



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

## UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : Physique Energétique et Énergies Renouvelables

Par :

**Mr AZZOUG Oussama**

Sur le thème

---

# Etudes et Optimisation des cellules solaires en couche mince à base de Kesterite

---

Soutenu publiquement le 24 juin 2023 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mr AMARA Sofiane	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mme MERAD Faiza	MRB	Centre de développement de Satellite d'Oran	Encadrante
Mr MERAD Abdelkrim	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur
Mme BOUAYED Nawel	MCA	Université de Tlemcen	Co-encadrante

## Dédicaces

### À mes chers parents

Ma très chère mère **Bouchaour Ilhem**, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, je t'aime et je te souhaite une longue vie.

Mon cher père **Molay Boumedienne** qui n'a pas arrêté de m'encourager et de se sacrifier pour que je puisse franchir tout obstacle durant mes années d'études, que Dieu me le garde en très bonne santé.

À mes très chères sœurs **Fadia** et **Amina**, pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral.

À mes chers frères **Mehdi** et mon petit frère **Islem** pour son appui et leur encouragement.

À mes grand-mères **Ezouhra** et **Hayat** et mon grand père **Abd Elghani**

À mon oncle **Abdrezak** pour vos mots d'encouragement, je vous remercie et vous offre tout mon respect.

À mes amis particuliers, mes frères **Aissani Sid Ahmed** , **Lansari Abdelkrim**.

À mes précieux cousins **Riad**, **Malik**, **Rachid**, **abdesamd**, **Hichem**, **Mouhammed**.

À toute ma famille pour leur soutien indéfectible tout au long de ma carrière universitaire.

**AZZOUG OUSSAMA**

## Remerciements

Je remercie tout d'abord **ALLAH** tout puissant de m'avoir donné la force, la patience, la volonté, le courage et la connaissance afin d'accomplir ce modeste travail.

Mes premiers remerciements s'adressent conjointement et tout naturellement à mon Encadrante **Madame KANOUN** née **MERAD Faiza** Maitre de Recherche au centre de développement de Satellite d'Oran, pour la qualité de son encadrement, ses compétences et ses conseils qui m'ont permis de mener à bien ce projet. Je lui suis également reconnaissante pour sa disponibilité et sa qualité humaine qui m'ont permis de travailler dans les meilleures conditions.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **mon Co-encadreur Madame BOUAYED** née **KANOUN Nawel** Maitre de conférences l'université de Tlemcen qui n'a ménagé aucun effort afin de me défrayer le chemin, facilité mes tâches et me guidé dans l'élaboration de ce mémoire.

Je tiens à remercier vivement **Monsieur AMARA Sofiane**, Professeur à l'université de Tlemcen, de m'avoir fait l'honneur d'accepté de présider le jury.

Je voudrais aussi adresser mes plus vifs remerciements à **Monsieur MERAD Abdelkrim** Professeur à l'université de Tlemcen, de m'avoir fait l'honneur d'examiné ce modeste travail.

Mes remerciements vont aussi à **Monsieur KANOUN Ahmed Ali** Maitre de Recherche au centre de développement de Satellite d'Oran qui m'a beaucoup aidé dans ce travail.

Enfin, je ne saurais oublier de remercier toutes les personnes qui me sont chères, et particulières : mon père, ma mère mes sœurs et mes frères, pour leurs encouragements, la confiance et le soutien morale dont ils ont fait preuve tout au long de ce travail. Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin au succès de ce travail de mémoire

## Table des matières

Liste des figures .....	i
Liste des tableaux.....	iii
Liste des symboles .....	iv
Liste des acronymes .....	v
Introduction générale .....	2
Références Bibliographies.....	5
I.1. Introduction .....	7
I.2. Rayonnement solaire : .....	7
I.3. Cellule solaire photovoltaïque .....	9
I.3.1. Historique.....	9
I.3.2 Description .....	11
I.3.3 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque .....	12
I.3.4 Différents paramètres de sortie de la cellule photovoltaïque.....	13
I.3.5 Modélisation électrique de la cellule photovoltaïque .....	15
I.4. Évolutions des cellules solaires.....	15
I.4.1 Cellule solaire de Première Génération .....	17
I.4.1.a Silicium monocristallin .....	17
I.4.1.b Les cellules à base de Si multicristallin.....	17
I.4.2 Cellule solaire du Deuxième Génération (couche minces) .....	18
I.4.2.a Silicium Amorphe .....	18
I.4.2.b Tellure de Cadmium (CdTe) .....	19
I.4.2.c Le di-séléniure de cuivre et indium (CIS ou CIGS) .....	20
I.4.2.d CZTSSe .....	22
I.4.3 Cellule solaire de la Troisième génération.....	22
I.4.3.a Filière des cellules organiques .....	22
I.4.3.b La filière des pérovskites.....	22
I.5. Conclusion.....	23
Références Bibliographies.....	24
II.1. Introduction .....	28
II.2 Les couches minces.....	28
II.2.1 La définition d'une couche mince .....	28
II.2.2 Caractéristiques des couches minces .....	28
II.2.4 Mécanisme de formation et croissance d'une couche mince .....	30

II.3	Description du matériau ZnO .....	30
II.4	Description du matériau CdS .....	31
II.5	Description du matériau GaAs .....	32
II.5.1	Applications du GaAs en couches minces sur les cellules photovoltaïques .....	33
II.6	Les cellules photovoltaïques couches mince à base de Kesterite .....	33
II.6.1	Structure d'une cellule à base de CZTS .....	33
II.6.2	Structure du matériau CZTSSe .....	34
II.6.3	Propriétés électriques.....	35
II.6.4	Propriétés optiques.....	36
	Conclusion.....	37
	Références Bibliographies.....	38
III.1.	Introduction .....	41
III.2.	Presentation du logiciel de simulation .....	41
III.2.1	Définition .....	41
III.2.2	Utilisation du logiciel.....	42
III.2.3	Théorie de fonctionnement .....	43
III.2.4	Avantages et inconvénients du SCAPS.....	45
III.3	Simulation par SCAPS.....	45
III.3.1	Structure et paramètres de la cellule étudiée .....	45
III.3.1.1	Présentation de la cellule étudiée .....	45
III.3.1.2	Les paramètres du dispositif étudié.....	46
III.3.2	Résultats et discussion .....	47
III.3.2.1	Simulation structurelle.....	47
III.3.2.2	Influence de la variation de l'épaisseur.....	49
III.3.2.3	Influence de la variation de dopage.....	54
III.4	Conclusion.....	61
	Références Bibliographiques .....	63
	Conclusion générale.....	65

## Liste des figures

Figure I.1	Spectres du rayonnement solaire moyen incident au sommet de l'atmosphère (courbe noir) et à la surface de la Terre (bleu)	6
Figure I.2	Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le Soleil notion de la convention AM	7
Figure I.3	Les débuts du photovoltaïque : (a) expérience électrochimique de A.E. Becquerel, (b) la première cellule solaire d'Adams et Day	9
Figure I.4	Les inventeurs de la première cellule solaire "réelle » : Chapin, Fuller et Pearson. La figure à droite montre le premier module solaire au monde (mini module de 8 cellules solaires)	10
Figure I.5	l'assemblage d'une cellule photovoltaïque Si	11
Figure I.6	Schéma explicatif du fonctionnement d'une cellule Photovoltaïque	12
Figure I.7	Caractéristiques I(V) d'une cellule photovoltaïque soumise à différents éclairagements	13
Figure I.8	Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque	14
Figure I.9	part de marché des différentes technologies solaires	14
Figure I.10	Cellule solaires au silicium monocristallin et poly-cristallin	15
Figure I.11	Progression des rendements de conversion dans les industries des cellules à base de silicium multicristallin. Source NREL USA	16
Figure I.12	Cellule solaire au silicium amorphe en couche mince	17
Figure I.13	Schéma de principe d'une cellule à base de silicium amorphe et comparaison à une cellule en silicium cristallin	17
Figure I.14	Structure d'une cellule photovoltaïque au CdTe	18
Figure I.15	Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS	19
Figure I. 16	Cellule solaire organique	20
Figure II.1	Carte conceptuelle montre les étapes du procédé de fabrication de couches minces	29
Figure II.2	Structure wurtzite de l'Oxyde de Zinc	30
Figure II.3	Structure du composé (CdS). (a -zinc blende), (b - Wurtzite)	31
Figure II.4	Maille élémentaire de deux types de structures cristallographiques (a) zinc blendedu GaAs et (b) diamant du Si	32
Figure II.5	Structure standard d'une cellule à base de CZTS	33
Figure II.6	Les familles de semi-conducteur dont le CZTSSe est issu	34
Figure II.7	Structures cristalline du $Cu_2ZnSn(S,Se)_4$ : Structures kesterite (gauche) et stannite (droite)	34
Figure II.8	Variation de l'énergie de bande interdite du CZTSSe en fonction de la composition x qui vaut pour ce schéma $x = [Se]/([S]+[Se])$	36
Figure III.1	Panneau de démarrage du logiciel SCAPS, « action panel » ou principal	42
Figure III.2	Stratégie de fonctionnement de SCAPS	45
Figure III.3	Schéma simplifié de la cellule solaire en couche mince utilisée	46

Figure III.4	Schéma simplifié de la cellule solaire en couche mince utilisée	47
Figure III.5	Caractéristiques I-V simulé pour cellule solaire en couche mince avec et sans la couche GaAs	48
Figure III.6	Rendements quantiques simulé pour cellule solaire en couche mince avec et sans la couche GaAs	48
Figure III.7	L'effet d'épaisseur de la couche CZTS sur la caractéristique I-V	50
Figure III.8	L'effet d'épaisseur de couche CZTS sur le rendement quantique	50
Figure III.9	Variation des performances ( $V_{oc}$ , $J_{sc}$ , FF et $\eta$ ) de la cellule solaire en couche mince en fonction de l'épaisseur de la couche d'absorbeur CZTS	51
Figure III.10	L'effet d'épaisseur de la couche GaAs sur la caractéristique I-V	52
Figure III.11	L'effet d'épaisseur de couche GaAs sur le rendement quantique	52
Figure III.12	Variation des performances ( $V_{oc}$ , $J_{sc}$ , FF et $\eta$ ) de la cellule solaire en couche mince en fonction de l'épaisseur de la couche GaAs	53
Figure III.13	L'effet d'épaisseur de la couche CdS sur la caractéristique I-V	54
Figure III.14	L'effet d'épaisseur de couche CdS sur le rendement quantique	54
Figure III.15	Variation des performances ( $V_{oc}$ , $J_{sc}$ , FF et $\eta$ ) de la cellule solaire en couche mince en fonction de l'épaisseur de la couche CdS	55
Figure III.16	L'effet de dopage de couche CZTS sur la caractéristique I-V	56
Figure III.17	L'effet de dopage de couche CZTS sur le rendement quantique	56
Figure III.18	Variation des performances ( $V_{oc}$ , $J_{sc}$ , FF et $\eta$ ) de la cellule solaire en couche mince en fonction de dopage de la couche CZTS	57
Figure III.19	L'effet de dopage de couche GaAs sur la caractéristique I-V	58
Figure III.20	L'effet de dopage de couche GaAs sur le rendement quantique	58
Figure III.21	Variation des performances ( $V_{oc}$ , $J_{sc}$ , FF et $\eta$ ) de la cellule solaire en couche mince en fonction de dopage de la couche GaAs	59
Figure III.22	L'effet de dopage de couche CdS sur la caractéristique I-V	60
Figure III.23	L'effet de dopage de couche CdS sur le rendement quantique	60
Figure III.24	Variation des performances ( $V_{oc}$ , $J_{sc}$ , FF et $\eta$ ) de la cellule solaire en couche mince en fonction de dopage de la couche CdS	61
Figure III.25	Les caractéristiques $V_{oc}$ , $J_{sc}$ , FF (%) et $\eta$ (%) en fonction de band gap de la couche CZTS	62

### Liste des tableaux

Tableau III.1	Paramètres de la cellule solaire en couche mince utilisé dans la simulation	47
Tableau III.2	Les paramètres des structures de la cellule solaire en couche mince étudié	49



## Liste des symboles

Symbole	Signification	Unité
$I_{cc}$	Courant de court-circuit.	A
$V_{co}$	Tension en circuit ouvert.	V
<b>FF</b>	Facteur de forme.	%
$P_m$	Point de puissance maximale.	W
$\eta$	Rendement énergétique.	%
$V_m$	La tension à la puissance maximale.	A
$I_m$	Le courant à la puissance maximal.	V
<b>S</b>	Surface de la cellule solaire.	m <sup>2</sup>
$E_g$	Energie de la bande interdite (gap).	eV
<b>T</b>	Température.	°C
$\Lambda$	Longueur d'onde	Nm
$T_f$	Température de fusion.	°C
$N_A$	Densité des accepteurs	cm <sup>-3</sup>
$N_D$	Densité des donneurs	cm <sup>-3</sup>
$\mu_n$	Mobilité des électrons	m <sup>2</sup> /V.s
$\mu_p$	Mobilité des trous	m <sup>2</sup> /V.s
<b>QE</b>	Rendement quantique	%
<b>E</b>	Permittivité électrique	F m-1
$h_\lambda^c$	L'énergie d'un photon	J
<b>A</b>	Coefficient d'absorption	
<b>I(V)</b>	Courant-tension	
<b>K</b>	La constante de Boltzmann est égale à 1.38×10 <sup>-23</sup> J/K.	J/K
$I_{ph}$	Courant photo générée ou photo courant.	V

## Liste des acronymes

<b>Abréviation</b>	<b>Définition</b>
<b>AM</b>	Spectre d'irradiance solaire hors atmosphère.
<b>AM0</b>	Masse atmosphérique (nombre d'air masse).
<b>CZTS</b>	sulfure de cuivre, de zinc et d'étain
<b>CZTSSe</b>	sulfure de cuivre, de zinc et d'étain
<b>CdS</b>	Sulfure de cadmium.
<b>CIGS</b>	Séléniure de Cuivre et Indium et de Gallium.
<b>CIS</b>	Séléniure de Cuivre et Indium.
<b>GaAs</b>	Arséniure de Gallium.
<b>CdTe</b>	Tellurure de cadmium.
<b>PV</b>	Photovoltaïque.
<b>PECVD</b>	Plasma- Enhanced Chemical Vapor Deposition.
<b>ZnO</b>	Oxyde de Zinc.
<b>Si</b>	Silicium.
<b>TCO</b>	Oxide Transparent Conducteur.
<b>UV</b>	Ultra-Violet
<b>SCAPS</b>	Simulateur de capacité de la cellule solaire.
<b>mono-Si</b>	Silicium Monocristallin.
<b>a-Si:H</b>	Silicium amorphe hydrogéné.
<b>Mo</b>	Molybdénium.
<b>Ni/Al</b>	Nickel Aluminide.
<b>CBD</b>	Chemical bath deposition.
<b>In<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Oxyde d'indium.
<b>SnO<sub>2</sub></b>	Dioxyde d'étain.
<b>ITO</b>	Oxyde de l'indium dopé à l'étain (Indium Tin Oxide).
<b>CVD</b>	Chemical Vapor Deposition.
<b>PCE</b>	Power Conversion Efficiency.

# **Introduction Générale**

## Introduction générale

Si nous observons notre environnement pour voir quelle est la ressource gratuite la plus abondante dont nous disposons, la réponse est l'énergie solaire. C'est pour cette raison qu'elle représente une alternative potentielle et naturelle aux combustibles fossiles, comme le pétrole, le gaz et le charbon. L'énergie fossile est utilisée pour générer l'électricité à grande échelle. La rareté et le gaspillage de ces ressources l'ont rendues coûteuses. Il existe de nombreuses raisons d'utiliser l'énergie solaire, comme, le réchauffement climatique, le coût des combustibles fossiles et les biocarburants ainsi que l'évolution de l'utilisation de l'énergie solaire [1].

Effectivement, les panneaux solaires photovoltaïques ont suscité beaucoup d'attention ces dernières décennies et ont connu un développement rapide. Bien que la contribution actuelle de l'énergie solaire à la consommation totale d'énergie soit encore relativement faible, soit de l'ordre de 2 à 3 %, les améliorations récentes dans la technologie photovoltaïque laissent présager des avancées significatives dans la résolution des défis énergétiques [2]. L'augmentation de la production en volume et l'émergence de nouvelles technologies de cellules solaires rentables ont permis d'atteindre ces résultats. Toutefois, malgré les progrès réalisés, la commercialisation de ces technologies a été entravée par le coût élevé des modules de cellules solaires. Les scientifiques ont donc focalisé leurs recherches sur l'amélioration des performances, la diminution des coûts et la fiabilité des dispositifs solaires [3]. La technologie des couches minces joue un rôle important dans le développement de l'énergie solaire en permettant l'utilisation de matériaux peu coûteux qui rendent les installations solaires plus rentables.

Les cellules solaires à couches minces sont basées principalement sur les matériaux CdTe, silicium amorphe, CIS, CIGS, CIGSe, GaAs et  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS). Parmi eux, les cellules à base GaAs et CdTe qui contiennent des éléments toxiques (Cd, Te, As) et les cellules à base de CIS qui contiennent des éléments rares tel que l'indium et le gallium [4]. Par conséquent, et dans le futur, les applications de cellules solaires de grande surface ne peuvent pas être basées sur ces deux types d'absorbeurs [5]. Le CZTS est un matériau composé quaternaire du groupe  $\text{I}_2\text{-II-IV-VI}_4$  à structure késtéritique. Sa bande interdite est d'environ 1.5eV, ce qui est un écart optimal pour la conversion de l'énergie solaire. Cette valeur de bande interdite est très proche de la limite théorique de Shockley Queisser de la cellule solaire à semi-conducteur à jonction p-n unique (1.35 eV) [6]. CZTS est un matériau semi-conducteur à bande interdite directe ayant un coefficient d'absorption élevé [7]. Le CZTS par son respect

## Introduction générale

---

de l'environnement et sa non toxicité représente le meilleur candidat pour la prochaine génération de cellules solaires à couche mince. Récemment, il a été annoncé que les cellules solaires à couches minces de type CZTS ont déjà atteint plus de 12,6% d'efficacité sur la base de son matériau sulfo-séléniure (CZTSSe) associé [8]. Cette efficacité est déjà proche de l'efficacité CIGS commercialisée. Bien que CZTS soit considéré comme un substitut potentiel du CIGSSe comme matériau absorbant, la formation d'une jonction p-n avec des caractéristiques électroniques appropriées est très importante pour réaliser un dispositif performant, en particulier l'alignement des bandes entre les matériaux CdS (type n) et le CZTS (type p).

Dans notre étude, Nous avons utilisé le SCAPS-1D qui est un programme de simulation à une dimension qui nous a permis de concevoir une simulation numérique de cellules solaires en couche mince. Cette approche permet de modéliser les caractéristiques électriques des cellules solaires et d'estimer leurs performances. Les caractéristiques fondamentales que nous avons calculées comprennent la densité de courant de court-circuit  $J_{sc}$ , la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ , le facteur de forme FF et le rendement de conversion de la cellule solaire  $\eta$ .

Notre travail de mémoire sera divisé en trois chapitres:

Le premier chapitre traitera l'aspect technologique des cellules photovoltaïques, y compris leurs principe de fonctionnement et leurs caractéristiques électriques. Nous discuterons également des différentes filières des cellules photovoltaïques, c'est-à-dire des types de matériaux utilisés et de leurs avantages et inconvénients respectifs.

Dans le deuxième chapitre, Nous aborderons les généralités sur les couches minces. Nous présenterons les propriétés fondamentales des cellules solaires en couches minces, telles que leur faible épaisseur et la manière dont elles sont fabriquées.

Enfin, le dernier chapitre sera consacré à la simulation et à la discussion des résultats obtenus. En commençant par la description du programme SCAPS-1D utilisé pour la simulation. Ensuite, l'étude des performances de deux types de cellules solaires en couches minces : la structure CZTS/CdS/ZnO et la structure GaAs/CZTS/CdS/ZnO. Observer également l'effet de l'ajout de la couche BSF en GaAs sur les performances de la cellule. Enfin, l'étude est étendue à l'analyse de l'effet de la variation de l'épaisseur et des concentrations des dopants des différentes couches de la structure sur les performances de la cellule solaire.

## Introduction générale

---

Ce manuscrit s'achèvera par une conclusion générale, qui sera une synthèse des principaux résultats satisfaisants, pourront promettre des dispositifs photovoltaïques plus efficace à base de couches minces.

### Références Bibliographiques

- [1] BELARBI FATEN “ Etude des performances d’une cellule solaire à base d’un matériau ternaire CuXS2 ” Thèse de Doctorat Faculté de Physique 2021/2022
- [2] <http://www.irena.org/publications/2015/May/Renewable-Energy-and-Jobse-Annual-Review-2015>, (2015).
- [3] J. L. Stone, “Photovoltaics: Unlimited electrical energy from the sun,” *Physics Today*;(United States), vol. 46, no. 9, 1993.
- [4] Greenpeace and the European Photovoltaic Industry Association, *Solar Generation VI* (2011)
- [5] International Energy Agency, 2014. *Technology Roadmap, Solar photovoltaic energy*.
- [6] William Shockley and Hans J. Queisser, "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells", *Journal of Applied Physics*, Volume 32, pp. 510-519 (1961).
- [7] Delbos S. Kesterite thin films for photovoltaics: a review [J]. *EPJ Photovoltaics*, 2012, 3: 35004.
- [8] Wang W, Winkler M T, Gunawan O, et al. Device characteristics of CZTSSe thin-film

# **Chapitre I:**

## **État de l'art**

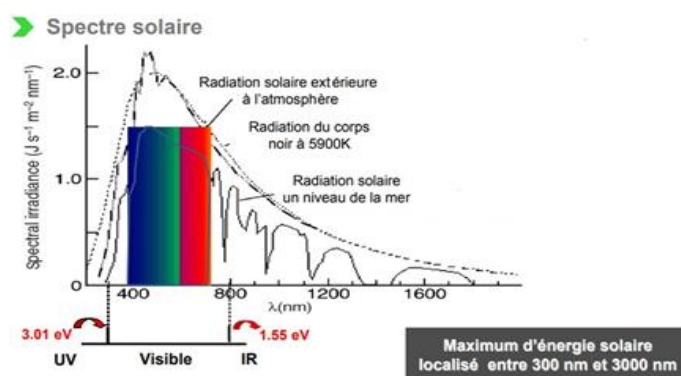


## I.1. Introduction

L'énergie solaire est considérée comme l'une des formes les plus importantes d'énergie renouvelable. Elle est générée par la lumière et la chaleur du soleil et peut être convertie en électricité de différentes manières, soit directement, soit indirectement. La conversion photovoltaïque est considérée comme l'une des technologies les plus récentes dans le domaine des énergies renouvelables. Elle présente plusieurs avantages importants. Tout d'abord, elle est non polluante, car elle ne produit pas de gaz à effet de serre ni de polluants atmosphériques lors de son fonctionnement. De plus, elle utilise une ressource inépuisable, le rayonnement solaire, ce qui en fait une source d'énergie durable [1].

## I.2. Rayonnement solaire :

Le soleil est l'étoile la plus proche de la Terre, située à environ 150 millions de kilomètres. Sa composition est principalement constituée de 70% d'hydrogène et de 28% d'hélium [2]. La fusion thermonucléaire qui se produit dans le cœur du Soleil génère une énorme quantité d'énergie sous forme de rayonnements. Ce rayonnement électromagnétique couvre une gamme de longueurs d'onde allant de l'ultraviolet ( $0,2 \mu\text{m}$ ) à l'infrarouge lointain ( $2,5 \mu\text{m}$ ), incluant la lumière visible. La quantité d'énergie solaire reçue par la Terre est connue sous le nom de constante solaire et a une valeur moyenne d'environ  $1367 \text{ W/m}^2$  d'atmosphère [3]. Cependant, il convient de noter que la Terre ne reçoit qu'une fraction de cette énergie, puisque l'irradiance de cette dernière est pondérée par plusieurs facteurs tels que l'absorption moléculaire dans les différentes couches de l'atmosphère, les conditions climatiques, l'attitude et les changements saisonniers (Figure I.1). Malgré ces facteurs, la quantité d'énergie solaire qui atteint la surface de la Terre en une heure est estimée de 8000 à 10 000 fois supérieure à la quantité totale d'énergie consommée par la population mondiale en une année. Cela met en évidence le potentiel énorme de l'énergie solaire comme source d'énergie renouvelable.



**Figure I. 1 :** Spectres du rayonnement solaire moyen incident au sommet de l'atmosphère (courbe noir) et à la surface de la Terre (bleu) [4].

## Chapitre I: État de l'art

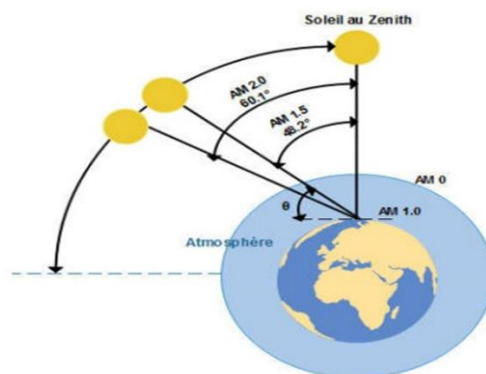
On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. Pour se rendre compte de la longueur effective parcourue à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct (AM x) (Figure I.2), l'air mass est utilisée pour quantifier l'atténuation de la lumière solaire due à l'absorption atmosphérique et est exprimée comme un multiple du parcours traversé par la lumière solaire au niveau de la mer lorsque le soleil est au zénith [2].

En chaque point, la valeur de la masse d'air est donnée par l'équation I-1

$$AM \approx \frac{1}{\sin\theta} \quad \text{I.1}$$

$\theta$  : angle en radians entre le rayonnement solaire et le plan horizontal de la terre.

En raison de l'absorption dans l'atmosphère (Figure I.2), le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol avec une inclinaison de  $90^\circ$  (rayonnement solaire direct au zénith) est d'environ  $1000 \text{ W/m}^2$  (AM1). Cela signifie que l'énergie reçue au niveau du sol est réduite par rapport à l'énergie totale transportée par le rayonnement solaire dans l'espace. Lorsque le soleil se couche, l'angle d'incidence du rayonnement solaire frappant la Terre est de  $48^\circ$ , ce qui correspond à une masse d'air de 1,5 (AM1.5) [5][6][7]. Cela signifie que le trajet de la lumière dans l'atmosphère est une fois et demie plus grand que le plus court trajet vers le Soleil. À cet angle, la quantité d'énergie solaire reçue est d'environ  $833 \text{ W/m}^2$ . Plus l'angle d'incidence (angle de pénétration) est faible, c'est-à-dire plus le Soleil est proche du zénith, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons solaires doivent traverser est faible, ce qui entraîne une moindre perte d'énergie.



**Figure I.2 :** Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil notion de la convention AM [8].

Le spectre d'émission du soleil est approximativement celui d'un corps noir à une température d'environ 5500 Kelvin, ce qui correspond à une lumière blanche. Pour optimiser les performances des cellules photovoltaïques, il est important que le matériau utilisé ait un spectre

d'absorption qui correspond le mieux possible au spectre solaire. Cela signifie que le matériau doit être capable d'absorber efficacement les différentes longueurs d'onde présentes dans la lumière blanche. De plus, il est important que le matériau puisse absorber un maximum de photons sur une faible épaisseur. Cela permet d'éviter ou de minimiser les phénomènes de recombinaison qui se produisent dans les différentes couches de la cellule solaire. Une bonne absorption de la lumière permet d'optimiser l'excitation des porteurs de charge dans le matériau, ce qui augmente le rendement de conversion de la lumière en électricité. Les caractéristiques photovoltaïques des cellules sont généralement mesurées sous une illumination standard appelée AM 1.5, qui correspond à la lumière solaire traversant une épaisseur atmosphérique de 1,5. Cette condition d'éclairage standard permet de comparer les performances des différentes cellules solaires de manière cohérente [8].

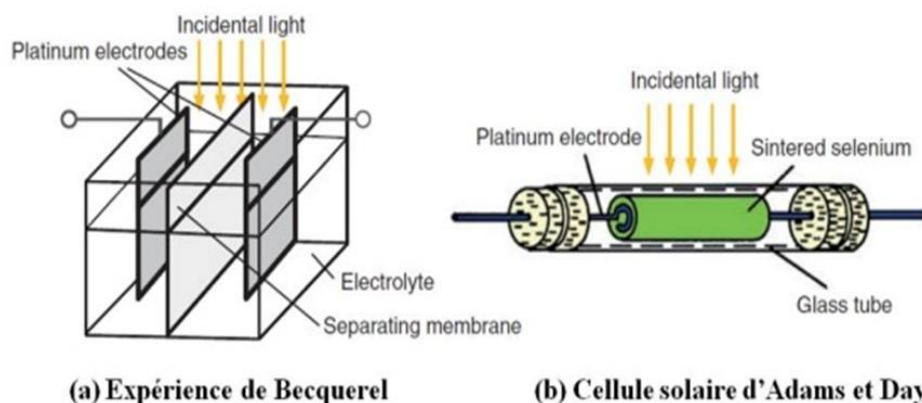
### **I.3. Cellule solaire photovoltaïque**

#### **I.3.1. Historique**

Le mot « photovoltaïque » vient du grec « photo » qui veut dire lumières et de « Volta » pris du nom du physicien italien Alessandro Volta qui en 1800 découvrit la pile électrique. Ainsi on peut définir la conversion photovoltaïque comme étant la transformation directe de la lumière en électricité par une cellule photovoltaïque, le soleil est la principale source lumineuse inépuisable.

- L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français Edmond Becquerel en 1839. Il a réalisé une expérience dans laquelle il a placé deux électrodes enrobées de platine dans un récipient contenant un électrolyte. Lorsqu'il a exposé cette configuration à la lumière, il a observé un courant électrique circulant entre les électrodes. Cela signifiait que l'intensité du courant avait changé en présence de lumière. Ce phénomène a été nommé l'effet photovoltaïque externe.
- En 1873, l'ingénieur britannique Willoughby Smith et son assistant Joseph May ont fait une découverte importante concernant le sélénium. Ils ont observé que la résistance électrique du sélénium changeait lorsqu'il était exposé à la lumière ( par la lumière, les électrons sont arrachés de la matieres et devenus des porteurs de charges libres). Cette découverte marquait le début de l'effet photovoltaïque interne
- La découverte des anglais William Adams et Richard Day, trois ans plus tard, a révélé que l'utilisation d'une tige de sélénium dotée d'électrodes de platine permet de produire de

l'énergie électrique lorsqu'elle est exposée à la lumière. Cette découverte démontrait pour la première fois qu'un corps solide pouvait convertir directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Cette propriété, connue sous le nom d'effet photoélectrique, a eu des implications majeures dans le domaine de l'énergie et de l'électronique,



**Figure I.3 :** Les débuts du photovoltaïque : (a) expérience électrochimique de A.E. Becquerel, (b) la première cellule solaire d'Adams et Day [9].

- L'inventeur américain Charles Fritts est en effet connu pour avoir construit une petite cellule solaire au sélénium en 1883. À l'époque, la technologie des cellules solaires était encore à ses débuts et les rendements de conversion étaient très faibles.
- Albert Einstein (1879-1955) a expliqué la théorie de cet effet en 1904.
- En 1916, le chimiste polonais Jan Czochralski a découvert un mécanisme de croissance cristalline: le processus de Czochralski, qui a eu un impact important dans la production de monocristaux semi-conducteurs de haute qualité.
- En 1949, William B. Shockley (1910–1989) a établi la théorie de la jonction PN [10] et a lancé les bases théoriques des cellules solaires utilisées aujourd'hui.
- En effet, en 1954, les chercheurs américains Gerald Pearson, Darryl Chapin et Calvin Fuller, travaillant aux Laboratoires Bell Téléphone, ont développé la première cellule solaire au silicium cristallisé, avec un rendement de 4 %, en utilisant le processus de Czochralski.
- Lors de la guerre froide en 1958, l'énergie photovoltaïque est utilisée par les États-Unis pour alimenter leurs satellites, le rendement a augmenté de 6%.

- Dans les années qui ont suivi, le rendement des modules solaires a atteint 10 %, ce qui signifie qu'ils étaient capables de convertir 10 % de l'énergie solaire en électricité. Cependant, à cette époque, les prix des modules solaires étaient très élevés. Le prix par watt était environ 1000 fois plus élevé que le prix actuel.

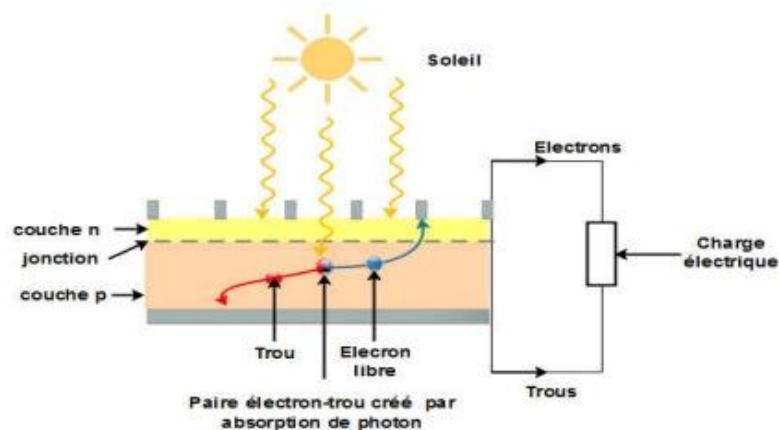


**Figure I.4** : Les inventeurs de la première cellule solaire « réelle » : Chapin, Fuller et Pearson. La figure à droite montre le premier module solaire au monde (mini module de 8 cellules solaires) [9].

- Le 17 mars 1958, la première utilisation aérospatiale de l'énergie photovoltaïque était par le satellite artificiel américain Vanguard.
- En 1960 M.Rodot et H.Voldman réalisèrent la première cellule photovoltaïque au centre national de la recherche scientifique (CNRS) [11]. En effet, au cours des années 1970, les crises pétrolières, notamment la flambée des prix du pétrole en 1973, ont entraîné une prise de conscience de la dépendance excessive aux énergies fossiles. Les accidents nucléaires, tels que celui de Three Mile Island aux États-Unis en 1979 et de Tchernobyl en URSS en 1986, ont également contribué à remettre en question l'utilisation de l'énergie nucléaire [12].

### I.3.2 Description

Une cellule solaire est un dispositif photovoltaïque servant à convertir l'énergie solaire (la lumière du soleil) en une énergie électrique [13]. La paire électron-trou photo-générée dans la couche de l'absorbeur est séparée par le gradient du champ électrique créé par la jonction PN avant qu'elle ne se recombine. Il est nécessaire que les semi-conducteurs choisis dans l'application photovoltaïques possèdent des propriétés électriques adéquates telles qu'une mobilité élevée, une longueur de diffusion importante et un coefficient d'absorption très élevé. La figure I.5 présente l'assemblage d'une cellule photovoltaïque en Si.



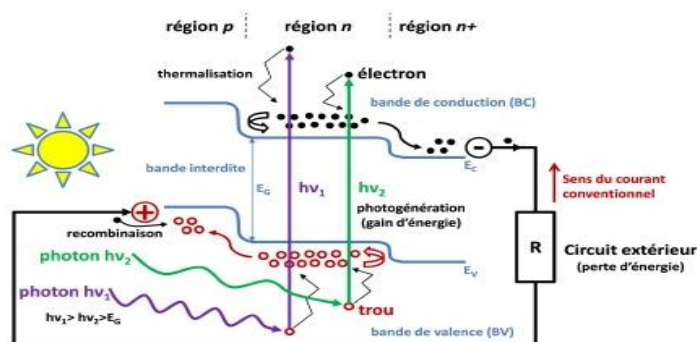
**Figure I.5** : l'assemblage d'une cellule photovoltaïque en Si [8].

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

Une jonction est constituée par la juxtaposition de deux régions de semi-conducteurs dopés P et N (jonction P-N). Les contacts métalliques sont responsables des connexions avec le milieu extérieur (ohmiques) pour assurer la circulation du courant [14].

L'effet photoélectrique est le phénomène par lequel les matériaux semi-conducteurs absorbent la lumière et génèrent un courant électrique. Les cellules photovoltaïques utilisent ce principe pour convertir l'énergie lumineuse en électricité, effectuant ainsi une recombinaison avec les trous, créant une zone de déplétion. La zone de déplétion est une région où la concentration d'électrons et de trous est réduite en raison de la recombinaison. Cette recombinaison crée une barrière de potentiel qui empêche davantage la diffusion d'électrons de la zone n vers la zone p et vice versa. Lorsque les deux couches sont mises en contact, un processus appelé jonction PN est formé. La jonction PN est la région de transition entre les deux types de dopage dans le matériau semi-conducteur. Au sein de la jonction PN, il y a un équilibre entre la diffusion des électrons de la zone n vers la zone p et la diffusion des trous de la zone p vers la zone n. Lorsque la jonction PN est formée, un phénomène connu sous le nom de courant de diffusion se produit. Le courant de diffusion est un courant électrique qui résulte de la diffusion des porteurs de charge (électrons et trous) à travers la jonction PN. Cependant, ce courant de diffusion initial ne peut pas se maintenir indéfiniment car il conduit à une déplétion des porteurs de charge à proximité de la jonction. Pour remédier à cela, on peut appliquer une tension externe à la jonction PN en connectant les deux couches dopées à une source de tension. Lorsque la tension est appliquée dans le sens direct (pôle positif à la zone p et pôle négatif à la zone n), elle permet de réduire la barrière de potentiel de la jonction PN, favorisant ainsi le passage du courant électrique. En revanche, si la tension est appliquée dans le sens inverse (pôle

positif à la zone n et pôle négatif à la zone p), elle augmente la barrière de potentiel de la jonction PN, rendant plus difficile le passage du courant électrique. Dans cette configuration, la jonction PN est polarisée en inverse et seule une faible fuite de courant, appelée courant de saturation, peut se produire [15].



**Figure I.6** : Schéma explicatif du fonctionnement d'une cellule Photovoltaïque. [16].

En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium des deux couches n et p. Les électrons libérés se déplacent alors dans toutes les directions. Après avoir quitté la couche p, les électrons empruntent ensuite un circuit pour retourner à la couche n. Ce mouvement des électrons n'est rien d'autre que de l'électricité [17].

### I.3.4 Différents paramètres de sortie de la cellule photovoltaïque

La caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque représente la relation entre le courant électrique (I) et la tension (V) aux bornes de la cellule pour un éclairage donné.

En l'absence de lumière, la caractéristique (I-V) d'une jonction PN (qui constitue la base des cellules photovoltaïques) passe par l'origine des coordonnées. Cela signifie que pour des tensions et des courants positifs ou nuls, le produit  $V * I$  est toujours positif. Les conventions de signe indiquent que le courant (I) et la tension (V) sont de même signe. Cependant, lorsque la jonction PN est éclairée, la caractéristique (I-V) se déplace vers les courants négatifs d'une quantité égale au photocourant ( $I_{ph}$ ). Le photocourant est le courant généré par la cellule en réponse à la lumière incidente. Cette augmentation du courant dans la région négative de la caractéristique (I-V) est due à la génération de paires électron-trou par l'absorption de photons. Dans cette région où le courant est négatif, le produit  $V * I$  devient négatif. Cela signifie que la cellule photovoltaïque fournit de l'énergie électrique, car la puissance électrique (P) est

donnée par le produit  $V * I$ , et une puissance négative indique que l'énergie est fournie plutôt que consommée. [17].

Une cellule solaire est caractérisée par :

- Sa tension à vide ou tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ): tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ): courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal (MPP): (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimal :  $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$  (parfois appelés aussi  $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ).

### ➤ Cas d'une cellule solaire idéale

Dans le cas d'une cellule solaire idéale l'expression du courant est donnée par l'équation I.2:

$$I = I_{ph} + I_s(e^{\frac{qv}{kT}} - 1) \quad \text{I.2}$$

La tension de circuit ouvert :

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s+1}\right) \quad \text{I.3}$$

La puissance débitée est :

$$P = VI = V(I_{ph} - I_s(e^{\frac{qv}{kT}} - 1)) \quad \text{I.4}$$

Point de puissance maximale :

$$P_m = I_m V_m \quad \text{I.5}$$

Le facteur de forme :

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{opt}} = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad \text{I.6}$$

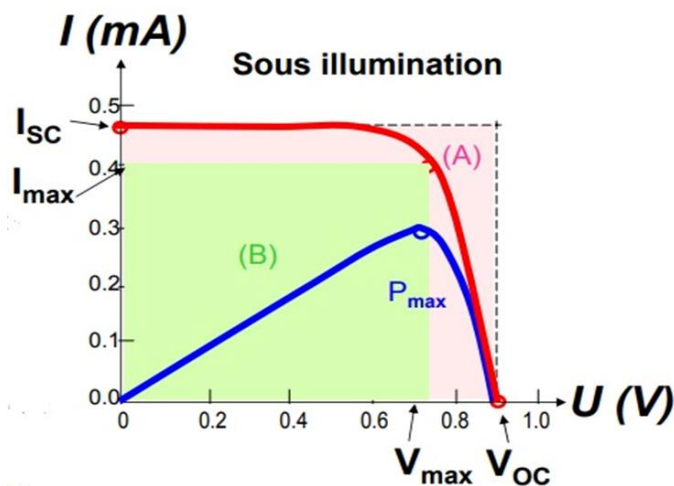
Le rendement de conversion :

$$\eta = I_m V_m / P_i \quad \text{I.7}$$

$$\eta = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc}}{P_i} \quad \text{I.8}$$

Pour le Silicium le rendement  $\eta=15\%$  , et pour le GaAs  $22\%$  dans les conditions STC [4].

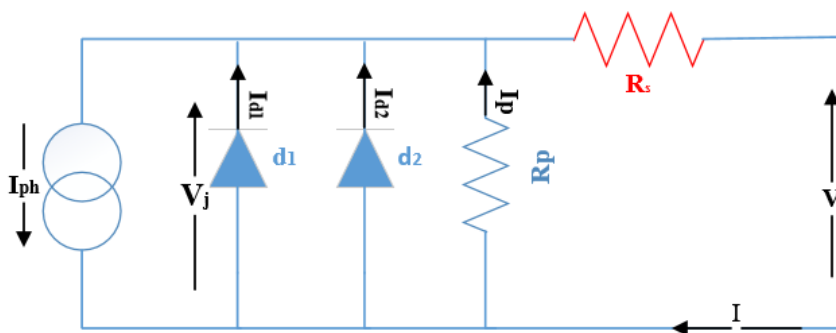




**Figure I.7 :** Caractéristiques  $I(V)$  d'une cellule photovoltaïque soumise à différents éclairagements [18].

### I.3.5 Modélisation électrique de la cellule photovoltaïque

L'analogie entre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque sous éclairement et celui d'un générateur de courant, produisant un courant  $I_{ph}$  auquel se soustrait le courant de la diode en polarisation directe, n'est qu'une représentation simple du fonctionnement réel de la cellule. Pour savoir les différentes limitations de la cellule photovoltaïque, on représente le modèle à deux diodes représenté sur la Figure I.8 suivante :



**Figure I.8 :** Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque .

### I.4. Évolutions des cellules solaires

Le développement de la technologie des cellules solaires vise à produire des cellules solaires peu coûteuses, à haut rendement, stables et ayant une durée de vie plus longue. L'objectif ultime est de remplacer efficacement la production d'énergie à partir de combustibles fossiles. Au fil des recherches, de nouveaux matériaux et techniques de fabrication de cellules solaires ont été découverts.

## Chapitre I: État de l'art

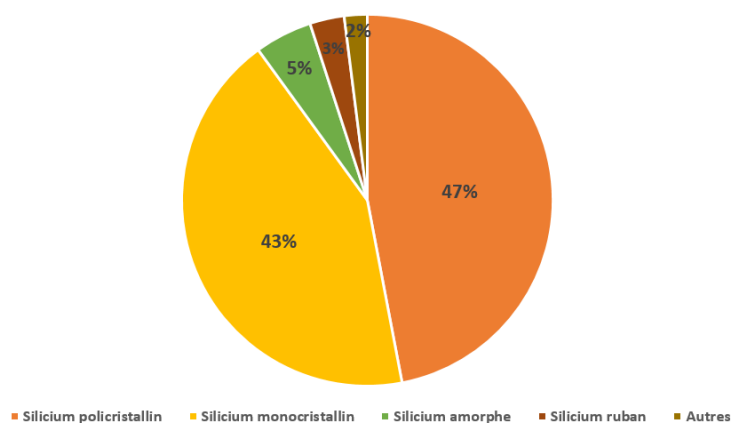
Dans le domaine de l'énergie solaire, on distingue plusieurs générations de technologies, comme illustré dans la Figure I.9 :

Première génération : Cette filière repose sur l'utilisation du silicium cristallin, et elle existe depuis de nombreuses années. C'est la plus mature et offre le meilleur rendement pour un coût modéré. Actuellement les cellules solaires à base de silicium cristallin sont largement utilisées sur le marché.

Deuxième génération : Cette génération regroupe les technologies dites "couches minces". Elle consiste à déposer une fine couche de silicium amorphe ou d'autres semi-conducteurs sur un substrat tel que le verre. Ces technologies sont en cours d'industrialisation. Bien que leur rendement soit encore inférieur à celui des cellules cristallines, il tend à s'améliorer. De plus, elles présentent l'avantage d'avoir des coûts de production inférieurs.

Troisième génération : Cette génération explore l'utilisation de nanomatériaux et de solutions organiques pour les cellules solaires. L'objectif est d'atteindre des rendements élevés et des coûts de production de plus en plus bas. Les avancées dans ce domaine ouvrent de nouvelles perspectives pour les technologies photovoltaïques.

Il est important de noter que les recherches se poursuivent activement pour améliorer les performances des cellules solaires, réduire les coûts de production et favoriser une adoption plus large de l'énergie solaire en remplacement des combustibles fossiles.



**Figure I.9** : part de marché de diverses technologies solaires. [19] - [20].

## I.4.1 Cellule solaire de Première Génération

### I.4.1.a Silicium monocristallin

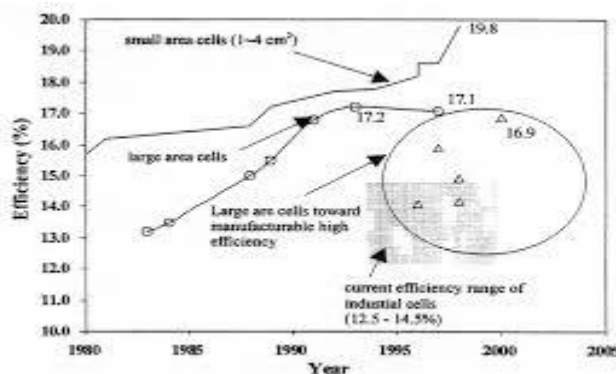
Ce sont les équipes de Martin Green de l'Université de New South Wales (Australie), qui ont obtenu le record mondial de rendement sur silicium monocristallin obtenu par la technique FZ, soit 24,7 % pour la structure PERL (Passived Emitter, Rear Localy diffusion), et FhG-ISE, (Allemagne) ont obtenu le record mondial de rendement sur silicium monocristallin obtenu par la technique CZ, soit de plus 22 % [17]. La technologie monocristalline, plus chère, utilise des barres pures de silicium également employées dans la fabrication des puces électroniques. Le silicium monocristallin est une matière première d'une très grande pureté. Il est généralement obtenu par tirage selon le procédé de «CZOCHEWSKI» ou par fusion de zone. Une plaquette de silicium monocristallin est composée d'un seul grain. On obtient des lingots cylindriques monocristallins par tirage en creuset [21].



Figure I.10 : cellule solaire en silicium monocristallin et poly-cristallin [22].

### I.4.1.b Les cellules à base de Si multicristallin

La cellule de silicium multi-cristallin provient d'un agglomérat de cristaux, ce qui la différencie de la cellule monocristalline qui est constituée d'un seul cristal de silicium. Le processus de fabrication de la cellule multi-cristalline implique un refroidissement lent de l'agglomérat de cristaux sur une période de plusieurs dizaines d'heures. Le silicium multi-cristallin est moins pur que le monocristallin, le rendement de conversion de la cellule monocristallin est légèrement supérieur à celui du multi-cristallin (22,3%) [23],



**Figure I.11** : Progression des rendements de conversion dans les industries des cellules à base de silicium multicristallin. Source NREL USA [24].

### I.4.2 Cellule solaire du Deuxième Génération (couche minces)

Les cellules solaires à couche mince sont une technologie qui repose sur le dépôt d'une fine couche de matériau photosensible capable d'absorber la majeure partie du rayonnement solaire. Ces cellules sont ainsi peu gourmandes en termes de matériaux de fabrication et s'adaptent aisément à des supports flexibles. Comparées aux cellules solaires de première génération, les cellules solaires à couche mince présentent des avantages concurrentiels tels que des coûts plus bas et des rendements plus élevés.

Cependant, il existe certains inconvénients liés à ces cellules solaires. La plupart des matériaux utilisés dans leur composition sont de plus en plus rares et coûteux (l'indium), ou hautement toxiques (cadmium). Parmi les technologies commerciales utilisant des cellules solaires à couche mince, on trouve le tellure de cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre indium gallium (CIGS), le silicium amorphe à couches minces (a-Si, TF-Si) et les kesterites (CZTSSe) [25], [26].

#### I.4.2.a Silicium Amorphe

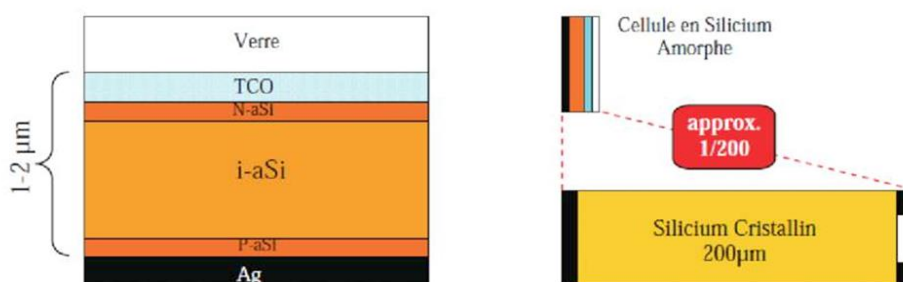
Par l'analyse de données de diffraction électronique, il a été montré que même si on définit le silicium amorphe comme un empilement aléatoire des atomes, il conserve quelques caractéristiques du silicium cristallin. La structure la plus simple d'une cellule en silicium amorphe se compose d'une zone dopée bore, d'une zone intrinsèque et d'une autre zone dopée phosphore (p-i-n) comme représenté sur la Figure I.12. Chaque élément peut être directement connecté en série sans besoin de liaisons externes.



**Figure I. 12** : Cellule solaires au silicium amorphe en couche mince [27].

Bien que les rendements en laboratoire aient atteint les 20% en double ou triple p-i-n, les rendements industriels stagnent depuis des années sous la barre des 10%, de sorte que des études très prometteuses ont été reprises dans le domaine des matériaux nano ou microcristallins et même presque amorphes (micro-morphe) avec des rendements de conversion déjà supérieurs à la barre des 10%.

Le silicium amorphe est fréquemment appliqué aux dispositifs de petite puissance (calculatrices, lampes ou horodateurs), parcontre plusieurs entreprises telles que Solarex, Phototronic, Canon et Fortum offrent des modules de taille comparable à celle des modules cristallins [28].



**Figure I.13** : Schéma de principe d'une cellule à base de silicium amorphe et comparaison à une cellule en silicium cristallin [28].

### I.4.2.b Tellure de Cadmium (CdTe)

La simplicité chimique du matériau à base de tellure de cadmium - (CdTe) et sa stabilité en font un matériau attractif. Ses propriétés thermo-physiques et ses caractéristiques chimiques permettent de fabriquer des cellules simples et à faible coût. Le rendement des cellules en CdTe dépend fortement de la manière dont les couches actives sont déposées (température de dépôt, vitesse et nature du substrat). Comparé aux autres technologies à couche mince, Le dépôt du CdTe est simple, ce qui en fait un choix plus adapté pour la fabrication de modules photovoltaïques à grande surface. Cependant, l'inconvénient principal réside dans la

toxicité bien connue du Cadmium, même s'il a été démontré que les risques environnementaux liés aux cellules PV en CdTe sont minimales [30].



**Figure I. 14** : Structure d'une cellule photovoltaïque au CdTe [8].

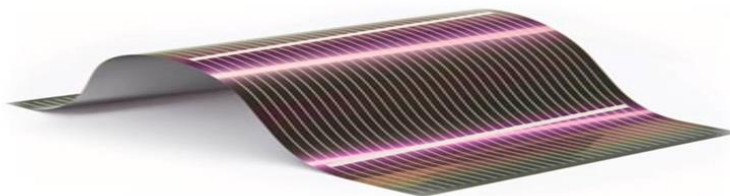
Tel qu'indiqué dans la figure I.14, une cellule CdTe est constituée de haut en bas:

- D'un verre protecteur .
- D'une couche conductrice transparente (d'oxyde d'indium-étain (ITO) ou d'oxyde de zinc (ZnO)).
- De sulfure de cadmium CdS de type n .
- De tellure de cadmium de type p .
- D'une couche conductrice inférieure métallique.
- D'un substrat, dont la nature peut varier suivant les propriétés désirées (souple ou rigide).

### **I.4.2.c Le di-séléniure de cuivre et indium (CIS ou CIGS)**

En 1975, S. Wagner et son équipe de Bell Téléphone ont développé les cellules en CIGS, qui fonctionnent selon le principe de la jonction p-n. Ces cellules contiennent un matériau absorbant composé de cuivre, de gallium, d'indium et de sélénium. La couche absorbante a une épaisseur de 1 à 2,5  $\mu\text{m}$  et de type p, exige d'être revêtu d'un matériau de type n, les cellules CIGS sont des cellules de type hétérojonction. En 2015, une cellule solaire de Solar Frontier au Japon d'environ 0,5  $\text{cm}^2$  a atteint un rendement record de 22,3 % , et une simulation a prédit un rendement de 25 %. Ces résultats placent les cellules en CIGS, tout comme les cellules en CdTe, en tête des technologies solaires en termes de rapport coût-rendement. Bien que la technologie des chalcogénures ternaires (CIS) et quaternaires ( $\text{CuInGaSe}_2$ ), ainsi que ses variantes, n'a pas connu la croissance explosive du CdTe, elle reste la plus pertinente pour une adoption à grande échelle en raison de son meilleur compromis entre rendement élevé, bonne stabilité et faible coût. Les améliorations les plus significatives

ont été réalisées en élargissant la bande interdite du  $\text{CuInSe}_2$  grâce à l'utilisation d'alliages tels que le  $\text{CuInSe}_2$  et le  $\text{CuGaSe}_2$  (diséléniure de cuivre et de gallium), qui ont respectivement des gaps de 1,02 eV et 1,67 eV. De plus, ces matériaux présentent des caractéristiques exceptionnelles, à savoir, un coefficient d'absorption presque aussi élevé que celui du c-Si, mais de 100 à 1000 fois plus large entre 1,1 à 2,6 eV, permettant ainsi une épaisseur d'absorbant de 1 à 2  $\mu\text{m}$ . La longueur de diffusion des porteurs minoritaires est spécifiquement adaptée aux dispositifs photovoltaïques, et leur tolérance aux défauts permet une production à grande échelle. Par ailleurs, il existe d'autres matériaux basés sur des alliages, extrêmement performants mais également très coûteux (comme l'arséniure/indium de gallium  $\text{InGaAs}$ ), qui sont principalement utilisés dans les applications spatiales avec des concentrateurs de lumière.



**Figure I.15** : Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS [34].

Les cellules en CIGS présentent une meilleure résistance à la chaleur que les cellules en silicium cristallin, mais elles sont moins performantes à cet égard que les cellules en CdTe. De plus, elles sont capables de capter la lumière aux premières et dernières heures de la journée, tout comme les autres types de cellules à couches minces.

### **Avantage :**

- Offre les meilleurs rendements par rapport aux autres types de cellules photovoltaïques à couches minces.
- Permet de se passer de l'utilisation du silicium.
- Permet la construction de cellules sur un substrat flexible.

### **Inconvénients :**

- Les cellules à couches minces nécessitent une surface plus étendue pour aboutir aux rendements comparables à ceux des cellules épaisses.
- L'indium et le gallium sont des matériaux rares.

### I.4.2.d CZTSSe

Sur le plan technique, les modules à couches minces disponibles sur le marché présentent actuellement plusieurs limitations. comme le a-Si qui présente un rendement relativement faible, d'autres souffrent d'une pénurie de matières premières, comme le tellure (Te) dans le cas du CdTe, ou de problèmes de toxicité, notamment avec le cadmium (Cd) dans le CdTe. Dans ce contexte, le  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})$ , communément appelé CZTSSe, se présente comme un matériau extrêmement attractif avec un fort potentiel. Il est utilisé comme matériau absorbant de chalcogénure dans les cellules solaires à couches minces. Ce matériau est fabriqué à partir de composés non toxiques (dans le cas d'un composé pur à base de soufre, sans sélénium) et utilise des matières premières abondantes et peu coûteuses. De plus, il présentera un potentiel élevé de rendement dans un avenir proche [35],[36]. Les travaux menés pour développer ces matériaux quaternaire ont pu améliorer son rendement de 0.66% [37],[38] jusqu'à 12.6% [39] en utilisant plusieurs procédés de fabrication, par voie humide, par évaporation et par pulvérisation.

### I.4.3 Cellule solaire de la Troisième génération

#### I.4.3.a Filière des cellules organiques

Depuis plus de 40 ans, on observe l'effet photovoltaïque dans les matériaux organiques, et ce domaine a enregistré le taux de développement le plus important parmi tous les secteurs photovoltaïques sur les douze dernières années. Les avancées les plus récentes dans ce domaine ont permis d'atteindre des rendements de 13,2 %. Cependant, le développement à grande échelle de ces technologies est actuellement entravé par la faible mobilité des porteurs de charge dans les matériaux, ce qui limite le rendement, ainsi que la courte durée de vie des cellules [40].

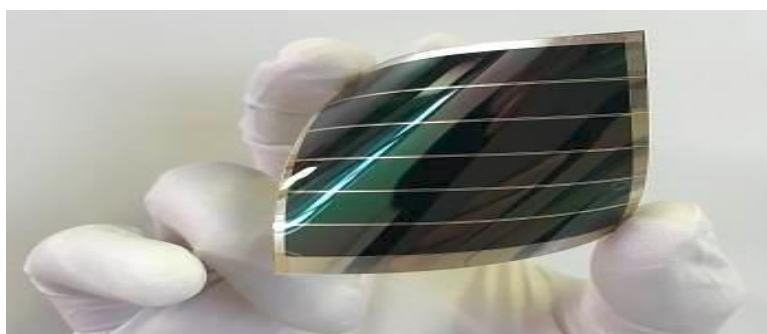


Figure I. 16 : cellule solaire organique [40].

#### I.4.3.b La filière des pérovskites

Cette branche est considérée comme la plus prometteuse des systèmes solaires photovoltaïques récents. Les cellules solaires basées sur les pérovskites offrent une alternative



intéressante aux cellules solaires à base de silicium qui dominent actuellement le marché. En comparant les pérovskites et le silicium, ce dernier a mis 30 ans pour atteindre le record mondial de rendement de 25,7 %, quant au premier atteint un rendement de 20 % en 6 ans. En outre, les pérovskites présentent une capacité d'absorption des photons 10 fois supérieure que le silicium, ainsi qu'une bonne séparation des charges électriques et une bonne mobilité. Malgré leurs performances supérieures, ces cellules ne peuvent rivaliser avec les cellules à base de silicium puisqu'elles commencent à se dégrader à 40°C et deviennent instables à 35 % d'humidité. De ce fait, les chercheurs s'intéressent à l'amélioration de la stabilité de ces cellules ainsi qu'à l'amélioration de leurs performances [40].

### **I.5. Conclusion**

Ce chapitre nous a permis en premier lieu de donner une description de l'énergie solaire , l'effet photovoltaïque et le principe de fonctionnement des cellules, suivi d'un aperçu historique sur les cellules solaires, Enfin nous avons cité les différentes filières des cellules solaires photovoltaïques.

## Chapitre I: État de l'art

### Références Bibliographiques

- [1] A. Adaine, "Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'ingan", thèse de doctorat, Université de Lorraine Français, 2018
- [2] S. Quoizola, "epitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium mesoporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût " these de doctorat, 2003, laboratoire de physique de la matiere de l'insa de lyon.
- [3] A. Allouche, "Simulation des propriétés et performances des cellules photovoltaïques en couches minces à base des matériaux semi-conducteurs CIGS", Mémoire de master, Université Mohamed El Bachir Elibrahimi –Bordj, 2020.
- [4] A. Boutaga, "Etude et Optimisations Des Cellules Solaires En Couche Mince" Mémoire de Fin d'Études, Université ABOU BEKR- BELKAID- TLEMCEN, 2022.
- [5] M. Petibon stéphane « nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » thèse de doctorat, université de Toulouse, 2009
- [6] P. Lyons, j. Wong, and m. Bhandari, "a comparison of window modeling methods in energy plus 4.0," proc. Simbuild, vol. 4, no. 1, pp. 177–184, 2010.
- [7] R. J. Komp, "practical photovoltaics," ann arbor aatec publ., 1995.
- [8] Kanoun ahmed-ali «Etude theorique et predictive des nouveaux materiaux pour conception des cellules solaires et applications photovoltaïques », these de doctorat universite abou bekr- belkaid- tlemcen 2019 .
- [9] Basore, P.A. & Clugston, D.A., 1996. PC1D version 4 for Windows:from analysis to design. In Proceedings of 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1996. Pp. 377–381.
- [10] H. Chenoufi « optimisation du procédé technologique de réalisation d'une cellule solaire par la technique de diffusion », mémoire de magister, univ- batna, 2005
- [11] A. Shah, « matériaux électroniques amorphes » vol.i&ii, photocopié epfl/uni-ne, Neuchâtel, 1993.
- [12] H. J. Hovel, "semiconductors and semimetals. Volume 11.solar cells," 1975.
- [13] M. A. Contreras, k. M. Jones, l. Gedvilas, and r. Matson, "preferred orientation in Polycrystalline cu (in, ga) se  $\text{Cu}_2\text{S}$  and its effect on absorber thin-films and devices," national renewable energy lab., golden, co (us), 2000.
- [14] H. Belkhalifa « Etude de l'effet du recuit à haute température sur les propriétés des couches minces de zno déposées par spray pyrolyse pour application photovoltaïque » memoire de Magister, Université M'Hamed Bougara-Boumerdes, 2010.
- [15] Abdoulwahab Adaine, "Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'ingan", Thèse, Université de Lorraine Français, 2018
- [16] R. Lachaume « contribution à la caractérisation électrique et à la simulation numérique des cellules photovoltaïques silicium à hétérojonction » thèse de doctorat, université de Grenoble, 2014
- [17] A. Bensmain « investigation de l'ingenierie de bandes des cellules solaires a heterojonction a\_si :h/csi : modelisation et simulation numerique» these de doctorat, universite djillali liabes de sidi bel abbes 2017/2018
- [18] B. Zebentout « Silicium Polycristallin : Conversion Photovoltaïque de l'Energie Solaire et Dispositifs Electroniques » thèse de doctorat, 2007

## Chapitre I: État de l'art

[19]	M. Turcu, i. M. Kötschau, and u. Rau, "composition dependence of defect energies and band alignments in the cu (in 1- x ga x) (se 1- y s y) 2 alloy system," journal of applied physics, vol. 91, no. 3, pp. 1391–1399, 2002
[20]	P. D. Paulson, r. W. Birkmire, and w. N. Shafarman, "optical characterization of cuin 1- x ga x se 2 alloy thin films by spectroscopic ellipsometry," journal of applied physics, vol. 94, no. 2, pp. 879–888, 2003.
[21]	M. Madani « réalisation des couches antireflets dans les cellules solaires a couches Minces » thèse de magister, université abou-bakr belkaid de tlemcen, 2006
[22]	[ <a href="https://www.google.com/url?sa=i&amp;url=https%3A%2F%2Fwww.youtube.com%2Fwatch%3Fv%3DTfMm5MnNtxs&amp;psig=AOvVaw2VD04ExTlzKvvQEpTA0y8o&amp;ust=1684040398235000&amp;source=images&amp;cd=vfe&amp;ved=0CBEQJRxqFwoTCOChs6_B8f4CFQAAAAAdAAAAABAE">https://www.google.com/url?sa=i&amp;url=https%3A%2F%2Fwww.youtube.com%2Fwatch%3Fv%3DTfMm5MnNtxs&amp;psig=AOvVaw2VD04ExTlzKvvQEpTA0y8o&amp;ust=1684040398235000&amp;source=images&amp;cd=vfe&amp;ved=0CBEQJRxqFwoTCOChs6_B8f4CFQAAAAAdAAAAABAE</a> ]
[23]	M. A. Green, Y. Hishikawa, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, and A.W. Ho-Baillie, "Solar cell efficiency tables (version 52)," Prog. Photovolt.Res. Appl., vol. 26, no. 7, pp. 427–436, 2018
[24]	Jean-Claude Muller, Améliorations attendues avec les nouvelles technologies PV : rendements, coûts et cycle de vie, J3eA - 6 (2007) - DOI : 10.1051/j3ea:2007003 mars 2007.
[25]	"Global Market outlook for photovoltaics until 2019. Solar Power Europe. -Yahoo Search - Actualités." [Online]. Available: <a href="https://fr.search.yahoo.com/search?fr=mcafee&amp;type=E210FR91105G0&amp;p=Global+Market+outlook+for+photovoltaics+until+2019.+Solar+Power+Europe.">https://fr.search.yahoo.com/search?fr=mcafee&amp;type=E210FR91105G0&amp;p=Global+Market+outlook+for+photovoltaics+until+2019.+Solar+Power+Europe.</a> [Accessed: 06-Février-2023].
[26]	M. A. Green, "Silicon solar cells: evolution, high-efficiency design and efficiency enhancements," Semicond. Sci. Technol., vol. 8, no. 1, p. 1, 1993
[27]	"Electronique et Electricite : Les cellules photovoltaïques au silicium amorphe," Electronique et Electricit
[28]	M. Petibon Stéphane « nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2009.
[29]	A. Bouraiou, "Elaboration et caractérisation des couches minces CuInSe2 par électrodéposition," 2009.
[30]	Z. El Jouad, "Realization et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques," PhD Thesis, Université d'Angers, 2016
[31]	H. Ullah, B. Marí, and H. N. Cui, "Investigation on the Effect of Gallium on the Efficiency of CIGS Solar Cells through Dedicated Software," Appl. Mech. Mater., vol.448, no. 453, pp. 1497–1501, 2014.
[32]	L. Ribeaucourt, G. Savidand, D. Lincot, and E. Chassaing, "Electrochemical study of one-step electrodeposition of copper–indium–gallium alloys in acidic conditions as precursor layers for Cu (In, Ga) Se2 thin film solar cells," Electrochimica Acta, vol. 56, no. 19, pp. 6628–6637, 2011.
[33]	A. Duchatelet, "Synthèse de couches minces de Cu (In, Ga) Se2 pour cellules solaires par électrodépôt d'oxydes mixtes de cuivre-indium-gallium," PhD Thesis, Lille 1, 2012.
[34]	Nour Elhouda BELABAS L. M. et Nous, "Le photovoltaïque dans tous ses états (2/2)," Le Monde et Nous 2020.
[35]	G. Altamura, "Development of CZTSSe thin films based solar cells," PhD Thesis, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2014.
[36]	W. Ki and H. W. Hillhouse, "Earth-abundant element photovoltaics directly from soluble precursors with high yield using a non-toxic solvent," Adv. Energy Mater., vol. 1, no. 5, pp. 732–735, 2011

## Chapitre I: État de l'art

---

[37]	H. Katagiri, N. Sasaguchi, S. Hando, S. Hoshino, J. Ohashi, and T. Yokota, "Preparation and evaluation of Cu <sub>2</sub> ZnSnS <sub>4</sub> thin films by sulfurization of E <sub>β</sub> B evaporated precursors," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 49, no. 1–4, pp.407–414, 1997.
[38]	R. Fillon, "Etude des propriétés électroniques de couches minces de CZTSSe," PhD Thesis, Université Grenoble Alpes, 2016
[39]	W. Wang et al., "Device characteristics of CZTSSe thin-film solar cells with 12.6% efficiency," Adv. Energy Mater., vol. 4, no. 7, p. 1301465, 2014.
[40]	Mohamed Ouled Salem, "Analyse, Modélisation et Simulation des Pertes dans un Module Photovoltaïque à Base de Silicium Monocristallin", Mémoire Magister, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2010.

**Chapitre II :**  
**Couche mince à base de CZTS**

### II.1. Introduction

Les technologies basées sur l'exploitation des propriétés spécifiques des couches, dites minces qui constitue le cœur de notre travail, se sont fortement développées à la fin du 20<sup>ème</sup> siècle et sont devenues l'une des voies les plus importantes de progrès tant en ce qui concerne la compréhension théorique des propriétés de la matière condensée que la miniaturisation ou le développement de nouveaux capteurs, dont la réalisation ne pourrait se faire sans cette technologie. C'est pour cela que nous porterons dans ce chapitre un grand intérêt aux couches minces (leurs définition, domaines d'application, mécanisme de croissance et les techniques de dépôt...) [1]. Ainsi on va présenter les différents matériaux utilisés (GaAs, CdS, ZnO, CZTS), leurs caractéristiques et le principe de fonctionnement.

### II.2 Les couches minces

#### II.2.1 La définition d'une couche mince

Par définition, une couche mince (C.M.) d'un matériau est une partie de ce matériau dont l'épaisseur, a été sensiblement réduite, allant de quelques nanomètres (nm) à quelques micromètres ( $\mu\text{m}$ ) (entre 10 et 100 nanomètres) [2]. Cette réduction significative de la distance entre les surfaces limite perturbe certaines propriétés physiques, car un si petit nombre de couches atomiques peut avoir des propriétés très différentes [3]. La distinction principale entre le matériau à l'état massif et à l'état de couche mince réside dans le fait que, dans l'état massif, le rôle des limites dans les propriétés est généralement négligé à juste titre, tandis que, dans une couche mince, ce sont les effets liés aux surfaces limites qui peuvent être prépondérants. Il est évident que plus l'épaisseur sera faible, moins son effet sera important.

La deuxième caractéristique importante de la couche mince est qu'elle est toujours liée à un substrat sur lequel elle est construite, quelle que soit la méthode utilisée pour sa fabrication. Par conséquent, il est impératif de tenir compte de ce fait majeur lors de la conception, car le support a une influence significative sur les propriétés structurales de la couche mince. Par conséquent, une couche mince du même matériau et de même épaisseur peut avoir des propriétés physiques sensiblement différentes selon qu'elle est déposée sur un substrat isolant amorphe tel que le verre, ou sur un substrat monocristallin de silicium, par exemple [4].

#### II.2.2 Caractéristiques des couches minces

- Une couche mince est toujours solidaire d'un substrat qui influe sur les propriétés structurales de la couche.

- Elle est fortement polluée par les molécules environnantes car elle est constituée à partir de quelques couches d'atome.
- On fait croître la couche mince en épaisseur à partir de zéro.
- Couches mince sont appelées discontinues constituées d'îlots.
- La distance entre les deux surfaces limites est si faible c'est la "bidimensionnalité"

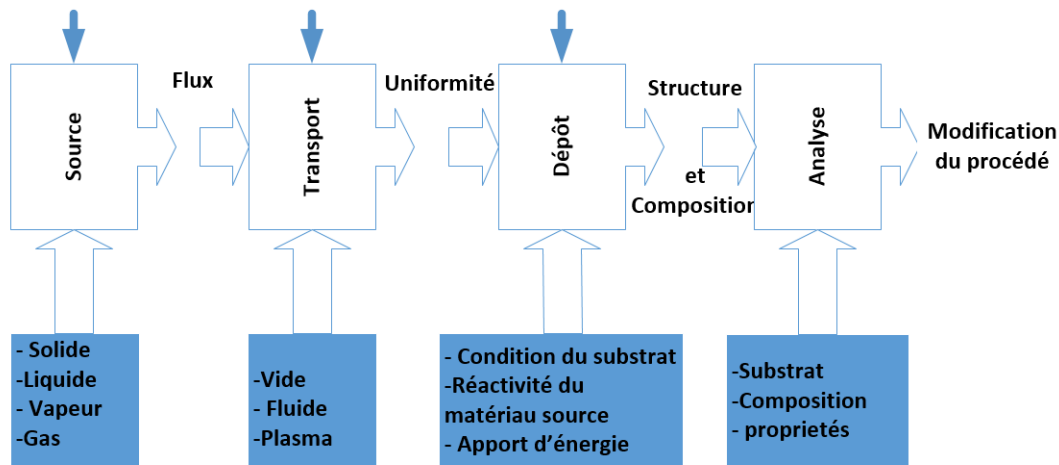
### II.2.3 Intérêts des couches minces

Les couches minces sont d'un grand intérêt en raison des propriétés physico-chimiques particulières acquises par le matériau. Elles sont très utilisées dans la nanotechnologie et ont connu une évolution très rapide et cela pour plusieurs raisons :

- L'addition de propriétés physico-chimiques à un substrat (résistance à la corrosion, isolation électrique, etc.) est due au changement de sa surface : l'utilisation d'un substrat à faible valeur permet de diminuer les coûts de production.
- La tendance actuelle à la miniaturisation des composants électroniques qui a conduit au développement de circuits basés sur des films représentant seulement une fraction de volume de ceux comportant des céramiques massives ou des matériaux monocristallins.
- Les films sont beaucoup moins nocifs que les monocristaux et ils peuvent représenter une variété de thèmes et être appliqués à une variété de géométries.
- D'un point de vue économique des matériaux, en rapportant les propriétés physiques et la simplicité des technologies mise en œuvre pour leur réalisation (élaboration facile, peu coûteuse).
- Une grande variété de matériaux est utilisée pour produire ces couches minces métalliques, tels que les alliages (binaires, ternaires, quaternaires), les composés réfractaires (oxydes, nitrures, carbures), les composés intermétalliques ainsi que les polymères [5].

### II.2.4 Mécanisme de formation et croissance d'une couche mince

- Les procédés de déposition de couches minces sont représentés dans la figure suivante:



**Figure II.1** : Carte conceptuelle montre les étapes du procédé de fabrication de couches Minces [6].

- La fabrication des films minces se déroule en trois étapes :
  - Production des espèces appropriées, qu'elles soient ioniques, moléculaires ou atomiques [6].
  - Transport de ces espèces vers le substrat.
  - Condensation sur le substrat, soit directement, soit par le biais d'une réaction chimique ou électrochimique, afin de former le dépôt solide [7].

La croissance d'une couche mince peut être représentée par plusieurs étapes :

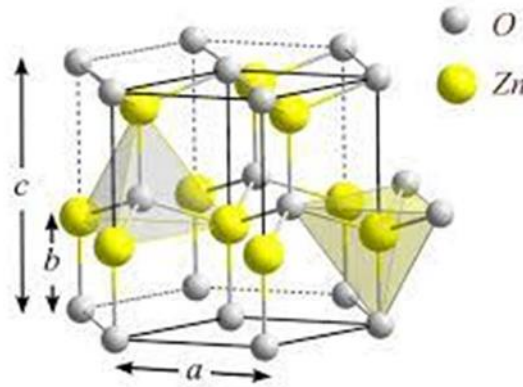
- **Nucléation** : C'est l'arrivée ou l'adsorption des atomes (ou molécules) sur la surface du substrat.
- **Coalescence** : La diffusion en surface des atomes.
- **Croissance** : L'interaction entre les atomes déposés et/ou ceux du substrat pour la formation de liaisons stables [8].

### II.3 Description du matériau ZnO

Le ZnO est un semi-conducteur pressenti pour être utilisé dans les applications optoélectroniques comme les cellules solaires [9][10][11], les détecteurs de gaz [12] et les photodétecteurs [13]. Les raisons de ce grand intérêt envers ce matériau sont diverses et l'on peut en particulier citer : sa structure cristallographique, sa facilité de croissance, sa structure de bande. L'oxyde de zinc est composé d'atomes de zinc (sous la forme  $Zn^{2+}$ ) et d'oxygène (sous la forme  $O^{2-}$ ) et peut cristalliser selon 3 formes : wurtzite, blende de zinc ou rocksalt. La



forme cristalline préférentielle, à température et à pression ambiante est la forme hexagonale wurtzite présentée en figure II.2. Le ZnO est donc un empilement d'une couche d'atomes de zinc chargés positivement puis d'une couche d'atomes d'oxygène chargés négativement, séparés d'un vecteur  $u = 3/8 = 0.375$  selon l'axe  $c$  et répétés périodiquement.



**Figure II.2.** Structure wurtzite de l'Oxyde de Zinc [45]

Le principal avantage du ZnO réside dans sa non-toxicité (contrairement à l'indium dans l'ITO) et son abondance naturelle, ce qui réduit les coûts de production. L'oxyde de zinc peut être utilisé comme une électrode transparente sur la couche supérieure du "contact avant", autorisant de ce fait au courant de circuler à travers le composant tout en permettant de passer la lumière.

Des études ont montré que l'utilisation du ZnO en surface, dans des conditions spécifiques, peut améliorer l'efficacité des cellules solaires.

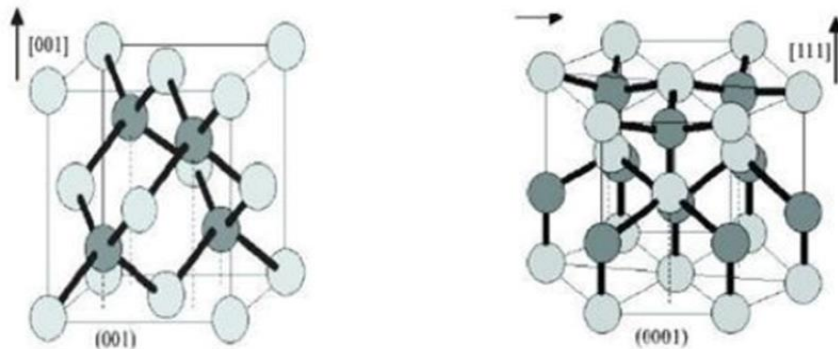
De plus, selon la méthode de synthèse utilisée, le ZnO peut présenter une surface plus ou moins rugueuse, ce qui représente une caractéristique importante dans la production de cellules solaires [14].

#### II.4 Description du matériau CdS

Le (CdS) est un semi-conducteur composé des matériaux de la colonne (II-VI). En raison de ses bonnes propriétés optiques, électriques et structurales, le (CdS) a reçu une large attention ces dernières années, ce qui le rend largement utilisé comme couche dans diverses hétérojonctions pour cellules solaires photovoltaïques, tels que: (CdS/CdTe), (CdS/CuInSe<sub>2</sub>) [15].

D'un point de vue cristallographique, les couches minces sont connues pour leur polymorphisme, et elles peuvent avoir deux structures possibles: une structure cubique ou une structure hexagonale. Ce phénomène est favorisé par la croissance dans les solutions [16], donc

il se cristallise sous structures (Wurtzite) et (Zinc-blende). Dans les conditions ambiantes, la structure la plus stable est la structure (Wurtzite). La structure Zinc-blende ne peut être stable que par la croissance sur des substrats cubiques [17].

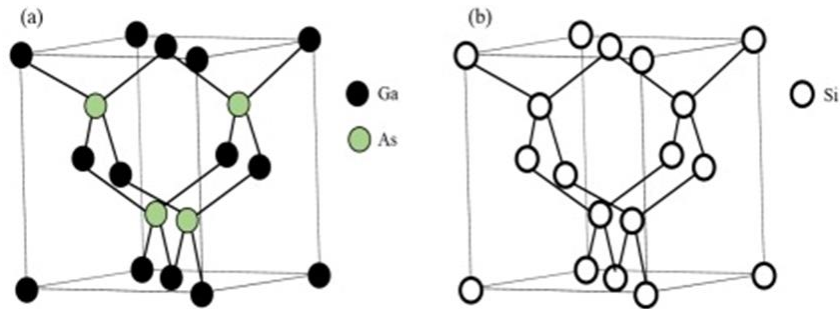


**Figure II.3 :** Structure du composé (CdS). (a -zinc blende), (b - Wurtzite) [17].

Ces dernières années, les films minces de sulfure de cadmium (CdS) ont attiré une grande attention en raison de leurs propriétés optiques, électriques et structurales favorables. En conséquence, ils ont été largement utilisés comme tampon (fenêtre) extrêmement mince dans des cellules photo-électrochimiques (PEC) bien connues telles que CdS/CdTe, CdS/CuInSe<sub>2</sub>, CdS/CuInS<sub>2</sub>, CdS/InP, CdS/In. Le CdS, appartenant au groupe II-VI, est un semi-conducteur de type n avec une bande interdite optique directe, une résistance électrique élevée à température ambiante et une émission optique très proche de la sensibilité maximale de l'œil humain [18].

### II.5 Description du matériau GaAs

Les semi-conducteurs III-V sont constitués des atomes appartenant à la colonne III tels que le gallium (Ga), l'indium (In)...et à la colonne V tels que l'arsenic (As), l'azote (N), le bismuth (Bi),...Ces éléments peuvent se combiner en formant des binaires (GaAs, InAs, GaN,...) des ternaires (InGaAs, GaAsN, GaAsBi,...) ou des quaternaires (AlGaInN, GaAsBiN,...). Les semi-conducteurs III-V peuvent se cristalliser sous deux phases : Zinc Blende (ZB) ou Wurtzite (WZ) selon les conditions thermodynamiques et la nature des constituants atomiques. [19]. Le GaAs est constitué de deux types d'atomes, un élément du groupe III : le gallium, et un élément du groupe V : l'arsenic, sont classés dans le groupe de semi-conducteur de type III-V.



**Figure II.4 :** Maille élémentaire de deux types de structures cristallographiques (a) zinc blendedu GaAs et (b) diamant du Si [20].

### II.5.1 Applications du GaAs en couches minces sur les cellules photovoltaïques

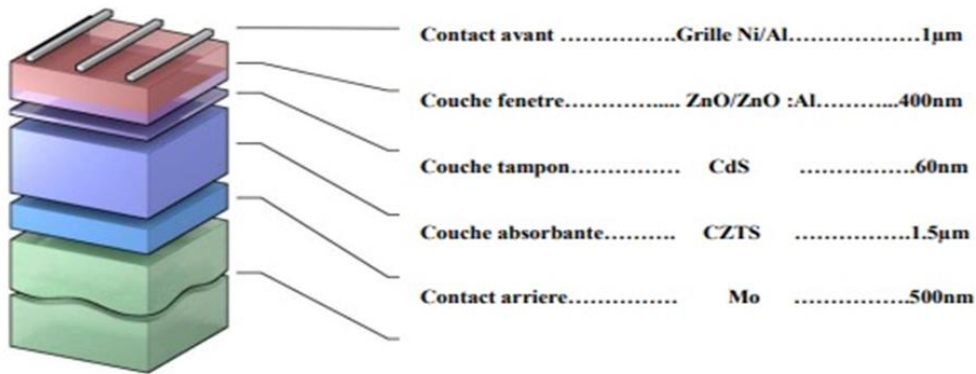
Le GaAs a été l'objet de nombreuses études en tant que matériau pour les applications photovoltaïques. Il est rapidement devenu une référence pour les cellules solaires à couches minces. Une étude menée par Silverman et al. a comparé les performances des cellules photovoltaïques à base de GaAs et de silicium dans des conditions extérieures. Les résultats ont montré que malgré une efficacité similaire, les cellules en GaAs produisent une quantité d'énergie totale supérieure et fonctionnent à une température inférieure de 10°C par rapport aux cellules en silicium. Par conséquent, sur un toit exposé à une chaleur élevée, les panneaux solaires en GaAs recueillent plus de 50% d'énergie totale supplémentaire par rapport aux panneaux solaires concurrents à base de silicium [21].

### II.6 Les cellules photovoltaïques couches mince à base de Kesterite

Ces dernières années, le  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS) apparu comme un nouveau matériau pour les applications photovoltaïques, car il possède un gap direct qui a mené les chercheurs à lui porté un intérêt croissant dans la filière des couches minces. En outre, son coefficient d'absorption est supérieur à  $10^4 \text{ cm}^{-1}$ .

#### II.6.1 Structure d'une cellule à base de CZTS

La configuration courante et bien connue d'une cellule CZTS implique l'empilement de plusieurs matériaux en couches minces déposés successivement sur un substrat. Ce substrat est généralement une plaque de verre sodo-calcique (Soda-Lime Glass, SLG). La Figure II.5 illustre la structure standard d'une cellule solaire basée sur le CZTS.

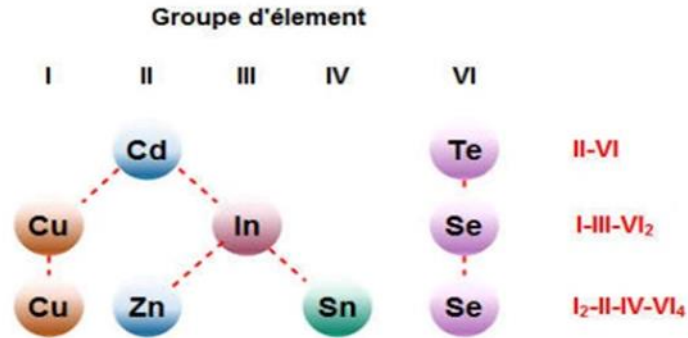


**Figure II.5:** Structure standard d'une cellule à base de CZTS [22].

Les cellules à base de CZTS contiennent un absorbeur composé de cuivre, de zinc, d'étain et de soufre. Cette couche, d'une épaisseur de 1 à 2,5 µm, est dopée de type p et doit être recouverte d'un matériau de type n pour former la première partie de l'hétérojonction p-n. Le sulfure de cadmium (CdS) a donné les meilleurs rendements, mais en raison de la toxicité du cadmium, des efforts considérables sont déployés pour développer des couches tampon alternatives telles que le Zn(O,S), le (Zn,Mg)O, etc. La couche tampon, d'une faible épaisseur variant de 0,04 à 0,07 µm, est recouverte d'une couche de fenêtre optique, généralement composée d'oxyde de zinc (ZnO). Cette couche de ZnO est résistive et permet de limiter la formation de courts-circuits dans les zones où le CZTS et la couche tampon ne se recouvrent pas parfaitement. Les TCO (Transparent Conductive Oxides) les plus couramment utilisés sont le ZnO dopé à l'aluminium (ZnO:Al), l'oxyde d'indium (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et l'oxyde d'étain (SnO<sub>2</sub>), déposés par pulvérisation cathodique. L'épaisseur de la couche de fenêtre optique est généralement de l'ordre de 300 nm à 500 nm. Le contact avant final est réalisé en ajoutant une grille à l'empilement, qui collectera les charges générées par le dispositif. Cette grille est composée d'une couche de nickel et d'une couche d'aluminium.

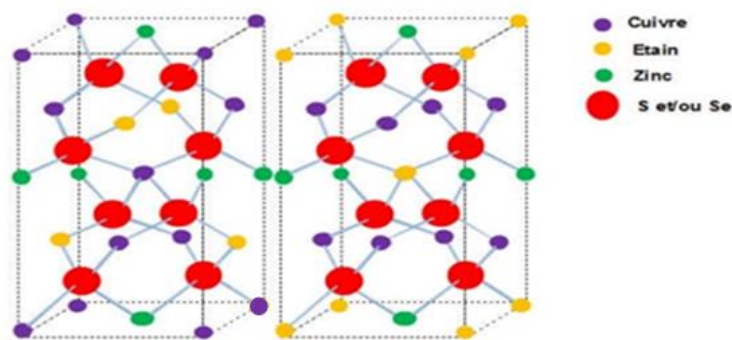
### II.6.2 Structure du matériau CZTSSe

Les plus simples semi-conducteurs proviennent de la 4ème colonne du tableau périodique, où se trouve le silicium. Il est également possible de former des semi-conducteurs binaires en remplaçant l'élément de la 4ème colonne par un élément de la 2ème colonne et un élément de la 6ème colonne, comme le cadmium telluride (CdTe), qui est un semi-conducteur de type II-VI. Les semi-conducteurs à base de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS) sont dérivés de la structure du CdTe, dans laquelle les atomes du groupe II sont substitués par des atomes du groupe I et III. Les semi-conducteurs à base de Cu<sub>2</sub>ZnSn(S,Se)<sub>4</sub> (CZTSSe), quant à eux, sont dérivés du CIGS, où deux atomes des groupes II et IV remplacent l'atome du groupe III (figure II.6). [22].



**Figure II.6 :** Les familles de semi-conducteur dont le CZTSSe est issu [22].

Le CZTSSe présente une cristallisation dans une structure de type kesterite et/ou stannite, qui est dérivée de la structure des chalcopyrites, elle-même dérivée de la structure sphalérite-cubique (Zinc-Blende). L'arrangement des cations le long de l'axe "c" diffère entre les structures kesterite et stannite. La Figure II.7 illustre un arrangement de type (-[CuSn]-[CuZn]-[CuSn]-[CuZn]-) pour la structure kesterite et un arrangement de type (-[ZnSn]-[Cu<sub>2</sub>]-[ZnSn]-[Cu<sub>2</sub>]-) pour la structure stannite. Il est très probable que les deux types de structures soient présents dans un matériau, car leurs énergies de formation diffèrent très peu (environ 3 meV par atome). La structure kesterite est celle qui présente l'énergie la plus basse et une plus grande stabilité. [23].



**Figure II.7 :** Structures cristalline du  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ : Structures kesterite (gauche) et stannite (droite)[22].

### II.6.3 Propriétés électriques

Les principales caractéristiques électriques des matériaux semi-conducteurs résultent des déplacements des porteurs de charge sous l'effet d'un champ électrique, ou magnétique (conductivité électrique, effet Hall, photoconductivité,...). Néanmoins, ces déplacements sont gouvernés par les collisions des porteurs de charge avec les ions, les impuretés ou les défauts du réseau cristallin. Le libre parcours moyen, qui caractérise la distance moyenne parcouru par un électron entre deux chocs successifs, est un paramètre important spécifique de l'état

structural du matériau. Dans les matériaux photovoltaïques classiques, en particulier le silicium, on procède souvent aux dopages n et p de ces semi-conducteurs pour former la jonction p-n, par contre le semi-conducteur CZTS est naturellement dopé p. Son dopage résiduel est intrinsèque et inhérent aux défauts cristallins du matériau. Ces défauts sont en majorité des substitutions de cations ou les atomes de cuivre prennent la place des atomes de zinc (CuZn). Les propriétés électriques du CZTSSe peuvent varier considérablement en raison des écarts de composition, ce qui est similaire aux chalcopyrites. [22].

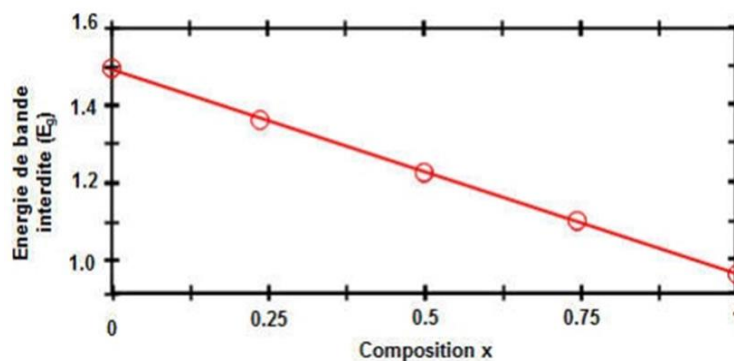
### II.6.4 Propriétés optiques

La bande interdite du CZTSe pur est de 1,0 eV, alors que celle du CZTS pur est de 1.5eV. Pour le CZTSSe, la bande interdite se situe entre ces deux valeurs et peut être ajustée en fonction du rapport soufre/sélénium. La valeur de la bande interdite, qui est d'environ 1.13eV, se rapproche de la valeur optimale permettant une absorption maximale du spectre solaire, atteignant ainsi la limite de Shockley-Queisser avec un rendement de 32% pour un absorbeur. Chen et al. ont démontré que la largeur de la bande interdite peut être déterminée à l'aide de la relation suivante:

$$E_g(x) = (1-x) E_g(\text{CZTSe}) + x E_g(\text{CZTS}) - bx(1-x) \quad (\text{II. 2})$$

Avec où  $x$  est le taux soufre ( $[S]/([S]+[Se])$ ),  $b$  représente un paramètre d'ajustement

La modification de la bande interdite en fonction de la composition  $x$  est illustrée dans la Figure II.8. En optimisant la composition, le CZTSSe présente un coefficient d'absorption supérieur à  $104 \text{ cm}^{-1}$  au pic d'émission du spectre solaire, ce qui lui permet d'absorber 90% de la lumière solaire sur une épaisseur relativement mince de quelques micromètres [22].



**Figure II.8 :** Variation de l'énergie de bande interdite du CZTSSe en fonction de  $x$  qui vaut pour ce schéma  $x = [Se]/([S]+[Se])$  [24].

### **Conclusion**

À travers ce deuxième chapitre, nous avons présenté les notions essentielles des cellules solaires en couche mince, suivit d'une description des matériaux utilisés dans la structure de ces cellules ainsi que leurs différentes propriétés.

### Références Bibliographiques

- [1] K. Kamli , « Elaboration et caractérisations physicochimique des couches minces de sulfure d'étain par spray ultrasonique : Effet des sources d'étain », Mémoire de Fin d'Études, Université Mohamed Khider-Biskra, 2013
- [2] S. Hariech, « élaboration et caractérisation des couches minces de sulfure de cadmium (cds) préparées par bain chimique (cbd ». Mémoire de magister, université mentouri-constantine, 2009.
- [3] A. Ben Aicha, S. Cherifi, C. Frioua, «Simulation numérique d'une cellule solaire tandem à couche mince», Mémoire de Fin d'Études, Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued, 2019
- [4] daranfad ouarda ,Technologie des couches minces  
«[http://pero.wanadoo.fr/michel.hubin/physique/Couches/chap\\_cm1](http://pero.wanadoo.fr/michel.hubin/physique/Couches/chap_cm1) » 2017.
- [5] a.kirdous, a.bouchehkhchkh, memoire de master, univ. a.mira-bejaia,2012.
- [6] H.TEBANI, Mémoire de master, Univ.8 mai 1945, Guelma, 2019.
- [7] M.LAMRI ZEGGAR, Thèse de doctorat, Univ. Frères Mentouri, Constantine1, 2016.
- [8] N.BOUHSSIRA, Thèse de doctorat, Univ.Constantine1, 2013.
- [9] J. B. Baxter et E. S. Aydil, «Nanowire-Based Dye-Sensitized Solar Cells,» Appl. Phys. Lett., vol. 86, p. 053114, 2005.
- [10] E. Puyoo, G. Rey, E. Appert, V. Consonni et D. Bellet, «Efficient Dye-Sensitized Solar Cells Made from ZnO Nanostructure Composites,» J. Phys. Chem. C, vol. 2012, pp.18117-18123, 2012
- [11] C. Lévy-Clément, R. Tena-Zaera, M. A. Ryan, A. Katty et G. Hodes, «CdSe-Sensitized pCuSCN/Nanowire n-ZnO Heterojunctions,» Adv. Mater., vol. 17, pp. 1512-1515, 2005.
- [12] Q. Wan, Q. H. Li, Y. J. Chen et T. H. Wang, «Fabrication and ethanol sensing characteristics of ZnO nanowire gas sensors,» Applied Physics Letters, vol. 84, p. 3654,2004.
- [13] J. Garnier, R. Parize, E. Appert, O. Chaix-Pluchery, A. Kaminski-Cachopo et V. Consonni,«Physical Properties of Annealed ZnO Nanowire/CuSCN Heterojunctions for Self-Powered UV Photo-detectors,» ACS Appl. Mater. Interfaces, vol. 7, pp. 5820-5829, 2015.
- [14] J. Müller, B. Rech, J. Springer et M. Vanecek, «TCO and light trapping in silicon thin film solar cells. Solar Energy,» Solar Energy, vol. 77, pp. 917-930, 2004.
- [15] K. Vanheusden, C. H. Seager, W. L. Warren, D. R. Tallant, , J. A. Voiget,«Correlation between photo- luminescence and oxygen vacancies in ZnO phosphors», Applied Physics Letters 68403, (1996).
- [16] S. Hariech, "élaboration et caractérisation des films minces chalcogenures a base de Cadmium et de cuivre pour des applications photovoltaïques ", Thèse doctorat (2013).
- [17] M. A. Martinez, C. Guillen, J. Herrero, " Morphological and structural studies of CBD-CdS thin films by microscopy and diffraction techniques", Applied Surface Science 136, 8- 16, (1998).
- [18] A. Mosbah, "Elaboration et Caractérisation de Couches Minces d'Oxyde de Zinc ", Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine,(2009).
- [19] Boumaraf Ibtissem et Habes Wissam, «Préparation et caractérisations des couches minces de sulfure de cadmium CdS dopées Zn», Mémoire de master, Université de Larbi Ben M'Hidi Oum El Bouaghi, 2016.
- [20] BECHANE LEILA <http://dSPACE.univ-setif.dz:8888/jspui/retrieve/7592>



## Chapitre II: Couche mince a base de CZTS

---

	/Eth1995%20 Bechane.pdf 21-fév-2022.
[21]	Sawsen Azaizia, «Alliages à base de GaAs pour applications optoélectroniques et spintroniques», Mémoire de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse), 2018.
[22]	kanoun ahmed-ali «Etude théorique et prédictive des nouveaux matériaux pour conception des cellules solaires et applications photovoltaïques » thèse de doctorat université abou bekr- belkaid- tlemcen 2019.
[23]	Arras Aida, «Caractérisation des cellules photovoltaïques à base d'hétérojonction de silicium a-Si/c-Si», Mémoire de master, Université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen, 2018.
[24]	N.Oleksiy, 'Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités', Thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, France, (2005).

# **Chapitre III**

## **Simulations et Résultats**

### III.1. Introduction

En raison de la complexité des systèmes physiques impliqués dans les dispositifs photovoltaïques, la simulation numérique offre l'outil nécessaire pour étudier les performances et optimiser la conception [1], Sachant que l'optimisation englobe l'étude de l'influence des différents paramètres sur l'efficacité de la cellule solaire dans le but d'obtenir une structure conduisant au meilleur rendement.

Parmi les logiciels de simulation utilisés pour les cellules solaires en couches minces, on peut mentionner le logiciel "SCAPS-1D", qui permet la simulation des cellules solaires et l'évaluation de leurs caractéristiques électriques, comme la courbe courant-tension (J-V). Il est également capable de calculer les paramètres clés des cellules photovoltaïques, à savoir : la tension en circuit ouvert ( $V_{OC}$ ), le courant de court-circuit ( $J_{SC}$ ), la puissance maximale ( $P_{max}$ ), le facteur de forme (FF), le rendement de conversion photovoltaïque ( $\eta$ ) et la réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde du spectre [2].

Ce chapitre, est consacré en premier temps à la présentation de l'outil de simulation pour passant après à une étude comparative entre les deux structures, p-CZTS/n-CdS/ZnO et p-GaAs/p-CZTS/n-CdS/ZnO, ensuite, nous allons étudier l'influence de la variation de l'épaisseur et du dopage de la couche du CZTS, GaAs et CdS sur les paramètres de la cellule au moyen du logiciel « SCAPS ».

### III.2. Présentation du logiciel de simulation

#### III.2.1 Définition

Le SCAPS-1D, abréviation de "Solar Cell Capacitance Simulator one Dimension", est un logiciel de simulation des cellules solaires unidimensionnelles élaboré à l'Université de Gent en Belgique par Marc Burgelman et son équipe. Il est utilisé pour simuler les caractéristiques électriques des dispositifs photoniques notamment les cellules solaires à couches minces.

Initialement, SCAPS a été créé pour modéliser des systèmes photovoltaïques contenant des semi-conducteurs tels que le CuInSe<sub>2</sub> et le CdTe. Après, le programme a été étendu pour prendre en compte d'autres types de cellules solaires, notamment les cellules cristallines (Si et GaAs) et les cellules amorphes (a-Si et Si microcristallin). Il offre ainsi la possibilité de simuler des cellules solaires composées d'un maximum de sept couches, chaque couche ayant des caractéristiques différentes, telles que l'épaisseur, la distribution d'énergie des niveaux donneurs ou accepteurs, le profil de dopage, l'absorption optique, etc. Le logiciel effectue des calculs sur les bandes d'énergie, les caractéristiques J-V, les concentrations et les courants, la

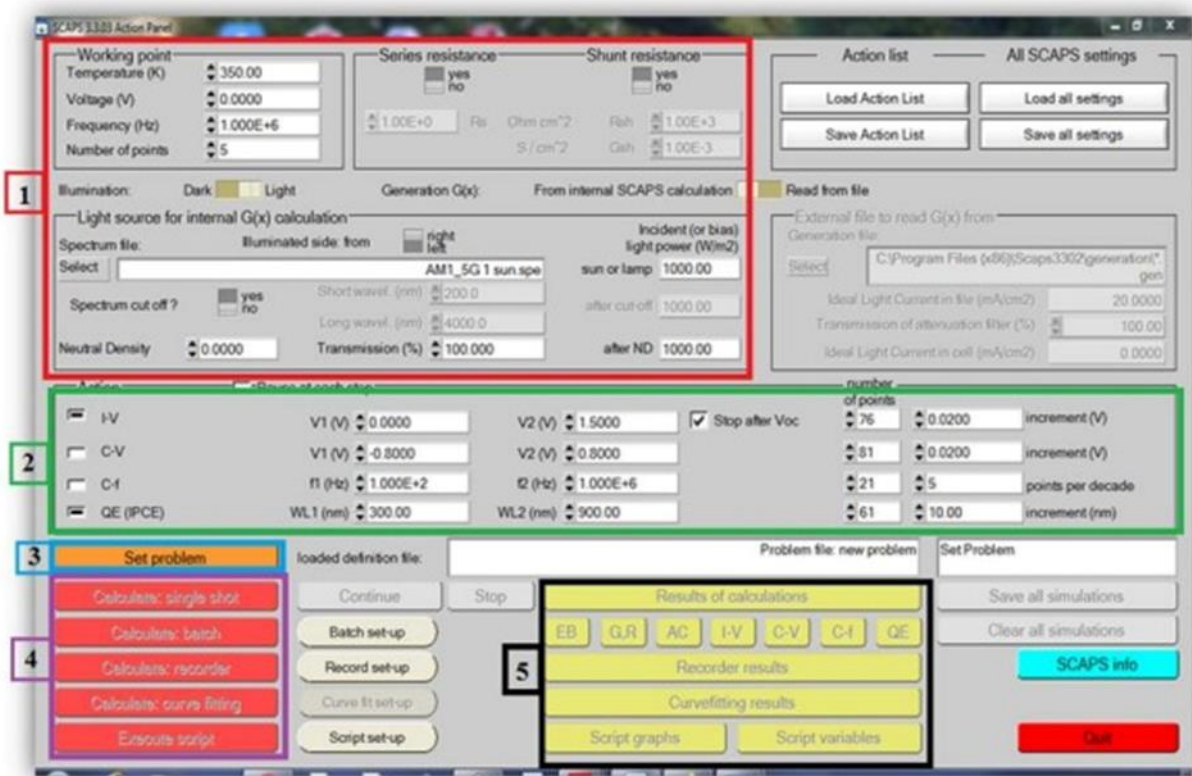
réponse spectrale (QE) et les caractéristiques alternatives (C et G en fonction de V et/ou de f) [3].

### III.2.2 Utilisation du logiciel

Le programme est structuré en plusieurs panneaux qui permettent à l'utilisateur de définir les paramètres et de calculer les résultats [4]. SCAPS examine la physique du modèle et fournit des informations sur les profils de recombinaison, la distribution du champ électrique, le mécanisme de transport des porteurs de charge et les densités de courant individuelles [5].

Pour simuler et examiner tous les paramètres d'un dispositif photovoltaïque à l'aide du logiciel SCAPS, nous utilisons trois grandes fenêtres (voir figure III.1) :

- La fenêtre d'exécution (« action panel ») [6], où les actions peuvent être exécutées.
- La fenêtre de conception du dispositif et de définition du problème (« Définition panel ») [6], où les caractéristiques du dispositif peuvent être spécifiées.
- La fenêtre des résultats [6], où les résultats de la simulation sont affichés.



**Figure III. 1:** Panneau de démarrage du logiciel SCAPS, « action panel » ou principal.

- Fenêtre d'exécution (action panel): Cette fenêtre est composée de deux blocs. Le premier bloc permet de définir les conditions expérimentales et les points de fonctionnement

comme l'éclairage, la fréquence, la tension, les résistances série et shunt, et la température. Le second bloc sélectionne les grandeurs à simuler.

- Fenêtre de conception du dispositif et définition du problème (Définition panel) : dans Cette fenêtre , on définit le dispositif photovoltaïque. L'addition d'une couche affiche une fenêtre contenant de nombreux paramètres électriques à définir tels que l'énergie de bande interdite, la permittivité électrique, l'affinité, le dopage et le type de dopage. Les défauts de différents types peuvent également être définis, à la fois dans les couches et aux interfaces, en indiquant l'état de charge, la distribution énergétique, la propriété optique et la transitions métastables entre les niveaux.

- Il est important de noter que les propriétés optiques telles que le coefficient d'absorption et la réflexion avant et arrière en fonction de la longueur d'onde peuvent être importées à partir de fichiers de données du logiciel. De plus, le code de SCAPS contient des fichiers de données avec l'extension .def qui fournissent une conception et une définition de dispositifs photovoltaïques standard tels que le CdTe et le CIGS. La conception peut être modifiée à l'aide de champs spécifiques.

- Fenêtre des résultats: les résultats de la simulation sont affichés dans cette fenetre, sous forme de graphiques, avec la possibilité de les sauvegarder ou d'exporter leurs valeurs.

### III.2.3 Théorie de fonctionnement

SCAPS-1D se base principalement sur la résolution des équations de Poisson et des équations de continuité. Cela comprend les équations de continuité pour les trous et les électrons, ainsi que l'équation de Poisson pour le potentiel électrostatique  $\psi$ .

➤ Les équations de continuité pour les électrons et les trous sont les suivantes :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} + G - R_n(n, p) \quad (III.1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} + G - R_p(n, p) \quad (III.2)$$

avec G : le taux de génération, R : le taux de recombinaison,  $J_n$  et  $J_p$  représentent la densité de courant des électrons et des trous.

➤ L'équation de Poisson appliquer est :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon(x) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = -\frac{q}{\epsilon_0} \left[ -n + p + N_D^+ - N_Q^- + \frac{1}{q} \rho_{def}(n, p) \right] \quad (III.3)$$

où  $\epsilon$  est la constante diélectrique,  $\psi$  le potentiel électrostatique,  $p$  et  $n$  les concentrations de porteurs libres pour le trou et l'électron,  $N_D^+$  et  $N_A^-$  représente la densité d'accepteur et de donneur ionisés et  $\rho_{def}$  est la densité de charge d'espace.

- Le coefficient d'absorption des matériaux à bande directe employés dans la structure simulée est donné par:

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi K(\lambda)}{\lambda} \quad (\text{III.4})$$

Avec  $K$  le coefficient d'extinction, et  $\lambda$  la longueur d'onde [4].

La stratégie de fonctionnement de SCAPS-1D est illustrée par la figure III.2. Chaque calcul débute à partir d'un point de départ et utilise une hypothèse initiale, qui est exprimée en termes de niveaux de quasi-Fermi, pour parvenir à une situation d'équilibre. Lors de cette situation, aucune illumination ni tension n'est appliquée. Lorsque le point de fonctionnement est défini dans un état sans éclairage, la condition d'équilibre est appliquée pour calculer la solution. Lorsqu'il est configuré dans des conditions d'éclairage, la situation de court-circuit est calculée et cette nouvelle valeur est utilisée comme valeur initiale pour l'étape suivante.

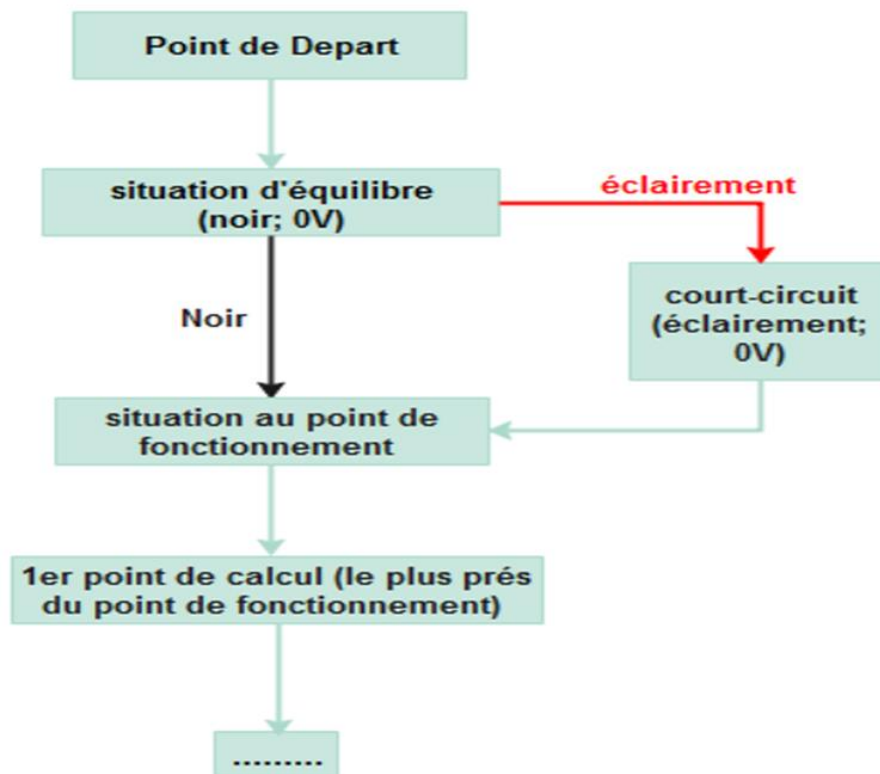


Figure III. 2: Stratégie de fonctionnement de SCAPS [5].

SCAPS utilise un schéma d'itération de type Gummel avec l'algorithme de Newton-Raphson pour assurer la convergence des calculs numériques. Une fois qu'un point de calcul est sélectionné, SCAPS applique l'algorithme de Newton-Raphson pour itérer les calculs jusqu'à atteindre la valeur d'optimisation souhaitée.

### III.2.4 Avantages et inconvénients du SCAPS

Plusieurs avantages considérables sont offerts par le programme de calcul SCAPS. Tout d'abord, il offre une exécution extrêmement rapide, permettant aux utilisateurs d'obtenir rapidement des résultats. De plus, les utilisateurs peuvent facilement accéder aux fichiers d'entrée au format texte, ce qui facilite la manipulation des données spectrales et des paramètres de description du dispositif. SCAPS prend également en compte les interfaces et les phénomènes de recombinaison, ce qui permet une modélisation plus précise. Il permet également d'introduire les résistances série et parallèle pour une analyse plus complète. De plus, le logiciel permet de visualiser les caractéristiques de capacité-tension et de fréquence de capacité, ce qui facilite l'analyse des performances du dispositif.

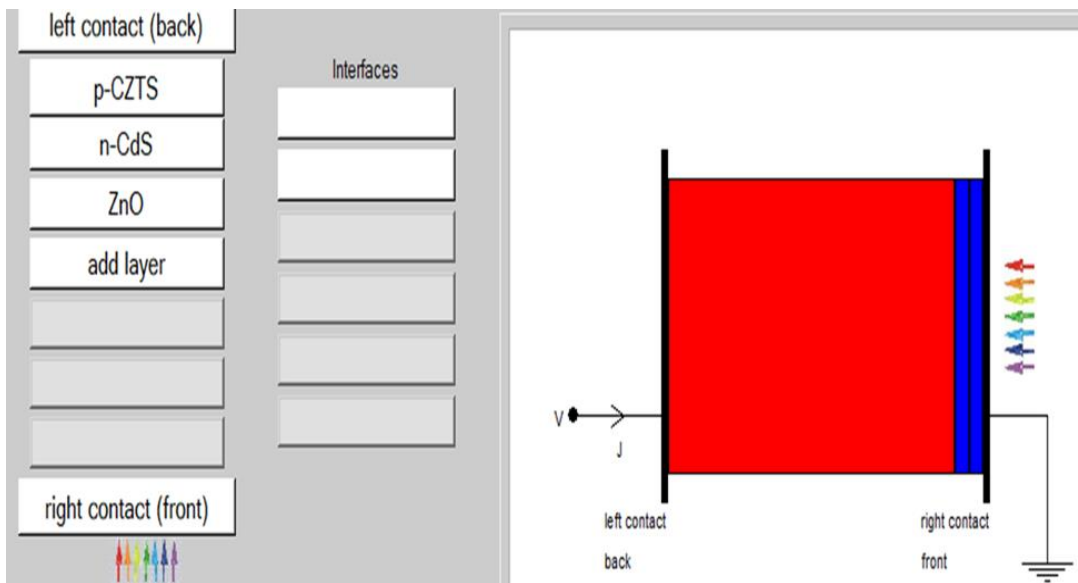
Cependant, il convient de noter certains inconvénients de SCAPS. En particulier, il présente une limitation dans la gestion des phénomènes de réflexion à l'interface des différentes couches constitutives de la cellule solaire. Cela peut limiter la précision des résultats dans certaines situations.

## III.3 Simulation par SCAPS

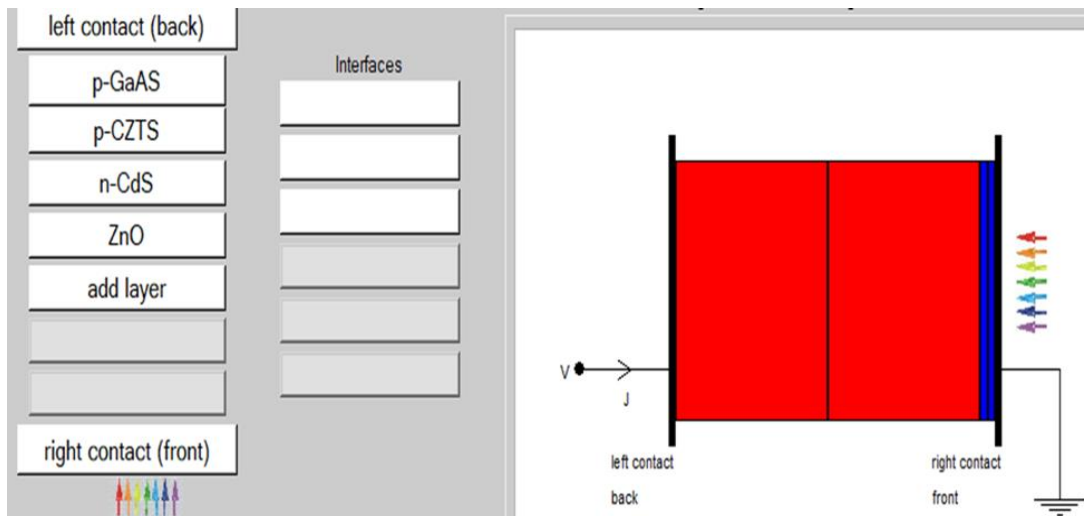
### III.3.1 Structure et paramètres de la cellule étudiée

#### III.3.1.1 Présentation de la cellule étudiée

Notre objectif principal est de simuler une cellule solaire en couche mince afin de comprendre et d'optimiser ses caractéristiques électriques, optiques et géométriques. Dans le cadre de notre étude, nous nous concentrons sur l'utilisation de deux types de cellules solaires avec une couche absorbante en CZTS. Les structures spécifiques que nous étudierons sont les suivantes : CZTS/CdS/ZnO et GaAs/CZTS/CdS/ZnO, elles sont présentés respectivement dans les figures III.3 et III.4. En simulant ces structures, nous visons à obtenir une compréhension approfondie de leur fonctionnement et à optimiser leur rendement électrique.



**Figure III. 3 :** Schéma simplifié de la cellule solaire en couche mince utilisée.



**Figure III. 4 :** Schéma simplifié de la cellule solaire en couche mince utilisée.

#### III.3.1.2 Les paramètres du dispositif étudié

les paramètres des matériaux utilisés dans la simulation par le logiciel « SCAPS » sont présentés dans le tableau III.1 :



Proprietes des materiaux	ZnO	CdS	CZTS	GaAs
Energie de gap $E_g$ (eV)	3.40	2.40	1	1.42
Affinite electronique $\chi_e$ (eV)	4.55	4.50	4.35	4.07
Permittivite $\epsilon_r$	10	10	13.60	12.90
Mobilite des electrons $\mu_n$ (cm <sup>2</sup> /V.s)	50	100	100	8500
Mobilite des trous $\mu_p$ (cm <sup>2</sup> /V.s)	20	25	25	400
Densite effective d'etat a $C_B$ $N_C$ (cm <sup>-3</sup> )	$4 \times 10^{18}$	$2.2 \times 10^{18}$	$2.2 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{18}$
Densite effective d'etat a $V_B$ $N_V$ (cm <sup>-3</sup> )	$9 \times 10^{18}$	$1.8 \times 10^{18}$	$1.8 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{19}$
Concentration du dopage de type n $N_D$ (cm <sup>-3</sup> )	$10^{17}$	$2.0 \times 10^{17}$	-	-
Concentration du dopage de type p $N_A$ (cm <sup>-3</sup> )	-	-	$8.0 \times 10^{16}$	$1 \times 10^{18}$
Vitesse thermique des electrons/ trous (cm/s)	$10^7$	$10^7$	$10^7$	$10^7$
Densite de defect (cm <sup>-3</sup> )	$10^{14}$	$10^{14}$	$10^{14}$	$10^{14}$
Epaisseur ( $\mu$ m)	0.05	0.05	1	1

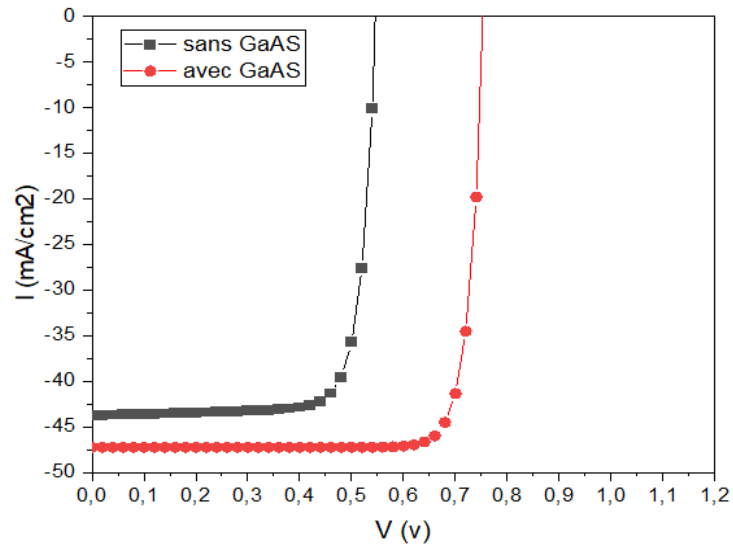
**Tableau III. 1:** Paramètres de la cellule solaire en couche mince utilisé dans la simulation [7]

### III.3.2 Résultats et discussion

#### III.3.2.1 Simulation structurelle

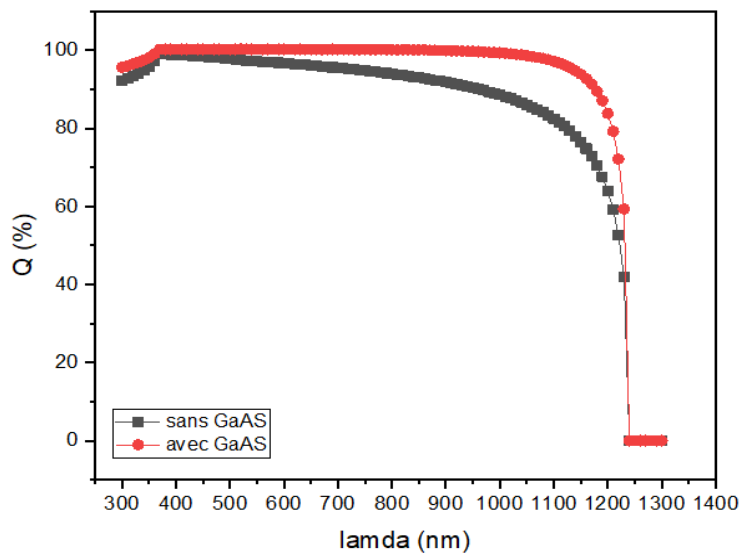
##### III.3.2.1.1 Simulation des structure ZnO/CdS/CZTS /GaAs et ZnO/CdS/CZTS

Les caractéristiques I-V de la cellule solaire en couche mince ayant les structures ZnO/CdS/CZTS /GaAs et ZnO/CdS/CZTS étudiée sont illustrées dans la figure III.5.



**Figure III. 5:** Caractéristiques I-V simulé pour cellule solaire en couche mince avec et sans la couche GaAs.

Les rendements quantiques pour cellule solaire en couche mince avec et sans la couche GaAs sont présentés dans la figure III.6.



**Figure III. 6:** Rendements quantiques simulé pour cellule solaire en couche mince avec et sans la couche GaAs.

Le tableau III.2 représente les paramètres des structures de la cellule solaire en couche mince étudié :

	Voc (v)	Jsc(mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	η (%)
<b>CZTS/CdS/ZnO</b>	<b>0.547</b>	<b>43.78</b>	<b>79.70</b>	<b>19.07</b>
<b>GaAs/CZTS/CdS/ZnO</b>	<b>0.754</b>	<b>47.26</b>	<b>85.32</b>	<b>30.39</b>

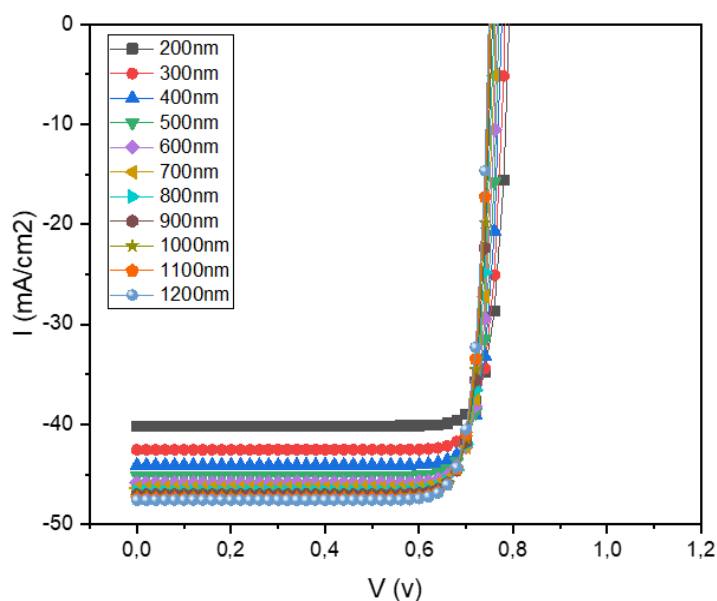
**Tableau III. 2:** Les paramètres des structures de la cellule solaire en couche mince examiné

Les représentations montrent clairement que la couche GaAs joue un rôle crucial dans les performances de la cellule solaire. En simulant la cellule avec la structure GaAs/CZTS/CdS/ZnO, nous obtenons des valeurs prometteuses pour Voc (0,754 V) et Jsc (47,26 mA/cm<sup>2</sup>). De plus, cette structure possède un rendement plus élevé, atteignant 30,39 %. Ces résultats soulignent l'importance de la couche GaAs dans l'amélioration des performances globales de la cellule solaire.

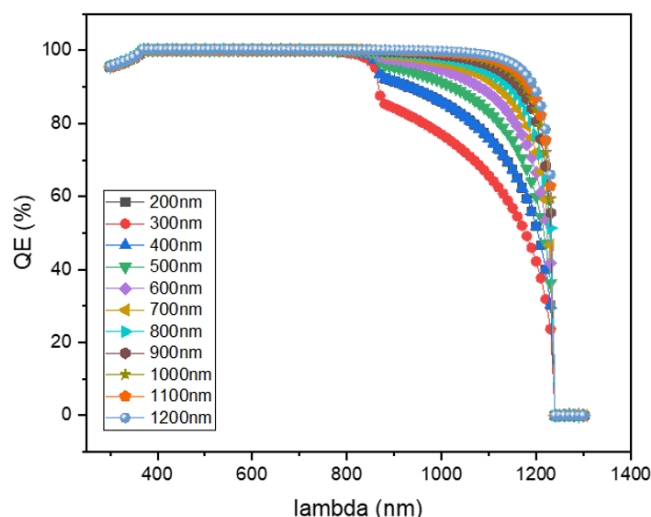
### III.3.2.2 Influence de la variation de l'épaisseur

#### III.3.2.2.1 Variation de l'épaisseur de la couche CZTS

L'optimisation de l'épaisseur de la couche CZTS est présentée dans la figure III.7 ainsi que la figure III.8 :



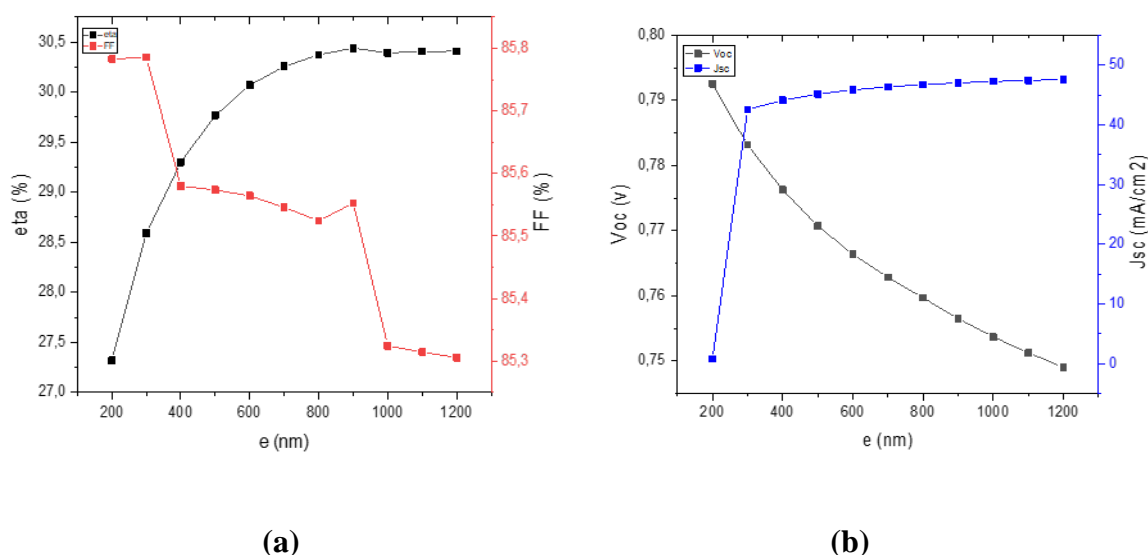
**Figure III. 7:** Impact de l'épaisseur de la couche CZTS sur la caractéristique I-V.



**Figure III. 8:** Impact de l'épaisseur de couche CZTS sur le rendement quantique

En analysant les représentations, il est conclu que l'épaisseur de la couche CZTS de 900nm permet d'atteindre un rendement maximal de 30,44 %. La simulation donne également des valeurs satisfaisantes pour la tension  $V_{oc}$  (0,756 volts) et la densité de courant  $J_{sc}$  (47,03 mA/cm<sup>2</sup>) (voir figure III.7 et III.8). Ces résultats mettent en évidence l'importance de l'épaisseur de la couche CZTS dans l'optimisation des performances de la cellule solaire.

L'influence de l'épaisseur de la couche absorbant CZTS sur les performances de la cellule est illustrée dans la figure III.9.



**Figure III. 9:** Variation des performances de la cellule solaire en couche mince en fonction de l'épaisseur de la couche d'absorbant CZTS (a) : FF,  $\eta$  et (b) :  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ .

Selon les observations faites à partir de la figure III.9, on remarque que l'augmentation de l'épaisseur de l'absorbeur CZTS entraîne une augmentation des caractéristiques  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$  et du facteur de forme de la cellule simulée. Cette augmentation est tout à fait compréhensible, car c'est dans cette couche que se produit la capture des photons et la conversion photovoltaïque. Par conséquent, nous choisissons une épaisseur de 900 nm comme valeur optimale, correspondant à un rendement maximal de 30,44 %. Cette épaisseur permet d'optimiser les performances de la cellule solaire en favorisant une meilleure absorption de la lumière et une conversion efficace de l'énergie solaire.

#### III.3.2.2.2 Variation de l'épaisseur de la couche GaAs

L'influence de l'épaisseur de la couche GaAs sur les performances de la cellule est illustré dans la figure III.10 et III.11.

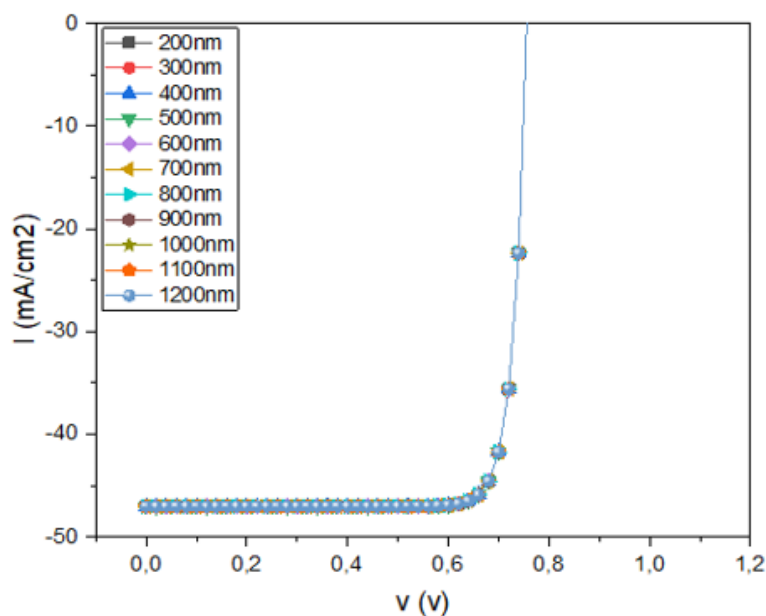
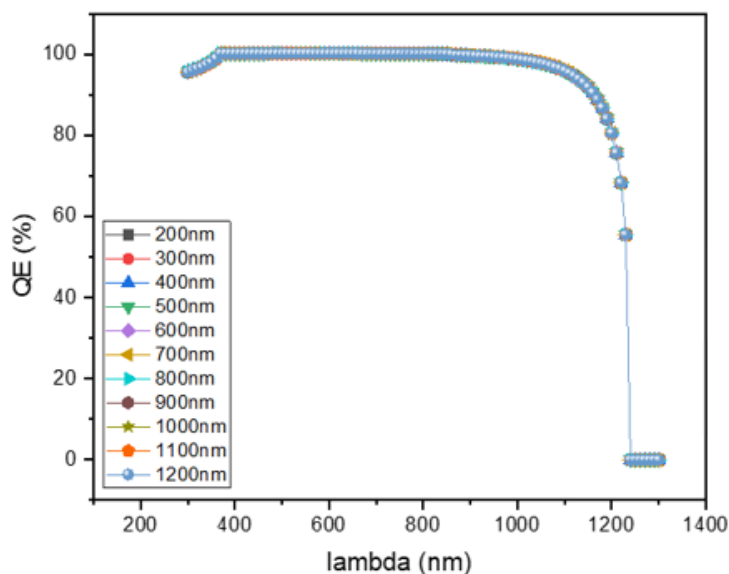


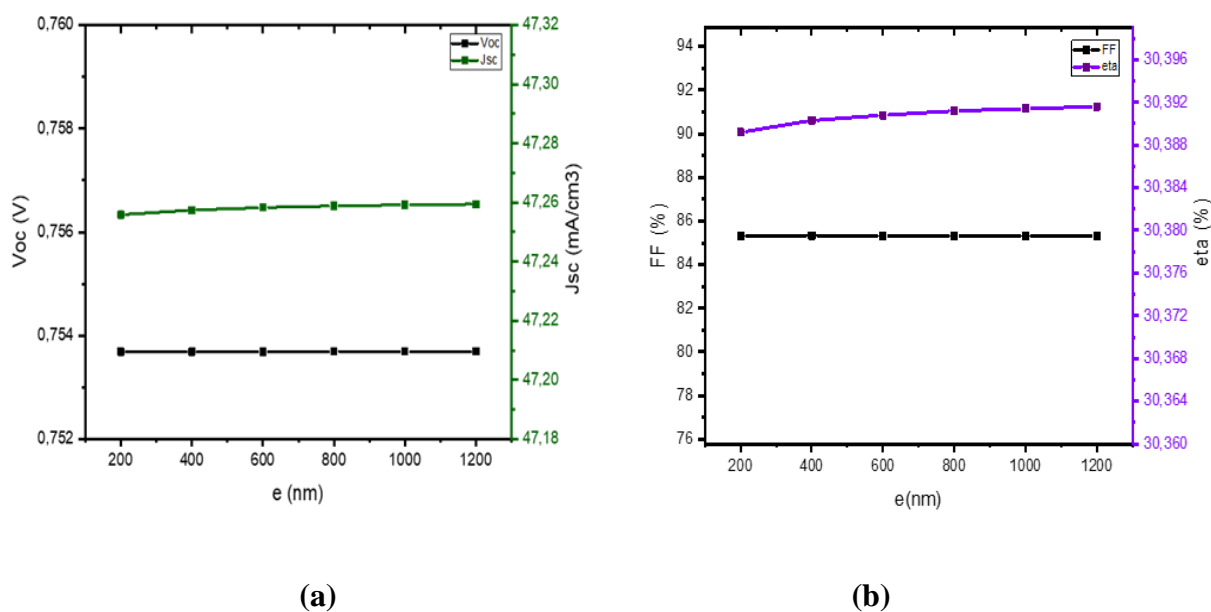
Figure III. 10: Impact de l'épaisseur de la couche GaAs sur la caractéristique I-V.



**Figure III. 11:** Impact de l'épaisseur de couche GaAs sur le rendement quantique.

Selon l'aspect des différentes courbes (I-V) et (QE) présentées dans les figures III.10 et III.11, nous remarquons qu'elles ont une forme similaire. Cette observation nous conduit à conclure que l'épaisseur de la couche GaAs n'a pas d'influence significative sur les caractéristiques I-V et le rendement quantique.

L'influence de la variation de l'épaisseur de la couche GaAs sur les paramètres caractéristiques ( $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF,  $\eta$ ) est présenté sur la figure III.12.



**Figure III. 12:** Variation des performances de la cellule solaire en couche mince en fonction de l'épaisseur de la couche GaAs (a) :  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$  et (b) : FF,  $\eta$ .

Si les graphiques montrent que les paramètres caractéristiques ( $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ ,  $FF$ ,  $\eta$ ) restent constants malgré les variations d'épaisseur de la couche GaAs, cela suggère que l'épaisseur de la couche n'a pas d'influence significative sur ces paramètres. Cependant, il convient de souligner que cette observation peut dépendre des conditions expérimentales et des spécificités propres au dispositif étudié.

#### III.3.2.2.3 Variation de l'épaisseur de la couche CdS

L'optimisation de l'épaisseur de la couche GaAs est présentée dans la figure III.13 et III.14 :

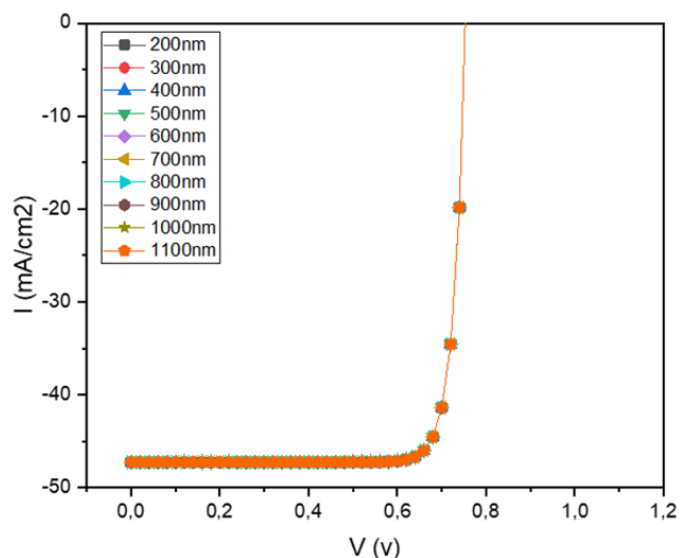


Figure III. 13: L'effet d'épaisseur de la couche CdS sur la caractéristique I-V.

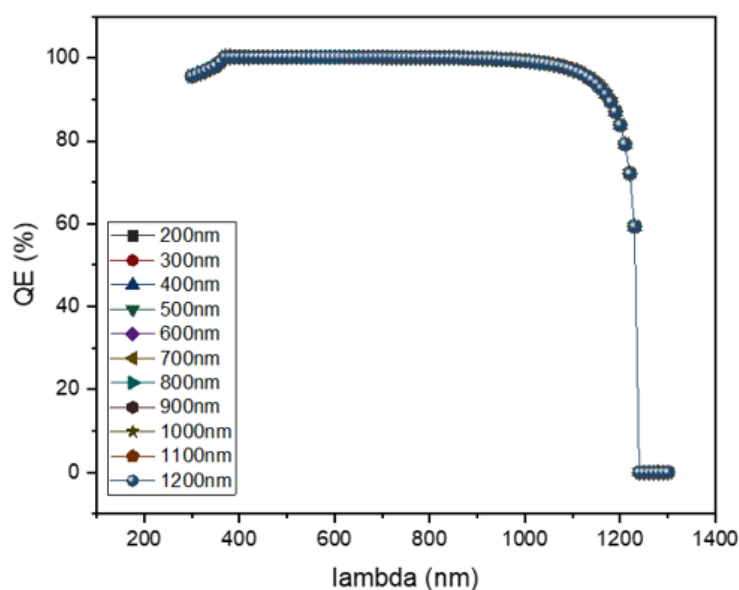
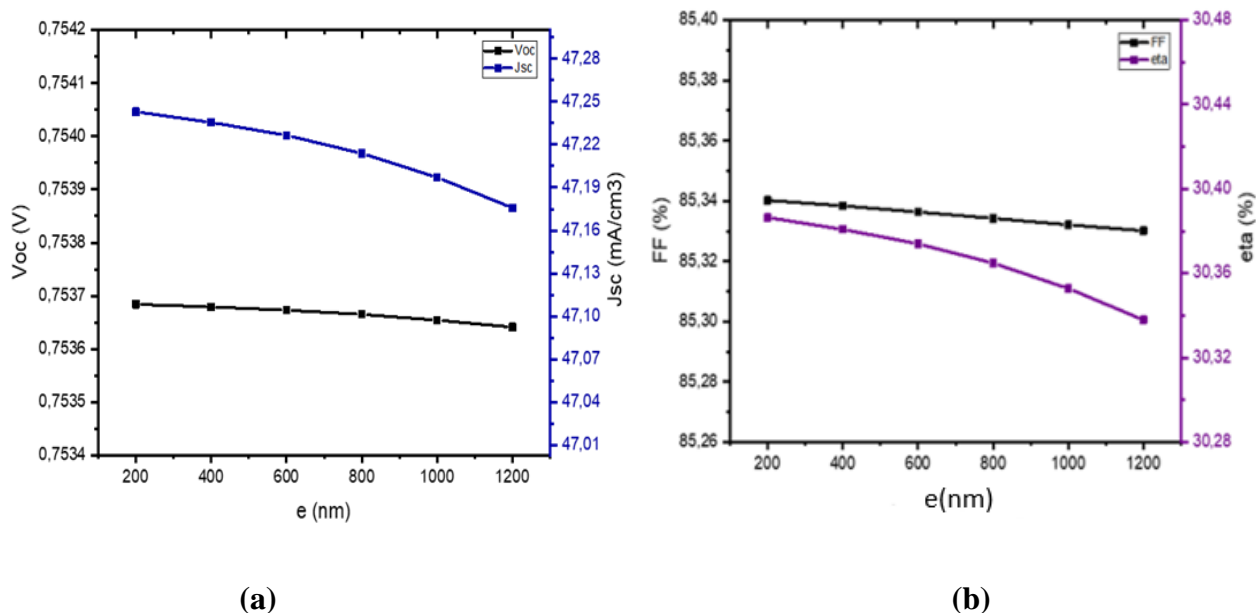


Figure III. 14: Impact de l'épaisseur de la couche CdS sur le rendement quantique.

En observant les configurations graphiques (I-V) et (QE) présentées dans la figure (III.13) et la figure (III.14), on remarque qu'elles ont une forme presque identique. Cela suggère que l'épaisseur de la couche CdS n'a pas d'influence significative sur la caractéristique I-V et le rendement quantique.

L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche CdS sur les paramètres caractéristiques ( $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF,  $\eta$ ) est illustré dans la figure III.15.



**Figure III. 15:** Variation des performances de la cellule solaire en couche mince en fonction de l'épaisseur de la couche CdS (a) :  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$  et (b) : FF,  $\eta$  .

En examinant les représentations graphiques, on peut observer que les caractéristiques  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF et le rendement  $\eta$  restent constants malgré les variations de l'épaisseur de la couche CdS. Par conséquent, on peut conclure que l'épaisseur de la couche CdS n'a pas d'influence significative sur les paramètres caractéristiques ( $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF,  $\eta$ ).

### III.3.2.3 Influence de la variation de dopage

#### III.3.2.3.1 Variation du dopage de la couche CZTS

L'influence de la variation de dopage de la couche CZTS sur la caractéristique I-V est présenté sur la figure III.16.



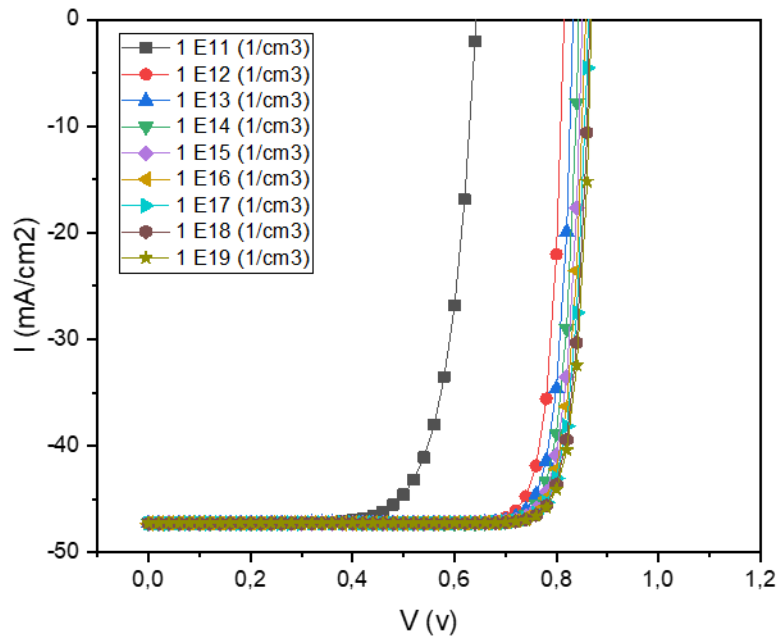


Figure III. 16 : Impact du dopage de couche CZTS sur la caractéristique I-V.

L'influence de la variation de dopage de la couche CZTS sur le rendement quantique QE est présenté sur la figure III.17.

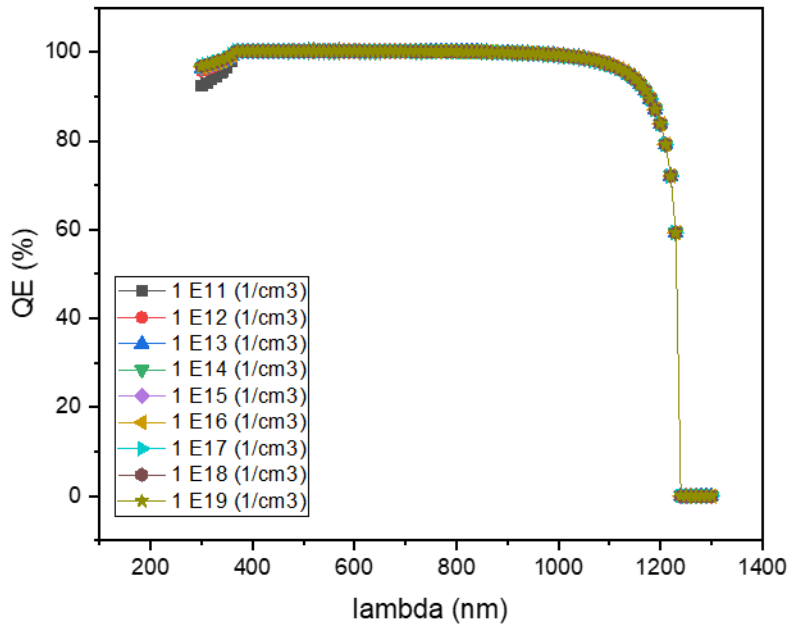
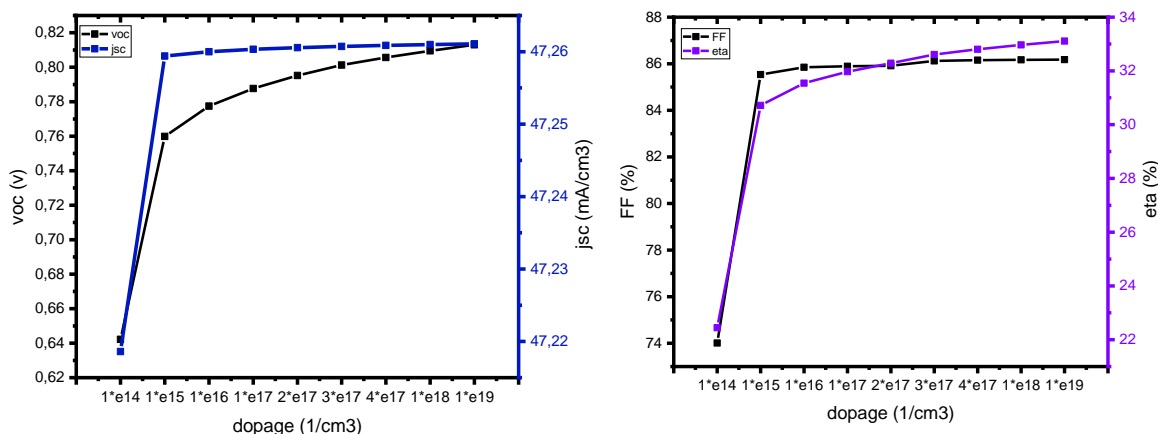


Figure III. 17: Impact du dopage de couche CZTS sur le rendement quantique.

L'influence de la variation du dopage de la couche d'absorbeur CZTS sur les paramètres caractéristiques ( $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF,  $\eta$ ) est présenté sur la figure III.18.



(a) (b)

**Figure III. 18:** Variation des performances de la cellule solaire en couche mince en fonction de dopage de la couche CZTS (a) : $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$  et (b) : FF et  $\eta$ .

En analysant les graphes, on peut conclure que pour un dopage de CZTS de  $10^{19}$  cm<sup>-3</sup>, il est possible d'atteindre un rendement maximal de 33,11 %. La simulation présente une valeur satisfaisante pour la tension  $V_{oc}$  (0,813 V) et une valeur optimale pour la densité de courant  $J_{sc}$  (47,26 mA/cm<sup>2</sup>) (voir figure III.16 et III.17).

En observant les graphiques, on remarque une augmentation significative de  $V_{oc}$ , du FF, du rendement  $\eta$  et du  $J_{sc}$  avec l'augmentation du dopage. Ainsi, nous pouvons conclure que le rendement atteint une valeur maximale pour  $N_A = 10^{19}$  cm<sup>-3</sup>. Cela indique que la valeur optimale de  $N_A$  est de  $10^{19}$  cm<sup>-3</sup>, correspondant à un rendement de 33,11 % (voir figure III.18).

#### III.3.2.3.2 Variation de dopage de la couche GaAs

L'influence de la variation de dopage de la couche GaAs sur la caractéristique I-V est illustrée sur la figure III.19.

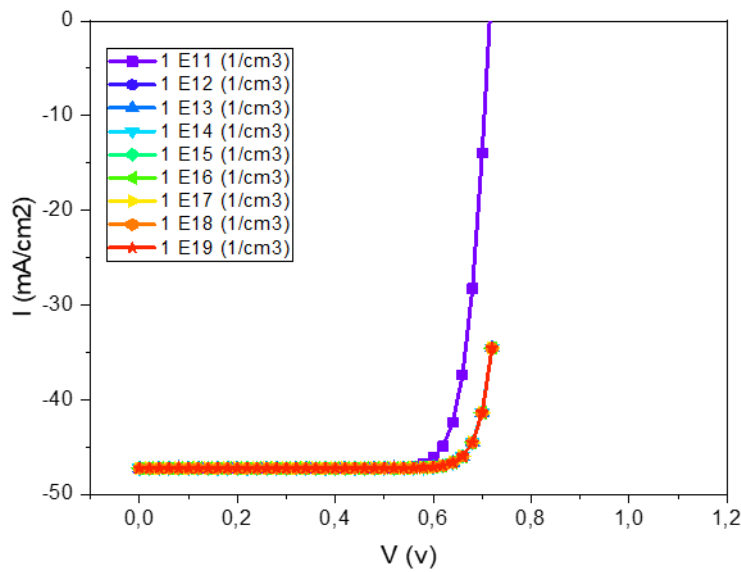


Figure III. 19: Influence du dopage de couche GaAs sur la caractéristique I-V.

L'influence de la variation de dopage de la couche GaAs sur le rendement quantique QE est présentée sur la figure III.20.

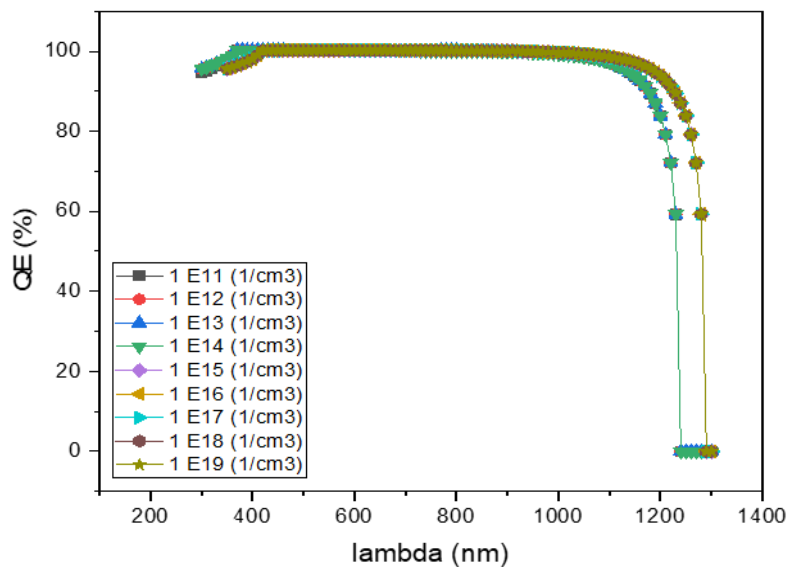
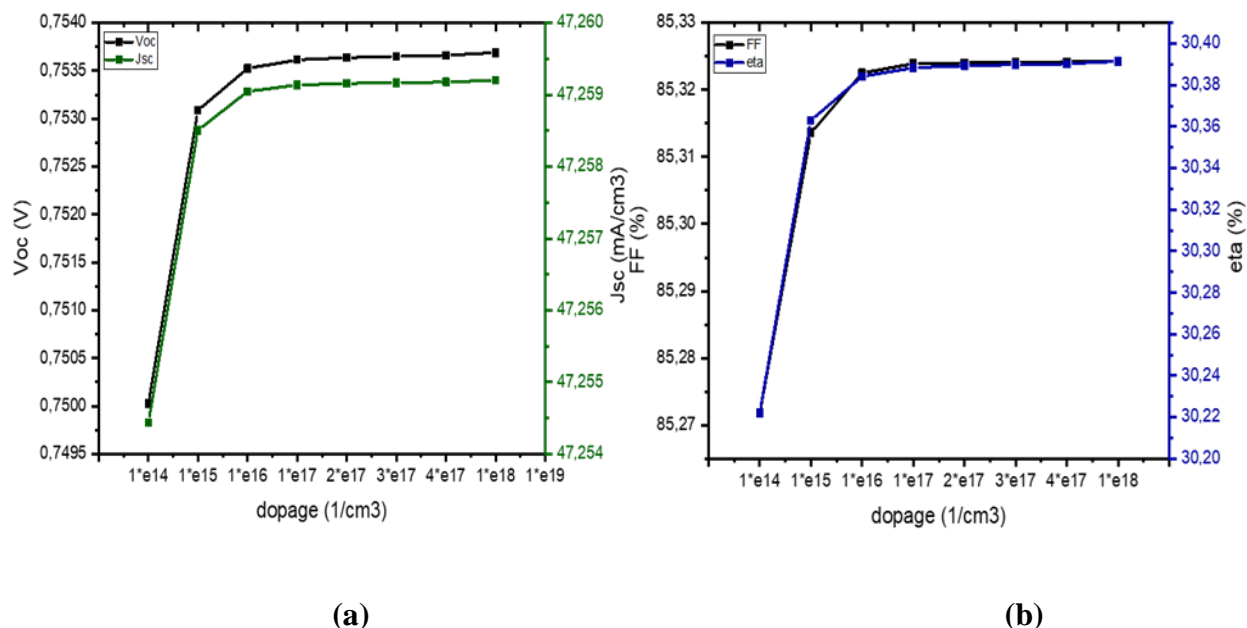


Figure III. 20: Influence de dopage de couche GaAs sur le rendement quantique.

En analysant les graphiques, il est évident que pour un dopage de GaAs de  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , un rendement significatif de 30.39 % peut être obtenu. La simulation révèle une valeur

satisfaisante pour la tension  $V_{oc}$  (0.753V) et une valeur optimale pour la densité de courant  $J_{sc}$  ( $47.26 \text{ mA/cm}^2$ ) (voir figures III.19 et III.20).

L'influence de la variation de dopage de la couche GaAs sur les paramètres caractéristiques ( $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF,  $\eta$ ) est présenté sur la figure III.21.



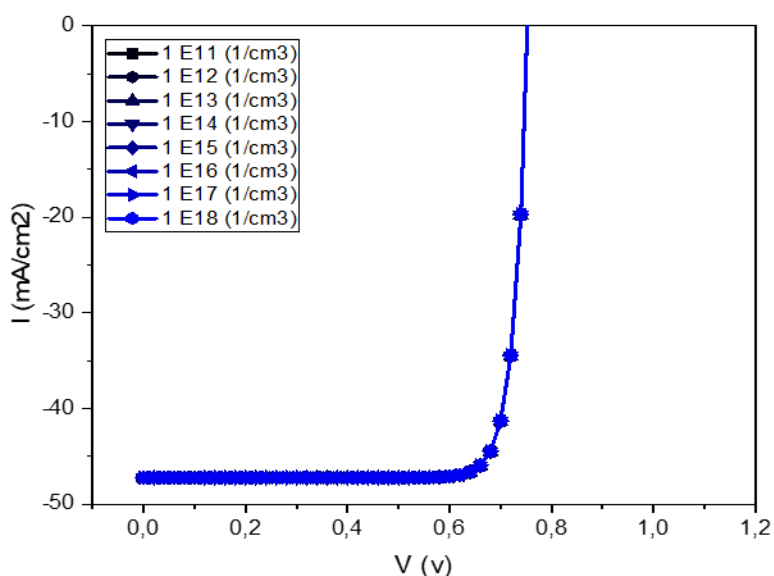
**Figure III. 21:** Variation des performances de la cellule solaire en fonction du dopage de la couche GaAs (a) : $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$  et (b) :FF et  $\eta$ .

En étudiant les graphiques, on observe une augmentation de  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , rendement  $\eta$  et FF lorsque le dopage de la couche GaAs augmente de  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , puis ces paramètres restent constants au-delà de  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

On peut donc conclure que le rendement atteint une valeur significative pour un dopage de  $N_A=10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Cela indique que la valeur optimale de  $N_A$  correspond à  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , ce qui conduit à un rendement de 30.3934 % (voir figure III.21).

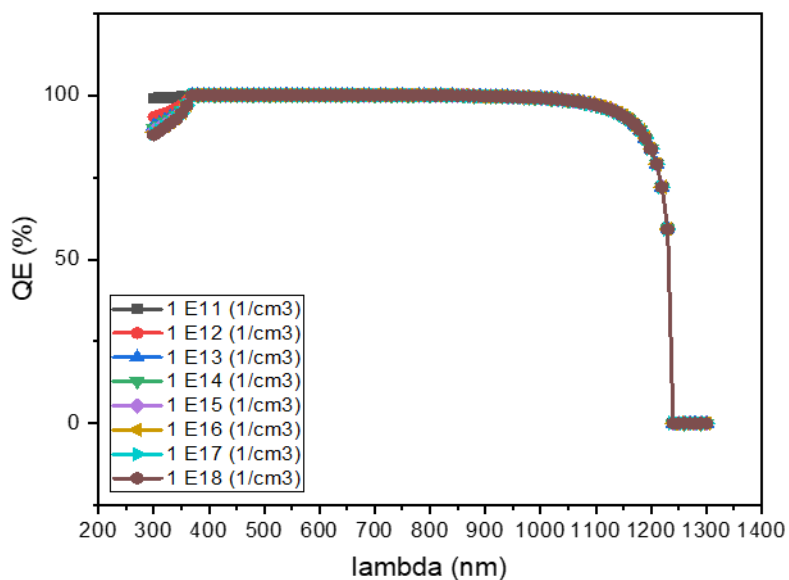
#### III.3.2.3.3 Variation du dopage de la couche CdS

L'influence de la variation du dopage de la couche CdS sur la caractéristique I-V est présenté sur la figure III.22.



**Figure III.22:** Influence de dopage de couche CdS sur la caractéristique I-V.

L'impact de la variation de dopage de la couche CdS sur le rendement quantique QE est présenté sur la figure III.23.

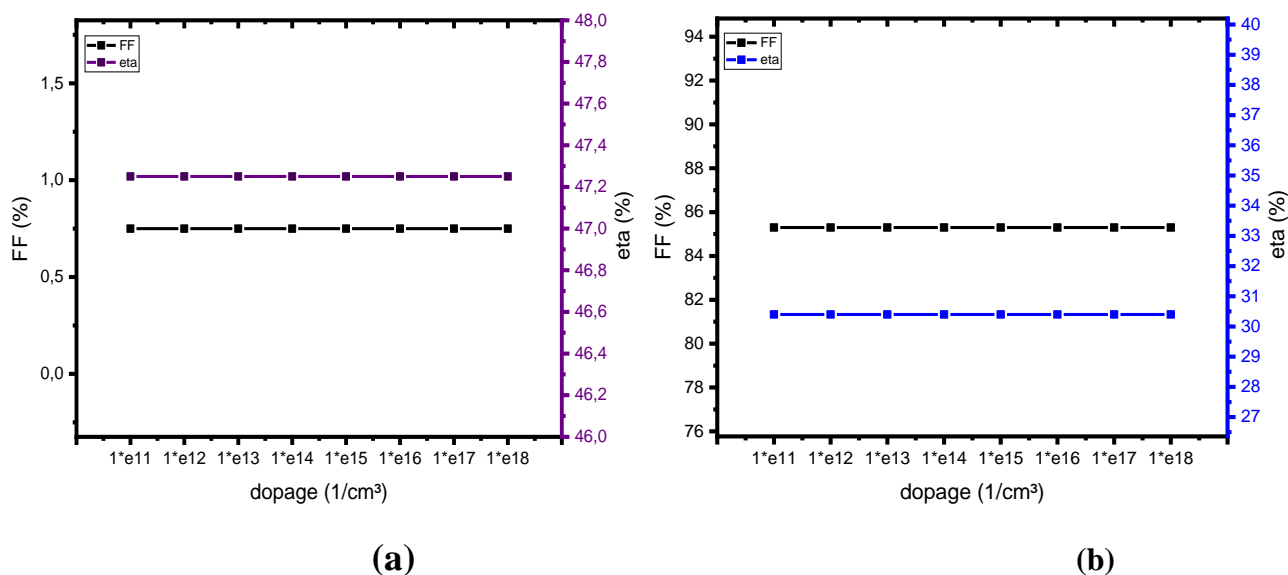


**Figure III. 23:** Influence du dopage de couche CdS sur le rendement quantique.

En analysant les courbes (I-V) et (QE) dans la figure III.23, nous constatons qu'elles présentent une forme similaire. Cela nous permet de conclure que le dopage de la couche CdS n'a pas d'influence significative sur les caractéristiques I-V et le rendement quantique. Nous pouvons également noter qu'un dopage de  $N_A=10^{11} \text{ cm}^{-3}$  de la couche CdS permet d'obtenir un

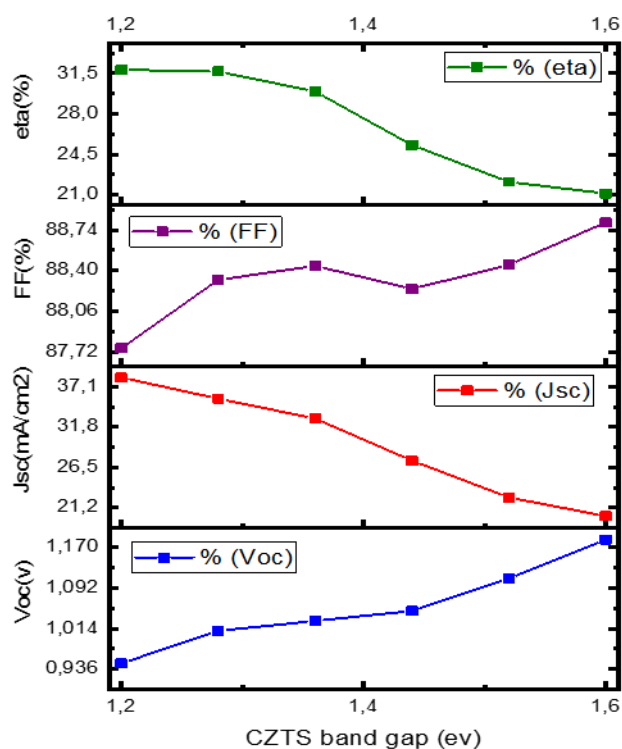
rendement maximal de 30.39 %. La simulation donne des valeurs satisfaisantes pour la tension Voc (0.753 V) et la densité de courant optimale Jsc (47.26 mA/cm<sup>2</sup>) (voir figure III.23 et III.24).

L'influence de la variation de dopage de la couche CdS sur les paramètres caractéristiques (Voc, Jsc, FF,  $\eta$ ) est présenté sur la figure II



**Figure III. 24:** Variation des performances (Voc, Jsc, FF et  $\eta$ ) de la cellule solaire en couche mince en fonction de dopage de la couche CdS.

D'après les graphes, on constate qu'avec l'augmentation de dopage de CdS, les paramètres caractéristiques (Voc, Jsc, FF,  $\eta$ ) restent constants. Donc cela nous permet de dire que le dopage n'influence pas sur les performances de la couche CdS (figure III.24).



**Figure III.25:** Les caractéristiques Voc, Jsc, FF (%) et  $\eta$  (%) en fonction de l'énergie du gap de la couche CZTS.

D'après la Figure III.25, l'augmentation de l'énergie du gap de la couche CZTS entraîne une diminution de la densité du courant de court-circuit (Jsc) ainsi que le rendement  $\eta$ , part contre il y a une augmentation de la tension de circuit ouvert (Voc) et du facteur de forme FF.

### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé des simulations pour adapter une cellule solaire en couche mince utilisant CZTS et GaAs. Nous avons d'abord étudié l'impact de la couche GaAs sur la performance de la cellule. Nos résultats ont montré que la présence de la couche GaAs conduit au meilleur rendement de 30.39%. Ainsi, la structure optimale identifiée est GaAs/CZTS/CdS/ZnO.

Par la suite, nous avons étudié l'effet de l'épaisseur et du dopage de la couche absorbante CZTS puis l'ajout de la couche GaAs et CdS sur la caractéristique I-V, QE et les paramètres Voc, Jsc, FF et le rendement  $\eta$ .

En utilisant le logiciel "SCAPS" pour effectuer la simulation, nous avons obtenu des résultats significatifs. Nous avons observé que l'épaisseur optimale de la couche d'absorbeur

CZTS est d'environ 900 nm, tandis que celle de la couche GaAs est de 300 nm. De plus, nous avons constaté que le dopage optimal de la couche absorbante CZTS est de  $10^{19}$  cm<sup>-3</sup>, tout comme celui de la couche GaAs.

Les résultats de simulation ont été encourageants, avec un courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ) de 47.26 mA/cm<sup>2</sup>, une tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) de 0.813V et un facteur (FF) de 86.17%. Le rendement de conversion d'énergie a atteint 33.11 %.

En conclusion, nous avons observé que les performances photovoltaïques de la cellule solaire GaAs/CZTS/CdS/ZnO sont nettement supérieures à celles de la cellule CZTS/CdS/ZnO. Ces résultats ou prédictions sont précieux pour approfondir notre compréhension du mécanisme de fonctionnement et pour améliorer les performances des cellules solaires.



#### Références Bibliographiques

- [1] M. Burgelman, J. Verschraegen, S. Degrave, and P. Nollet, "Modeling thin-film PV devices," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 12, no. 2–3, pp. 143–153, 2004.
- [2] Benramdane Ikram, " Conception et Simulation Numérique des cellules Solaires à base de matériaux hybrides organiques - inorganiques pérovskites", Mémoire de master, université Abou- Bakr Belkaid- Tlemcen, 2021
- [3] Afaf Allouche, "Simulation des propriétés et performances des cellules photovoltaïques en couches minces à base des matériaux semi-conducteurs CIGS", Mémoire de master, Université Mohamed El Bachir Elibrahimi –Bordj, 2020.
- [4] A-A.Kanoun<sup>1</sup>, Z.Kourdi<sup>1</sup>, F. Merad<sup>1</sup>, M.A.Rabah" Exploring the Performance of CZTS solar cells using BSF layers "2022.
- [5] Kanoun Ahmed-Ali," Etude théorique et prédictive des nouveaux matériaux pour conception des cellules solaires et applications photovoltaïques", Thèse de doctorat, Université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen, 2020.
- [6] M. Burgelman, K. Decock, A. Niemegeers, J. Verschraegen, and S. Degrave, *SCAPS manual*. February, 2016.
- [7] F. Merad, A. Guen-Bouazza, A. -A. Kanoun ,A. E. Merad, "Optimization of Ultra-Thin CIGS Based Solar Cells by Adding New Absorber Layers\_ InGaAs and AlGaAs", Article, 2020.

## **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque, de grandes espoirs s'appuient sur le développement de la technologie des cellules solaires à base de couches minces, Dans le cadre de cette étude, notre objectif était d'améliorer l'intégration, la conception et la simulation des cellules solaires à base de CZTS, afin de parvenir à une production d'électricité compétitive. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel unidimensionnel SCAPS. Le modèle que nous avons développé pour le dispositif nous a permis d'établir une corrélation entre les propriétés des matériaux et les caractéristiques électriques des cellules solaires. Notre objectif était d'optimiser les performances des cellules solaires en couches minces, en mettant l'accent sur les matériaux CZTS et GaAs.

Nous avons évalué les principales caractéristiques des cellules étudiées, à savoir ; le courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ), la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), le facteur de forme (FF) et le rendement électrique ( $\eta$ ). Ces évaluations ont été effectuées pour une structure typique de cellule solaire GaAs/CZTS/CdS/ZnO. Nous nous sommes ensuite intéressés à l'épaisseur et au dopage des différentes couches pour étudier leur influence sur les paramètres de sortie et particulièrement sur le rendement électrique de la structure.

Une étude comparative a été menée sur la structure de la cellule avec et sans la présence de GaAs dans la couche absorbeur, montrant que la cellule de structure ZnO/CdS/GaAs/CIGS présente un meilleur rendement de 30.39%. En outre, nous avons calculé les caractéristiques fondamentales de la cellule solaire lorsqu'on change l'épaisseur et le dopage des différentes couches, ce qui a permis d'identifier les valeurs optimales pour l'épaisseur et le dopage de chaque couche.

Les résultats obtenus pour la cellule finale montrent des performances encourageantes, avec un  $J_{sc}$  de  $47.26 \text{ mA/cm}^2$ , un  $V_{oc}$  de  $0.813\text{V}$ , un FF de  $86.17\%$  et un rendement de conversion d'énergie de  $33,11\%$ . En conclusion, cette étude ouvre la voie à des améliorations futures des performances des cellules solaires en couche mince.

## Résumé

La seconde génération de cellules solaires en couches minces utilise des matériaux semi-conducteurs tels que le CZTS, le CIS, le GaAs, le ZnO, etc. Ces matériaux ont des coefficients d'absorption élevés par rapport au silicium cristallin et possèdent d'excellentes propriétés optiques et électriques, ce qui permet de réaliser des dispositifs photovoltaïques compétitifs. Dans notre travail, Nous abordons les performances d'une cellule solaire en couche mince à base de semi-conducteurs CZTS, en étudiant différents paramètres solaires à savoir : le rendement quantique QE, les caractéristiques I-V, le facteur de forme (FF), la tension de circuit ouvert (Voc) et la densité de courant de court-circuit (Jsc). En outre, nous nous intéressons à l'épaisseur et au dopage des couches CZTS et GaAs pour étudier leur influence sur les paramètres de sortie. Nous avons utilisé le programme de simulation numérique "SCAPS1D" pour modéliser notre dispositif et étudier les cellules solaires en couche mince. Notre travail est important car il contribue à la compréhension et à l'amélioration des performances des cellules solaires en couches minces, qui ont un grand potentiel pour fournir de l'électricité à partir de sources renouvelables.

## Abstract

The second generation of thin film solar cells uses semiconductor materials such as CZTS, CIS, GaAs, ZnO, etc. These materials have high absorption coefficients compared to crystalline silicon and possess excellent optical and electrical properties, which allow the realization of competitive photovoltaic devices. In our work, we simulate the performance of a thin-film solar cell based on CZTS semiconductors, by studying different solar parameters as : QE quantum efficiency, I-V characteristics, fill factor (FF), open circuit voltage (Voc), and short circuit current density (Jsc). In addition, we are interested in the thickness and doping of the CZTS and GaAs layers to study their influence on the output parameters. we used the "SCAPS1D" numerical simulation program to model our device and study thin-film solar cells. Our work is important because it contributes to understanding and improving the performance of thin-film solar cells, who get high potential to providing electricity by renewable sources.

## ملخص

يعتمد الجيل الثاني من الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة على استخدام مواد أشباه الموصلات مثل CZTS و CIS و GaAs و ZnO، إلخ. تتمتع هذه المواد بمعاملات امتصاص عالية مقارنة بالسيليكون البلوري وتتمتع بخصائص بصرية وكهربائية ممتازة تسمح بتحقيق الأجهزة الكهروضوئية التنافسية. في عملنا، نتناول أداء خلية شمسية رقيقة تعتمد على أشباه الموصلات CZTS، من خلال دراسة المعلمات الشمسية المختلفة، وهي: الكفاءة الكمية QE، خصائص I-V، عامل الشكل (FF)، جهد الدارة المفتوحة (Voc) وكثافة تيار الدارة القصيرة (Jsc) علاوة على ذلك، نحن مهتمون بسمك وتنشيط طبقات CZTS و GaAs لدراسة تأثيرها على معلمات الإخراج. استخدمنا برنامج المحاكاة الرقمية "SCAPS1D" لنمذجة أجهزتنا ودراسة الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة. عملنا مهم لأنه يساهم في فهم وتحسين أداء الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة، والتي لديها إمكانات كبيرة لتوفير الكهرباء من مصادر متجددة.