Dinezza, S Liu, C M Campbell, Y Zhao, Appli. Phys. Lett. **105**, 252101 (2014)
- [7] : J Han, C Spanheimer, G Haindl, G Fu, V Krishnakumar, J Schaffner, C Fan, K Zhao, A Klein, W Jaegermann, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **95**, 816-820 (2011)
- [8] : S Chander, M S Dhaka, J. Mater. Sci.: Mater. Electron. **27**, 11961–11973 (2016)
- [9] : C Chander, A K De, M S Dhaka "Towards CdZnTe solar cells: An evolution to post-treatment annealing atmosphere" Solar Energy **179**, 757-761 (2018)

## **Chapitre IV :**

### **Détermination théorique des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire CZT.**

## Chapitre IV : Détermination théorique des paramètres photovoltaïques de CZT.

### IV.1 Introduction :

Au cours de ce chapitre, nous allons utiliser le programme **python 2.7 (spider)** pour déterminer les paramètres photovoltaïques, à savoir : la caractéristique courant-tension I-V, le rendement, la puissance et le facteur de forme de la cellule solaire CZT décrite dans le chapitre III. Nous rappelons ici que cette cellule a été soumise aux différentes atmosphères.

Nous contribuons à fournir une réponse sur la limite théorique maximale des caractéristiques photovoltaïques de la cellule CZT, ce qui permet de donner une idée plus claire sur les investigations qu'il faudra réaliser en futur dans le but d'améliorer le rendement de ces cellules.

Mais avant cette tâche, nous allons tout d'abord réaliser des calculs théoriques basées sur une étude précédente [1] à travers de laquelle nous montrerons comment ces paramètres photovoltaïques changent tel que la tension à circuit ouvert «  $V_{co}$  » avec la concentration chimique du zinc dans la cellule CZT.

## Chapitre IV : Détermination théorique des paramètres photovoltaïques de CZT.

### IV.2. Variation de $V_{co}$ dans la cellule solaire CZT unique :

En utilisant l'approximation du cristal virtuel (VCA), les grandeurs physiques d'un alliage peuvent être évaluées en fonction de la concentration molaire du dopant dans la gamme limitée par celle des éléments constituant l'alliage. D'où, l'énergie du gap des alliages  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  est exprimée comme suit :

$$E_g(x) = (1 - x)E_g(CdTe) + xE_g(ZnTe) - bx(1 - x) \quad (IV.1)$$

Où à  $T = 300\text{ K}$ ,  $E_g(CdTe) = 1,51\text{ eV}$  et  $E_g(ZnTe) = 2,26\text{ eV}$  [5], correspond à l'énergie de la bande interdite et  $b$  est appelé le coefficient de « bowing » du gap est égal à 2 pour  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  [2].

Selon l'équation standard des diodes, la caractéristique I-V d'une cellule solaire à simple jonction peut être exprimée comme suit (voir chapitre II):

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp\left(\frac{qV}{AKT}\right) - 1 \right) \quad (IV.2)$$

Selon le travail de Benghanem et Merad [2], la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  pour les alliages  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ , est exprimée comme suit :

$$V_{oc}(x) = \frac{AKT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}(x)}{I_0(x)} + 1\right) \quad (IV.3)$$

Comme première approximation, ils ont proposé une relation qui permet d'évaluer la tension  $V_{co}$  en fonction de la concentration  $x$  du zinc

$$V_{co}(x) = (1 - x)V_{co}(CdTe) + xV_{co}(ZnTe) \quad (IV.4)$$

La densité de courant de saturation inverse  $I_0$  est calculée à partir de la relation suivante:

$$I_0(x) = I_{00} \exp\left(-\frac{E_g(x)}{AKT}\right) \quad (IV.5)$$

Avec :

$$I_{00} = qn_i^2 \left( \frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \quad (IV.6)$$

## Chapitre IV : Détermination théorique des paramètres photovoltaïques de CZT.

La concentration des porteurs intrinsèques  $n_i$  est calculée pour tous les alliages identifiés et est exprimée par [3]

$$n_i^2 = 2.31 \times 10^{31} \left( \frac{m_n m_p}{m_0^2} \right) \times T. \exp \left( -\frac{E_g}{KT} \right) \quad (\text{IV.7})$$

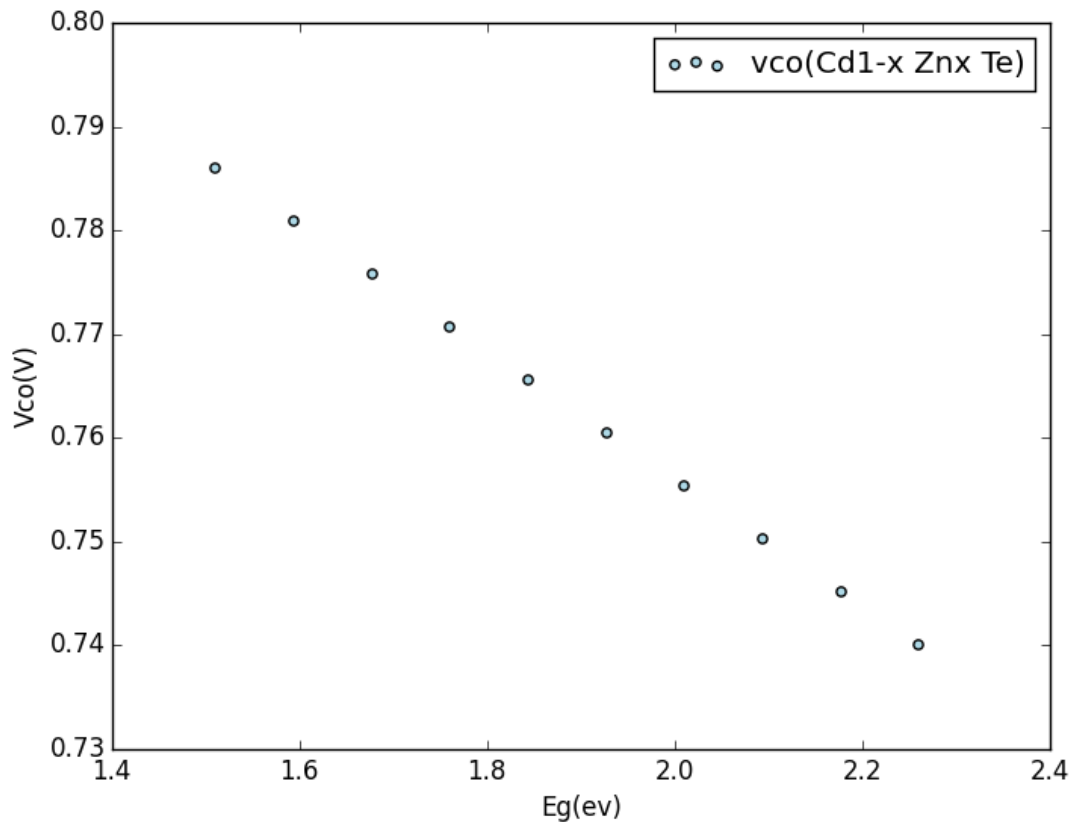
Les données utilisées dans la détermination théorique des caractéristiques photovoltaïques de la cellule CZT en fonction de la concentration  $x$  du Zn sont résumées dans le tableau suivant [3].

**Tableau IV.1** : Les paramètres physiques de CdTe et ZnTe utilisés dans le calcul.

| Paramètres                                                           | CdTe        | ZnTe        |
|----------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|
| $m_n/m_0$                                                            | 0.25        | 0.13        |
| $m_p/m_0$                                                            | 0.7         | 0.6         |
| Mobilité des trous libres $\mu_p$                                    | 60          | 80          |
| Mobilité des électrons libres $\mu_n$                                | 100         | 330         |
| Energie de gap (ev)                                                  | 1.5         | 2.26        |
| Concentration $N_A(\text{cm}^{-3})$                                  | $4.10^{17}$ | $4.10^{17}$ |
| Concentration $N_D(\text{cm}^{-3})$                                  | $4.10^{17}$ | $4.10^{17}$ |
| Coefficient de diffusion de l'électron $D_n(\text{cm}^2/\text{V.S})$ | 460         |             |
| Coefficient de diffusion de l'électron $D_p(\text{cm}^2/\text{V.S})$ |             | 60          |
| $L_n(\mu\text{m})$                                                   | 10          |             |
| $L_p(\mu\text{m})$                                                   |             | 6           |

## Chapitre IV : Détermination théorique des paramètres photovoltaïques de CZT.

Les tensions de circuit ouvert  $V_{co}$  pour le CdTe et le ZnTe sont respectivement égales à 0,786 V et 0,74 V [2], ce qui donne une tension  $V_{co}$  du CdTe supérieure à celle du ZnTe. Sur la base de ces résultats, nous avons présenté dans la figure (IV.1) l'évolution de la tension  $V_{co}$  en fonction de l'énergie du gap  $E_g$  pour les alliages  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  :

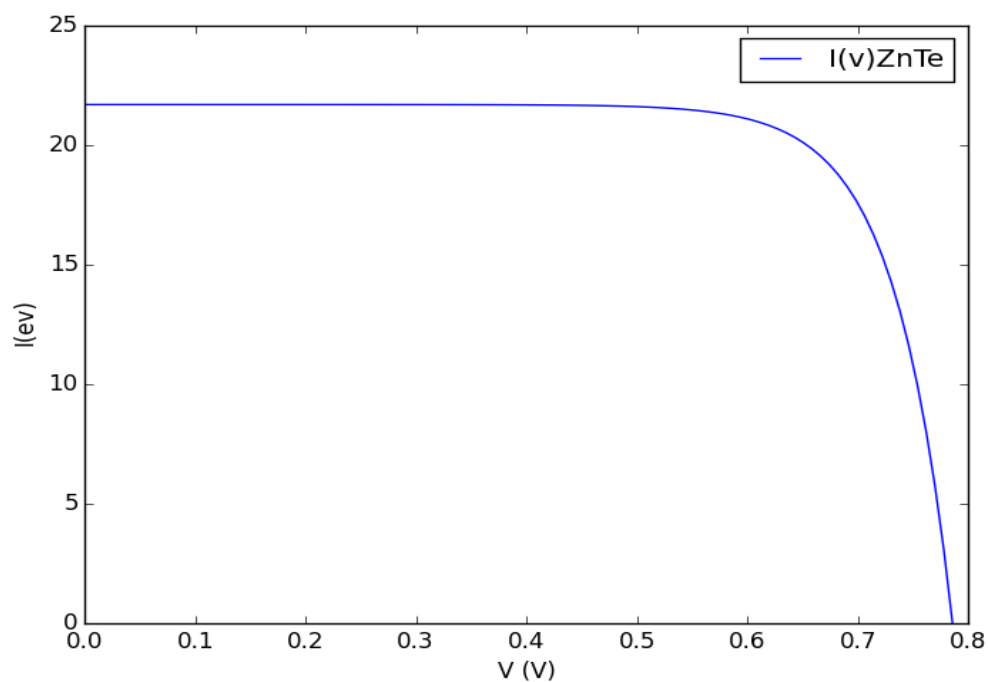
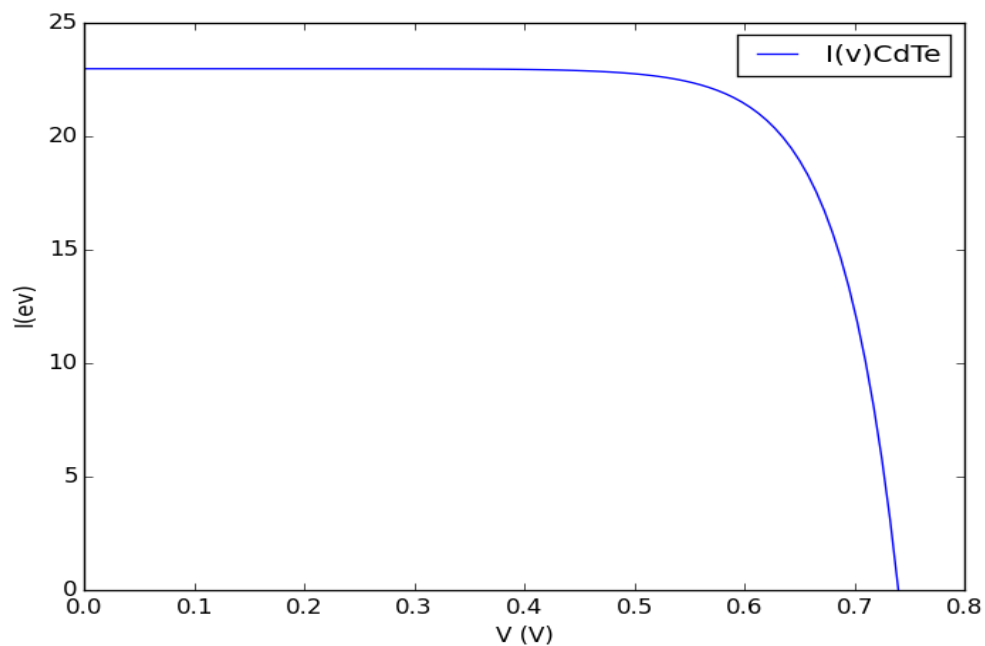


**Figure IV. 1 :** Evolution de la tension  $V_{co}$  en fonction de l'énergie du gap  $E_g$  pour les alliages  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ .

Nous remarquons que la tension  $V_{co}$  diminue linéairement avec l'augmentation de l'énergie de gap  $E_g$  allant de celle du CdTe à celle du ZnTe. Cela indique que la tension  $V_{co}$  des alliages  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  est comprise entre celles des composés CdTe et ZnTe.

## Chapitre IV : Détermination théorique des paramètres photovoltaïques de CZT.

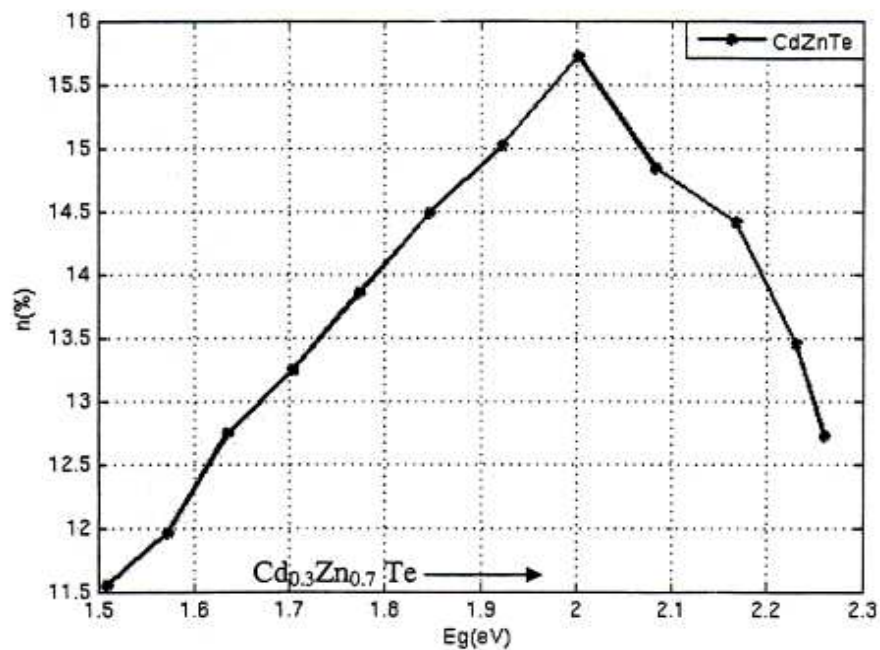
A titre illustratif, nous avons tracé la courbe de la caractéristique I-V pour le CdTe et le ZnTe tel qu'elle est montré dans la courbe IV.2.



**Figure IV.2 :** Caractéristiques I-V pour CdTe et ZnTe .

## Chapitre IV : Détermination théorique des paramètres photovoltaïques de CZT.

Le rendement de la cellule solaire à base de  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  a été évalué en fonction de la concentration du zinc et le meilleur rendement estimé à 15.8% a été obtenu pour 70% du zinc [2]. Ceci est indiqué dans la courbe IV.3 qui montre la variation du rendement en fonction de l'énergie du gap des alliages  $Cd_{1-x}Zn_xTe$ .



**Figure IV.3 :** Rendement de la cellule solaire  $Cd_{1-x}Zn_xTe$  en fonction de l'énergie de gap [2].

### IV.3 : Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire CZT en couches minces :

Dans ce qui suit, nous étudions théoriquement la cellule solaire CZT en couches minces, qui a été réalisée récemment par Chender et al [1] (Voir plus de détail dans le chapitre III). Afin de déterminer la limite théorique maximale du rendement de cette cellule, nous avons utilisé le modèle idéal décrit par la figure II.1.

## Chapitre IV : Détermination théorique des paramètres photovoltaïques de CZT.

### IV.3.1 : Caractéristique I-V :

Premièrement, nous avons calculé la caractéristique courant-tension (I-V) de la cellule solaire CZT dans différentes atmosphères.

Le courant de la diode est donné par l'équation :

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{qV}{AkT}\right) - 1 \right) \quad (\text{IV.8})$$

Pour cela, nous avons évalué tout d'abord le courant de saturation  $I_s$  pour  $I=0$ . Dans ce cas, son expression sera donc :

$$I_s = \frac{I_{ph}}{\exp\left(\frac{qV}{AkT}\right) - 1} \quad (\text{IV.9})$$

Avec :

$$I_{ph} = I_{cc} \quad (\text{IV.10})$$

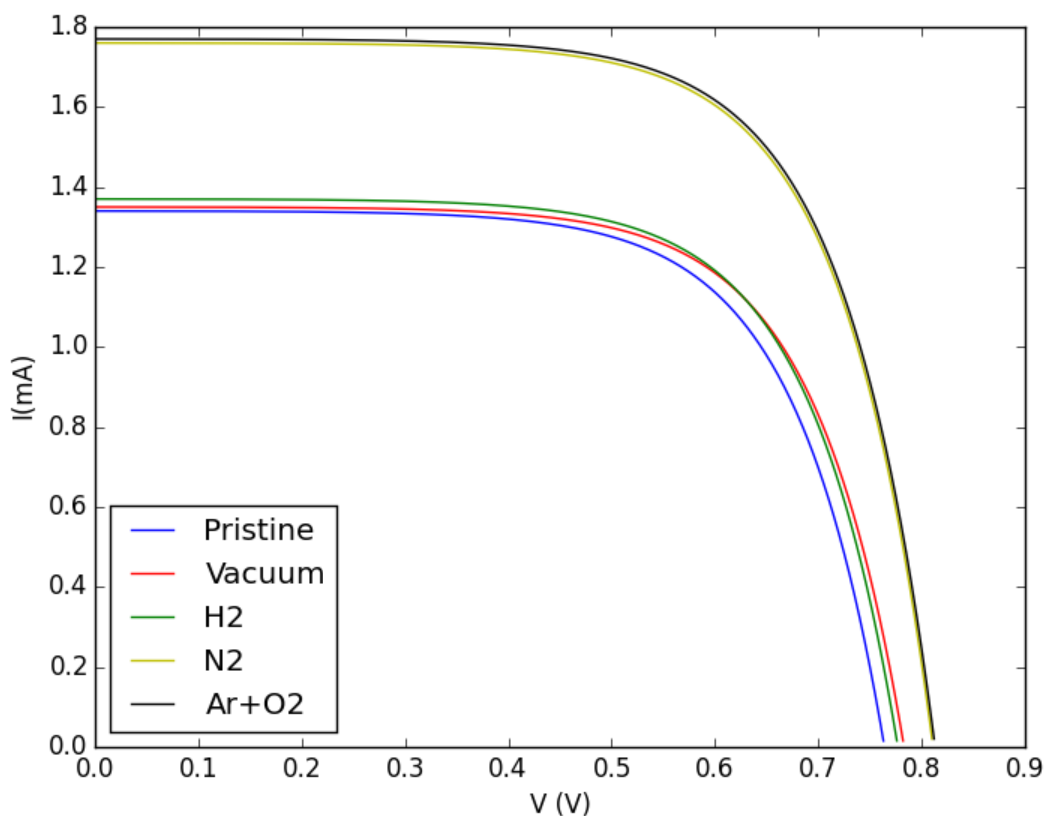
Les valeurs de courant de saturation  $I_s$  trouvé pour différentes atmosphères sont illustrées dans le tableau IV.2 suivant :

**Tableau IV.2 :** Les valeurs calculées de courant de saturation de la cellule solaire CZT dans plusieurs atmosphères

| Atmosphère          | $I_s$ (mA)            |
|---------------------|-----------------------|
| Pristine (primitif) | $2.05 \times 10^{-4}$ |
| Vacuum (vide)       | $1.66 \times 10^{-4}$ |
| H <sub>2</sub>      | $1.81 \times 10^{-4}$ |
| N <sub>2</sub>      | $1.57 \times 10^{-4}$ |
| Ar + O <sub>2</sub> | $1.54 \times 10^{-4}$ |

## Chapitre IV : Détermination théorique des paramètres photovoltaïques de CZT.

Nous illustrons dans la figure IV.4 la caractéristique I-V obtenue, de la cellule solaire CZT traitée sous cinq différentes atmosphères (Pristine , Vacuum , H<sub>2</sub> , N<sub>2</sub> , Ar + O<sub>2</sub>) à la température égale à 673.15 K (400 °C), un facteur d'idéalité A égale à 1.5 et sous un éclairement de 1000 w/m<sup>2</sup>. Nous constatons un bon accord avec les courbes expérimentales données par la figure III.6 (a).



**Figure IV.4 :** La caractéristique I-V théorique de la cellule solaire CZT pour les différentes atmosphères.

La figure nous indique que la cellule photovoltaïque est une source de courant constante pour des faibles valeurs de la tension avec un courant approximativement égale au courant de court circuit  $I_{cc}$ . Avec l'augmentation de la tension, le courant commence à diminuer exponentiellement jusqu'à la valeur zéro où la tension est égale à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ . Nous remarquons que l'accroissement du courant de court circuit  $I_{cc}$  pour les différentes atmosphères est plus important que l'accroissement de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , donc le changement de l'atmosphère réagit sur la caractéristique I-V. Ce

## Chapitre IV : Détermination théorique des paramètres photovoltaïques de CZT.

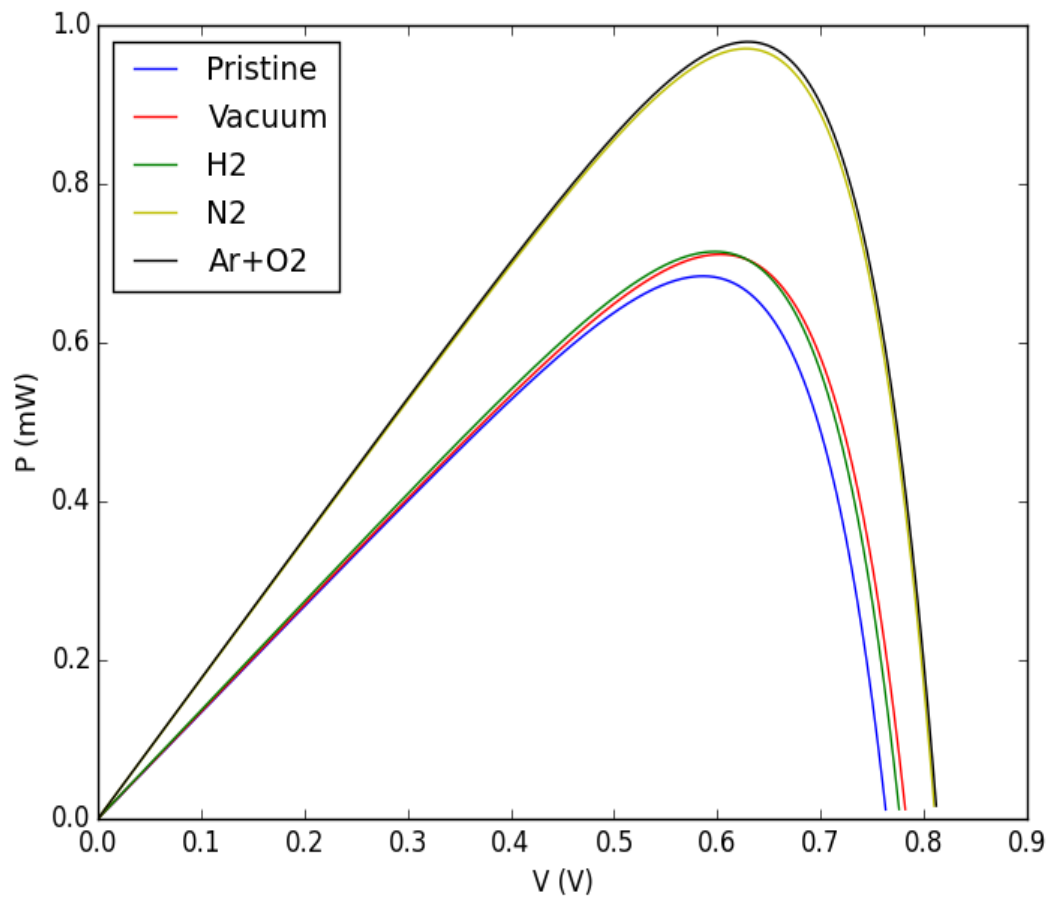
changement affecte les propriétés optiques du dispositif (absorption des photons) et les propriétés microstructurales de la couche d'absorbeur CdZnTe. Nous pouvons constater aussi que la cellule solaire traitée dans l'atmosphère Ar + O<sub>2</sub> a un courant de court circuit  $I_{cc}$  maximal et une tension de circuit ouvert  $V_{co}$  maximale, donc la caractéristique I-V est fortement influencée par le changement de l'atmosphère.

### IV.3.2 : Puissance P :

Nous avons évalué la puissance maximale à partir des valeurs maximales de l'intensité et de la tension. Les valeurs obtenues sont résumées dans le tableau (IV.3) suivant :

**Tableau IV.3 :** Puissance maximale de la cellule solaire CZT sous différentes atmosphères

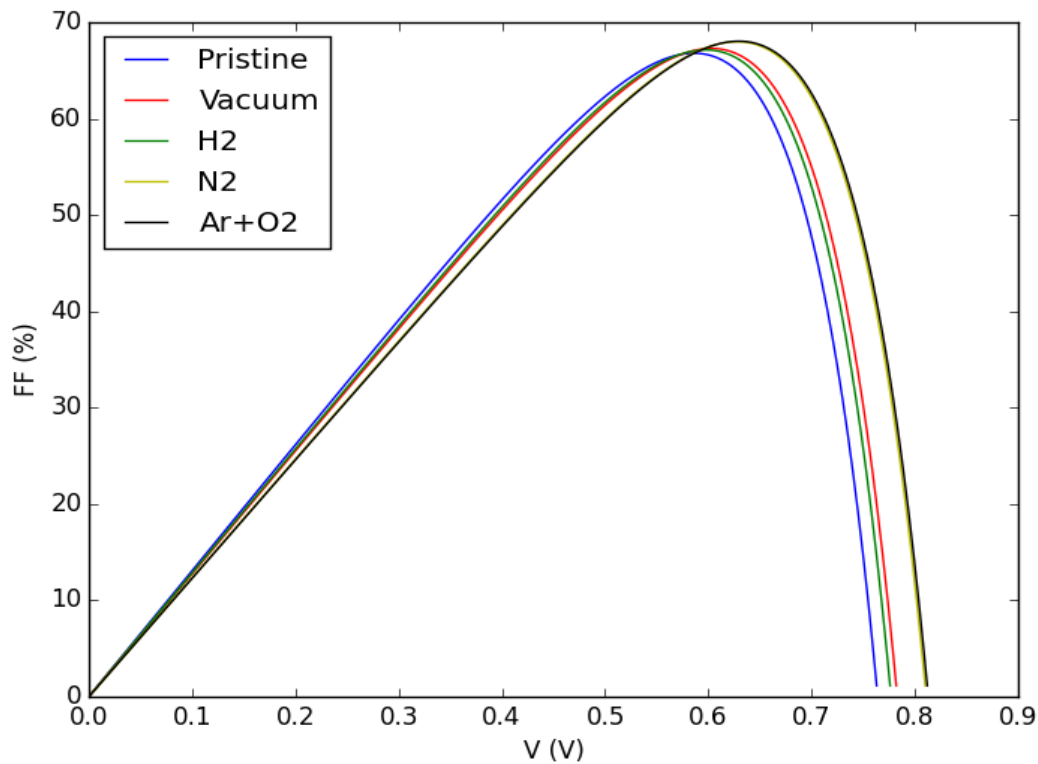
| L'atmosphère        | $V_{max}$ (V) | $I_{max}$ (mA) | $P_{max}$ (mW) |
|---------------------|---------------|----------------|----------------|
| Pristine            | 0,575         | 1,187          | 0,683          |
| Vacuum              | 0,586         | 1,213          | 0,711          |
| H <sub>2</sub>      | 0,610         | 1,170          | 0,714          |
| N <sub>2</sub>      | 0,638         | 1,521          | 0,970          |
| Ar + O <sub>2</sub> | 0,641         | 1,528          | 0,979          |



**Figure IV.5 :** La caractéristique P-V de la cellule solaire CZT pour les différentes atmosphères.

La figure IV.5 montre les allures de la puissance en fonction de la tension. La puissance augmente proportionnellement avec la tension jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale, correspondante à l'intensité maximale  $I_{max}$  et la tension maximale  $V_{max}$ . Après ce pique, nous remarquons une diminution de la puissance en fonction de la tension. Ceci est normal, car la puissance dépend des valeurs du courant et de la tension de la caractéristique I-V. En comparant à d'autres atmosphères, nous remarquons que la puissance est maximale dans le cas du Ar + O<sub>2</sub>, et est égale à 0.979 W/m, ce qui signifie que ce milieu offre une absorbance élevée des photons.

### IV.3.3 : Facteur de Forme FF :



**Figure IV.6 :** Facteur de Forme en fonction de la tension de la cellule solaire CZT pour les différentes atmosphères.

La figure IV.6 représente les allures du facteur de forme en fonction de la tension, correspondant à la cellule solaire CZT pour les cinq atmosphères. On sait que le facteur de forme est le rapport de surface du rectangle (puissance) au produit de la tension en circuit ouvert et du courant de court circuit, donc il a la même allure que la puissance. Chaque courbe a une valeur maximale correspond à la même valeur de la tension équivalent à la puissance maximale, d'après les courbes, Nous déduisons que l'atmosphère Ar + O<sub>2</sub> et le meilleur milieu qui donne un FF = 68,037 %.

## Chapitre IV : Détermination théorique des paramètres photovoltaïques de CZT.

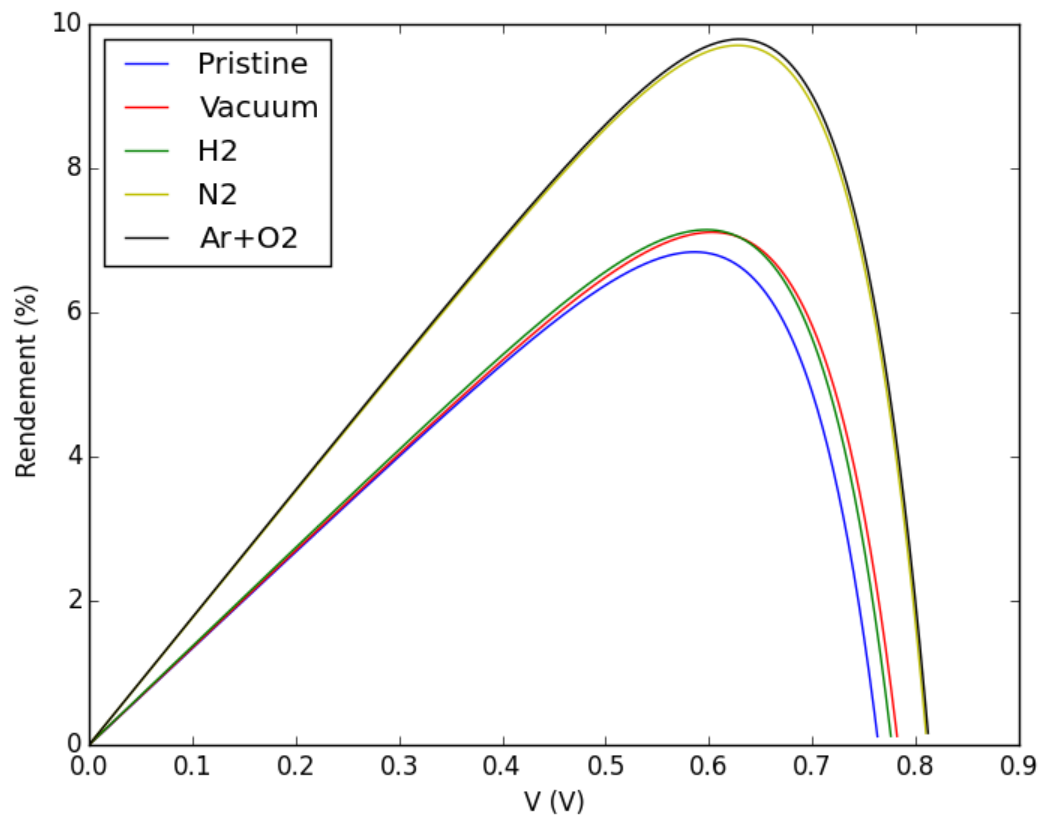
**Tableau IV.4 :** Les paramètres électriques de la cellule solaire CZT.

| L'atmosphère        | $V_{co}$ (V) | $I_{cc}$ (mA) | $P_{max}$ (mW) | FF (%) |
|---------------------|--------------|---------------|----------------|--------|
| Pristine            | 0,764        | 1,34          | 0,683          | 66,795 |
| Vacuum              | 0,783        | 1,35          | 0,711          | 67,289 |
| H <sub>2</sub>      | 0,777        | 1,37          | 0,714          | 67,134 |
| N <sub>2</sub>      | 0,811        | 1,76          | 0,970          | 67,988 |
| Ar + O <sub>2</sub> | 0,813        | 1,77          | 0,979          | 68,037 |

### IV.3.4 : Rendement $\eta$ :

Dans la figure IV.7, nous illustrons notre résultat théorique du rendement pour la cellule solaire CZT. Le rendement dépend de la caractéristique I-V et de la puissance. Nous remarquons que, par rapport aux autres atmosphères, la performance de la cellule est améliorée dans l'atmosphère Ar + O<sub>2</sub>. Le rendement ici est maximal atteignant la valeur de 9,79%. La comparaison de ces résultats avec l'expérience [1] montre que le rendement idéal est supérieur au rendement réel car il n'y a pas des parasites (les résistances). Le tableau IV.5 montre une comparaison entre le rendement théorique obtenu et le rendement expérimental pour les différentes atmosphères. Les résultats montrent la limite maximale que peut atteindre le rendement. Pour le cas de l'atmosphère Ar + O<sub>2</sub>, une amélioration qui ne dépasse pas les 15.31 % pourra être réalisée en développant les techniques expérimentales.

## Chapitre IV : Détermination théorique des paramètres photovoltaïques de CZT.



**Figure IV.7 :** Le rendement théorique de la cellule solaire CZT  
Pour les différentes atmosphères.

## Chapitre IV : Détermination théorique des paramètres photovoltaïques de CZT.

**Tableau IV.5 :** Le rendement théorique de la cellule solaire CZT comparé à l'expérience.

| L'atmosphère        | Rendement<br>calculé $\eta$ (%) | Rendement<br>expérimental $\eta$ (%)<br>[1] | $\frac{\Delta\eta}{\eta}$ (%) |
|---------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------|
| Pristine            | 6,83                            | 6.37                                        | 7.22                          |
| Vacuum              | 7,11                            | 6.81                                        | 4.23                          |
| H <sub>2</sub>      | 7,14                            | 6.88                                        | 3.78                          |
| N <sub>2</sub>      | 9,70                            | 7.32                                        | 32.51                         |
| Ar + O <sub>2</sub> | 9,79                            | 8.49                                        | 15.31                         |

## Chapitre IV : Détermination théorique des paramètres photovoltaïques de CZT.

### Conclusion :

La cellule solaire CZT, d'une structure de dispositif verre/ITO/CdS/CdZnTe/Au, a été traité sous différentes atmosphères de post-traitement (Pristine , Vacuum ,  $H_2$  ,  $N_2$  ,  $Ar + O_2$ ) à la température de  $400^\circ C$  et sous un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Les résultats expérimentaux montrent que l'atmosphère  $Ar + O_2$  est la plus appropriée donnant un rendement de 8.49 %. Dans ce chapitre on a implémenté un programme python qui sert à déterminer les paramètres théoriques maximales de cette cellule avec une précision de  $10^{-5}$  pour les cinq différentes atmosphères, où on a déduit que l'amélioration de rendement pour l'atmosphère ( $Ar + O_2$ ) ne dépasse pas les 15,31%.

## Références:

---

**[1]** : C Chander, A K De, M S Dhaka "Towards CdZnTe solar cells: An evolution to post-treatment annealing atmosphere" Solar Energy **179**, 757-761(2018)

**[2]** : M Benghanem, A E Merad "Theoretical determination of the efficiency of Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te single solar cell materials", Internal Report, UNESCO-IAEA-ICTP, 1-8, Miramare –Trieste , (2007)

**[3]** : P Kireev , «la physique des semiconducteurs », MIR, Moscou , translated from Russian by S.Mendelev (1975).

## Conclusion Générale :

---

L'évolution des énergies renouvelables est devenue une priorité, sinon une obligation de survie à l'échelle humaine. Parmi ces énergies, l'énergie solaire qui est illimitée, propre, gratuite et moins coûteuse. Grâce à cette source énergétique, on peut produire de l'électricité par l'effet photovoltaïque qui convertit la lumière du soleil directement à une électricité. Cette filière a profité des nouvelles connaissances expérimentales dans le domaine des matériaux et la simulation qu'elle encourage les chercheurs car elle leur pose un défi.

Dans le présent travail, on modélise les paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque de nouvelle génération à base de nouveaux alliages semi-conducteurs cette cellule est basé sur le CdZnTe.

Dans un premier temps, nous avons tout d'abord décrit des notions de base d'un système photovoltaïque où nous avons décrit en premier les semi-conducteurs et la physique de ces dispositifs, et le principe de fonctionnement des cellules solaires ainsi les différents types de ces cellules. L'un de ces types est les cellules multi-jonctions (Tandem). Ensuite, Nous avons donné une description de la modélisation des cellules photovoltaïques avec des circuits électriques équivalents et les équations mathématiques qui les gouvernent.

Ensuite, nous avons présenté une bibliographie d'une réalisation récente de la cellule solaire CZT, basée sur l'élaboration du semiconducteur CdZnTe. Les étapes d'élaboration et de caractérisation ainsi que les performances photovoltaïques de la cellule CZT sont détaillées et expliquées. Ainsi, la cellule solaire CZT, d'une structure de dispositif ITO/CdS/CdZnTe/Au, a été traité sous différentes atmosphères de post-traitement (Pristine , Vacuum ,  $H_2$  ,  $N_2$  , Ar +  $O_2$ ) à la température de  $400^\circ C$  et sous un éclairciment de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Les résultats expérimentaux montrent que l'atmosphère Ar +  $O_2$  est la plus appropriée donnant un rendement de 8.49 %.

Afin d'avoir une idée sur à quel degrés d'amélioration, cette cellule solaire CZT pourra être intéressante, nous avons ciblé comme objectif, parmi les objectifs réalisés dans ce travail, la détermination de la limite théorique maximale du rendement. Pour cela, nous avons réalisé un programme basé sur le **python 2.7 (spider)** qui permet de déterminer les caractéristiques photovoltaïques de cette cellule solaire, à savoir : la caractéristique courant-tension I-V, la caractéristique puissance-tension P-V, le facteur de forme FF et le rendement  $\eta$ .

Les résultats obtenus montrent que la limite théorique du rendement n'était pas aussi loin de la valeur expérimentale. En effet, pour le cas de l'atmosphère Ar + O<sub>2</sub>, nous avons montré qu'une amélioration qui ne dépasse pas les 15.31 % pourra être réalisée en développant les techniques expérimentales appropriées.

### **Perspectives :**

A partir de cela l'objectif de notre travail est atteint globalement ce qui nous encourage à déterminer la limite maximale du rendement théorique pour plusieurs expériences en suivant la même démarche (valable pour plusieurs expériences). Ceci nous pousse aussi à développer notre champ de recherche à calculer le rendement pour cette cellule dans le cas réel en tenant compte des valeurs des parasites résistances (série, shunt), qui nous permet d'approcher aux rendements expérimentaux et aussi on peut étudier l'influence de la température et de l'éclairement sur cette cellule.

## Résumé :

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables la plus utilisée actuellement. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique (solaire) en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semiconducteur. Dans notre travail on a étudié une réalisation récente de la cellule solaire inorganique (CZT) formé à base des semi conducteurs CdZnTe. Elle a été traitée sous différentes atmosphères de post-traitement. Dans cette configuration, on a développé un programme python qui sert à déterminer la caractéristique I-V et on a déduit aussi les paramètres photovoltaïques (la puissance, le facteur de forme, le rendement) avec une précision de  $10^{-5}$ . Les résultats obtenus montrent que la limite théorique du rendement n'était pas aussi loin de la valeur expérimentale. En effet, pour le cas de l'atmosphère Ar + O<sub>2</sub>, nous avons montré qu'une amélioration qui ne dépasse pas les 15.31 % pourra être réalisée en développant les techniques expérimentales appropriées.

**Mots clés :** Alliages semi conducteurs, cellule photovoltaïque, caractéristique courant-tension, modélisation, résolution numérique.

## Abstract:

Photovoltaic solar energy is one of the most widely used renewable energies. It consists of converting directly the electromagnetic (solar) radiation into electricity through the production and transport in a semiconductor material. This work represents the study of recent realization of the inorganic SC (CZT) formed from CdZnTe semiconductors. It has been processed under different post-processing atmospheres. In this configuration, we have developed a python program which is used to determine the I-V characteristic and we also deduce the photovoltaic parameters (the power, the form factor, the efficiency), with an accuracy of  $10^{-5}$ . The results obtained show that the theoretical limit of the efficiency was not so far from the experimental value. Indeed, for the case of the Ar + O<sub>2</sub> atmosphere, we have shown that an improvement that does not exceed 15.31% can be achieved by developing the appropriate experimental techniques.

**Key words:** Semiconductor alloys, photovoltaic cell, characteristic current-voltage, modeling, digital resolution.

## ملخص:

الطاقة الشمسية الفوتوضوئية من الطاقات المتجددة الأكثر استعمالاً في الوقت الحالي . فهي تعتمد على التحويل المباشر للفوتونات إلى كهرباء و ذلك اعتماداً على أشباه الموصلات . يهدف هذا العمل إلى دراسة خلية فوتوضوئية غير عضوية مصنوعة من CdZnTe ، بحيث عولجت في خمسة أجواء مختلفة ، قمنا باستحداث برنامج python ، يعمل على حساب خاصية ( تيار\_توتر ) و استنتاج الخواص الأخرى للخلية ( القوة ، عامل الشكل ، المردود ) كما قمنا بتحديد قيمة تحسين المردود التي قدرت ب 15,31% التي يمكن تحصيلها بتطوير ظروف التجربة

**الكلمات المفتاحية :** ترابط أشباه الموصلات ، خلية فوتوضوئية، ميزة ( تيار\_توتر ) ، النمذجة و المحاكاة