

UNIVERSITÉ MOHAMED EL-BACHIR EL-IBRAHIMI

BORDJ BOU-ARRERIDJ

FACULTÉ SCIENCE ET TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT SCIENCE DE LA MATIÈRE



Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de master

Filière : Chimie

Spécialité : Chimie des matériaux

Intitulé

Prédiction des propriétés et performance des cellules photovoltaïques à base des matériaux semi-conducteurs binaire et/ou quaternaires

Présenté par :

- BELKHAIRI Mahdi
- ADOUI Roumaïssa

Soutenu publiquement le 25 /06 /2023

Jury de soutenance :

Président	:	BOUBATRA Moustapha	MCB Université BBA
Encadreur	:	BOUZID Abderrazak	Pr. Université BBA
Examineur	:	HAMLA Meriem	MCB Université BBA

Année universitaire :2022/2023

Remerciements

*Nous remercions Allah le tout puissant pour
m'avoir donné le courage, la volonté et la
patience de mener à terme ce présent
travail. Que nous implorons afin de nous
aider à atteindre nos aspirations,*

*Si Dieu le veut. nous tenons à exprimer
mes remerciements les plus sincères à
mon encadreur **Pr. BOUZID**
Abderrazak d'avoir bien voulu
m'encadré.*

*Les membres de jury pour avoir accepté
de corriger et évaluer notre travail.*

*nous remercions tous ceux qui de près ou
de loin m'ont aidé à la réalisation de ce
travail.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail a

À mon très cher papa

*Tu as toujours été à mes coté pour
me soutenir et m'encourager. Que
ce travail traduit ma gratitude et
mon affection.*

À ma très chère mère

*Source d'espoir et motivation, que je ne cesse de
remercier pour tout ce qu'elle m'a donné.*

*Et mes chères sœurs, et mon cher frère, que dieu lui
fasse miséricorde.*

À ma chère tante Linda, qui m'a toujours encouragé

*À tous mes amis, qui je souhaite plus de
succès.*

R. ADOUI

Dédicace

Je dédie ce modeste travail a

Mon très cher père.

À ma très chère mère.

À mes frères et mes sœurs.

*À ma défunte grand-mère « que
le paradis soit ta demeure
éternelle »*

À toute la famille belkhairi

*À mes amis DJALAL.B ISLAM.T et
ISLAM.G tous mes amis proches*

*À mes camarades de chimie des
matériaux*

M. BELKHAIRI

SOMMAIRE

Remerciement

Dédicaces

Sommaire

Liste Tableau

Liste De Figure

Lise des symboles et abréviations

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

BIBLIOGRAPHIE..... 3

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉ ET RAPPELS THÉORIQUES

I.1 INTRODUCTION 4

I.2 DÉFINITION DE L'ENERGIE 4

I.3 LES DIVERSES FORMES DE L'ENERGIE 5

I.4 LES TYPES DE L'ENERGIE 5

I.4.1 Les énergies non renouvelables 5

I.4.2 Les énergies renouvelables 6

I.5. L'ENERGIE SOLAIRE 8

I.5.1 L'origine de l'énergie solaire 8

I.5.2 Le rayonnement solaire 9

I.5.3 Les trois voix de l'énergie solaire 9

I.5.4 Le potentiel solaire en Algérie 10

I.5.5 L'énergie photovoltaïque en Algérie 10

I.5.6 Les avantages de l'énergie solaire 11

I.6 L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE 12

I.6.1 Historique	12
I.6.2 L'effet photovoltaïque	13
I.6.3 Le principe de la conversion photovoltaïque.....	13
I.6.4 Un panneau solaire	13
I.6.5 Cellule solaire	14
I.6.6 la structure de cellule solaire	14
I.6.7 Description de principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque	14
I.6.8 Les diffèrent caractéristique de cellule photovoltaïque	15
I.6.9 Les diffèrent structure de cellule PV	17
I.6.10 Les technologies de cellules solaires	18
Bibliographie	22

CHAPITRE II : LES MATÉRIAUX SEMI-CONDUCTEURS POUR APPLICATION PHOTOVOLTAÏQUE

II.1 INTRODUCTION	26
II.2 LA THÉORIE DE BANDES	26
II.3 LES SEMI-CONDUCTEURS	27
II.3.1 Gap énergétique.....	28
II.3.2 Les type de semi-conducteurs	29
II.3.3 Jonction PN	31
II.4 LES MATÉRIAUX ÉTUDE	32
II.4.1 Les semi-conducteurs III-V	32
II.4.2 Les semi-conducteurs du groupe II-VI	35
II.4.3 Les semi-conducteurs du groupe I-III-VI2	38
Bibliographie	43

CHAPITRE III : MÉTHODES ET MOYENS DE CALCUL

III.1 INTRODUCTION	45
III.2 NOTIONS DE BASE	45
III.3 DÉFINITION D'UNE CELLULE SOLAIRE	51
III.4 DÉFINITION LES COUCHES	52
III.5 LES AVANTAGE DE SCAPS-1D	53
III.6 INCONVÉNIENTS	54
Bibliographie	55

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1 INTRODUCTION	56
IV.2 PRÉSENTATION LES CELLULES ÉTUDE	56
IV.3 DIFFÉRENTS PARAMÈTRES DES CELLULES ÉTUDIÉES	59
IV.4 DÉTERMINATION DE LA STRUCTURE OPTIMALE	60
IV.5 ÉTUDE DU COMPORTEMENT DE LA STRUCTURE OPTIMALE	64
IV.6 CONCLUSION.....	71
Bibliographie	73

CONCLUSION GÉNÉRALE	74
----------------------------------	----

Liste Des Tableaux

TABLEAU I.1. ÉQUIVALENCES ENTRE LES UNITÉS D'ÉNERGIES LES PLUS COURANTES.	5
TABLEAU II.1. EXEMPLE DES SEMI-CONDUCTEURS.	28
TABLEAU II.2. EXTRAIT DE LA CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS.	32
TABLEAU II.3. LES PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DU CdTe.	37
TABLEAU II.4. LES PROPRIÉTÉS OPTIQUES DU CdTe.	37
TABLEAU IV.1. LES PARAMÈTRES PHYSIQUES DE SIMULATION.	59
TABLEAUX IV.2. LES PARAMÈTRES PHOTOVOLTAÏQUE DES STRUCTURES SIMULÉES.	61
TABLEAUX IV.3. LES PARAMÈTRES PHOTOVOLTAÏQUE DES STRUCTURE SOLAIRE INVERSÉE SIMULÉES.	62
TABLEAU IV.4. L'EFFET DE CHANGEMENT DE LA COUCHE FENÊTRES SUR LES CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALE.	69
TABLEAU IV.5. LES CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DE DEUX STRUCTURES SOLAIRES DIFFÉRENT.	69

Liste Des Figures

FIGURE I.1. LES DIFFÉRENTS TYPES DE L'ÉNERGIE RENOUVELABLES	6
FIGURE I.2. SOUS-SYSTÈMES ET COMPOSANTS D'UNE ÉOLIENNE À AXE HORIZONTAL TYPIQUE ..	7
FIGURE I.3. STRUCTURE LA PLUS SIMPLE D'UNE CELLULE SOLAIRE.....	14
FIGURE I.4. LA STRUCTURE D'UNE CELLULE À JONCTION P-I-N	18
FIGURE I.5. STRUCTURE D'UNE CELLULE AU SILICIUM AMORPHE HYDROGÉNÉ	19
FIGURE I.6. STRUCTURE D'UNE CELLULE CIS	19
FIGURE I.7. STRUCTURE D'UNE CELLULE CdTe	20
FIGURE II.1. DISTINCTION DES DIFFÉRENTS TYPES DE MATÉRIAUX EN FONCTION DU REPLISSAGE DES BANDES ET DE LA TAILLE DU GAP D'ÉNERGIE.....	27
FIGURE II.2. A) SEMI-CONDUCTEUR À GAP DIRECT. B) SEMI-CONDUCTEUR À GAP INDIRECT	28
FIGURE II.3. PHÉNOMÈNES DE GÉNÉRATION/ RECOMBINAISON. A) CRÉATION D'UNE PAIRE ÉLECTRON TROU. B) DISPARITION D'UNE PAIRE ÉLECTRON-TROU	29
FIGURE II.4. SEMI-CONDUCTEUR DE TYPE N	30
FIGURE II.5. SEMI-CONDUCTEUR DE TYPE P	31
FIGURE II.6. A) JONCTION PN SIMPLIFIÉE. B) PROFIL DE DOPAGE.	32
FIGURE II.7. MAILLES CRISTALLOGRAPHIQUES DES STRUCTURES DIAMANT ET ZINC BLENDE.	33
FIGURE II.8. STRUCTURE DE BANDE DE GAAS	34
FIGURE II.9. LES TRANSITIONS OPTIQUES DIRECTES ET INDIRECTES.	35
FIGURE II.10. MAILLE ÉLÉMENTAIRE DE LA STRUCTURE CUBIQUE DE CdTe. LES SPHÈRES CLAIRES REPRÉSENTENT LES ATOMES DE CADMIUM ET LES SPHÈRES FONCÉES CEUX DE TELLURE.....	36
FIGURE II.11. UNE CELLULE SOLAIRE À COUCHE MINCE CdS/CdTe.	38
FIGURE II.12. A) STRUCTURE DE LA MAILLE ÉLÉMENTAIRE DU ZINC-BLENDE (ZnS). B) STRUCTURE DE LA MAILLE ÉLÉMENTAIRE DE LA CHALCOPYRITE DU CuInSe.	39
FIGURE II.13. COEFFICIENT D'ABSORPTION DE CuInSe ₂ ET CuInGaSe ₂ EN FONCTION DE LONGUEUR D'ONDE.	41
FIGURE II.14. STRUCTURE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE AU CIGS	42
FIGURE III.1. PANNEAU DE DÉMARRAGE SCAPS : LE PANNEAU ACTION OU LE PANNEAU PRINCIPAL	46
FIGURE III.2. DÉFINIR LE PROBLÈME.....	47
FIGURE III.3. DÉFINITION DU POINT DE TRAVAIL	48
FIGURE III.4. PANNEAU DES BANDES D'ÉNERGIE	50
FIGURE.III.5. PANNEAU D'AFFICHAGE DE LA COURBE I-V CLAIRE ET SOMBRE ÉCLAIRAGE.	51
FIGURE.III.6. DÉFINITION DE LA STRUCTURE D'UNE CELLULE SOLAIRE.....	52
FIGURE III.7. PROPRIÉTÉS DE LA COUCHE AJOUTÉE.	53
FIGURE IV.1. LE SCHÉMA DE LA CELLULE TYPIQUE DE LA STRUCTURE 1 À BASE DE (CIGS/CIS).	57
FIGURE IV.2. LE SCHÉMA DE LA CELLULE TYPIQUE DE LA STRUCTURE 2 À BASE DE (CdS/CIGS).	57

FIGURE IV.3. LE SCHÉMA DE LA CELLULE TYPIQUE DE LA STRUCTURE 3 À BASE DE (CIGS/GAAS).....	58
FIGURE IV.4. LE SCHÉMA DE LA CELLULE TYPIQUE DE LA STRUCTURE 4 À BASE DE (CdSTe/CIS).....	58
Figure IV.5. Le schéma de la cellule typique de la structure 5 à base de (GaAs/CdSTe).....	59
FIGURE IV.6. LA VARIATION DES CARACTÉRISTIQUES ESSENTIELLES DES CELLULES SOLAIRES SIMULÉE.	61
FIGURE IV.7. LA VARIATION DES CARACTÉRISTIQUES ESSENTIELLES DES CELLULES SOLAIRES INVERSEE SIMULÉE.	62
FIGURE IV.8. LA VARIATION DES CARACTÉRISTIQUES ESSENTIELLES DE LA CELLULE SOLAIRE EN FONCTION DE DIFFÈRENT STRUCTURE SIMULÉE.	63
FIGURE IV.9. LA VARIATION DES CARACTÉRISTIQUES ESSENTIELLES DE LA CELLULE SOLAIRE EN FONCTION DE DIFFÈRENT STRUCTURE INVERSÉE SIMULÉE.	64
FIGURE IV.10. LES CARACTÉRISTIQUES Voc, Jsc, FF (%) ET η (%) EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DE GAAS.	65
FIGURE IV.11. EFFET DE LA VARIATION DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE ABSORBANTE GAAS SUR LA RÉPONSE SPECTRALE	66
FIGURE IV.12. LES CARACTÉRISTIQUES Voc, Jsc, FF (%) ET η (%) EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DE CdSTe.	67
FIGURE IV.13. EFFET DE LA VARIATION DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE ABSORBANTE CdSTe SUR LA RÉPONSE SPECTRALE.	68
FIGURE IV.14. EFFET DE LA VARIATION DE L'ORDRE DE LES DEUX COUCHE ABSORBEURS SURE LA RÉPONSE SPECTRALE (s1 : STRUCTURE1 ; s2 : STRUCTURE 2).	70
FIGURE IV.15. LES CARACTÉRISTIQUES Voc, Jsc, FF (%) ET η (%) EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE CDS.....	71

Lise des symboles et abréviations

Symboles	
QE	Rendement quantique
η	Rendement de conversion
Vco	Tension en circuit ouvert
FF	Facteur de forme
Jcc	Courant de court-circuit
I_{ph}	Courant photonique
T	Température absolue.
Q	Constante de charge d'électron.
K	Constante de Boltzmann.
Is	Courant de saturation
μ_e	Mobilité d'électrons (cm ² /Vs)
μ_h	Mobilité de trous(cm ² /Vs)
N _c	Densité d'électrons dans la bande de conductivité
N _v	Densité d'électrons dans la bande de valence
X	Affinité électronique
N _{D/A}	Concentration de dopage
ϵ/ϵ_0	Primitivité diélectrique
Φ_b	Largeur de la bande interdite des contacts avant et arrière
Se	Vélocité de surface de recombinaisons des électron
St	Vélocité de surface des trous
Abréviation	
TEP	Tonne équivalent pétrole
TS	Température de surface
PV	Photovoltaïque
CC	Courant continu
BV	Bande de valence
BC	Bande de conduction
CdSTe	Tellurure de sélénium-cadmium
GaAs	L'arséniure de galium
CIS	Diséniure de cuivre et d'indium.
CIGS	Cuivre-gallium-indium-diséniure.
ITO	Oxyde d'indium dopé à l'étain
CdS	Soufre de Cadmium
SCAPS 1D	Solar Cell Capacitance Simulator One Dimension

Introduction générale

Le changement climatique et la diminution des réserves en ressources naturelles fossiles sont deux problèmes majeurs auxquels le monde est confronté. Face à ce double défi, la transition énergétique s'impose. Le solaire photovoltaïque apparaît comme la pierre angulaire de cette transition, tant en termes de coût (qui a baissé de 85 % entre 2010 et 2020) que de disponibilité (qui pour le photovoltaïque est sans limite) [1].

Le photovoltaïque s'avère prometteur en raison de ses qualités intrinsèques : il est fiable, ses frais de fonctionnement sont très réduits, ses exigences d'entretien sont limitées, silencieux et relativement facile à installer. De plus, dans certaines applications autonomes, le photovoltaïque est très pratique comparé à d'autres sources d'énergie, en particulier dans les endroits difficiles d'accès et peu rentables pour l'installation de lignes électriques traditionnelles [2].

La cellule solaire, élément unitaire d'un module photovoltaïque, est aussi l'élément actif dans lequel se produit l'effet photovoltaïque. Celui-ci permet au matériau de cellule de capter l'énergie lumineuse (photons) et de la transformer en énergie électrique caractérisée par un déplacement de charges, positives et négatives [3].

Les cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser le meilleur rapport entre le rendement énergétique et le prix de revient. Pour diminuer à la fois le poids et le prix de ces dispositifs tout en augmentant leurs surfaces et leurs souplesses.[4]

Les technologies cristallines à base de silicium (multicristallin et monocristallin) sont de loin les plus utilisées aujourd'hui mais les technologies "couches minces", en particulier CIS et CdTe se développent de plus en plus sur le marché. D'autres filières basées sur l'utilisation de colorants ou de matériaux organiques, encore à leur balbutiement, promettent un bel avenir à l'énergie photovoltaïque [3].

L'objectif assigné au présent travail est d'étudier, par simulation, les propriétés et les performances de nouvelles structures de cellules photovoltaïques à base de différentes combinaisons de deux couches absorbeurs semi-conducteurs binaires et quaternaires.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les énergies renouvelables, l'énergie photovoltaïque et les cellules solaires.

Le deuxième chapitre est consacré aux généralités sur les semi-conducteurs et les propriétés structurales, optiques et électriques des alliages semi-conducteurs binaire et ternaires et aussi d'autres types des matériaux semi-conducteurs utilisés comme cellules photovoltaïques.

Le troisième chapitre présente les détails concernant le logiciel de simulation SCAPS utilisé.

Le quatrième chapitre est réservé à la présentation et à la discussion de nos résultats de simulation concernant de l'étude par simulation des structures de cellules solaires basées sur des semi-conducteurs binaires et quaternaires par le logiciel de simulation appelé SCAPS-1D, le but principal recherché est de déterminer les performances photovoltaïques de plusieurs structures avec diverses combinaisons notamment de matériaux absorbeurs et d'essayer d'en déduire et optimiser la structure optimale.

Bibliographie

- [1] Y. Bendib, A. Adjout, « solar photovoltaic in Algeria : A comparative and sustainable energy vector » Al-riyada for Business Economics Journal/ Vol 08– N° 01/ Janvier 2022, p-352.
- [2] M. BOUZEGANE, F. GAOUAOUI, « Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque », Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2018, p-1.
- [3] Site web. « <https://www.photovoltaique.info/> », Page consultée le 08/06/2023 à 01 :34.
- [4] 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 Bou Arreridj, 2020, p-50.

CHAPITRE I

*GÉNÉRALITÉS ET RAPPELS
THÉORIQUES.*

I.1 Introduction

L'énergie est listée comme la première priorité de l'humanité, pour les années prochaines, elle est largement utilisée dans l'industrie, le transport, la communication, l'agriculture et la vie quotidienne [1].

Pendant longtemps, les humains ont utilisé différents types d'énergie, comme les combustibles fossiles, les tiges agricoles, le charbon et le gaz naturel. L'utilisation de ces carburants pendant longtemps a causé beaucoup de risques environnementaux. Par conséquent, il est important d'étudier les autres formes d'énergies de substitution comme les énergies renouvelables. À cet égard, l'énergie solaire est l'une des meilleures ressources énergétiques qui fournit de l'énergie encore et encore. La création de cellules solaires avec la meilleure efficacité et le coût le plus bas est au centre de nombreuses équipes de recherche [2].

La quête de dispositifs photovoltaïques à faible coût, durables et à haut rendement, propulse la recherche dans les technologies photovoltaïques depuis les dernières décennies.

Ainsi, pour accomplir le besoin perpétuel du triangle d'or (c'est-à-dire le coût, l'efficacité et la durée de vie), différentes architectures de cellules solaires avec divers types de matériaux semi-conducteurs sont largement explorées [3].

Ce chapitre présente quelques notions sur l'énergie en général et les énergies renouvelables et en particulier l'énergie solaire photovoltaïque qui nous intéresse le plus, et qui fait l'objet de nos recherches dans le cadre du projet de fin d'études de master.

I.2 Définition de l'énergie

Pour les scientifiques et les ingénieurs, le terme fait référence à la capacité d'un corps, d'un système, à produire un travail qui peut provoquer un mouvement, de la chaleur ou des ondes électromagnétiques (y compris la lumière). En thermodynamique, il existe deux formes principales d'énergie : le travail et la chaleur.

Pour les physiciens, l'énergie se mesure simplement en joules ou en multiples de celui-ci : méga, giga, trillion (c'est-à-dire 1000 giga). Pour les électriciens, en Wattheures ou des multiples de ceux-ci (Wattheures WH équivaut à 3600 Joules [4]).

On obtient alors le tableau de correspondance suivant :

Tableau I.1. Équivalences entre les unités d'énergies les plus courantes [4].

Unité de mesure	Giga joules	Watheure GWh	Tonne équivalent pétrole
1GJ	1	0.00278	0.0238
1GWh	3600	1	85.7
1TEP	42	0.0117	1

I.3 Les diverses formes de l'énergie [5]

Elle peut exister sous plusieurs formes, à savoir :

- Énergie cinétique.
- Énergie de gravitation.
- Énergie élastique.
- Travail.
- Énergie calorifique.
- Énergie radiative.
- Énergie chimique.
- Énergie nucléaire.

I.4 Les types de l'énergie

Pour ce qui relève des considérations de développement durable, les sources d'énergie sont fréquemment classées en deux catégories : non renouvelable et renouvelable [6].

I.4.1 Les énergies non renouvelables

Contrairement aux énergies renouvelables, les énergies non renouvelables sont une source d'énergie qui ne peut pas se renouveler assez rapidement à l'échelle humaine [7].

Il y en a une quantité finie sur Terre, et ses ressources diminueront à mesure que les humains les consommeront. La désignation comprend des sources de divers combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel) et de l'énergie nucléaire [8].

I.4.2 L'énergie renouvelable

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui soit ne s'épuise jamais, soit peut se renouveler rapidement à l'échelle humaine. Le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. Les énergies renouvelables n'engendrent pas de déchets ni d'émissions polluantes de manière directe. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue [9].

Les sources principales des énergies renouvelables sont : solaire, hydraulique, éolienne, biomasse et géothermique.



Figure I.1. Les différents types de l'énergie renouvelables.[9]

I.4.2.1 L'Énergie éolienne

La production d'énergie éolienne se réfère à la conversion du mouvement de l'air (énergie cinétique du vent) en énergie électrique à l'aide d'une éolienne. Le vent se déplace autour de la terre en raison des différences de température et de pression. Le mouvement du vent est exploité par les pales d'une éolienne pour produire de l'électricité. Les pales sont reliées à un arbre et entraînent souvent une boîte de vitesses pour convertir la vitesse de rotation des pales en énergie mécanique. Celle-ci est convertie en énergie électrique par un générateur électrique relié à la boîte de vitesses ou à l'arbre, au besoin [10].

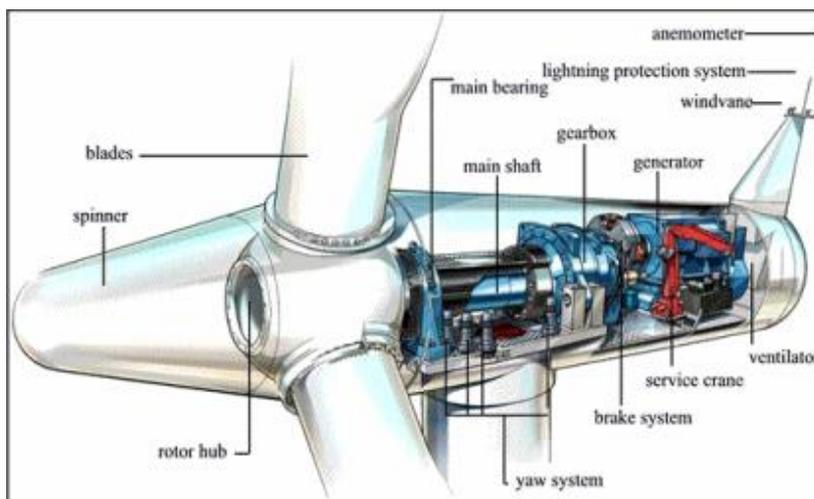


Figure I.2. Sous-systèmes et composants d'une éolienne à axe horizontal typique.[10]

I.4.2.2 Energie biomasse

La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques pouvant se transformer en énergie. On entend par matière organique aussi bien les matières d'origines végétales (résidus alimentaires, bois, feuilles) que celles d'origines animales (cadavres d'animaux, êtres vivants du sol).

Il existe trois formes de biomasse présentant des caractéristiques physiques très variées :

- Les solides (ex : paille, copeaux, bûches).
- Les liquides (ex : huiles végétales, bioalcools).
- Les gazeux (ex : biogaz).

La biomasse est parfois considérée comme une source d'énergie renouvelable uniquement si sa régénération est au moins égale à sa consommation (par exemple, l'utilisation du bois ne doit pas conduire à une diminution du nombre d'arbres) [11].

I.4.2.3 L'Energie hydraulique

L'énergie hydraulique est une énergie renouvelable très faiblement émettrice de gaz à effet de serre. Cette source d'énergie renouvelable exploite les mouvements de l'eau actionnés par le Soleil et la gravité à travers le cycle de l'eau, les marées et les courants marins.

Qu'elles utilisent les chutes d'eau naturelles (cascades) ou artificielles (barrages hydroélectriques), le débit des cours d'eau ou les courants marins (marée, circulation

thermohaline, etc.), les centrales hydrauliques produisent de l'énergie mécanique convertie la plupart du temps en électricité (hydroélectricité) [12].

I.4.2.4 L'Energie géothermique

La géothermie, du grec géo (« la Terre ») et thermos (« la chaleur »), désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur.

Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité [13].

I.5. L'énergie solaire

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique [14].

I.5.1. L'origine de l'énergie solaire

Pour exploiter l'énergie du soleil de manière efficace, il est nécessaire de comprendre sa forme et sa nature.

Le soleil est considéré comme un corps noir avec une température de surface apparente T_s estimée à $5800K$ qui émet un rayonnement diffus dans tout le système solaire. Ce corps céleste présente une masse d'environ $2.1030Kg$ dans une proportion d'environ 75% d'hydrogène et 25% d'hélium. Des réactions de fusion nucléaire au sein du noyau permettent la transformation de l'hydrogène en hélium libérant ainsi une grande quantité d'énergie radiative. Cette énergie est estimée à $63 MW.m^{-2}$ à sa surface (Fernández-García et al. 2010). Le flux d'énergie solaire reçue sur la Terre par unité de surface perpendiculaire aux rayons est réduit à $1368 W.m^{-2}$ à cause de la distance séparant la Terre du soleil.

La quantité d'énergie solaire emmagasinée sur Terre en 2 heures suffirait à satisfaire les besoins énergétiques annuels de l'humanité évalués à 18,78 *TW* en 2018 (International Energy Agency 2020) [15].

I.5.2 Rayonnement solaire

Le soleil est le corps central du système solaire et peut être considéré comme un radiateur avec une température de surface de 5777K. C'est la source de lumière et énergie thermique pour la Terre ; il transfère en permanence une quantité énorme d'énergie thermique vers la Terre sous forme de rayonnement. Le rayonnement solaire est résolu en éléments monochromatiques qui sont distribués en fonction de longueurs d'onde ou fréquences en séquence de courtes à longues longueurs d'onde, y compris les lumières cosmiques, les rayons γ et X, et les ultraviolets, visibles, infrarouges.

En raison de l'atmosphère, l'énergie du rayonnement solaire qui atteint finalement la surface de la Terre a été influencée par divers facteurs. D'une manière générale, les principaux facteurs d'influence comprennent l'altitude solaire, le nombre de masse d'air, la transparence atmosphérique, la latitude géographique, la durée d'ensoleillement et l'élévation [16].

I.5.3 Les trois voix de l'énergie solaire

Les trois façons d'utiliser "directement" l'énergie solaire :

I.5.3.1 L'énergie solaire thermodynamique

Le solaire thermodynamique à concentration est un autre procédé pour produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire. Très sommairement, son principe est de concentrer la composante directe du rayonnement solaire pour générer une source de chaleur à haute température. Puis, d'utiliser la différence de température entre cette source de chaleur et l'environnement ambiant pour faire fonctionner une machine thermodynamique. Cette machine, couplée à un alternateur, produit l'électricité [17].

I.5.3.2 L'énergie thermique

Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique c'est-à-dire en chaleur. Cette énergie peut être utilisée directement soit pour le chauffage mais aussi pour obtenir de l'eau chaude. Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul

endroit. Ceux-ci sont alors piégés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques. Ces mêmes absorbeurs réchauffent alors un réseau de tuyaux où circule un fluide caloporteur. Cet échangeur va ensuite chauffer à son tour de l'eau stockée dans un cumulus, cette même eau ira alimenter chauffe-eau et systèmes de chauffages solaires [18].

I.5.3.3 L'énergie photovoltaïque

La PV est la technologie qui génère une puissance électrique en courant continu (CC) mesurée en watts (W) ou en kilowatts (kW) à partir de matériaux semi-conducteurs lorsqu'ils sont éclairés par des photons. Tant que la lumière brille sur la cellule solaire (le nom de l'élément PV individuel), il génère de l'énergie électrique. Lorsque la lumière s'arrête, l'électricité s'arrête. Les cellules solaires n'ont jamais besoin d'être rechargé comme une batterie. Certains sont en fonctionnement extérieur continu sur Terre ou dans l'espace depuis plus de 30 ans [19].

I.5.4 Le potentiel solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose l'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh /m² /an au Nord et 2263 kWh/m² /an au sud du pays [20].

I.5.5 L'énergie photovoltaïque en Algérie

De toutes les énergies renouvelables que l'Algérie est en mesure de mobiliser rapidement, figure en premier lieu le solaire photovoltaïque. Une énergie largement disponible, propre, "gratuite", avec un potentiel techniquement réalisable de 1500 kWh/m² /an au Nord et 3500 kWh/m² /an au Sud. Le développement de ce vecteur énergétique en Algérie est en parfaite symbiose avec l'objectif général des pays signataires de la convention sur le changement climatique (GIEC) à savoir la sortie des combustibles fossiles. La création d'un ministère de la transition énergétique et des énergies renouvelables témoigne de la prise de conscience de l'importance stratégique de ce secteur : le programme gouvernemental vise en

particulier le développement des énergies renouvelables et l'hydrogène vert, tout en menant des actions publiques de sobriété et d'efficacité énergétique. Le premier programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique en Algérie a été initié en mars 2011 avec pour objectif l'installation d'une capacité de production de 22000 MW d'énergies renouvelables à l'horizon 2030, soit 1158 MW par an. Politiquement, ce programme a été érigé en 2016 au rang de priorité nationale. Malheureusement, en l'espace d'une décennie (2010-2019), seule une capacité installée de 390 MW a vu le jour à travers une vingtaine de centrales solaires, ce qui représente 39 MW/an, loin derrière les 1158 MW/an envisagés dans le programme initial [21].

I.5.6 Les avantages de l'énergie solaire :

L'énergie solaire est considérée comme la source d'énergie la plus fiable parmi toutes les sources des énergies renouvelables. Elle présente les avantages suivants :

➤ Économies et gains de prix

L'installation d'un système solaire photovoltaïque permet d'économiser sur l'électricité et d'autres factures d'énergie et peut générer de l'argent si elle est fournie au réseau.

➤ Indépendance énergétique

Le consommateur bénéficie d'une indépendance énergétique totale en utilisant des panneaux solaires photovoltaïques sur le toit.

➤ Emplois et économie

En raison de la grande intégration des systèmes solaires, de nouvelles industries sont mises en place, ce qui crée de nouveaux emplois et de renforcer l'économie du pays.

➤ Sécurité

La garantie de sécurité énergétique est très élevée, ce qui est un atout majeur [22].

I.6 L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

I.6.1 Historique

➤ **Becquerel Associates Lumière avec électricité (1839)**

Alexandre-Edmond Becquerel a découvert que la lumière brillante sur l'électrolyte liquide près d'une électrode produit du courant électrique. Pas exactement une cellule solaire telle que nous la connaissons aujourd'hui, mais le premier lien documenté entre la lumière et l'électricité [23].

➤ **Formule de Planck pour le rayonnement thermique (1900)**

Max Planck a dérivé la formule désormais célèbre du spectre du rayonnement thermique, postulant que le rayonnement échange de l'énergie avec la matière sous la forme de quanta finis qui deviendraient connus sous le nom de photons (Prix Nobel de physique, 1918) [23].

➤ **Le transistor (1947)**

John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley, travaillant chez Bell Laboratoires, ont inventé le transistor (prix Nobel de physique, 1956). En tant qu'appareil, la cellule solaire est plus proche d'une diode semi-conductrice, mais c'est le savoir-faire des transistors qui a conduit au développement des premières cellules solaires au silicium moins de 10 ans plus tard [23].

➤ **Première cellule solaire utilisable (1954)**

Bell Laboratoires a annoncé ce qui était effectivement la première cellule solaire utilisable, fabriquée à partir de silicium. Les détails ont été publiés plus tard cette année-là dans un article de Daryl Chapin, Calvin Fuller et Gerald Pearson dans le Journal de physique appliquée [23]

➤ **Haut niveau d'efficacité des cellules solaires (1990)**

Martin Green et ses collègues de l'Université de Nouvelle-Galles du Sud ont rapporté un record cellule solaire en silicium cristallin avec une efficacité atteignant finalement 25% - plus de 80% de la théorie maximum établi par Shockley et Queisser quelque 30 ans plus tôt [23].

➤ **Le volume de cellules solaires dépasse 1 000 MW (1999)**

Au cours de cette année, le volume cumulé total de cellules solaires a atteint la puissance maximale de 1 000 MW—la puissance d'une grande centrale électrique conventionnelle. Le photovoltaïque était arrivé, pour devenir une véritable source d'alimentation à grande échelle. Mais l'économie est encore incertaine et le besoin de recherche reste élevé [23].

➤ **Nouvelle classe de cellules solaires organiques (2001)**

La recherche sur le photovoltaïque a continué à prendre de l'ampleur avec la découverte d'une nouvelle classe de cellules solaires à base de buckminsterfullerène (C₆₀), conduisant à une cellule solaire entièrement organique avec une efficacité de 2,5 % [23].

I.6.2 L'effet photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [24].

I.6.3 Le principe de la conversion photovoltaïque

Par absorption des photons, la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire consiste à convertir directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Dans la gamme spectrale solaire, l'énergie d'un photon est de l'ordre de l'électron-volt (cf. $E = h\nu$). Or les énergies séparant les niveaux électroniques impliqués dans les liaisons chimiques dans les solides ou les molécules sont justement dans la même gamme d'énergie.

C'est ainsi que dans les semi-conducteurs, l'écart entre le haut de la bande de valence (BV), pleine des électrons de liaison entre les atomes, et le bas de la bande de conduction (BC), pratiquement vide d'électrons à l'équilibre, et appelée bande interdite [25].

I.6.4 Un panneau solaire

Les panneaux solaires sont composés de réseaux de cellules photovoltaïques, ils sont presque toujours utilisés avec des batteries de stockage pour réguler l'énergie non constante

fournie par une source lumineuse, que ce soit le soleil ou l'intérieur éclairage. La puissance des cellules solaires dépend de la nature du matériau absorbant, de la surface du réseau de cellules photovoltaïques, l'orientation vers la source lumineuse et la composition spectrale de la lumière ainsi que l'heure du jour et la latitude en cas d'ensoleillement [26].

I.6.5 Cellule solaire

Les cellules solaires fonctionnent en convertissant directement l'énergie lumineuse en électricité par absorption des photons par des matériaux semi-conducteurs. L'utilisation des cellules solaires débutait avec le développement de la recherche spatiale. Mais le véritable investissement dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres n'a commencé qu'après la crise énergétique des années soixante-dix [27].

I.6.6 La structure de cellule solaire

La structure de base d'une cellule solaire photovoltaïque est une jonction PN (figure I.3) constituée de la manière suivante : un cristal semi-conducteur dopé P est recouvert d'une couche mince dopée N (quelques millièmes de mm). Entre les deux couches se développe la jonction. La couche supérieure qui est la zone N est recouverte par une grille métallique qui sert de cathode, tandis qu'un substrat métallique (contact arrière) joue le rôle d'anode [28].

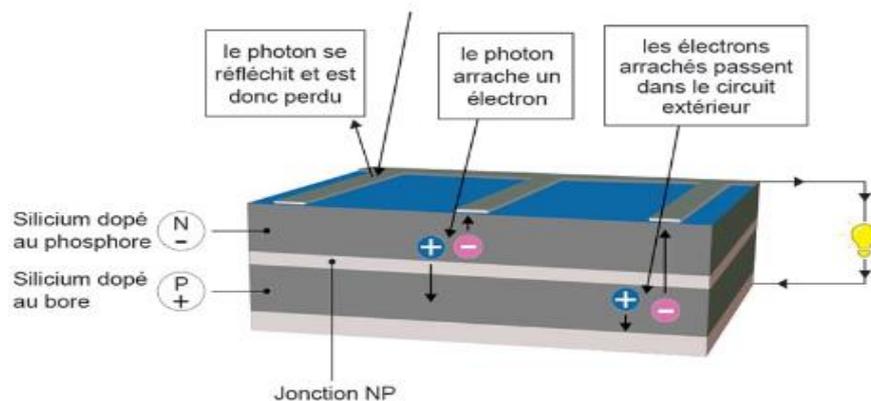


Figure I.3. Structure la plus simple d'une cellule solaire.

I.6.7 Description de principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque

La plupart des cellules PV inorganiques sont à base de jonctions p-n. Cette dernière résulte de l'association d'un semi-conducteur de type p (trous majoritaires) et d'un semi-conducteur

de type n (électrons majoritaires). Après mise en contact, les trous du semi-conducteur p diffusent vers le semiconducteur n et réciproquement pour les électrons du semi-conducteur n. Il apparaît alors une zone dépourvue de porteurs libres dans la zone centrale de la jonction appelée zone de charges d'espace (ZCE). Celle-ci est formée d'ions fixes issus du dopage, et crée de ce fait un champ électrique interne qui s'oppose à la diffusion des porteurs majoritaires. Après l'établissement de la jonction, les photoporteurs créés dans les régions neutres, dépourvues de champ électrique, engendrent des courants de diffusion tandis que ceux créés dans la zone de charge d'espace de largeur, WZCE, sont accélérés par le champ électrique vers les zones où ils deviennent porteurs majoritaires. Par conséquent, seuls les porteurs minoritaires en excès sont actifs dans une jonction p-n et participent à la génération d'un courant (somme des courants de diffusion et de drift) [29].

I.6.8 Les différentes caractéristiques de cellule photovoltaïque

Les principaux paramètres des cellules photovoltaïques extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques, sont les suivants [30].

I.6.8.1 Courant de court-circuit (J_{cc})

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V = 0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [30].

On peut écrire :

$$J_{cc} = J(V = 0) = I_{ph} \quad (I.1)$$

I.6.8.2 Tension en circuit ouvert (V_{co})

Il s'agit de la différence de potentiel mesurée aux bornes de la cellule lorsque cette dernière est en circuit ouvert, c'est-à-dire la tension mesurée lorsque le courant nul. Elle décroît avec la température et varie avec l'intensité lumineuse. Pour une cellule solaire idéale, la tension de circuit ouvert est donnée par :

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (I.2)$$

$\frac{KT}{q}$: Potence thermodynamique.

T : température absolue.

q : constante de charge d'électron.

K : constante de Boltzmann.

I_{ph} : courant photonique.

I_s : courant de saturation

I.6.8.3 Facteur de forme (FF)

Le facteur de forme FF (Fill factor) représente l'efficacité de la cellule solaire. C'est le rapport entre la puissance débitée $V_m \cdot I_m$ et la puissance idéale $V_{co} \cdot I_{cc}$. Il est donné par la relation suivante :

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{co}} \quad (I.3)$$

I.6.8.4 Rendement de conversion (η)

Ce rendement exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{p_{max}}{p_{in}} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad (I.4)$$

Où P_{in} est la puissance incidente de la lumière. Elle est égale à la puissance solaire qui est de 100 mW/cm²

I.6.8.5 Rendement quantique (QE)

Le rendement quantique décrit la probabilité, pour un photon incident d'une longueur d'onde donnée, de créer une paire électron-trou effectivement collectée par la cellule. Il est exprimé par l'équation suivante [31].

$$QE(\lambda) = \frac{I_{ph}}{q\phi_0(\lambda)} \quad (I.5)$$

I.6.9 Les différentes structures de cellule PV

I.6.9.1 Structure homojonction

L'homo-jonction est la structure solaire la plus couramment utilisée. Elle est constituée principalement de la juxtaposition des deux blocs de même nature mais de dopage différent, d'un même matériau semi-conducteur.

Les composants optoélectroniques à base d'homo-jonction ont été développés depuis les années 1960 et constituent la naissance de l'émission de la lumière sur un semi-conducteur [32].

I.6.9.2 Structure hétérojonction

Les jonctions réalisées entre deux matériaux semi-conducteurs de type et de gap différents cristallin ou non cristallin sont appelées hétérojonction. La réalisation d'hétérojonction s'effectue par la croissance cristalline d'un matériau sur l'autre et nécessite l'utilisation de semi-conducteurs ayant la taille des atomes assez proche [32].

I.6.9.3 Structure p-i-n et n-i-p

La cellule au silicium amorphe dite à simple jonction délivre le rendement le plus faible parmi les technologies au silicium amorphe, de 5 à 9%, mais aussi les prix les plus intéressants, de l'ordre de 1EUR/W. Par ailleurs, elle constitue l'assemblage le plus simple qui soit capable de donner un matériau photovoltaïque : l'empilement d'une couche ultrafine dopée positivement (P), d'une couche non dopée ou couche intrinsèque (i) et d'une couche dopée négativement (n). Par conséquent, l'empilement s'appelle jonction p-i-n (Figure I.4). Ce type de module est fabriqué par la plupart des constructeurs de la filière amorphe [33].

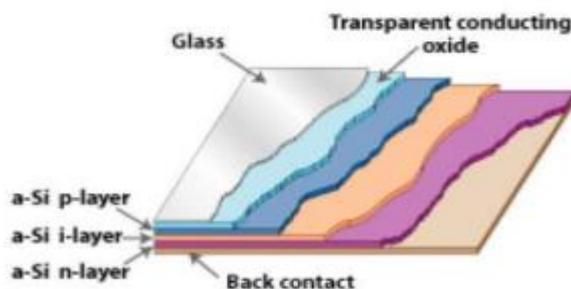


Figure I.4. La structure d'une cellule à jonction p-i-n [33]

I.6.10 Les technologies de cellules solaires

I.6.10.1 Les cellules photovoltaïques au silicium cristallin

Les cellules les plus utilisées sont encore aujourd'hui les cellules au silicium cristallin, dite de première génération (80% des panneaux sur le marché).

La cellule au silicium monocristallin est constituée d'un seul cristal. Elle a un aspect uniforme, de couleur gris bleuté, ou noir. Il existe également des cellules composées de plusieurs cristaux assemblés, dites au silicium microcristallin (grains plus petits que 1 μm), polycristallin (grains plus petits que 1 mm) ou multicristallin (grains plus petits que 10 cm).

Le rendement des cellules monocristallines est actuellement de l'ordre de 15 à 19% en industrie et de 25% en laboratoire. Pour les cellules au silicium multicristallin, le rendement en industrie est de 12 à 16% et de 20.4% en laboratoire [34].

I.6.10.2 Les cellules photovoltaïques en couches minces

Les couches minces consistent en un dépôt de matériaux semi-conducteurs sur un substrat rigide ou souple. Il existe plusieurs technologies de couches minces commercialisées dont trois voies qui semblent s'imposer, même si cela ne représente actuellement pas plus de 20% du marché PV : le silicium amorphe, le tellure de cadmium (CdTe) et les combinaisons à partir du diséléniure de cuivre et d'indium (CIS ou CIGS lorsque du gallium est ajouté) [34].

Elles présentent les avantages suivants :

- Un fort potentiel de réduction des coûts liés à des processus de fabrications peu onéreux : utilisation de verre de faible qualité ou de polymères comme substrat, sur lesquels on dépose une mince couche active ;

- Une flexibilité de mise en œuvre des matériaux, notamment avec l'utilisation de substrats souples.
- La possibilité d'obtenir des cellules semi-transparentes.

Les principaux inconvénients sont :

- Le rendement encore faible.
- La rareté de certains matériaux.
- La toxicité de certains matériaux [34].

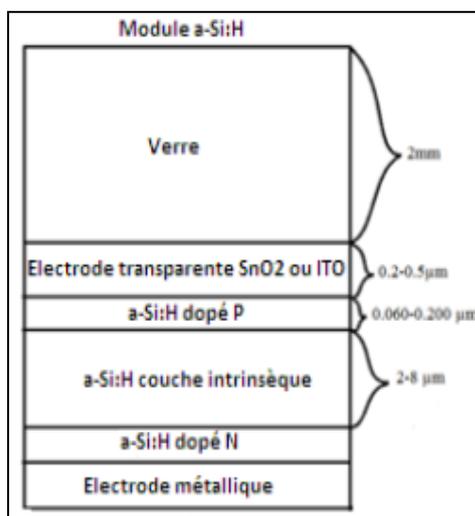


Figure I.5. Structure d'une cellule au silicium amorphe hydrogéné [34].

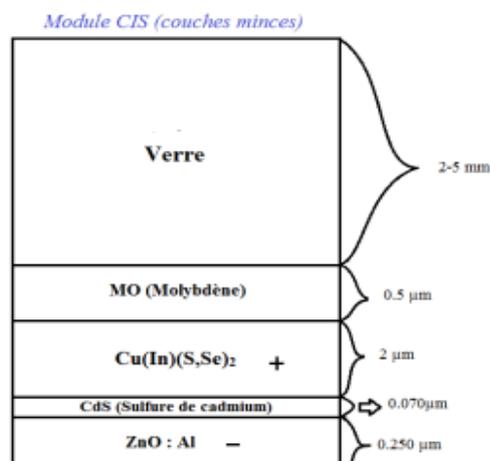


Figure I.6. Structure d'une cellule CIS [34].

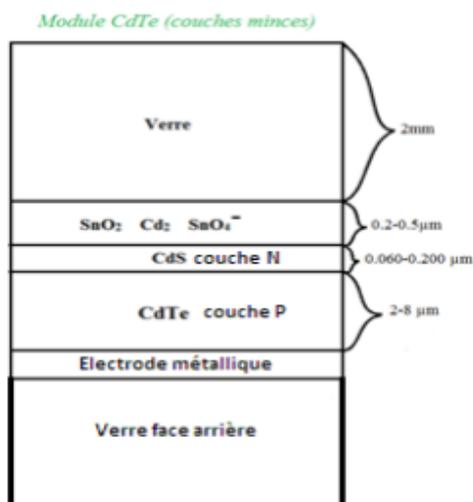


Figure I.7. Structure d'une cellule CdTe [34].

I.6.10.3 Les cellules photovoltaïques de troisième génération

Il existe d'autres cellules, dites de troisième génération, qui reposent sur des macromolécules et des nanoparticules dont les procédés de fabrication sont bien moins consommateurs d'énergie et, potentiellement, d'un coût de revient plus faible : les cellules organiques et les cellules à colorants. Malheureusement pour l'industrie PV, ces cellules manquent de stabilité dans le temps, ce qui entraîne une durée de vie, lorsqu'elles sont exposées au soleil, trop courte et variable pour les applications PV.

Une autre catégorie de cellules appartenant à la troisième génération, basées cette fois-ci sur une logique de très hauts rendements, sont les cellules à multijonctions qui peuvent atteindre un rendement de plus de 40% en laboratoire et une limite théorique de 81%.

Ces cellules sont en revanche très onéreuses et ne sont utilisées, pour le moment, que dans le domaine du spatial ou du solaire à concentration [34].

I.6.10.4 Les dernières cellules à base de pérovskites

Le matériau pérovskite fut découvert en 1839 sous la forme CaTiO_3 , mais il fallut attendre les années 2000 pour une première démonstration de cellule photovoltaïque pérovskite. Kojima et al. Utilisèrent du $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ sur du TiO_2 nanoporeux en se basant sur une cellule Grätzel (ou cellule solaire à pigment photosensible) [1], et obtinrent un rendement de conversion de 2,2 %. À partir de là, l'engouement pour les pérovskites dans le solaire monta en flèche. Il faut dire que la pérovskite présente de nombreux avantages : excellentes

propriétés optoélectroniques, faibles coûts des matières premières, bande interdite ajustable et vaste éventail de techniques de dépôt [35].

Dès lors, grâce aux travaux de recherche intensifs déployés au cours des dernières années, les efficacités de ces cellules ont très rapidement évolué en seulement quatre ans pour atteindre les 21% en fin 2015. A l'heure actuelle, le rendement record certifié est de 25,2%, plaçant ainsi cette technologie. Cependant, malgré leur potentiel très prometteur, il reste encore des défis à relever qui freine pour le moment leur commercialisation, notamment la stabilité à long terme vis-à-vis de la température, la lumière, l'humidité et l'oxygène [36].

Bibliographie

- [1] C. HOUARI, S. ADJOUT, « Simulation Des Propriétés Et Performances Des Cellules Photovoltaïques A Base De Matériaux Semi-Conducteurs Ternaires CdTeS », Mémoire de Master, Université Mohamed El Bachir El-Ibrahimi-Bordj Bou Arreridj, 2020, p4.
- [2] S. RAWAT, R. GUPTA, S. GOHRI, « Performance assessment of CIGS solar cell with different CIGS grading profile », journal Materials Today, Volume 81, Part1,2023, ISSN : 2214-7853.
- [3] R. PANDEYA, A. KHANNAB, K. SINGHB, S. K. PATELB, H. SINGHB, J. MADAN, « Device simulations : Toward the design of > 13% efficient PbS colloidal quantum dot », solar cell ; solar energy journal, volume 207, 1 Septembre 2020, Pages 893-902.
- [4] B. BOUZIANI, « Le Défi Énergétique : L'autre Aspect De La Problématique De L'eau », Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°22, June 2015, p.109-122.
- [5] I. ABBAD, « Simulation de l'effet des paramètres climatiques (température, poussière et éclairage) sur le rendement d'une cellule solaire », Mémoire Master, Université Larbi Ben M'Hidi / Oum El Bouaghi, 2019, p-5.
- [6] Site web : <https://www.connaissancedesenergies.org/> consulte le 13/05/2023 a 16 :22.
- [7] Les énergies non renouvelables utilisées pour produire de l'électricité disponible sur « <https://www.ac-nancy-metz.fr> ». Page consulte le 26/4/2023 a 16 :16.
- [8] Site web : <https://www.upenergie.com/info-energie-energie-non-renouvelable/> consultée le 26/04/2023 a 16 :24.
- [9] N. AMADOU, K. ACHARI, « Production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque », Mémoire Master, Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2019, p-8.
- [10] M. BOUZOUBAA, « Contribution au Développement des Stratégies en Maintenance Intégrée A La Production D'énergie Pour un Parc Éolien Sous Contraintes Opérationnelles et Environnementales », thèse doctorat, L'Université de Lorraine – Metz, 2021, p-27.
- [12] Site web : <https://www.futura-sciences.com> consulté le 26/04/2023 a 20 :14.
- [11] Site web : <https://www.connaissancedesenergies.org/> consulté le 13/05/2023 à 22 :34.

- [13]. H. DJALAB, E. GHADRI, « chauffage de serre par énergie géothermique », Mémoire Master, Mohamed Boudiaf Université de M'sila, 2020, p-17.
- [15] M. HALIDI, « Modélisation multi-échelle par approche ab-initio et atomistiques des propriétés thermo-radiatives de matériaux semi-conducteurs réels : Application à la conception de récepteurs solaires innovants pour centrale à tour », Thèse De Doctorat, Université De Nantes, 2021, p-9.
- [16]. Z. WANG ; « Design of Solar Thermal Power Plants », chapitre 02 The Solar Resource and Meteorological Parameters ; Academic Press ;2019 ; ISBN
- [17] E. TAPACHÈS, « Estimation du Potentiel de la Technologie Solaire Thermodynamique à Concentration en Climat Non Désertique - Application à La Réunion », Thèse Doctorat, Université De La Réunion, 2015, p-3.
- [18] Z. KHADRAOUI, « Étude d'une centrale solaire thermique », Mémoire Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2017, p27.
- [19] A. LUQUE, S. HEGEDUS, « Handbook of Photovoltaic Science and Engineering », John Wiley & Sons Ltd, 2003, ISBN 0-471-49196-9.
- [20] M. LOUAZENE, « Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – Application zone de Ouargla », Thèse Doctorat, Université El Hadj Lakhdar – Batna, 2015, p-8.
- [21] A. ABDELKADER, Y. BENDIB, « Solar photovoltaïque in Algeria : A comparative and sativable energy vector », Al-Riyad for Business Economics Journal/ Vol 08– N° 01/ Janvier 2022, p-367.
- [22] M. H. RASHID, « Electric Renewable Energy Systems ; Academic Press », 2016, ISBN 978-0-12-804448-3.
- [23] C. J. CLEVELAND, C. MORRIS, « Handbook of energy Volume II : Chronologies, Top Ten Lists, and Word Clouds ; Elsevier Science ;2014 ; ISBN 978-0-12-417013-1.

- [24] A.C. PASTOR, « conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », L'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006, p-7.
- [25] D. LINCOT, « La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire », L'actualité chimique - février-mars 2012 - n° 360-361 1.
- [26] A. BENSKY, « Short-range Wireless Communication, chapitre 14 Technologies and applications », Third Edition, ISBN 978-0-12-815405-2, 2019, p-423.
- [27] N. TOUAFEK, « Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de $\text{Cu}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ », Thèse Doctorat, Université Des Frères Mentouri – Constantine, 2015, p-9.
- [28] A. MEDJHED, « Extraction des paramètres des cellules solaires en utilisant le modèle à deux exponentielles », Mémoire Master, Université Ferhat Abbas-Sétif, 2011, p-20.
- [29] T. ROUSSEAU, « Élaboration et caractérisation de cellules solaires organiques à base de nouvelles classes de matériaux actifs », Thèse de Doctorat, Université d'Angers France, 2011, p-20.
- [30] A. MALLEM, « Simulation des cellules solaires hétérojonction Si-SiGe par SILVACO », Thèse De Doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, 2014, p-37.
- [31] A. LABADI, « Étude et simulation d'une cellule solaire en CIGS par SCAPS », Mémoire Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2022, p11.
- [32] N. BAKALEM, M. NESRINE, « Étude et simulation comparative entre deux cellule solaire homo-jonction et hétérojonction à base d'une jonction PIN en GaAIAs », Université Saad Dahlab De Blida, 2020, p.42-43.
- [33] B. KHETTOUT, C. FAID, « Étude et simulation d'une cellule solaire hétérojonction à base de GaAs », Mémoire De Master, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA, 2022, p-11.
- [34] T. MAMBRINI, « Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies », Thèse De Doctorat, Université Paris-Sud École Doctorale, STITS Laboratoire de Génie Électrique de Paris (LGEP), 2014, p.62-63.

[35] F. BERRY, « Nanostructuration et cristaux photoniques à base de pérovskites hybrides pour applications photovoltaïques », Thèse De Doctorat, Université De Lyon opérée au sein de l'École centrale de Lyon, 2020, p-23.

[36] P. Dally, « Cellules Solaires à base de Matériaux Pérovskites : De la caractérisation des matériaux à l'amélioration des rendements et de la stabilité », Thèse De Doctorat, Université Grenoble Alpes, 2019, p-17.

Chapitre II

Les Matériaux Semi-Conducteurs

Pour

Applications Photovoltaïques

II.1 Introduction

La cellule solaire est l'élément nécessaire assurant la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. L'interaction entre la lumière et les semi-conducteurs constituant la cellule solaire se traduit par différents phénomènes physiques tel que la génération et la combinaison. Cette dernière dépend fortement du matériau semi-conducteur [1].

Le présent chapitre est divisé en deux parties : La première est consacrée aux généralités sur les semi-conducteurs, et la deuxième aux les matériaux semi-conducteurs objet de notre étude à savoir les matériaux semi-conducteurs de groupe binaire et quaternaire.

II.2 La théorie de bandes

La théorie des bandes est utilisée pour décrire les niveaux d'énergies que peuvent occuper les électrons dans un solide cristallin, dans lesquels les atomes sont arrangés de manière périodique. A l'image des niveaux d'énergie discrets que peuvent occuper les électrons dans un atome isolé, dans un solide, ces niveaux d'énergie forment des bandes qui sont séparées entre elles par des bandes dites « interdites » qui consistent en des niveaux d'énergie qu'aucun électron du solide ne peut occuper. La répartition de ces bandes d'énergie dans un solide dépend des éléments qui le composent et de leur organisation cristalline et dicte les propriétés du matériau.

La répartition des électrons dans les bandes d'énergie à température nulle ($T = 0 \text{ K}$) dicte la nature du matériau et ce notamment à travers leur répartition entre deux bandes spécifiques : la bande de valence (BV) et le bande de conduction (BC). La (BV) est définie comme la dernière bande remplie complètement, elle est notamment composée des électrons situés en périphérie des atomes qui jouent le rôle de la cohésion du solide. D'autre part, la bande de conduction juste au-dessus, peut, à $T = 0 \text{ K}$, être vide ou partiellement remplie, les électrons qui s'y trouvent sont quasiment libres et sont responsables des propriétés de conduction du matériau [2].

Une quantité importante est également définit, la bande d'énergie interdite, autrement appelé gap d'énergie, qui correspond à la différence d'énergie entre le haut de valence BV et le bas de la BC. Différents cas se distinguent alors :

- La BC est partiellement remplie : le matériau est un métal

- La BC est vide et le gap d'énergie est nul : c'est le cas des semi-métaux
- La BC est vide et le gap d'énergie est non nul : le matériau est alors un semiconducteur ou un isolant. La distinction entre les deux cas n'est pas nette et dépend de la valeur en énergie du gap. De manière générale, le matériau est défini comme semi-conducteur lorsque le gap ne dépasse pas quelques électron-volts (eV) et isolant lorsqu'il est supérieur [2]. Ces considérations sont résumées en (Figure II.1) :

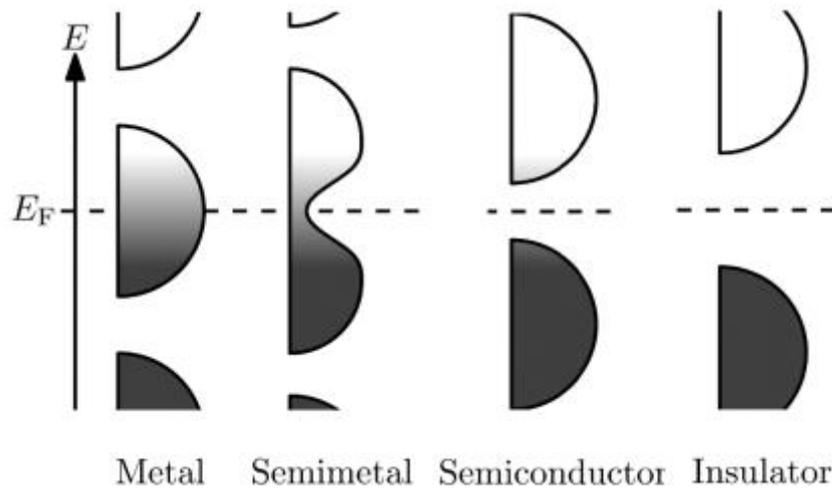


Figure II.1. Distinction des différents types de matériaux en fonction du remplissage des bandes et de la taille du gap d'énergie [2].

II.3 Les semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité électrique intermédiaire entre celle des conducteurs et des isolants. Cette conductivité varie sous l'effet de la température, l'éclairement et la présence d'impuretés (dopage, défauts du réseau) [3].

Le tableau II.1 donne des exemples de matériaux ou de composés semi-conducteurs en fonction des éléments qui les constituent et de la position de ces éléments dans le tableau de Mendeleïev [4].

Tableau II.1. Exemple des semi-conducteurs [4].

Colonne		Semi-conducteurs
IV		Ge, Si
III	Binaire	GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP, InSb
	Ternaire	$Al_xGa_{1-x}As, GaAs_yP_{1-y}$
	Quaternaire	$Al_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$
II	Binaire	CdS, HgTe, CdTe, ZnTe, ZnS
	Ternaire	$Cd_xHg_{1-x}Te$

II.3.1 Gap énergétique

Les courbes $E_{cv}(k)$ dites aussi relations de dispersion où E_c est le minimum de la bande de conduction, E_v le maximum de la bande de valence et K^{\rightarrow} le vecteur d'onde associé à un électron, ces courbes font apparaître deux types de semi-conducteurs. Si ce maximum et ce minimum correspondent à la même valeur de K^{\rightarrow} on dit que le semi-conducteur est à gap direct. Si au contraire, ce maximum et ce minimum correspondent à des valeurs de K^{\rightarrow} différentes, on dit que le semi-conducteur est à gap indirect. (Figure.II.2)

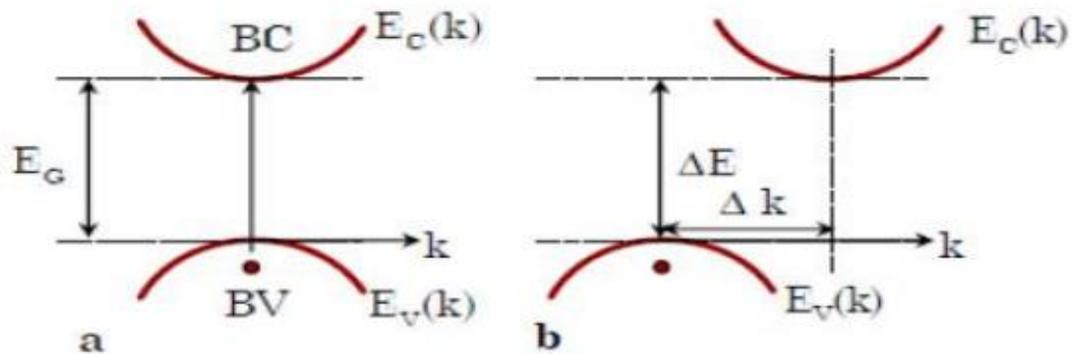


Figure II.2. a) Semi-conducteur à gap direct. b) Semi-conducteur à gap indirect.

La nature du gap joue un rôle fondamental dans l'interaction du semi-conducteur avec un rayonnement électromagnétique (en particulier lumineux), et donc dans le fonctionnement des

composants utilisés en optoélectronique. Nous pouvons remarquer, que dans un semi-conducteur à gap direct un électron du haut de la bande de valence qui acquière une énergie passe dans la bande de conduction sans changer de quantité [5].

II.3.2 Les type de semi-conducteurs

II.3.2.1 Intrinsèque

Un semi-conducteur est dit intrinsèque lorsqu'il est pur, il ne comporte aucune impureté (volontaire ou non) et son comportement électrique ne dépend que de la structure du matériau (cas d'un semi-conducteur parfait). En réalité, un semi-conducteur n'est jamais parfaitement intrinsèque mais peut parfois en être proche. Il se comporte comme un isolant à 0 K et sa conductivité augmente avec la température.

À une température ambiante se produit le mécanisme de création de pair électron-trou, l'énergie thermique communiquée à la structure cristalline permet "d'arracher" des électrons et de rompre certaines liaisons. Ces électrons deviennent libres dans la BC et peuvent donc se déplacer très facilement, ils laissent des trous dans la BV eux aussi libres de se déplacer.

Parallèlement à la création de pair électron-trou se produit le mécanisme de recombinaison qui provoque la disparition de ces deux charges mobiles, l'atome concerné redevient électriquement neutre. Ce mécanisme est d'autant plus fréquent que la concentration des charges est élevée. Une fois atteint un état stable du matériau les deux phénomènes se compensent, la concentration des charges reste constante [6].

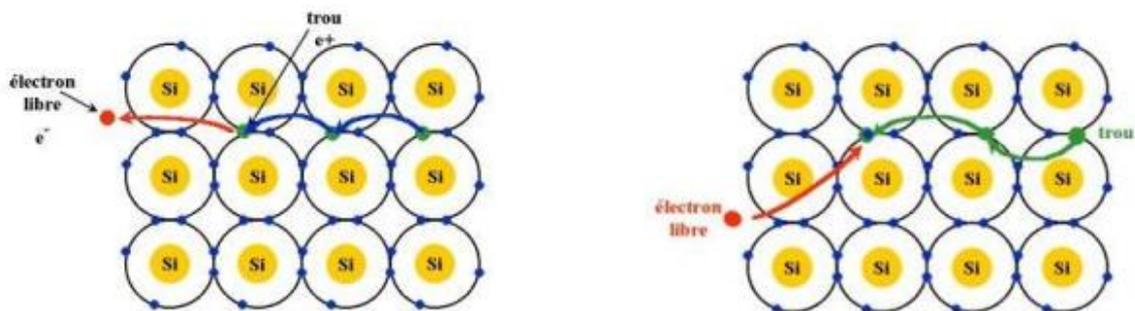


Figure II.3. Phénomènes de génération/ recombinaison. a) Création d'une paire électron trou. b) Disparition d'une paire électron-trou [6].

II.3.2.2 Extrinsèque

La technique du dopage augmente, selon la nature des atomes introduits, la densité des porteurs de charge à l'intérieur du matériau semi-conducteur. Si elle augmente la densité d'électrons, il s'agit d'un dopage de type N. Si elle augmente celle des trous, il s'agit d'un dopage de type P [6].

II.3.2.2.1 Semi-conducteur de type N

Pour un tel matériau, des atomes pentavalents de la colonne V de la classification périodique des éléments sont introduits (en général en faible quantité), afin de privilégier la conduction par électrons.

La figure II.4 représente une matrice Si dopée au P. L'atome P possède 5 électrons de valence, quatre d'entre eux entrent en liaison avec les quatre électrons des atomes de Si voisins. Un faible apport d'énergie (0.04eV), par exemple dû à une température différente de 0K , peut libérer le cinquième électron, qui ne trouve pas sa place dans la liaison formée, et qui se retrouve plongé dans le champ positif de l'ion P^+ . De ce fait il devient un électron libre et l'atome pentavalent est appelé "atome donneur" [7].

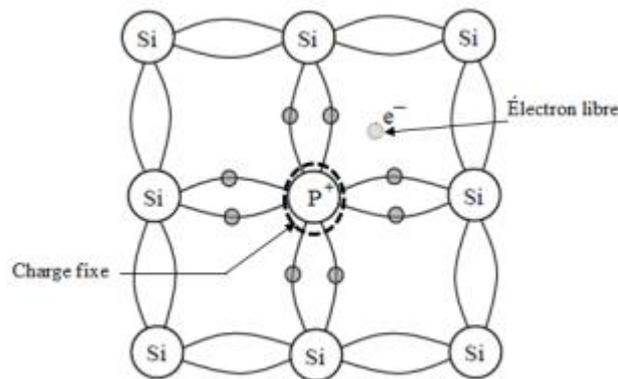


Figure II.4. Semi-conducteur de type N.

II.3.2.2.2 Semi-conducteur de type P

Cette fois-ci, les impuretés sont de type accepteur ce qui correspond aux atomes de la colonne III de la classification périodique des éléments. Les éléments les plus utilisés dans le dopage sont le bore (B) et le gallium (Ga).

La figure II.5 représente une matrice Si dopée au B. L'association avec ses quatre voisins confère à l'atome B sept électrons sur la couche externe ce qui est insuffisant pour le rendre stable et il est alors tenté d'en subtiliser un à un proche voisin. Le B se retrouve donc ionisé négativement (B^-) et on assiste au déplacement d'un trou libre d'atome en atome [7].

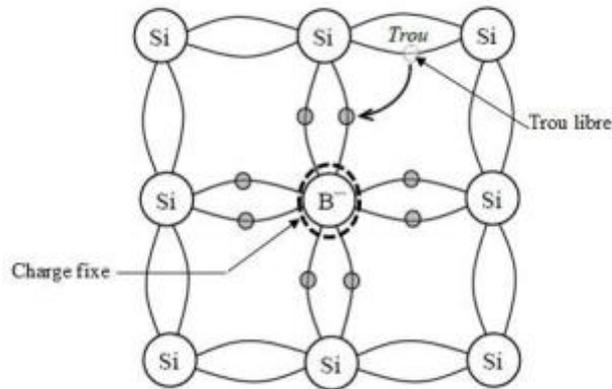


Figure II.5. Semi-conducteur de type P.

II.3.3 Jonction PN

Une jonction p-n est formée par un semi-conducteur monocristallin dont un côté est dopé avec des accepteurs (p) et l'autre côté est dopé avec des donneurs (n). À l'emplacement de contact la jonction métallurgique se forme comme le montre la figure (II.6). Initialement il y a un très grand gradient de densité de porteurs majoritaires à la jonction métallurgique.

Équilibre seront recherchés car les porteurs majoritaires dans le matériau de type p (trous) commenceront à se diffuser dans le matériau de type n tandis que les porteurs majoritaires du matériau de type n (électrons) commencent à diffuser dans le matériau de type [8].

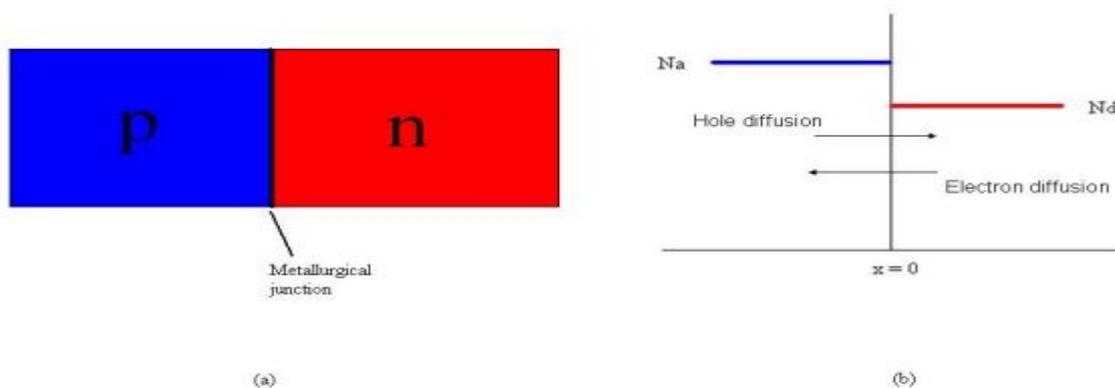


Figure II.6. a) Jonction PN simplifiée. b) profil de dopage.

II.4 les matériaux étude

II.4.1 Les semi-conducteurs III-V

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés formés à partir d'un élément de la III (-ème) colonne et d'un élément de la V (ème) colonne de la classification périodique de Mendeleïev. Le tableau (II-2) regroupe un extrait de cette classification (les chiffres en haut et bas représentent respectivement le nombre atomique et la masse atomique). Ainsi de nombreux composés binaires peuvent être réalisés.

On peut obtenir un semi-conducteur si la somme des électrons des deux espèces est égale à 8 électrons [9].

Tableau II.2. Extrait de la classification périodique des éléments.

III	IV	V
${}_{12.01}^{6}\text{B}$	${}_{12.01}^{6}\text{C}$	${}_{14.01}^{7}\text{N}$
${}_{26.98}^{13}\text{AL}$	${}_{28}^{14}\text{Si}$	${}_{30.97}^{15}\text{P}$
${}_{69.74}^{31}\text{Ga}$	${}_{72.59}^{32}\text{Ge}$	${}_{74.92}^{33}\text{As}$
${}_{114.82}^{49}\text{In}$	${}_{118.61}^{50}\text{Sn}$	${}_{121.75}^{51}\text{Sb}$

II.4.1.1 Présentation de semi-conducteurs GaAs

L'arséniure de gallium GaAs (1.42eV) qui est un semi-conducteur III-V à gap direct, composé de deux semi-conducteurs de la colonne III et V. L'arséniure de gallium (GaAs) est un matériau attrayant pour le photovoltaïque grâce à son fort coefficient d'absorption lui permettant de réaliser des cellules solaires ultra-minces pouvant absorber jusqu'à 90% des photons incidents dans une épaisseur de $3\mu\text{m}$, une forte mobilité des électrons, une forte résistance aux radiations solaire et une bonne stabilité face aux températures élevées. De plus, la possibilité de transformer facilement l'arséniure de gallium en un semi-conducteur ternaire, a favorisé aussi son utilisation dans les cellules solaires multi-jonctions [10].

II.4.1.2 Structure cristalline

La plupart des matériaux III-V cristallisent dans la structure sphalérite dite "Zinc Blende" présentée sur la figure (I-1). Cette structure, qui s'apparente à celle du diamant (C, Ge, Si, etc.), est constituée de deux sous-réseaux cubique face centrée (cfc), l'un d'éléments III et l'autre d'éléments V, décalés l'un par rapport à l'autre du quart de la diagonale principale, c'est-à-dire de $\frac{1}{4}a$ [1.1.1], où a représenté le paramètre de maille du matériau [11].

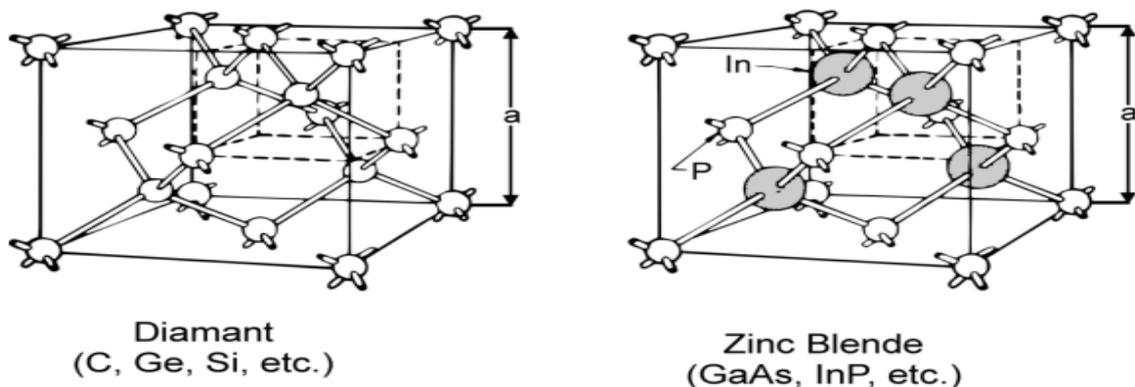


Figure II.7. Mailles cristallographiques des structures Diamant et Zinc Blende.

II.4.1.3 Structure électronique de bande

Les électrons présentent une masse effective plus petite dans GaAs qui est de 0.068 la masse réelle, d'où une mobilité des électrons dans GaAs plus élevé. Cela signifie que GaAs peut être utilisé pour produire un circuit plus rapide. Étant donné que le maximum de la bande de

valence coïncide avec le minimum de la BC sur l'axe d'impulsion de GaAs (Figure II.8), on l'appelle un semi-conducteur à bande interdite directe.

Cela signifie qu'un électron ne doit perdre que de l'énergie et presque pas de quantité de mouvement lorsqu'il se désintègre de la conduction vers la bande de valence. La bande interdite de GaAs fixe la longueur d'onde de la lumière émise à environ 900 nm, ce qui se situe dans la région proche de l'infrarouge. La plus grande bande interdite permet également aux dispositifs GaAs de fonctionner à des températures plus élevées que d'autres dispositifs comme le silicium. À une température de (- 20°C à 100°C) la densité de porteurs libres est minimale par rapport à ceux introduits par dopage. Ceci est toujours vrai à des températures élevées. Certains appareils GaAs sont utilisables jusqu'à 400°C et la plupart fonctionnera à des températures compris entre -200°C et 200°C [12].

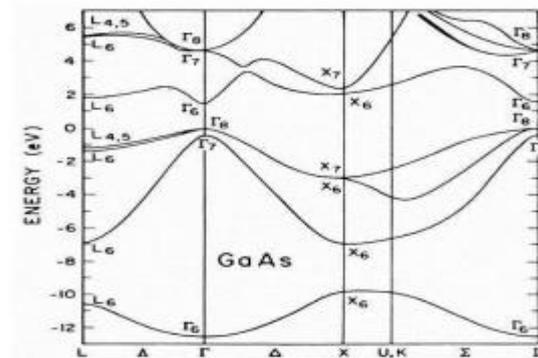


Figure II.8. Structure de bande de GaAs.

II.4.1.4 PROPRIÉTÉS OPTIQUES

L'interaction d'un électron avec un photon se fait, comme toute interaction, avec conservation de l'énergie et du vecteur d'onde. Le vecteur d'onde du photon étant très inférieur à celui des électrons, les transitions optiques directes entre la bande de valence et la bande de conduction apparaissent verticales dans le diagramme de bande des électrons. Dans le cas d'un semi-conducteur à bande interdite indirecte, les transitions optiques à travers le gap ne peuvent avoir lieu que grâce à une interaction supplémentaire, par exemple celle d'un phonon.

En revanche, un matériau à bande directe comme le GaAs, pour lequel électrons et trous se retrouvent sur le maxima de leurs bandes respectives qui sont tous les deux au point $k = 0$ (voir Fig. II.9), est un très bon émetteur de lumière [13].

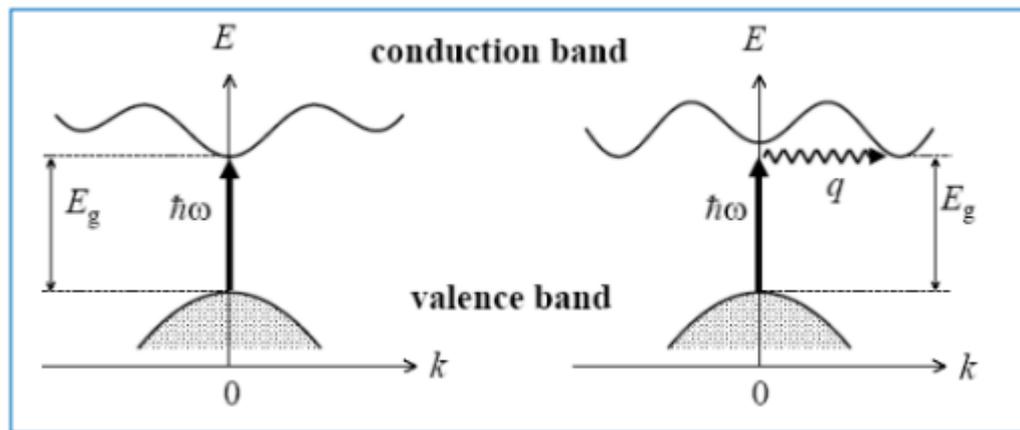


Figure II.9. Les transitions optiques directes et indirectes.

II.4.2 Les semi-conducteurs du groupe II-VI

Les semi-conducteurs II-VI sont constitués par l'association des atomes de la colonne II avec ceux de la colonne VI de la classification périodique de Mendeleïev.

La dernière orbitale s des atomes du groupe II ne possède que deux électrons ; tandis que la couche électronique périphérique des atomes du groupe VI renferme six électrons de valence dont deux sur l'orbitale s et quatre sur l'orbitale p. Un matériau II-VI comportera donc des liaisons hybrides de type sp^3 où chaque anion se retrouve dans un environnement tétraédrique d'un cation, et inversement. Ces liaisons ont un caractère intermédiaire entre la liaison ionique et la liaison covalente [14].

II.4.2.1 Les composés à base de cadmium

Les composés semiconducteurs binaires II-VI, appartenant à la famille des chalcogénures de cadmium (CdS, CdSe, CdTe), sont considérés comme des matériaux très importants pour les applications photovoltaïques.

Le CdSe est un matériau photovoltaïque prometteur en raison de son coefficient d'absorption élevé et de son énergie de bande interdite presque optimale pour une absorption efficace de la lumière et une conversion en énergie électrique. Des couches minces de CdSe ont également été préparées et caractérisées pour leurs propriétés structurales, optiques et électriques [15].

II.4.2.2 Structure cristalline

Les semi-conducteurs II-VI cristallisent dans la structure zinc blende et/ou würtzite. Ces deux types de structure sont formés de l'empilement de plans d'anions et de cations successifs de maille hexagonale [16].

La structure cristallographique du CdTe est du type zinc-blende. Les atomes de cadmium et de tellure sont disposés selon deux réseaux cubiques à faces centrées (cfc) décalés l'un par rapport à l'autre d'un quart de la diagonale du cube du réseau. Les nœuds d'un des réseaux cubiques à faces centrées sont occupés par les atomes de cadmium (Cd) tandis que ceux de l'autre réseau sont occupés par les atomes de tellure (Te) (figure II.10). Ainsi, autour de chaque atome d'une espèce, quatre atomes de l'autre espèce sont disposés aux sommets d'un tétraèdre régulier [17].

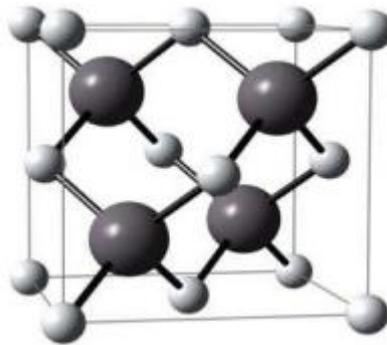


Figure II.10. Maille élémentaire de la structure cubique de CdTe. Les sphères claires représentent les atomes de cadmium et les sphères foncées ceux de tellure.

II.4.2.3 Propriétés électriques du CdTe

La structure de bande du CdTe présente une bande d'énergie interdite (BI) de largeur E_g séparant la BV quasiment remplie d'électrons de la BC quasiment vide. Le niveau de Fermi noté E_f est défini comme l'énergie à laquelle la probabilité théorique d'occupation par les électrons est de 0,5. Par analogie avec les métaux, ce niveau est identifié avec le travail de sortie électronique $q \Phi_{sc}$ qui correspond à l'énergie minimale nécessaire pour faire passer un électron du solide au vide immédiatement adjacent [17].

Le tableau suivant (tableau II.3) résume quelques propriétés électriques du CdTe :

Tableau II.3. Les propriétés électriques du CdTe.

Le gap (E_g)	1.44 eV
L'affinité (X)	4.28 Ev
La mobilité des trous	60 à 90 cm ²
La mobilité des électrons	800 à 1100 cm ²
τ_p	1 μ s
τ_n	1 μ s

II.4.2.4 Propriétés optiques du CdTe

Le CdTe a une structure de bande directe, autorisant les transitions optiques. Son indice de réfraction est égal à 2.68. Le tableau suivant (tableau II.4) résume quelques propriétés optiques du CdTe :

Tableau II.4. Les propriétés optiques du CdTe [17].

Indice de réfraction	2.68
Constante diélectrique optique	7.15
Constante diélectrique statique	10.03

II.4.2.5 Cellule solaire à base de CdTe

Avec une bande interdite d'énergie optique directe de 1,5 eV et un haut coefficient d'absorption des photons d'énergie supérieure à 1,5 eV, seuls quelques microns de CdTe sont nécessaires pour absorber la majeure partie de la lumière incidente. Parce que seules des couches minces sont nécessaires, les coûts de matériaux sont minimisés, et parce qu'une courte longueur de diffusion minoritaire (quelques microns) est un traitement adéquat et coûteux des matériaux peut être évité.

Une vue en coupe d'une cellule solaire typique CdS / CdTe est illustrée dans la Figure (II.11).

Un contact avant est assuré par le dépôt d'un conducteur transparent (TCO) sur le substrat de verre. La couche TCO a une transparence optique élevée dans les régions visibles et proche infrarouge et un type n élevé conductivité. Ceci est suivi du dépôt d'une couche fenêtre CdS, la couche absorbante CdTe, et enfin le contact arrière [18]

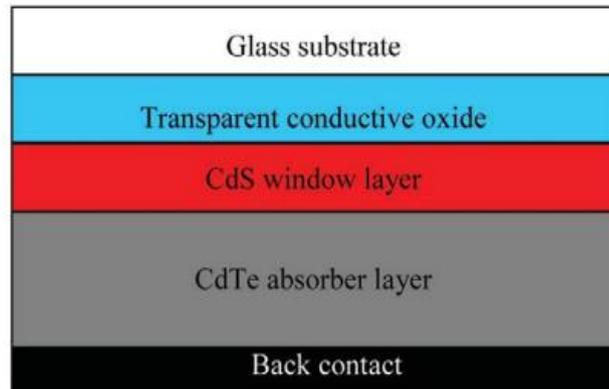


Figure II.11. Une cellule solaire à couche mince CdS/CdTe.

II.4.3 Les semi-conducteurs du groupe I-III-VI 2

II.4.3.1 Présentation des matériaux CIS et CIGS

C'est en 1876 que le premier composant photovoltaïque à base de semi-conducteur a été réalisé en élaborant mécaniquement une couche de sélénium entre deux électrodes. Mais l'introduction de cuivre et de l'indium n'a été effectuée qu'un siècle plus tard, en 1973, par Wagner et ces collaborations qui ont obtenus des rendements de 12% à partir d'un monocristallin de CuInSe_2 . Le Cuivre Indium Gallium Sélénium (CIGS) est un semi-conducteur en solution solide. La concentration d'indium et de gallium peut varier du séléniure de cuivre et d'indium pur ($x=1$, CIS) à du séléniure de cuivre et de gallium pur ($x=0$, CGS). Ainsi, son gap varie continuellement avec x , de 1.0 eV pour CIS aux environs 1.7eV pour le CGS [19].

II.4.3.2 La structure cristalline

La famille CuInSe_2 des couches minces appartient à la classe I-III-VI₂ des semiconducteurs à couche mince, et a montré la grande promesse pour des applications photovoltaïques. CuInSe_2 est un composé ternaire trois éléments, I-III-VI₂. La figure suivante montre la

prétendue structure chalcopyrite de ce composé, qui essentiellement, est comme une maille de diamant composé des cellules d'unité tétragonale à face centrée. Par exemple l'alliage ternaire CuInSe_2 appartenant à la famille I-III-IV₂ qui se cristallise dans la structure tétragonale de chalcopyrite est obtenu à partir de la structure cubique de Zinc Blende des matériaux II-VI comme le ZnS . Ceci est réalisé en occupant les positions de Zn alternativement avec du Cu et du In, alternativement chaque atome Se a deux liaisons au Cu et deux liaisons à In [20].

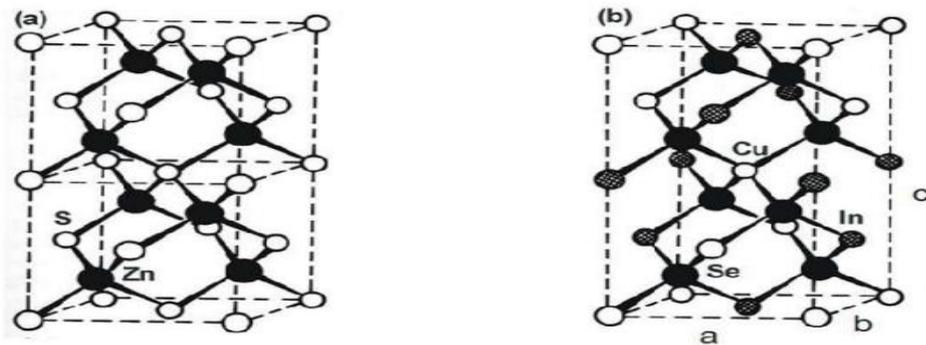


Figure II.12. a) Structure de la maille élémentaire du zinc-blende (ZnS). b) Structure de la maille élémentaire de la chalcopyrite du CuInSe_2 .

II.4.3.3 Propriétés électroniques des bandes de CIGS et CIS

Le CuInSe_2 et le CuGaSe_2 sont des matériaux semi-conducteurs possédant respectivement des gaps directs de 1.035eV et 1.68eV. Cette différence est majoritairement liée à une différence de minimum de la bande conduction (EC). Comme nous l'avons vu précédemment, le CIGS est une solution solide de ces deux matériaux.

Le réaction $x = [\text{Ga}] / ([\text{In}] + [\text{Ga}])$ détermine le taux d'atomes de gallium qui remplacent les atomes d'indium dans la structure. La largeur de la bande interdite du CIGS varie en fonction de x entre les valeurs du pur CIS et du pur CGS, suivant la loi empirique suivante :

$$E_g = 1.035 + 0.65x - 0.264x(1 - x) \quad (\text{II.1})$$

Le CIGS est donc un matériau dont E_g peut être ajusté entre 1.035eV et 1.68eV en fonction du taux de gallium. La valeur optimale d' E_g dépend de plusieurs facteurs. Du point de vue de l'absorption des photons, il est préférable d'avoir une valeur de E_g réduite, permettant d'absorber un spectre plus large (plus grandes longueurs d'onde). Il en résulte un courant plus important délivré par la cellule solaire (J_{sc}).

Cependant, c'est la valeur de E_g qui détermine la tension maximale délivrée par la cellule. Afin de maximiser le rendement de conversion, il est donc nécessaire d'obtenir un compromis idéal entre courant et tension. La plupart des résultats expérimentaux publiés dans le domaine des cellules CIGS montrent que les meilleurs rendements sont obtenus avec un gap d'environ 1.2eV, ce qui correspond à un taux de Ga proche de 30% [21].

II.4.3.4 Propriété optique de CIGS/CIS

Si le CIGS est utilisable dans des dispositifs photovoltaïques en couches minces, c'est parce qu'il possède un gap direct. De ce fait, l'absorption des photons ayant une énergie proche du gap ne nécessite pas l'intervention de phonons et il en résulte un coefficient d'absorption très élevé, plus grand que 10^5cm^{-1} dans le domaine du visible et le proche infrarouge.

L'équation de conversion des longueurs d'ondes du spectre solaire en énergie est la suivante :

$$E = \frac{hc}{1.6 \times 10^{-19} \cdot \lambda} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

E : l'énergie d'irradiation en eV.

h : la constante de Planck, elle est égale à 6.62×10^{-34} J.s.

C : la vitesse de la lumière dans le vide, elle est égale à 3×10^8 m s⁻¹.

λ : la longueur d'onde incident en m.

La valeur de l'énergie du gap du CuInSe₂ permet d'absorber les photons ayant des longueurs d'onde inférieures à 1192 nm, ce qui indique que la gamme d'absorption de ce ternaire sont située dans la région optimale du spectre solaire.

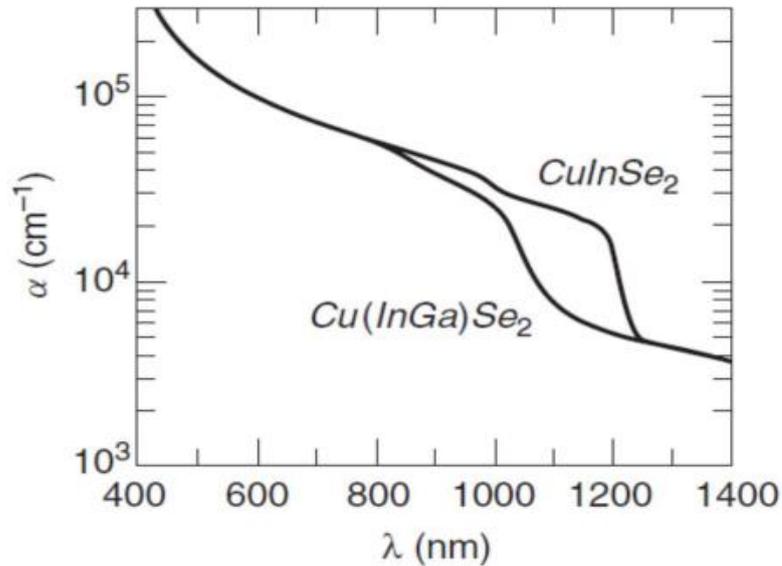


Figure II.13. Coefficient d'absorption de CuInSe_2 et Cu(InGa)Se_2 en fonction de longueur d'onde.

La relation entre son gap d'énergie E_g et son coefficient d'absorption α est la suivante :

$$\alpha = \frac{A(E - E_g)^{1/2}}{E} \quad (\text{II.3})$$

Avec A , une constante de proportionnalité qui dépend des densités des états liés à l'absorption de photon, E l'énergie d'irradiation [19].

II.4.3.5 Les cellules CIGS

Les cellules à base de CIGS fonctionnent aussi selon le principe de la jonction p-n. Elles renferment un absorbant composé de cuivre, de gallium, d'indium et de sélénium. Cette couche de 1 à 2,5 μm d'épaisseur étant de type p, elle doit être recouverte d'un matériau de type n. Puisqu'il y a deux semi-conducteurs différents, les cellules CIGS représentent des hétérojonctions. De plus, leur rendement est le plus élevé à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couches minces. Le rendement record de 22.3 % a été atteint le 8 décembre 2015 par une cellule solaire d'environ 0,5 cm^2 de Solar Frontier-Japon [22].

Les cellules en CIGS résistent mieux à l'échauffement que les cellules au silicium cristallin, mais moins bien que les cellules au CdTe. En plus, elles captent un peu mieux la lumière en début et en fin de journée (quelques pour cent), comme toutes les couches minces.

Les cellules CIGS peuvent être construites sur des supports en plastique, en verre de silicates sodocalcique de 1 à 3 mm d'épaisseur, ou sur des feuilles métalliques [22].

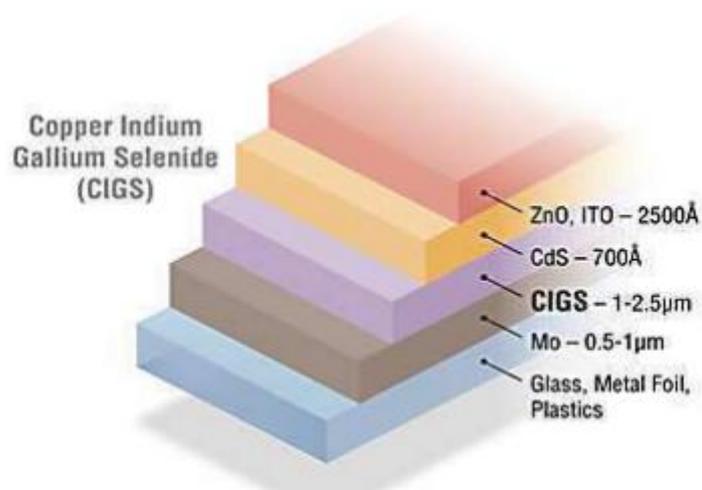


Figure II.14. Structure d'une cellule photovoltaïque au CIGS [22].

Bibliographie

- [1] A. CHANANE, A. KEFKEF, « Étude et simulation d'une structure a base de GaASP/GaAs/InGaAs pour le photovoltaïque », Mémoire Master, Université Saad Dahlab Blida, 2020, p-2.
- [2] D. AMELOT, « Études des propriétés d'interfaces pour les cellules solaires de nouvelle génération », Thèse de Doctorat, Sorbonne Université, 2021, p11-12.
- [3] B. KOLLI, « Étude des propriétés électroniques et optiques des alliages ternaires $\text{AlP}_x\text{Sb}_{1-x}$ », Mémoire Master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arreridj, 2018, p-5.
- [4] S. KALACHE, « Étude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS », Mémoire Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2017, p-7.
- [5] L. BENSEFA, « Effet du désordre compositionnel sur les propriétés électroniques et optiques des alliages ternaires semiconducteurs $\text{InP}_x\text{Sb}_{1-x}$ », Mémoire Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2018, p-8.
- [6] Y. MAROUF, « Étude et simulation des cellules solaires multi-jonctions à base de matériaux semi-conducteurs III-V », Mémoire Master, Université Mohamed Khider – Biskra, 2019, p11-12.
- [7] H. YAHI, « Physique des Semi-conducteurs, mémoire master », Université 8 Mai 1945 Guelma, 2021, p-20.
- [8] J. LAVERY, « Quantum tunneling model of a P-N junction in silvaco », Thésis Naval post graduat school Monterey California, 2008.
- [9] M. BELMADI, « technologie et intégration en semi-conducteurs III-V », Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2016, p-28.
- [10]. H. CHARANE, A. MAHRANE, A. MESRANE, H. MAZOUZ, « Simulation et optimisation de l'épaisseur de l'émetteur d'une cellule solaire mono-jonction à base de GaAs », Revue des Matériaux et Énergies Renouvelable Vol 4, N°2 2021 ISSN : 2507-7554, 09 July 2020.

- [11] Z. BENYAHIA, O. BENZAIM, « Étude de la conception d'une diode laser à base de matériau InGaN/GaN », Mémoire Master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –,2022, p-15.
- [12] M. TAHRAOUI, Y. SAHOUI, « Optimisation du rendement photovoltaïque d'une cellule solaire à base d'Arséniure de Gallium « GaAs » », Mémoire De Master, Université ABOUBAKR BELKAÏD – Tlemcen, 2022, p-44.
- [13] N. BAGHDADLI, « Étude Des Propriétés Optoélectroniques Des Semi-Conducteurs Iii-V A Base De Galium », Mémoire Master, Université Abou-Bakr Belkaid – Tlemcen, 2010, p18.
- [14] A. BENAMAROUCHE, « Étude et simulation d'une structure photovoltaïque à base de semiconducteurs II-VI (CdZnTe) », Mémoire Master, Université Saad Dahlab de Blida, 2012, p31.
- [16] A. ADJADJ, « Contribution à l'étude des propriétés physiques des alliages $CaxZn_{1-x}O$ et $CaxZn_{1-x}S$ par la méthode ab-initio FP-LMTO », Thèse De Doctorat, Université Djilali Liabès de Sidi Bel-Abbés, 2016, p11.
- [17] D. LALAM, « Étude et optimisation des cellules solaires en couches minces CdTe/CDs », Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016, p2-3.
- [18] W. ROBERT, MILES, Z. GUILLAUME, I. FORBES, « Inorganic photovoltaic cells », materials today journal, SSN :1369 7021, 2007, p25-26.
- [19] A. LABADI, « Étude et simulation d'une cellule solaire en CIGS par SCAPS », Mémoire Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2022, p31-38-39.
- [20] M. KARA, « Étude et simulation de cellules photovoltaïques à couches minces à base de cis et CIGS », Mémoire Master, Université Abou-Bakr Blekaid Tlemcen. 2012, p-52.
- [21] C. ROGER, « Développement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats métalliques », Thèse Doctorat, Université De Grenoble, 2006, p-17.
- [22] Z. EL JOUAD, « Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques », Thèses De Doctorat, Université d'Angers, 2016, p 40-41.

Chapitre 03

Méthodes et Moyens de Calculs

III.1 Introduction

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

Le logiciel SCAPS-1D acronyme de « **Solar Cell Capacitance Simulator One Dimension** » est un programme développé à l'université de Gent en Belgique avec Windows/CVI National Instruments par Marc Burgelman et AL. Ce programme est conçu spécialement pour la simulation des dispositifs photoniques tels que les cellules au CdTe et CIGS [1].

SCAPS-1D est un logiciel de simulation unidimensionnel de cellules solaires [2].

III.2 Notions de base

SCAPS est un programme orienté Windows, développé avec Lab. Windows/CVI de National Instruments. Nous utilisons ici la terminologie LW/CVI de 'Panel' (les noms utilisés dans d'autres logiciels sont : une fenêtre, une page, un pop-up...). SCAPS s'ouvre avec le « **Action Panel** » [3].

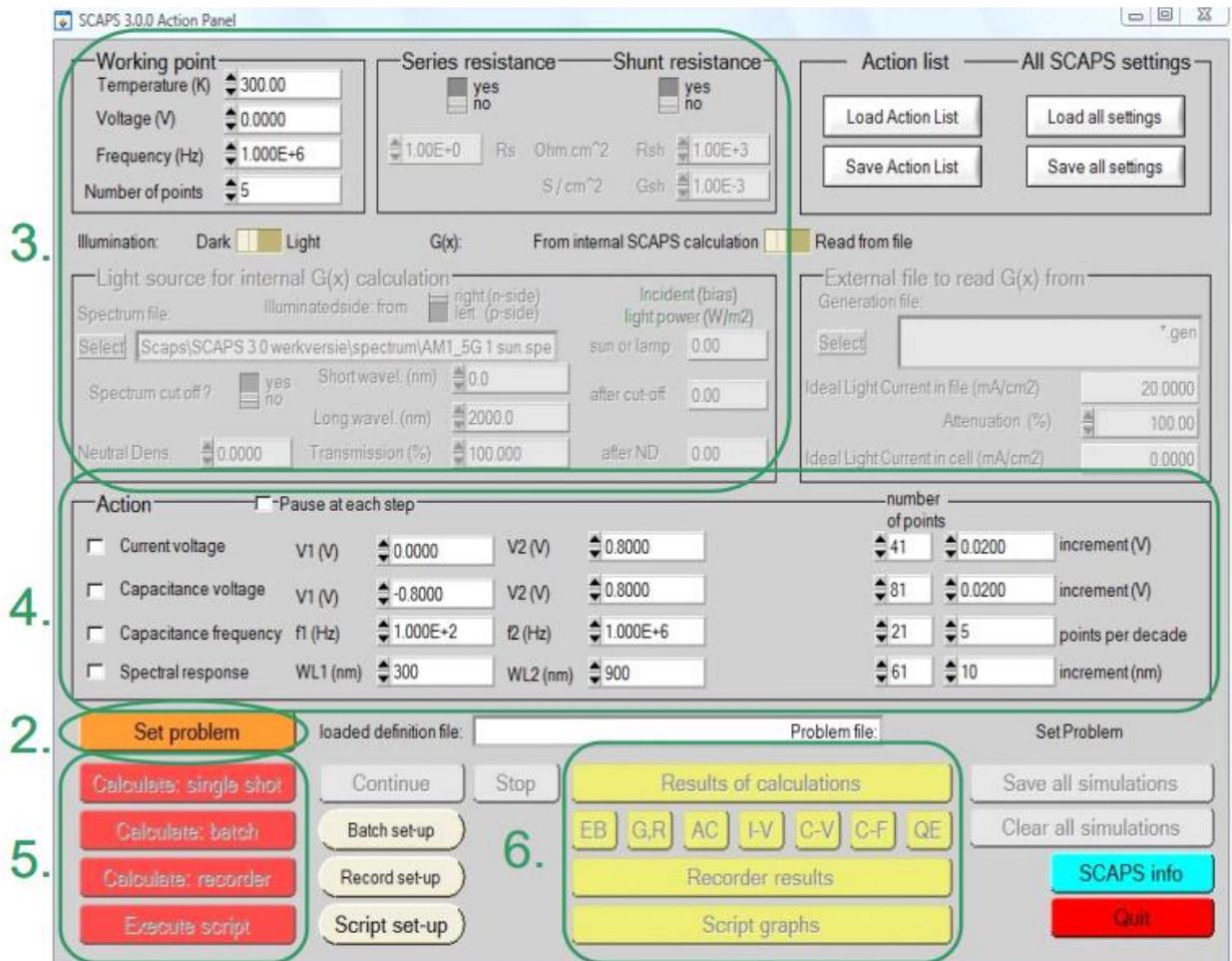


Figure III.1. Panneau de démarrage SCAPS : le panneau Action ou le panneau principal [3].

La signification des blocs numérotés de 1 à 6 est expliquée dans le texte.

Il existe des panels dédiés aux actions de base :

- Lancer SCAPS.
- Définir le problème, donc la géométrie, les matériaux, toutes les propriétés de votre cellule solaire
- Indiquez les circonstances dans lesquelles vous voulez effectuer la simulation, c.-à-d. précisez la personne qui travaille.
- Indiquez ce que vous allez calculer, c.-à-d. quelle mesure vous allez simuler.
- Commencer les calculs.
- Afficher les courbes simulées [3].

Ceci est expliqué plus loin.

III.2.1 Lancer SCAPS

Cliquez sur l'icône au-dessus du bureau ou double-cliquez sur le fichier scaps3200.exe dans le gestionnaire de fichiers (ou toute autre version de SCAPS). SCAPS ouvre avec le panneau d'action [3].



III.2.2 Définir le problème

Cliquez sur le bouton « **Set problem** » dans le panneau d'action, puis sélectionnez « **load** » dans le coin inférieur droit du panneau qui s'ouvre. Sélectionnez et ouvrez par exemple le fichier NUMOS CIGS baseline.def.

Ceci est un fichier exemple d'une cellule solaire à base de CIGS. Par la suite, il est possible de modifier toutes les propriétés de la cellule en cliquant sur 'Set Problem' dans le panneau d'action.

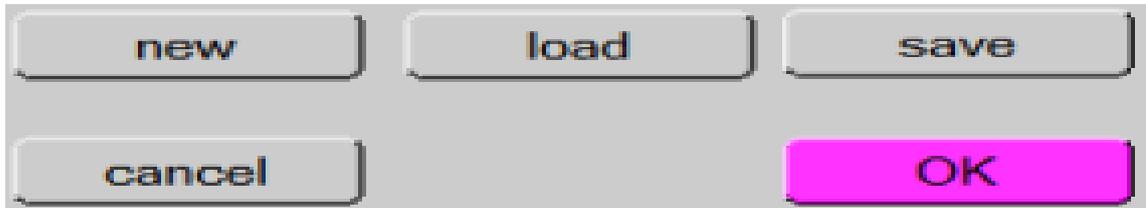


Figure III.2. Définir le problème.[3]

III.2.3 Définir le point de travail

Le point de travail spécifie les paramètres qui ne varient pas dans une simulation de mesure et qui sont pertinents pour cette mesure [3].

Ainsi, la température T est pertinente pour toutes les mesures :

- **La température T** : pertinente pour toutes les mesures. Remarque : dans SCAPS,

Seuls $NC(T)$, $NV(T)$, les vitesses thermiques, la tension thermique kT

Et toutes leurs dérivées sont les seules variables qui dépendent explicitement de la température.

Dépendent explicitement de la température ; vous devez saisir vous-même pour chaque T

Les paramètres correspondants des matériaux.

- **La tension V** : est ignorée dans les simulations I-V et C-V. Il s'agit de la tension de polarisation en courant continu. Il s'agit de la tension de polarisation continue dans la simulation C-f et dans la simulation $QE(\lambda)$.

$QE(\lambda)$. SCAPS démarre toujours à 0 V, et progresse vers la tension du point de travail en un certain nombre d'étapes que vous devez également spécifier.

- **La Fréquence f** : rejetée dans les simulations I-V, $QE(\lambda)$ et C-f. C'est la fréquence de la mesure C-V est simulé.

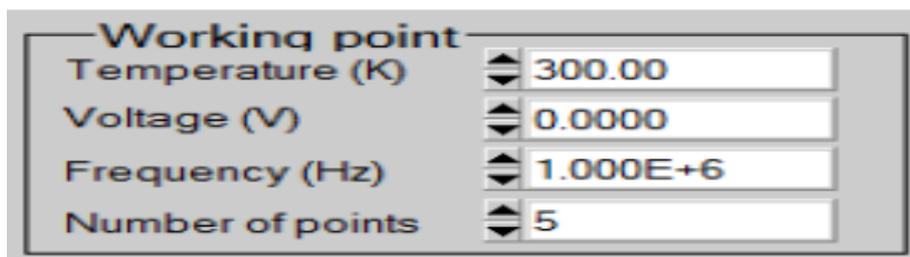


Figure III.3. Définition du point de travail. [3]

- **L'éclairement (illumination)** : utilisé pour toutes les mesures. Pour la mesure de $QE(\lambda)$, il détermine les conditions d'éclairage biais. Les réglages de base sont les suivants : foncé ou clair, choix du côté clair, choix du spectre. Exister un soleil (= 1000 W/m²) utilise le spectre "masse d'air 1,5, global" par défaut, mais vous pouvez choisir parmi une variété de spectres monochromatiques.

Grand choix de lumières et de spectres monochromatiques pour vos simulations professionnelles. Si tu as un Optical Simulator, vous pouvez charger instantanément des fichiers de configuration de construction au lieu d'utiliser des spectres [3].

III.2.4 Sélectionner la ou les mesures à simuler

Dans la partie action du panneau Action, vous pouvez sélectionner une ou plusieurs des mesures suivantes à simuler : I-V, C-V, C-f et $QE(\lambda)$. Ajustez si nécessaire les valeurs de début et de fin de l'argument, et le nombre des étapes. Dans un premier temps, effectuez une simulation à la fois et utilisez des pas assez grossiers : votre ordinateur et/ou le programme SCAPS peuvent être moins rapides que vous ne l'espérez, ou votre problème peut être

vraiment difficile... Un indice : dans une simulation C-V la courbe I-V est également calculée, il n'est donc pas nécessaire de la spécifier séparément [3].

III.2.5 Lancer le(s) calcul(s)

Cliquez sur le bouton Calculer : panneau de bande d'énergie « **Calculate : Single Shot** »

Ouvrir et commencer les calculs [4].



Calculate: single shot

III.2.6 Afficher les courbes simulées

Une fois le calcul terminé, SCAPS passe au panneau de la bande d'énergie, comme indiqué sur la figure (III.4). Dans ce panneau, nous pouvons voir le diagramme de bande d'énergie, la densité de porteurs libre, la densité de courant au dernier point de polarisation. Si nous voulons afficher le résultat Pour les tensions intermédiaires, utilisez le bouton pause sur le panneau de commande. Nous pouvons Utilisez les commandes PRINT, SAVE GRAPHICS, DISPLAY et La valeur est alors affichée à l'écran et peut être coupée et collée, via Par exemple, Excel, ou enregistrer des valeurs dans un fichier de données. Vous pouvez passer à Un de vos panneaux personnalisés (si vous simulez au moins une action La mesure) [4].

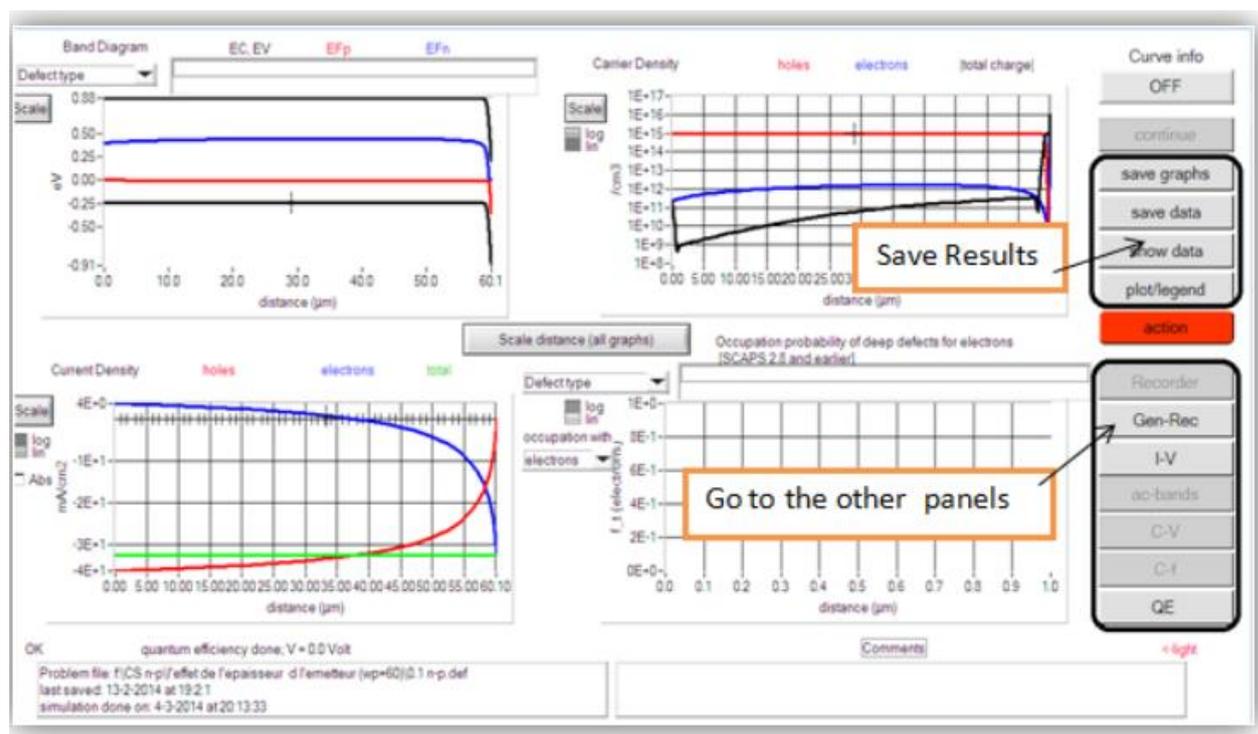


Figure III.4. Panneau des bandes d'énergie [3].

III.2.7 Afficher les courbes I-V

La figure (III.5) montre le panneau d'affichage de la courbe I-V claire et sombre éclairage.

La couleur de la dernière courbe calculée est affichée (lorsque le graphique est trop l'encombrement, nous cliquons sur « **CLEAR ALL GRAPHS** » dans le panneau d'action.

La courbe de rendement Seule la dernière recombinaison simulée est représentée. La couleur la légende correspond à la couleur de la courbe.

Si « **CURVE INFO** » est activé et que vous cliquez sur une courbe graphique, un panneau apparaîtra avec des informations sur le graphique, la courbe et le point cliqué.

Le bouton « **SCALE** » permet de modifier la plage et l'échelle des axes. Si nous appuyons bouton « **CTRL** », on sélectionne une zone rectangulaire dans le graphique, ça va zoomer À l'intérieur de la zone sélectionnée (zoom avant). Accompagné en appuyant sur la touche CTRL Un clic droit fera un zoom arrière [5].

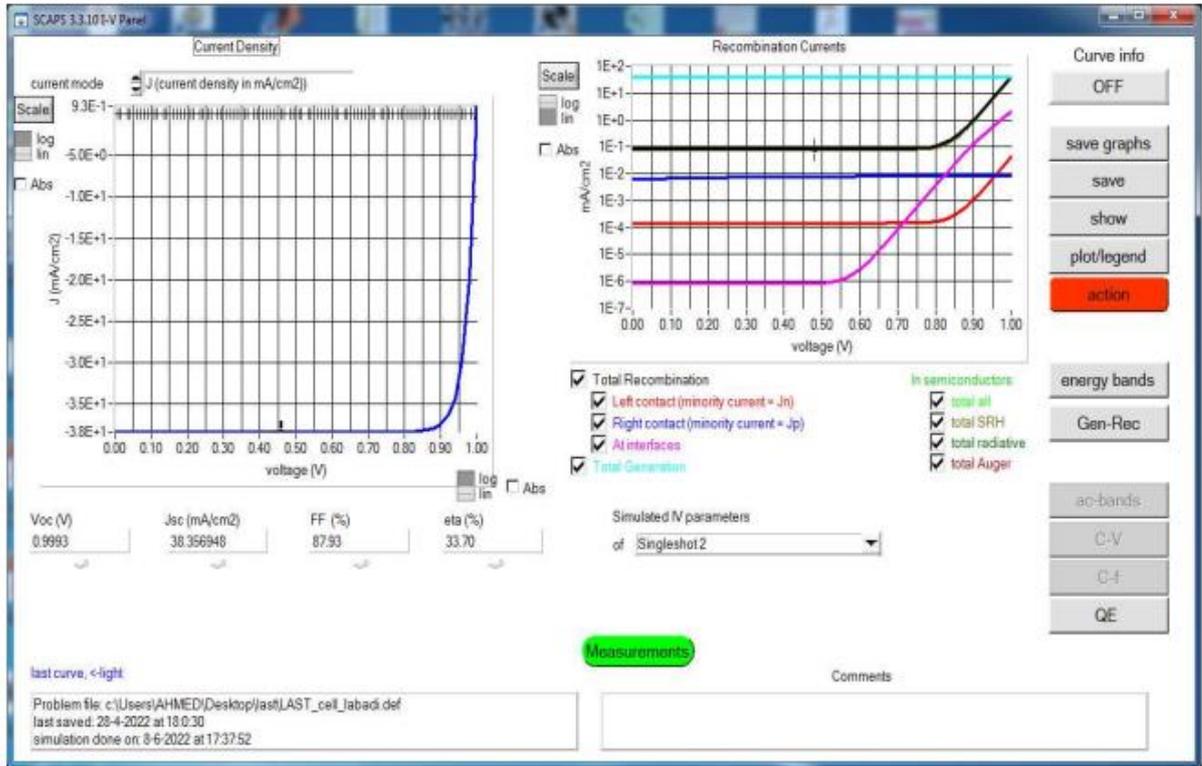


Figure.III.5. Panneau d'affichage de la courbe I-V claire et sombre éclairage.

III.3 Définition d'une cellule solaire

La manière recommandée d'introduire la structure de votre cellule solaire dans SCAPS est d'utiliser l'interface utilisateur graphique.

De cette façon, vous pouvez définir tous les paramètres de manière interactive pendant que SCAPS vous guide, de sorte que vous ne définissez pas de situations impossibles ou irréalistes [3].

III.3.1 Éditer la structure d'une cellule solaire

En cliquant sur le bouton « **SET PROBLEM** » dans le panneau d'action, le panneau « **SOLAR CELL DEFINITION** » (définition de la cellule solaire) s'affiche.

Ce panneau permet de créer/éditer des structures de cellules solaires et de les enregistrer dans des fichiers de définition ou de les charger à partir de ceux-ci. Ces fichiers de définition sont des fichiers ASCII standard avec l'extension "*.def" qui peuvent être lus avec, par

exemple, le bloc-notes. Même si le format de ces fichiers semble s'expliquer de lui-même, il est fortement conseillé de ne pas les modifier manuellement.

Les propriétés de la couche, du contact et de l'interface peuvent être modifiées en cliquant sur la case appropriée, comme le montre la Figure (III.6) De la même manière, les couches peuvent être ajoutées en cliquant sur « **ADD LAYER** » [3].

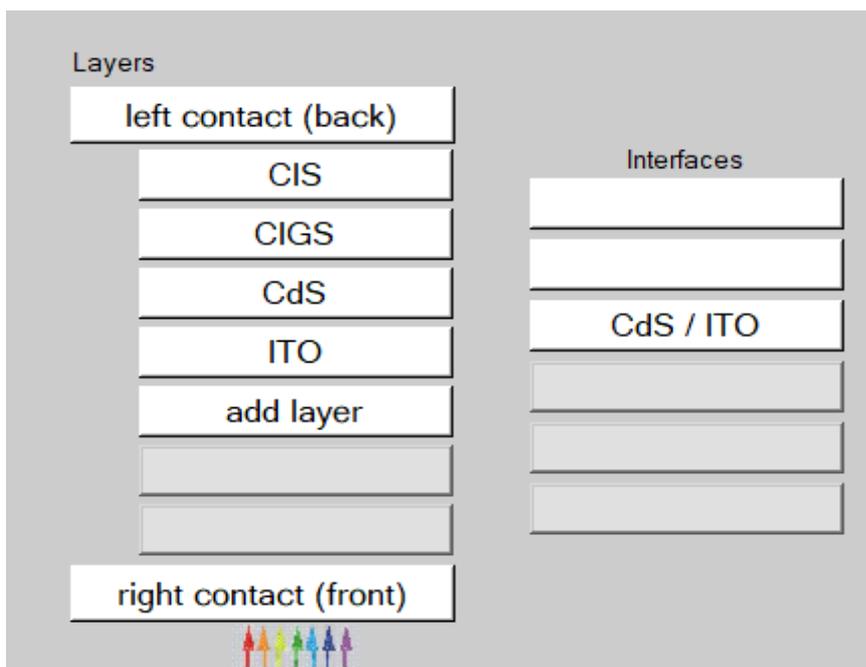


Figure III.6. Définition de la structure d'une cellule solaire

III.4 Définition des couches

En cliquant sur le bouton « **add layer** », une fenêtre s'ouvrira (Figure III.7) avec les différents paramètres du matériau à introduire. Ces paramètres peuvent avoir une distribution uniforme ou non uniforme, selon les propriétés physiques du matériau. Dans la première case, nous introduisons le nom de la couche (correspondant au type de dopage).

Dans la deuxième case, on introduit l'épaisseur de la couche, on introduit : la bande interdite, l'affinité électronique, la constante diélectrique, la densité effective des bandes de conduction et de valence, la vitesse thermique des électrons libres et des trous, la mobilité des électrons et des trous. Enfin, si l'on considère le transport des porteurs par effet tunnel, cela permet d'ajouter la masse effective des électrons et des trous. Si le matériau est un composé élémentaire avec une concentration non uniforme, un

changement progressif des paramètres précédents peut être introduit. Si on introduit des défauts (pièges) ; ils peuvent être homogènes ou non homogènes, discrets, avoir une distribution gaussienne, donneur, accepteur, neutre, monovalent ou bivalent [6].

LAYER 1		CIGS
thickness (μm)	2.000	
	uniform pure A (y=0)	
The layer is pure A: y = 0, uniform	0.000	
Semiconductor Property P of the pure material	pure A (y = 0)	
bandgap (eV)	1.150	
electron affinity (eV)	4.500	
dielectric permittivity (relative)	13.600	
CB effective density of states (1/cm ³)	2.200E+18	
VB effective density of states (1/cm ³)	1.800E+19	
electron thermal velocity (cm/s)	1.000E+7	
hole thermal velocity (cm/s)	1.000E+7	
electron mobility (cm ² /Vs)	1.000E+2	
hole mobility (cm ² /Vs)	2.500E+1	
<input type="checkbox"/> Allow Tunneling	effective mass of electrons	1.000E+0
	effective mass of holes	1.000E+0
no ND grading (uniform)	no ND grading (uniform)	
shallow uniform donor density ND (1/cm ³)	0.000E+0	
no NA grading (uniform)	no NA grading (uniform)	
shallow uniform acceptor density NA (1/cm ³)	1.000E+15	
Absorption interpolation model		
alpha pure A material (y=0)		
from file <input type="checkbox"/> from model <input checked="" type="checkbox"/>		
Set absorption file		
C:\Program Files (x86)\absorption\CdTe IR adapt ed.abs		

Figure III.7. Propriétés de la couche ajoutée.

III.5 Les avantages de SCAPS-1D

- Les utilisateurs peuvent accéder aux fichiers d'entrée au format texte, tels que les données.
- Décrire le spectre et les paramètres de l'appareil.
- Introduire des interfaces et prendre en compte la possibilité de phénomènes Regroupez-vous.
- Introduire une résistance série et obtenir des caractéristiques capacité-tension et fréquence de capacité.
- C'est un logiciel qui fonctionne rapidement [7].

III.6 Inconvénients

L'inconvénient est lié à l'absence de réflexions aux interfaces des différentes couches Formation de cellules non gérées par SCAPS et ses procédures de suivi inflexibles. D'autant plus que lorsque l'appareil est loin d'être idéal et comprend barrière secondaire [8].

Bibliographie

- [1] A. ZOUARI, A. SLIMANI, « Simulation Et Optimisation D'une Cellule Solaire A Base Du Pérovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$ En Architecture NIP » Mémoire De Master, Université Echahid Hamma Lakhdar D'El-Oued, 2019 ,26-p.
- [2] G. BEN ABDERRAZAK, « Étude par simulation numérique de la Cellule solaire à base de CZTS par SCAPS », Mémoire De Master, Université Med Khider Biskra, 2013 ,37-p.
- [3] Marc Burgelman Koen Decock, Alex Niemegeers, Johan Verschraegen, Stefaan Degrave
Version : 26/Novembre /2021.
- [4] C. HOURAI, S. ADJOUT, « Simulation des propriétés et performances des cellules photovoltaïques à base de matériaux semi-conducteurs ternaires CdTeS » Mémoire Master, Université Mohamed El Bachir El-Ibrahimi- Bordj Bou Arreridj, 2019, p-43.
- [5] A. LABADI, « Étude et simulation d'une cellule solaire en CIGS par SCAPS », Mémoire Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2021, p-63.
- [6] A. ALLOUCHE, « Simulation des propriétés et performances des cellules photovoltaïques en couches minces à base des matériaux semi-conducteurs CIGS », Mémoire Master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi–Bordj Bou Arreridj, 2020 ; p-46.
- [7] N. MAHMOUDI, « Effet de CdS sur les cellules solaires CZTS », Mémoire Master, Université Med Khider Biskra, 2018, p-41.
- [8] I. BENNIA, S. DERRADJ, « Simulation numérique et optimisation des performances d'une cellule solaire à pérovskite », Mémoire Master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2021, p-24.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1 Introduction

Avec l'augmentation de la complexité dans tous les dispositifs électroniques, il est devenu nécessaire pour les ingénieurs de conception, de prédire le comportement de ces systèmes avec des modèles rigoureux. La simulation a donc été largement utilisée dans le domaine photovoltaïque afin de déterminer les paramètres les plus importants pour le bon fonctionnement des cellules solaires, de minimiser les pertes et d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule solaire, afin d'obtenir un rendement maximal. La difficulté majeure réside dans le grand nombre de paramètres influençant le rendement [1].

Dans ce chapitre, il s'agit de faire une étude par simulation des structures de cellules solaires basées sur des semi-conducteurs binaires et quaternaires par le logiciel de simulation appelé SCAPS-1D.

Le but principal recherché est de déterminer les performances photovoltaïques de plusieurs structures avec diverses combinaisons notamment de matériaux absorbants et d'essayer d'en déduire la structure optimale.

Dans la première partie de cette étude, nous allons étudier les performances de Cinq structures différentes afin de déterminer la structure optimale, Dans la deuxième partie, Nous simulerons les performances de la structure optimale choisie.

IV.2 Présentation les cellules étude

Des structures avec deux types différents d'absorbants par cellule seront étudiées comme suit :

IV.2.1 La structure de la cellule 1

La cellule simulée est de type ITO(n)/CdS(n)/CIGS(p)/CIS(p), Elle contient respectivement les couches suivantes : La couche fenêtre ITO de conductivité de type n suivie par la couche tampon CdS de type n et l'absorbant1 CIGS de type p et l'absorbant2 CIS de type p.

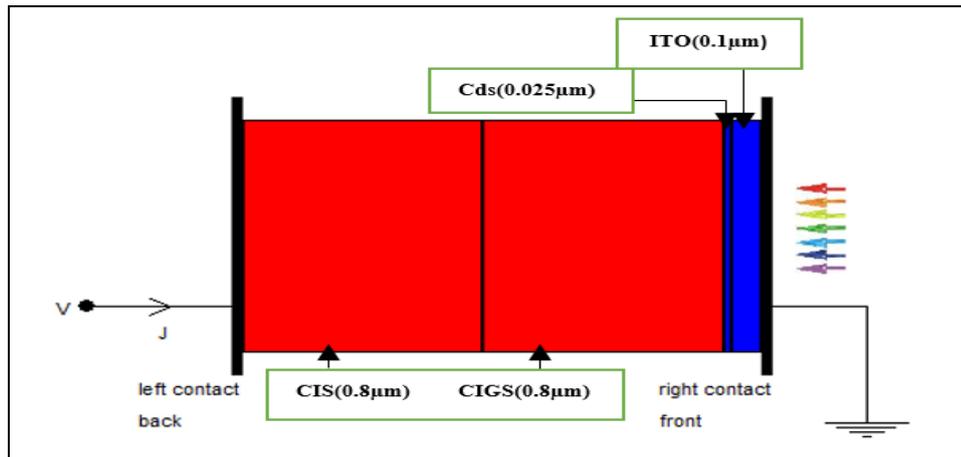


Figure IV.1. Le schéma de la cellule typique de la structure 1 à base de (CIGS/CIS).

IV.2.2 La structure de la cellule 2

La cellule simulée est de type ITO(n)/CdS(n)/CdSTe(p)/CIGS(p), Elle contient respectivement les couches suivantes : La couche fenêtre ITO de conductivité de type n suivie par la couche tampon Cds de type n et l'absorbeur1 CdSTe de type p et l'absorbeur2 CIGS de type p.

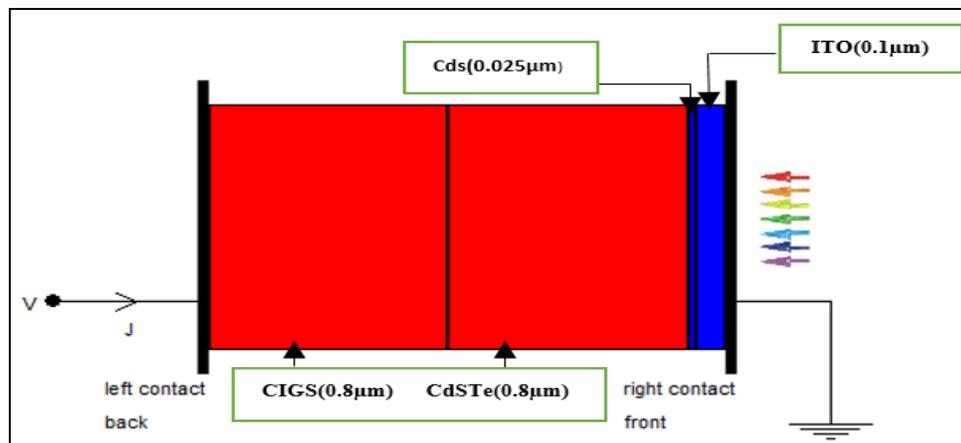


Figure IV.2. Le schéma de la cellule typique de la structure 2 à base de (CdSTe/CIGS).

IV.2.3 La structure de la cellule 3

La cellule simulée est de type ITO(n)/CdS(n)/CIGS(p)/GaAs(p), Elle contient respectivement les couches suivantes : La couche fenêtre ITO de conductivité de type n suivie par la 3couche tampon Cds de type n et l'absorbeur1 CIGS de type p et l'absorbeur2 GaAs de type p.

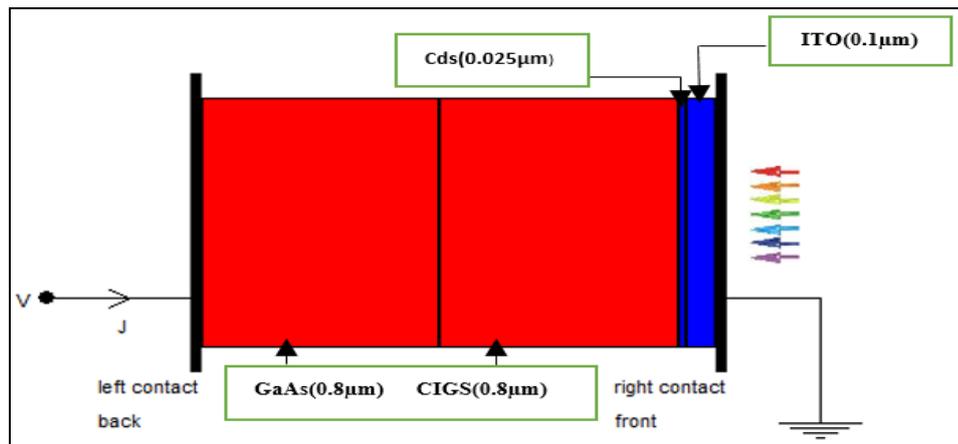


Figure IV.3. Le schéma de la cellule typique de la structure 3 à base de (CIGS/GaAs).

IV.2.4 La structure de la cellule 4

La cellule simulée est de type ITO(n)/CdS(n)/CdSTe(p)/CIS(p), Elle contient respectivement les couches suivantes : La couche fenêtre ITO de conductivité de type n suivie par la couche tampon Cds de type n et l'absorbeur1CdSTede type p et l'absorbeur2 CIS de type p.

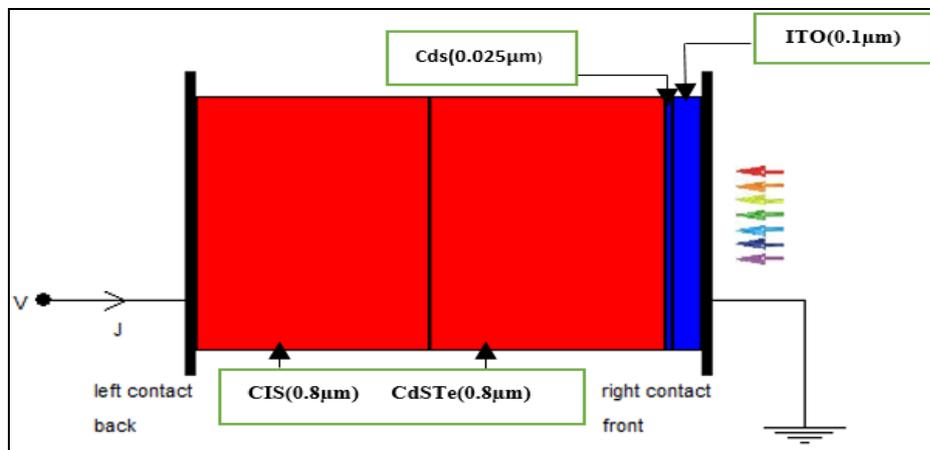


Figure IV.4. Le schéma de la cellule typique de la structure 4 à base de (CdSTe/CIS)

IV.2.5 La structure de la cellule 5

La cellule simulée est de type ITO(n)/CdS(n)/GaAs(p)/CdSTe(p), Elle contient respectivement les couches suivantes : La couche fenêtre ITO de conductivité de type n suivie par la couche tampon Cds de type n et l'absorbeur1CdSTede type p et l'absorbeur2 CIGS de type p.

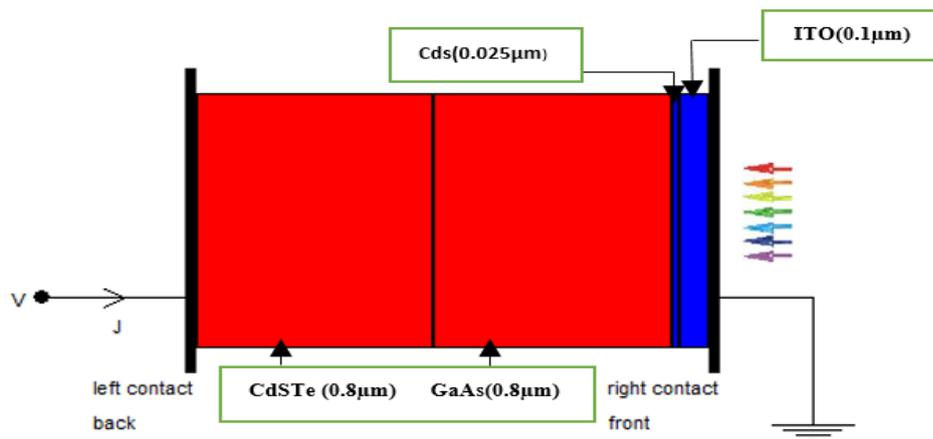


Figure IV.5. Le schéma de la cellule typique de la structure 5 à base de (GaAs/CdSTe).

IV.3 Différents paramètres des cellules étudiées

Le tableau suivant tableau (IV-1), regroupe les paramètres physiques utilisés dans la simulation. Le choix de ces valeurs est guidé par le modèle dans le logiciel SCAPS et quelques structures de laboratoires.

Tableau IV.1. Les paramètres physiques de simulation [2,3].

A. Propriétés générales de dispositif		
	Devant	Arrière
Φ_b (eV)	$\Phi_{bn}=0.1$	$\Phi_{bp}=0.$
Se(cm/s)	10^7	10^7
St(cm/s)	10^7	10^7
Réfectivité	0.1	0.8

B. Propriétés des couches						
	ITO	CdS	Cd Ste	GaAs	CIGS	CIS
E_g (eV)	3.65	2.4	1.4	1.424	1.15	1.02
ϵ/ϵ_0	8.9	10	9.4	12.91	13.6	13.6

$\mu_e(\text{cm}^2/\text{Vs})$	100	100	100	8000	100	100
$\mu_h(\text{cm}^2/\text{Vs})$	100	25	25	400	25	25
$N_c(\text{cm}^{-3})$	5.2×10^{18}	8×10^{17}	8×10^{17}	4.25E+17	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}
$N_v(\text{cm}^{-3})$	10^{18}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	8.16E+18	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}
$N_{D/A}(\text{cm}^{-3})$	10^{20}	$N_D: 10 \times 10^{17}$	$N_A: 5 \times 10^{15}$	$N_A: 10^{15}$	$N_A: 2 \times 10^{16}$	$N_A: 2 \times 10^{16}$
X (eV)	4.7	4.5	4.28	4.07	4.5	4.5
C. Paramètres de défauts						
	ITO	CdS	CdSTe	GaAs	CIGS	
Type de défaut	Neutre	Neutre	/	/	Neutre	
Distribution énergétique	Single	Single	/	/	Single	
Énergie de piège (eV)	1.8	1.2	/	/	0.1	
Sigma n (cm2)	10^{-12}	10^{-12}	/	/	5.10^{-13}	
Sigma p (cm2)	10^{-12}	10^{-12}	/	/	10^{-15}	

IV.4 Détermination de la structure optimale

Le but est de calculer leur performance afin de trouver la structure optimale. Les paramètres photovoltaïques des cellules solaires sont : Le rendement de conversion (η), le facteur de forme (FF), la densité de courant de court-circuit (J_{cc}) et la tension de circuit-ouvert (V_{co}) de chaque cellule solaire simulée.

Les épaisseurs utilisées dans notre étude sont : $0.1\mu\text{m}$ pour la couche fenêtre ITO, $0.025\mu\text{m}$ pour la couche tampon CdS et $0.8\mu\text{m}$ pour tous les absorbeurs utilisés.

IV.4.1 Effet de déferente structure solaire sure Les caractéristiques essentielles de la cellule photovoltaïque

Tableaux IV.2. Les Paramètres photovoltaïque des structures simulées.

N° Structure	JCC (MA/cm2)	VCO (Volt.10 ⁻¹)	FF (%)	η (%)
Structure1	24.371061	6.268	79.10	12.08
Structure2	29.822532	12.711	53.80	20.39
Structure3	28.603877	7.187	83.93	17.25
Structure4	29.956511	13.371	51.83	20.76
Structure5	31.227501	10.318	68.05	21.93

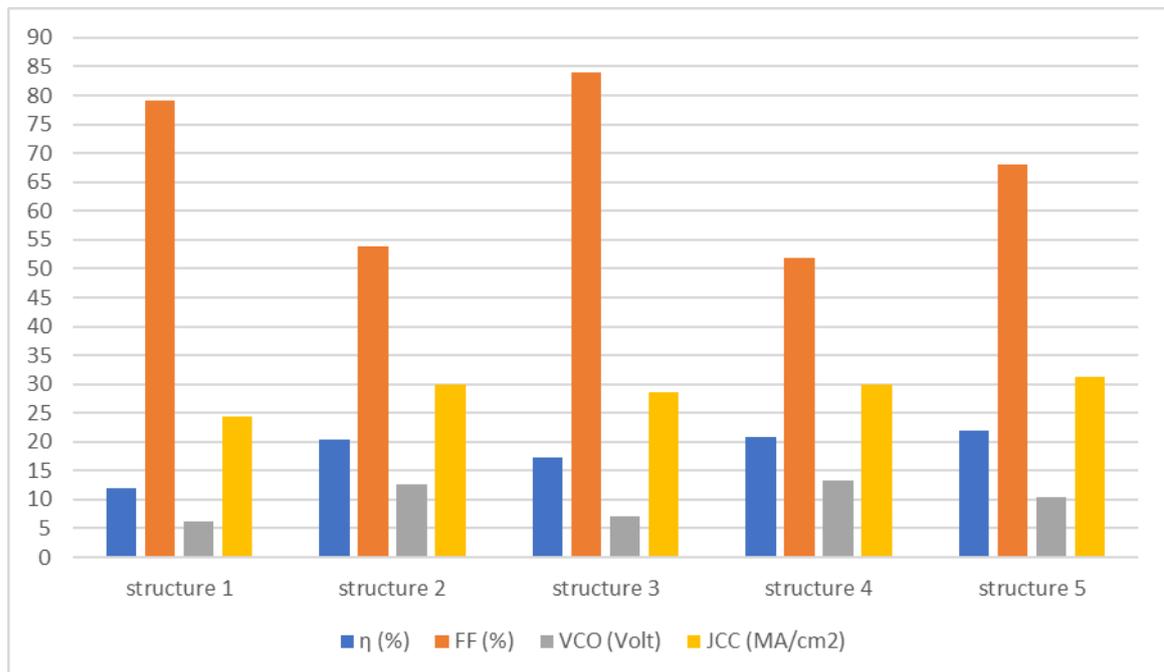


Figure IV.6. La variation des caractéristiques essentielles des cellules solaires simulée.

IV.4.2 Effet de déferente structure solaire inversée sure Les caractéristiques essentielles de la cellule photovoltaïque

Dans cette partie on va inversée l'ordre des absorbeurs utilisés dans chacune des structures des cellules solaires représentées en (IV.2) pour étudier l'effet sur les caractéristiques essentielles de la cellule solaire.

Tableaux IV.3. Les Paramètres photovoltaïque des structures solaires inversée simulées

N° Structure	JCC (MA/cm2)	VCO (Volt.10 ⁻¹)	FF (%)	η (%)
Structure1	45.442770	6.361	83.71	24.96
Structure2	30.221723	7.179	84.05	18.24
Structure3	29.863063	9.038	74.41	20.08
Structure4	29.391954	28.729	25.74	21.74
Structure5	29.870851	9.303	77.33	20.38

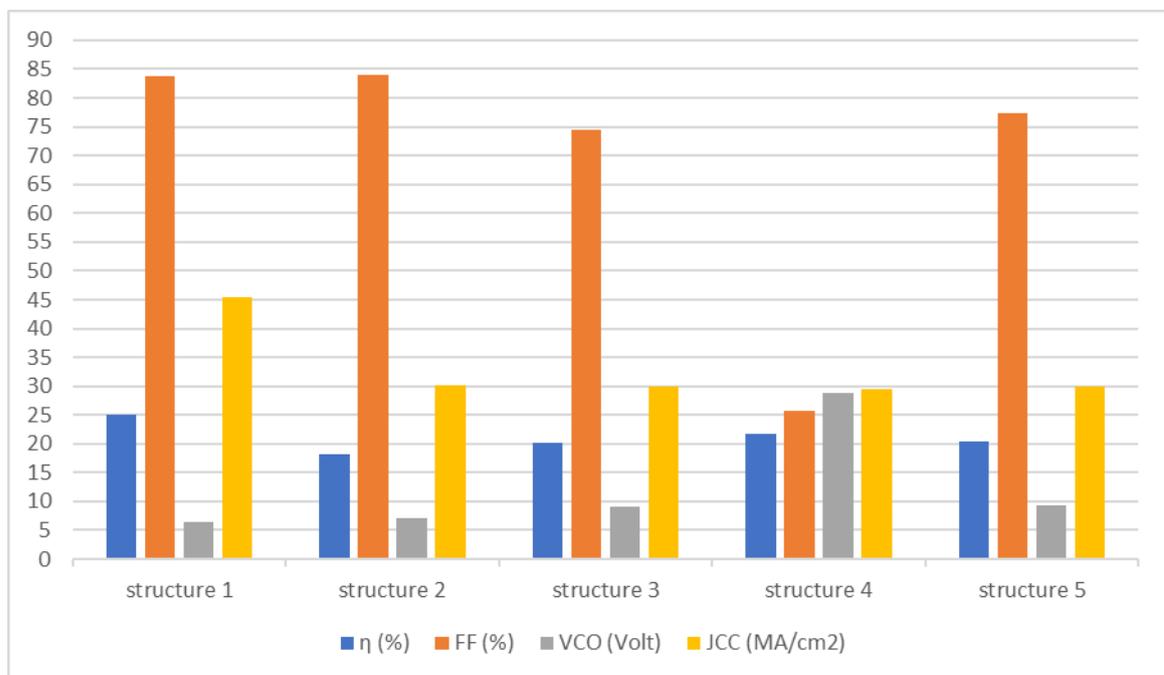


Figure IV.7. La variation des caractéristiques essentielles des cellules solaires inversée simulée.

IV.4.3 Comparaisons entre tous les caractéristiques essentielles des cellules simulées et définir la structure optimale

Afin de pouvoir comparer les diverses structures proposées à l'étude, une comparaison des caractéristiques essentielles est faite à travers les figures suivantes :

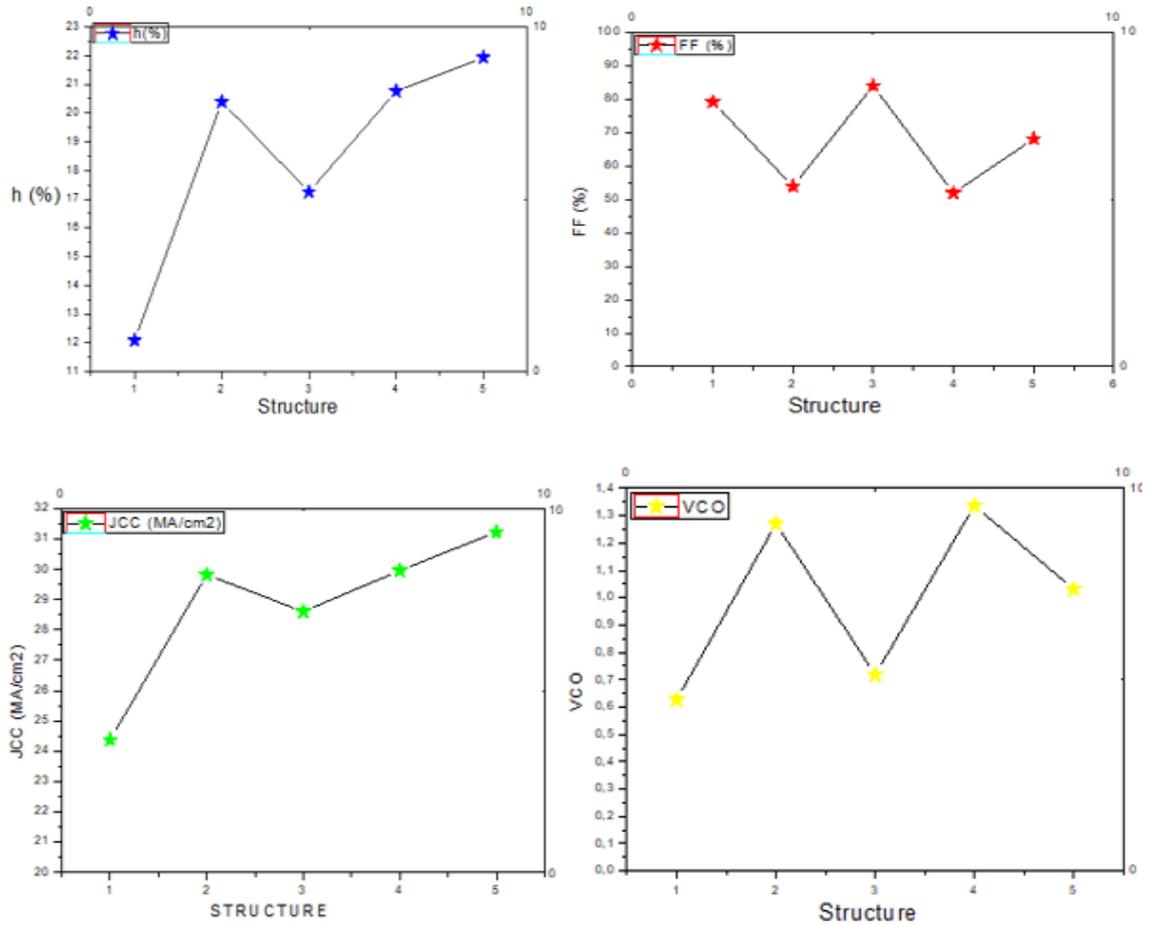


Figure IV.8. La variation des caractéristiques essentielles de la cellule solaire en fonction de différent structure simulée.

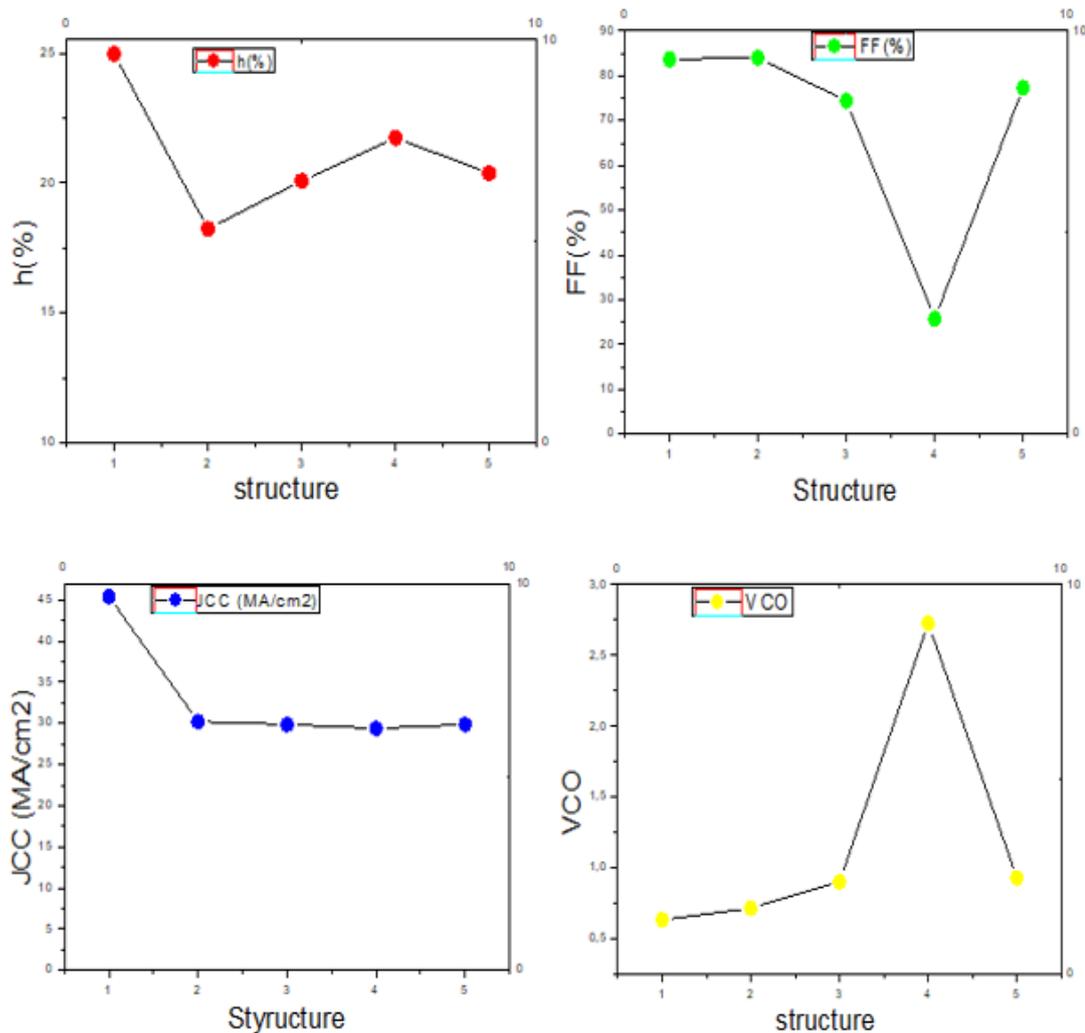


Figure IV.9. La variation des caractéristiques essentielles de la cellule solaire en fonction de différent structure inversée simulée.

D’après les figures (IV.8) et (IV.9), Il en ressort très clairement que la structure 5 de la cellule solaire ITO/CdS/GaAs/CdSTe présente les meilleures performances (η (%) =21.93 ; **FF** (%) =68.05 ; **VCO** (Volt)=1.031 ; **JCC** (MA/cm²) =31.22), Ainsi, dans le reste de ce travail on va orienter notre étude vers la simulation des propriétés de la cinquième structure uniquement.

IV.5 Étude du comportement de la structure optimale

IV.5.1 Effet de la variation l’épaisseur des couches absorbeurs

Dans cette partie, il s’agit de l’étude de l’effet de changement l’épaisseur de l’absorbeur 1 et 2 sur les caractéristiques principales et sur la réponse spectrale de la cellule.

IV.5.1.1 l'effet de variation l'épaisseur de la couche absorbeur (GaAs) sure les caractéristiques principales de la cellule

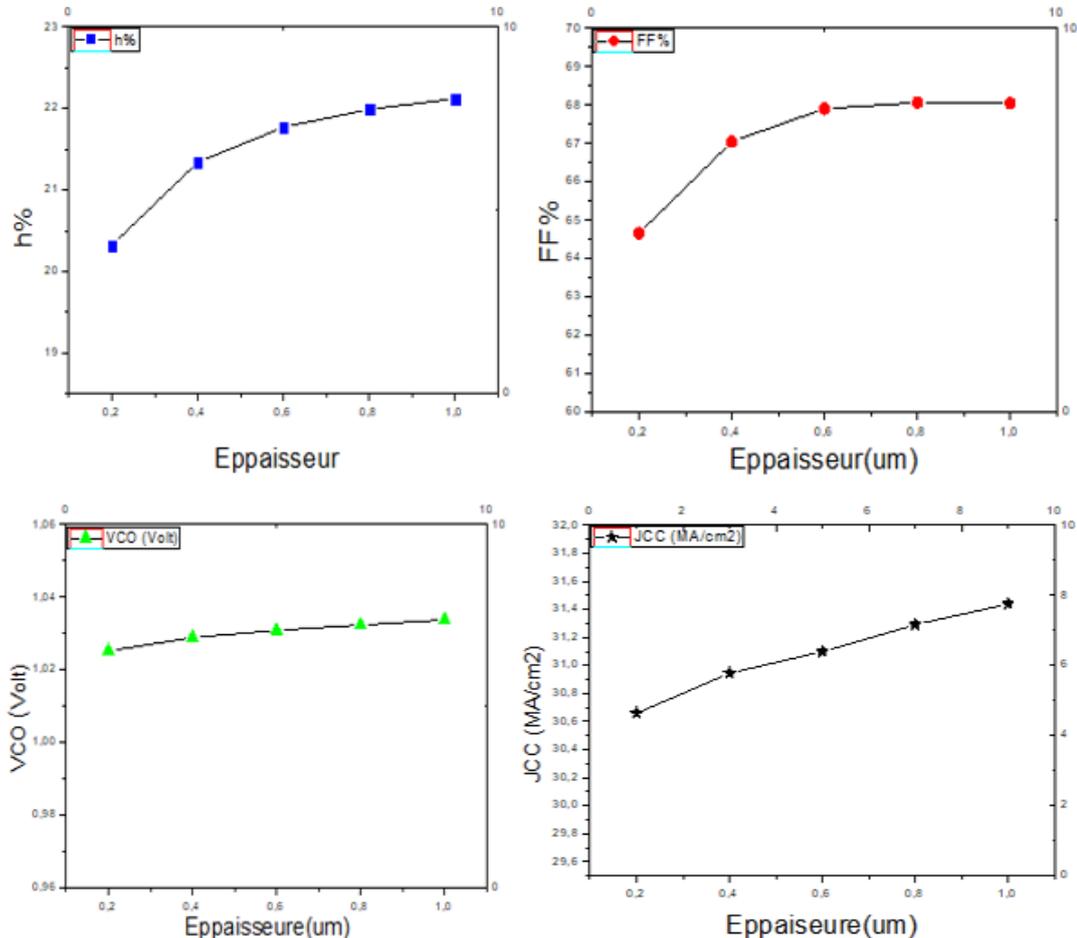


Figure IV.10 : Les caractéristiques Voc, Jsc, FF (%) et η (%) en fonction de l'épaisseur de GaAs.

Avec l'augmentation de l'épaisseur de l'absorbeur GaAs, on observe une augmentation des caractéristiques Voc, Jsc, facteur de forme et le rendement η, de la cellule simulée. Ce qui est tout à fait logique, puisque c'est dans cette dernière que se passe le phénomène de captage des photons et de conversion photovoltaïque. Plus l'épaisseur est importante, la probabilité du captage augmente et les propriétés de la cellule sont meilleures.

La meilleure épaisseur de la couche GaAs entre (0.6-0.8 μm).

IV.5.1.2 l'effet de variation l'épaisseur de la couche absorbeur (GaAs) sure la réponse spectrale (QE%)

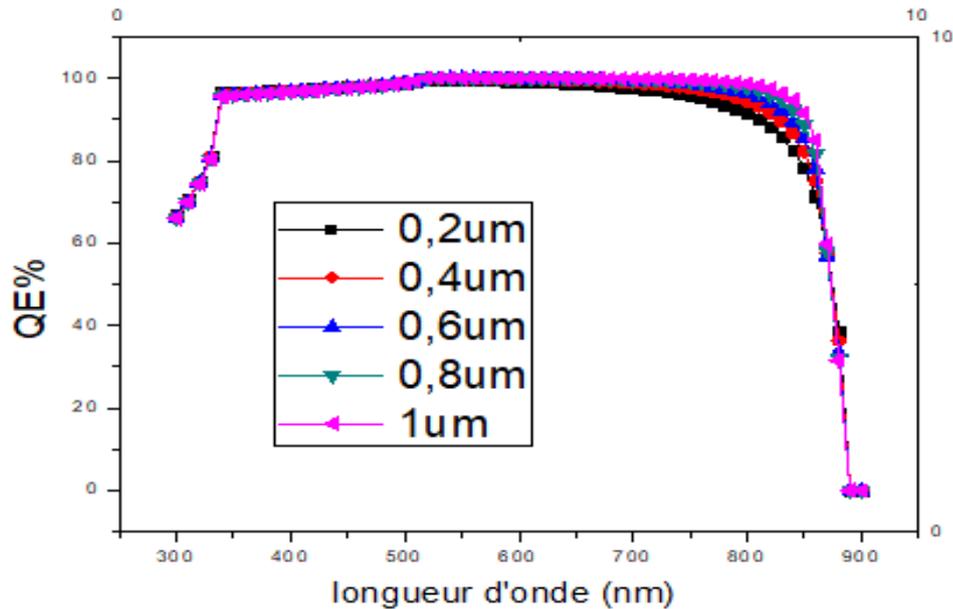


Figure IV.11. Effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbante GaAs sur la réponse spectrale

La figure (IV.11) représente la variation du rendement quantique (QE%) en fonction de l'abaisseur de GaAs dans l'intervalle de longueur d'onde (300μm-900μm), on remarque que la réponse spectrale est maximale dans un large intervalle de longueur du rayonnement incident, elle est maximale de 350 à 880 nm.

Dans l'intervalle (700-880) de longueur d'onde on observe une augmentation du rendement quantique en fonction de l'augmentations de l'épaisseur de GaAs.

IV.5.1.3 Effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbeur (CdSTe) sur les caractéristiques principales de la cellule solaire

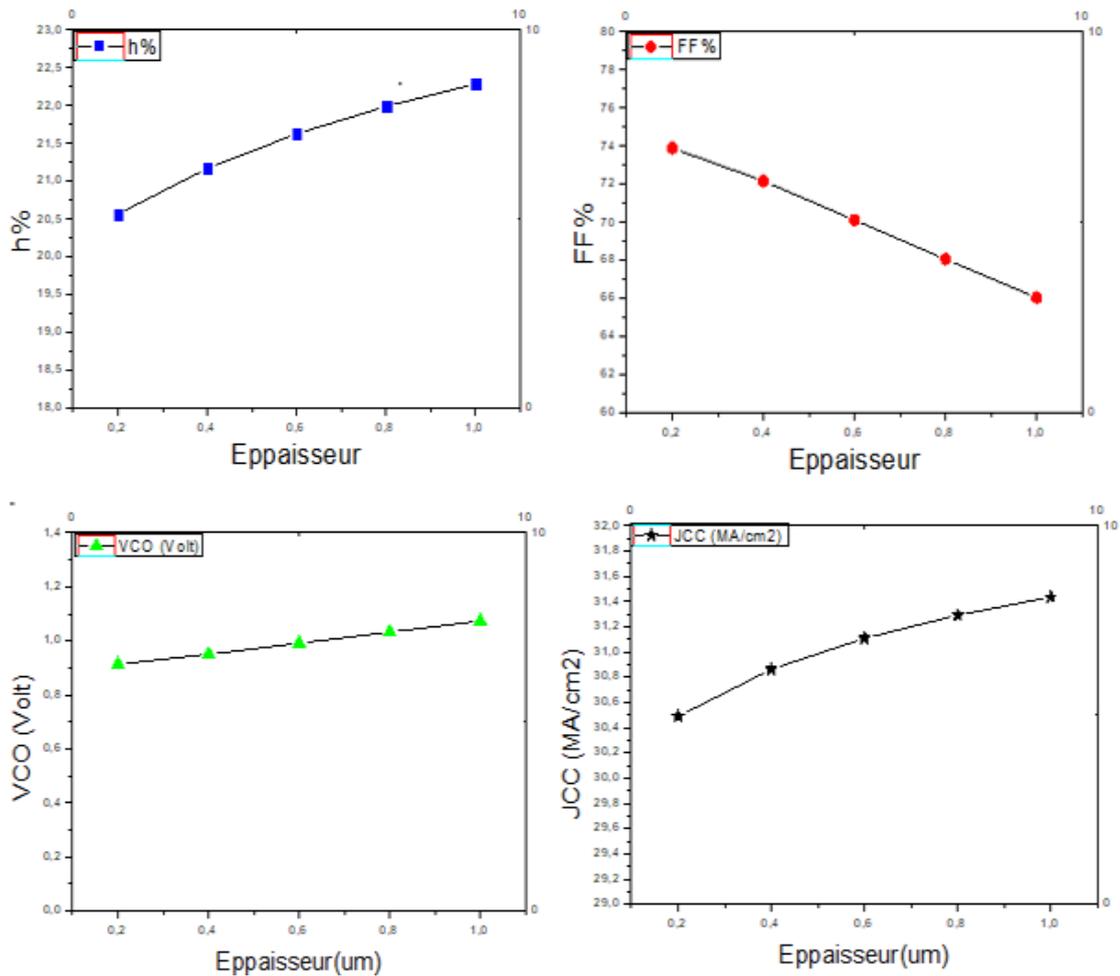


Figure IV.12. Les caractéristiques Voc, Jsc, FF (%) et η (%) en fonction de l'épaisseur de CdSTe.

Avec l'augmentation de l'épaisseur de l'absorbeur CdSTe, on observe une augmentation des caractéristiques Voc, Jcc, et le rendement η, et une légère dégradation du facteur de forme. La meilleure épaisseur de la couche CdSTe entre (0.8-1 μm).

IV.5.1.4 Effet de variation l'épaisseur de la couche absorbeur (CdSTe) sure la réponse spectrale (QE%)

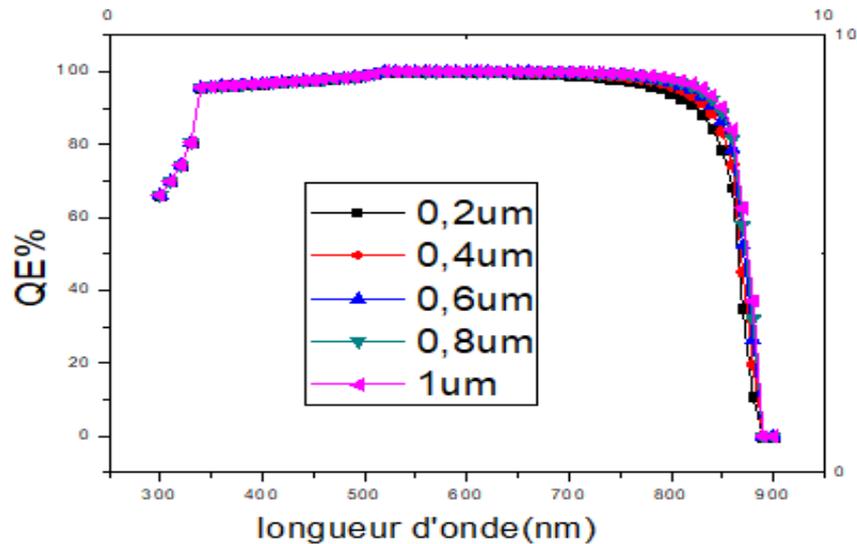


Figure IV.13. Effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbante CdSTe sur la réponse spectrale.

Ce graphe représente la variation du rendement quantique (QE%) en fonction de l'épaisseur de CdSTe dans l'intervalle de longueur d'onde (300 nm-900 nm). D'après le graphique, on remarque que la réponse spectrale est maximale dans un large intervalle de longueur du rayonnement incident. Elle est maximale de 350 à 850 nm. Dans l'intervalle (750-850) de longueur d'onde on a observé une augmentation du rendement quantique à l'effet de l'augmentation de l'épaisseur de CdSTe.

IV.5.2 Étude de l'effet de changement de la couche fenêtre sur les caractéristiques principale de la cellule solaire

Les caractéristiques principales des deux cellules SnO₂/CdS/GaAs/CdSTe et ITO/CdS/GaAs/CdSTe sont données dans le tableau comparatif suivant :

Tableau IV.4. : l'effet de changement de la couche fenêtres sur les caractéristiques principale.

Caractéristiques principales	Avec couche SnO2 (0.1 μm)	Avec couche ITO (0.1 μm)
Rendement η (%)	22.56	21.97
FF%	66.11	68.07
Voc (V)	1.0900	1.0324
J sc (mA/cm²)	31.304626	31.291156

Il est clair d'après le tableau (IV.3) que la structure SnO₂/CdS/GaAs/CdSTe présente une performance meilleure que la structure ITO/CdS/GaAs/CdSTe. L'amélioration est enregistrée surtout dans le rendement de conversion Avec l'utilisation d'une couche fenêtre de type SnO₂, on obtient un rendement (η =22.56).

IV.5.3 Étude de l'effet de l'ordre des deux couches absorbeurs

Dans cette partie nous allons voir l'effet de l'ordre des couches absorbeurs utilisées sur les caractéristiques principales et le rendement quantique de la cellule solaire.

Les structures sont comme suit :

. Structure 1 (ITO/CdS/GaAs/CdSTe)

. Structure 2 (ITO/CdS/CdSTe/GaAs)

IV.5.3.1 Effet sur les caractéristiques principales de la cellule solaire

Tableau IV.5. Les caractéristiques principales de deux structures solaires différent.

	η (%)	FF%	Voc (V)	J sc (mA/cm²)
Structure 1	21.93	68.05	1.0318	31.227501
Structure 2	20.38	77.33	9.303	29.870851

D'après ce tableau (IV.4), on n'observe que le rendement (η %) et J_{sc} obtenu par la simulation de la structure 1 et nettement meilleur que celui obtenu par la structure 2, par contre pour le facteur de forme et V_{oc} le meilleur résultat enregistré dans la structure 2.

IV.5.3.2 Effet sur la réponse spectrale de la cellule solaire

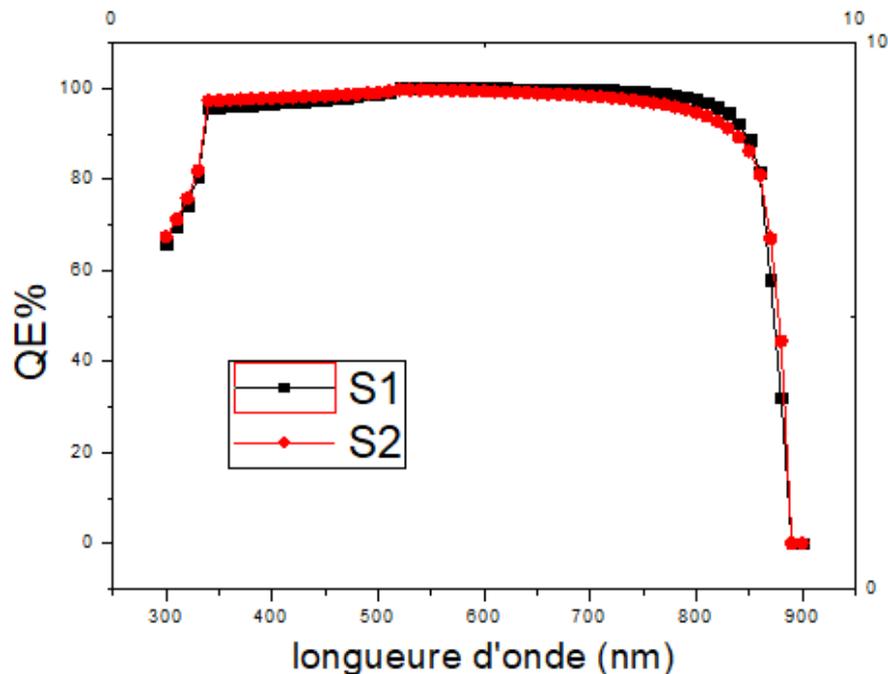


Figure IV.14. Effet de la variation de l'ordre de les deux couche absorbeurs sure la réponse spectrale (S1 : structure1 ; S2 : structure 2).

La figure (IV.14), représente la variation du rendement quantique (QE%) en fonction de l'ordre des couches absorbeurs dans l'intervalle de longueur d'onde (300nm-900nm).

Dans l'intervalle de longueur d'onde(300nm-750) les courbes sont presque parfaitement superposées et ainsi, on peut noter qu'aucun effet notable n'est observé lors de cette dernière variation et le même comportement est enregistré quelques soit l'ordre différent des couches absorbeurs dans la gamme choisie.

Et existe une légère différent entre (750nm-850nm) où la structure 1 présente une réponse bien meilleure).

Donc la réponse spectrale ne dépend pas de l'ordre de la couche absorbeur.

IV.5.4 Effet de la variation de l'épaisseur de la couche tampon CdS sur les caractéristiques principales

La gamme de la variation de l'épaisseur que nous avons choisie pour l'étude de l'influence de l'épaisseur de la couche tampon CdS sur les caractéristiques de notre cellule solaire est comprise entre 0.01 et 0.08 μm .

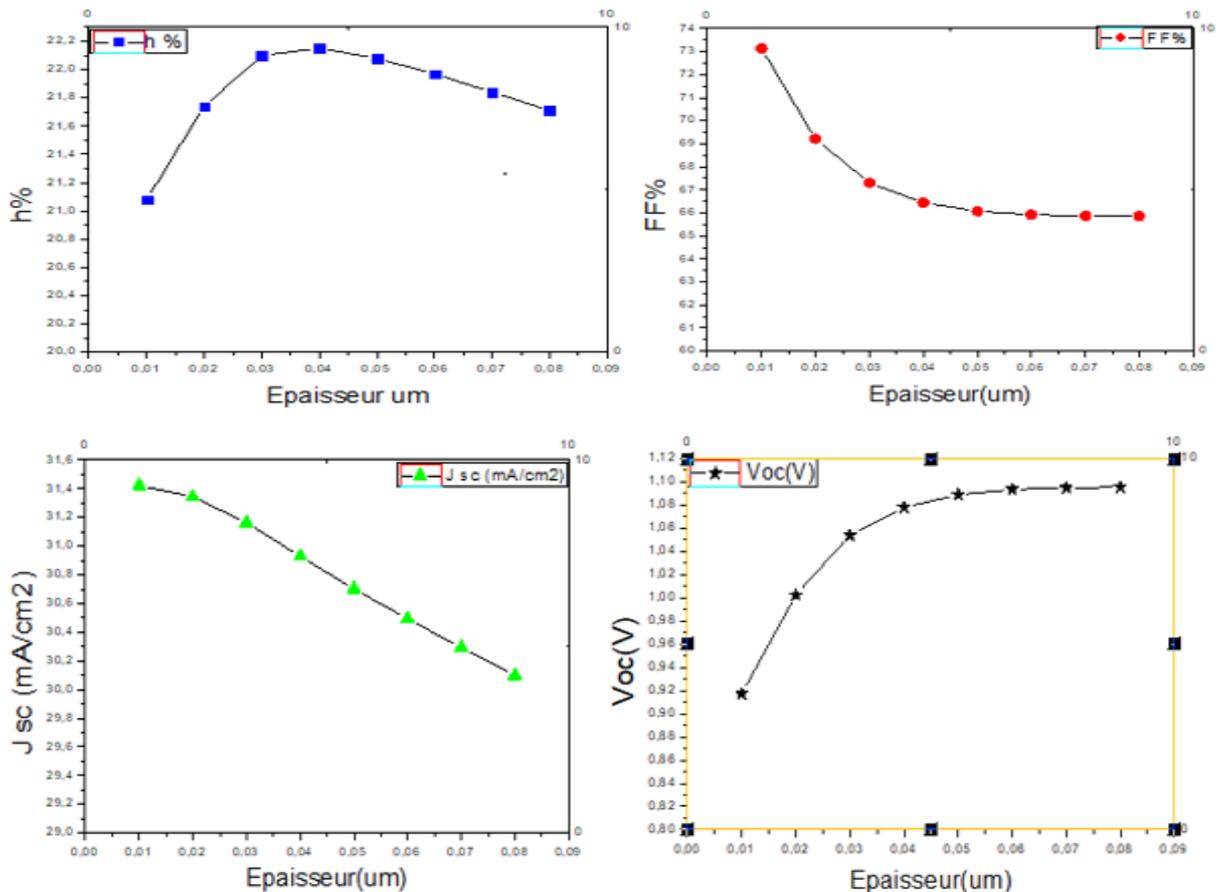


Figure IV.15. Les caractéristiques V_{oc} , J_{sc} , FF (%) et η (%) en fonction de l'épaisseur de la couche CdS.

Avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche CdS, on observe une diminution des caractéristique J_{sc} et FF et augmentation de V_{oc} et pour le rendement enregistre augmentation entre la valeur de l'épaisseur (0.1-0.4 μm) et diminution dans l'intervalle (0.4-0.8 μm).

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous sommes appuyés sur le logiciel le plus adapté à la conversion photovoltaïque des dispositifs à semiconducteurs, qui est le SCAPS -1D.

Notre travail est partagé en deux parties principales :

Dans la première partie, nous avons étudié les performances des cellules solaires en matériaux semi-conducteurs binaire et quaternaire dans le but de déterminer la structure optimale.

Dans la deuxième partie, nous avons étudié l'effet de plusieurs paramètres physiques et géométriques de la structure optimale, tel que : l'épaisseur de la couche absorbeurs, rendement quantique et les performances photovoltaïques suivantes : J_{cc} , V_{co} , FF, η .

Pour atteindre ce but, on a étudié en premier lieu, l'effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbeur, dans les deux types de matériaux GaAs et CdSTe sur les performances d'une cellule solaire et la réponse spectrale.

En second lieu, une petite comparaison entre les résultats obtenus par la simulation de la cellule SnO₂/CdS/GaAs/CdSTe et ceux des performances et propriétés de la cellule photovoltaïque ITO/CdS/GaAs /CdSTe.

En troisième lieu, on a étudié l'effet de l'ordre de les couche absorbeur utiliser sure les caractéristique principale et le rendement quantique de la cellule solaire.

En fin, l'étude de l'Effet de la variation de l'épaisseur de la couche tampon CdS sur les caractéristiques principales a été faite.

Bibliographie

- [1] Y. BOUMAMI, E. KHELIFA, « Simulation et optimisation des cellules solaires hybrides CH₃NH₃PbI₃/CIGS par le logiciel SCAPS », Mémoire Master, UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2022, p-46.
- [2] HOUARI. C, ADJOUT. S, Simulation Des Propriétés Et Performances Des Cellules Photovoltaïques A Base De Matériaux Semi-Conducteurs Ternaires CdTeS, Mémoire Master, UNIVERSITÉ MOHAMED EL BACHIR EL-IBRAHIMI-BORDJ BOU ARRERIDJ, 2020, p 54-55.
- [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 Bou Arreridj, 2020, p-50.

Conclusion générale

Actuellement, les filières de cellules solaires basées sur la technologie en couches minces sont en plein essor. Ce type de cellules permet de convertir le maximum de photons en électricité en utilisant le minimum de matériaux réactifs ce qui réduit le coût de fabrication.

L'objectif assigné à ce travail était d'étudier les propriétés et les performances de nouvelles structures de cellules photovoltaïques à base de différentes combinaisons de deux couches absorbeurs semi-conducteurs binaires et quaternaires simulation numérique basée sur le logiciel SCAPS -1D.

Soumise à l'éclairement AM1.5G, les diverses structures de cellules ont été simulées où nous avons générer leurs caractéristiques électriques telles que : la densité de courant-tension (J-V), la densité de courant de court-circuit (JCC), la tension de circuit-ouvert (VCO), le facteur de remplissage (FF) et le rendement de conversion photovoltaïque (η).

Pour atteindre ce but on a étudié en premier lieu, les paramètres photovoltaïques de Cinq structures des cellules solaires à multijonction dans le but était de déterminer la structure optimale.

Dans un deuxième lieu, les caractéristiques ont été étudiées et analysées pour la structure optimale de cellule solaire (ITO/CdS/GaAs/CdSTe) sous la variation des grandeurs des paramètres suivants :

- ✓ L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbeur, dans les deux types de matériaux GaAs et CdSTe, sur les performances de la cellule solaire, on a constaté que la meilleure épaisseur entre (0.6-0.8 μ m) pour le GaAs et (0.8-1 μ m) pour l'absorbeur CdSTe.
- ✓ L'influence de la nature des couches fenêtres entre SnO₂ et ITO sur la cellule solaire optimale montre que les performances des cellules SnO₂/CdS/GaAs/CdSTe sont nettement meilleures que celles de la cellule ITO/CdS/GaAs/CdSTe.
- ✓ L'effet de l'ordre des couches absorbeurs utilisées sur les caractéristiques principales et le rendement quantique de la cellule solaire, on a constaté que la structure 1 donne les meilleures performances.

CONCLUSION GÉNÉRALE

- ✓ L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche Tampon CdS, a montré que l'augmentation de l'épaisseur implique une amélioration le rendement conversion de la cellule solaire. on a constaté que la meilleure épaisseur de la couche CdS entre (0.01-0.04 μm)

Résumé

Notre travail consiste en la simulation des performances des cellules solaires à base de semi-conducteurs binaire et ternaire. Les paramètres de la cellule sont principalement : le rendement quantique et les caractéristiques essentielles de la cellule : le rendement ($\eta\%$), le facteur de forme (FF), la tension de circuit ouvert (V_{co}), la densité de courant de court-circuit (J_{sc}) Les effets de la variation de plusieurs paramètres tels que : la nature de couche fenêtre, le matériau absorbeur, l'épaisseur des différentes couches, l'ordre des couche, ...etc., ont été étudiés et discutés. Cette étude a montré également que le logiciel SCAPS-1D utilisé est un outil très pratique et permet de suivre l'évolution des performances des cellules avec succès.

Mots clés : La Lumière, L'absorbance, binaire, ternaire, Energie Renouvelable, Energie Solaire, Conversion Photovoltaïque.

المخلص

يتكون عملنا في محاكاة أداء الخلايا الشمسية على أساس أشباه الموصلات الثنائية والثلاثية. المعلمات من الخلية هي أساسا: كفاءة ، والكثافة الحالية ماس (V_{OC}) ، والجهد الدائرة المفتوحة (FF) الكم والخصائص الأساسية للخلية: الكفاءة ($\eta\%$)، وعامل الشكل آثار الاختلاف من عدة معلمات مثل: طبيعة النافذة، والمواد امتصاص، وسمك طبقات مختلفة، وترتيب الطبقات، (J_{CC}) كهربائي الخ، تمت دراستها ومناقشتها. أظهرت هذه الدراسة أيضا أن برنامج سكايس-1 المستخدم هو أداة عملية للغاية ويجعل من الممكن متابعة تطور أداء الخلايا بنجاح

الكلمات المفتاحية: الضوء، الامتصاص، ثنائي، ثلاثي، الطاقة المتجددة، الطاقة الشمسية، التحويل الكهروضوئي.

Abstract

Our work consists in the simulation of the performances of solar cells based on binary and ternary semiconductors. The parameters of the cell are mainly: the quantum efficiency and the essential characteristics of the cell: the efficiency ($\eta\%$), the form factor (FF), the open circuit voltage (V_{co}), the short-circuit current density (J_{sc}) The effects of the variation of several parameters such as: the nature of the window, the absorbing material, the thickness of the different layers, the order of the layers, ... etc., have been studied and discussed. This study also showed that the SCAPS-1 software used is a very practical tool and makes it possible to follow the evolution of the performance of the cells successfully.

Key words: Light, Absorbance, binary, ternary, Renewable Energy, Solar Energy, Photovoltaic Conversion.