

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Electronique des Systèmes Embarqués

THÈME

**Optimisation des performances
électriques d'une cellule en couche mince
de type chalcopyrite**

Préparé par :
Mohamed TOUATI
Abed CHEHAIMA

Devant le Jury :

| Nom et prénoms | grade | Qualité |
|----------------|-------|-----------|
| R.OTHMANI | MAA | Président |
| A. ABDICHE | Pr. | Examineur |
| Y. BELHADJI | MCB | Encadreur |

Promotion 2019/2020

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail à :

*Nos chers parents pour leurs sacrifices, et qui
n'ont jamais cessé de nous encourager. Que
dieu nous les gardes.*

Nos chers frères et nos chères sœurs

*Tous qui ont apporté une contribution à la
réalisation de ce mémoire*

*Tous nos amis et toute la promotion
d'électronique 2019/2020*

Cehaima Abed

Touati Mohamed

Remerciement

Avant tout, nous remercions Allah le tout puissant qui nous a données l'espoir et la force pour réaliser ce travail que nous souhaitons qu'il atteindra nos aspirations, si Dieu le veut.

Nous remercions notre encadreur Belhadji Youcef enseignant à l'université d'Ibn Khaldoun Tiaret, pour nous avoir proposé ce thème et de nous avoir encadré, nous a guidé et encouragé au court de la réalisation de ce travail. Nous le remercions pour tous les connaissances scientifiques et les conseils qu'il nous a apportés, grâce à lui nous avons beaucoup appris

Nous exprimons nos sincères remerciements aux messieurs A. Abdiche et R. Otmani d'avoir accepté de siéger dans le jury de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent aussi à tous nos enseignants durant les années d'étude

Nous exprimons toute notre gratitude à nos parents pour leur encouragement, la confiance et le soutien morale dont ils ont fait preuve tout ou long de ces années d'études.

Nous remercions tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidés à la réalisation de ce travail.

Sommaire

| | |
|----------------------------|-----|
| Dédicace..... | I |
| Remerciements..... | II |
| Sommaire..... | III |
| Liste des figures | IV |
| Liste des tableaux..... | VI |
| Introduction générale..... | V |

Chapitre 1: Cellules solaires en couches minces

| | |
|--|-----------|
| I.1. Introduction..... | 02 |
| I.2. Les principales sources d'énergie renouvelables | 03 |
| I.2.1. L'énergie solaire | 03 |
| I.2.1.1 Caractéristiques du rayonnement solaire sur Terre | 04 |
| I.2.2. Énergie éolienne | 06 |
| I.2.3. Centrales hydrauliques..... | 08 |
| I.2.4. Biomasse..... | 08 |
| I.3. Les cellules solaires..... | 10 |
| I.3.1. Historique des cellules photovoltaïque..... | 10 |
| I.3.2. Effet photovoltaïque | 10 |
| I.3.2. 1. Interaction photon/semi-conducteur..... | 11 |
| I.3.3. Définition d'une cellule photovoltaïque | 13 |
| I.3.4. Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques | 13 |
| I.3.5. Structure de la cellule solaire | 16 |
| I.3.6. Caractérisation physique des cellules photovoltaïques | 17 |
| I.3.6.1. Caractéristique courant/tension et schéma équivalent..... | 17 |
| I.3.6.1.1. Schéma équivalent..... | 18 |
| I.4. Les technologies des cellules solaires | 20 |
| I.4.1. Les cellules photovoltaïques inorganiques | 21 |
| I.4.2. La filière silicium..... | 21 |

| | |
|---|-----------|
| I.4.2.1. Cellules au silicium monocristallin | 22 |
| I.4.2.2. Cellules au silicium poly-cristallin | 23 |
| I.4.2.3. Silicium en ruban autosupporté | 24 |
| I.4.2.4. Silicium amorphe | 24 |
| I.5. Cellule à base de Chalcopyrite..... | 25 |
| Références bibliographiques..... | 30 |

Chapitre 2: Etude des caractéristiques des cellules en couches minces : CIGS

| | |
|--|-----------|
| II.1. Introduction | 33 |
| II.2.1 Avantage de la couche mince..... | 33 |
| II.2.2 Inconvénients | 34 |
| II.3. Les technologies de la couche mince à base du CIGS..... | 34 |
| II.4. Développement technologique des cellules solaires à base de Cu(In, Ga)Se₂..... | 35 |
| II.4.1. Effet de l'introduction du gallium | 38 |
| II.4.2. Influence du sodium..... | 38 |
| II.5. Propriétés du CIGS | 39 |
| II.6. Notions de gap graduel du CIGS | 42 |
| II.7. Effet du gap graduel sur les propriétés des cellules CIGS | 45 |
| Références bibliographiques..... | 47 |

Chapitre 3: Simulation et Résultat

| | |
|--|-----------|
| III.1. Introduction | 49 |
| III.2. Présentation de la cellule étudiée | 49 |
| III.3. Résultats de simulation..... | 51 |
| III.3.1. Caractéristiques J (V) sous obscurité et en présence de lumière | 51 |
| III.3.2. Effet de La température | 52 |
| III.3.3. Effet de l'intensité de la lumière | 55 |

| | |
|---|-----------|
| III.3.4. L'effet de l'épaisseur de la couche absorbante..... | 57 |
| III.3.5. Effet de l'épaisseur de la couche i-ZnO..... | 59 |
| III.3.6. L'effet du dopage | 63 |
| III.3.7 L'effet du dopage de la couche CdS | 67 |
| III.3.8 Effet de la concentration des défauts (accepteurs)..... | 69 |
| Références bibliographiques..... | 72 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Fig-I.1 : Panneau solaire thermique | 03 |
| Fig-I.2 : Représentation du flux solaire incident sur terre..... | 04 |
| Fig-I.3 : Cartographie de la répartition la répartition de la radiation solaire incidente | 05 |
| Fig-I.4 : Scénarios annuel mondial du marché solaire photovoltaïque 2018 – 2022..... | 06 |
| Fig-I.5 : Turbine éoliennes | 07 |
| Fig-I.6 : Présentation de la puissance éolienne installée dans quelques pays | 07 |
| Fig-I.7 : Centrale hydraulique | 08 |
| Fig-I.8 : Cycle de la biomasse | 09 |
| Fig-I.9 : Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas(a) correspond à un semi-conducteur à gap direct(Si), le cas(b) à un gap indirect(GaAs)..... | 12 |
| Fig-I.10 : Structure photovoltaïque standard | 14 |
| Fig-I.11 : (a) Diagramme de bande et (b) Structure d'une cellule photovoltaïque..... | 15 |
| Fig-I.12 : Schéma descriptif d'une jonction PN | 16 |
| Fig-I.13 : Schéma descriptif d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique | 17 |
| Fig-I.14 : Caractéristiques courant-tension $I=f(V)$ sous obscurité et sous éclairement d'une.17 | |
| Fig-I.15 : Circuit électrique équivalente d'une cellule solaire. | 19 |
| Fig-I.16 : Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque 2016..... | 21 |
| Fig-I.17 : La cellule en silicium monocristallin | 22 |
| Fig-I.18 : La cellule poly-cristalline. | 23 |
| Fig-I.19 : Cellule PV à base de Silicium amorphe..... | 25 |

| | |
|--|----|
| Fig-II.1 : pourcentage de marché des couches minces | 35 |
| Fig-II.2 : a) Fabrication de cellules en couches minces par procédé roll-to-roll. b)Cellule flexible à base de CIGS (Global Solar) | 36 |
| Fig-II.3 : Schéma représentatif d'une cellule solaire typique à base de CuInSe ₂ | 37 |
| Fig-II.4 : Structure standard d'une cellule à base de CIGS. | 38 |
| Fig-II.5 : (a) Structure de la maille élémentaire du zinc-blende (ZnS), (b) Structure de la maille élémentaire de la chalcopyrite du CuInSe..... | 39 |
| Fig-II.6 : Comparaison des mailles élémentaires des structures cristallines du Si, du CdTe et du CIGS. Structure chalcopyrite d'après. | 40 |
| Fig-II.7 :Evolution des valeurs de paramètres de maille a et c, et du rapport c/a en fonction du rapport Ga/(Ga+In) pour Cu(In _{1-x} Ga _x)Se ₂ | 41 |
| Fig-II.8 :Diagramme représentant l'évolution de la largeur de la bande interdite E _g en fonction du paramètre de maille a pour l'alliage quaternaire Cu(In _{1-x} Ga _x)(Se _{1-y} S _y) | 42 |
| Fig-II.9 : Le panneau Gradue dans cet exemple un classement de composition exponentiel est défini..... | 44 |
| Fig-II.10 : Définition de la notation de composition y (x). | 45 |
| Fig-III.1 : Structure de la cellule CIGS..... | 50 |
| Fig-III.2 : Caractéristiques I (V) sous obscurité et en présence de la lumière..... | 52 |
| Fig-III.3 : Caractéristiques courant-tension de la cellule CIGS à gap gradué pour différentes températures et profiles du gap d'énergie..... | 54 |
| Fig-III.4 : Caractéristiques courant-tension de la cellule CIGS à gap gradué pour différentes intensités de lumière et profiles du gap d'énergie..... | 56 |
| Fig-III.5 : Influence de l'épaisseur de la base sur la caractéristique J -V | 59 |
| Fig-III.6 : Influence de l'épaisseur de la couche i-ZnO sur la caractéristique J-V..... | 61 |
| Fig-III.7 : Influence de l'épaisseur de la couche i-ZnO sur la caractéristique J-V..... | 63 |
| Fig-III.8 : Courant-tension de cellule type CIGS en variant dans le dopage de La couche absorbante..... | 65 |
| Fig-III.9 : Courant-tension de cellule type CIGS en variant dans le dopage de La couche absorbante..... | 67 |
| Fig-III.10 : Courant-tension de cellule type CIGS en variant dans le dopage de La couche CdS..... | 69 |
| Fig-III.11 : Courant-tension de cellule type CIGS en variant dans la concentration des défaut du dopage..... | 71 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tab-I.1 : les caractéristiques structurales, optiques de chaque couche mince..... | 26 |
| Tab II.1 : Lois de base de classement disponible..... | 43 |
| Tab-III.1 : Les paramètres géométriques et physiques des matériaux des couches ZnO, CdS et CIGS..... | 50 |
| Tab-III.2 : Les caractéristiques électriques d'une cellule CIGS..... | 51 |
| Tab-III.3 : Les caractéristiques électriques de cellule CIGS à gap gradué pour des températures allant de 0C° à 45C°..... | 53 |
| Tab-III.4 : Caractéristiques de cellule solaire de CIGS..... | 55 |
| Tab-III.5 : Les caractéristiques électriques de cellule type CIGS Dans une épaisseur de100nm a 2.5u..... | 57 |
| Tab-III.6 : Les caractéristiques électriques de la couche i-ZnO de cellule type CIGS Dans une épaisseur de100nm a 2.5um..... | 60 |
| Tab-III.7 : Les caractéristiques électriques de la couche i-ZnO de cellule type CIGS Dans une épaisseur de100nm a 2.5um..... | 61 |
| Tab-III.8 : Caractéristiques de cellule solaire de CIGS..... | 64 |
| Tab-III.9 : Caractéristiques de cellule solaire de CIGS..... | 66 |
| Tab-III.10 : Influence de dopage du CdS sur les paramètres de sortie de la cellule..... | 68 |
| Tab-III.11 : Influence de concentration des défaut de dopage sur les paramètres de sortie de la cellule..... | 70 |

Liste des abréviations

ENR : Energies renouvelables.

PV : Photovoltaïque

CPV : Cellule photovoltaïque

Eg : Energie de la bande interdite (eV)

I_{ph} : Lephoto courant (A)

I_s : courant de saturation

i : facteur d'idéalité

T : Température (K)

I_d : courant de diode (A)

I_{cc} : Courant de court-circuit (A)

FF : Le facteur de forme %

V_{co} : Tension de circuit ouvert (V)

η : Le rendement %

P_{in} : puissance lumineuse incidente (W/cm²)

P_{max} : la puissance maximale fournie par la cellule (W)

E : Energie de photon (eV)

λ : la longueur d'onde (m)

I(V) : Le courant fournit par la cellule (A)

I_m : Courant correspondant à la puissance maximale fournie (A)

V_m : Tension correspondant à la puissance maximale fournie (V)

α : Coefficient d'absorption (m⁻¹)

I₀ : représente Intensité de la lumière incidente (W)

I : Intensité de la lumière sortante (W)

x : Longueur du trajet optique (m)

I_{obs} :le courant d'obscurité

I_s :le courant de saturation,

q ;la charge de l'électron,

K : la constante de Boltzmann,

n : le facteur d'idéalité de la diode

Introduction générale

Introduction générale

Pendant les dernières décennies, une croissance de la consommation mondiale de l'énergie a été observée, en proportion du développement de l'industrie, du transport et des moyens de communication, Cependant, la plupart de l'énergie est produite par les combustibles fossiles et notamment le carbone, le pétrole et le gaz naturel dont le délai d'épuisement est estimé à quelques décennies. De plus, ce type de production d'énergie est très polluant. Donc nous devons développer et utiliser les sources d'énergies renouvelables et non polluantes [1]. Parmi les sources d'énergies renouvelables, on trouve, la filière photovoltaïque qui s'avère l'une des plus prometteuses, mais la principale limitation du développement de cette filière est son prix relativement élevé comparé aux sources conventionnelles [2]. Récemment, les recherches dans le domaine photovoltaïque se portent principalement sur deux axes. Le premier, concerne le développement de cellules photovoltaïques à très haut rendement de conversion. Le second axe de recherche a pour objectif le développement de procédés et matériaux nouveaux en vue de la fabrication de cellules photovoltaïques à bas coût [3]. Le marché photovoltaïque est dominé par les technologies à base de silicium cristallin. En 2012, elles représentent 90 % de la part de marché [4]. On distingue deux grandes familles de cellules selon la nature de la plaquette de silicium, monocristalline ou poly-cristalline, pour lesquels les rendements record sont égaux à 25 et 20.4 %, respectivement [5]. Les modules classiques ont un rendement de conversion moyen de l'ordre de 15 %. Ces technologies éprouvées ont un coût de fabrication en constante diminution. Certains matériaux semi-conducteurs peuvent se substituer au silicium, et ne nécessitent que quelques microns d'épaisseur (contre 200 μm environ pour le silicium) pour absorber tous les photons de la lumière incidente [6]. Des techniques de synthèse moins énergivores peuvent également être utilisées, ce qui permet une diminution substantielle des coûts de production comparé au silicium cristallin. Ces technologies en couches minces ont pris ces dernières années une part croissante du marché photovoltaïque, avec une augmentation de 39 % de leur production entre 2010 et 2011 [7]. Les cellules solaires à base du couches minces au di séléniure de cuivre, d'indium et de gallium $\text{Cu(InGa)(SSe}_2\text{)}$ (CIGS) présentent une excellente stabilité et une grande résistance aux rayonnements [8,9]. Ils ont un intérêt considérable pour des applications spatiales et légères. Des tests d'irradiation de protons et d'électrons sur des cellules solaires en CIGS et

Introduction générale

CdTe ont montré que leur stabilité contre l'irradiation de particules est supérieure à celles de cellules solaires en Si ou bien en semi-conducteurs III-V [10].

Le CIGS est un semi-conducteur ayant un gap d'énergie optimal et un coefficient d'absorption optique élevé dans le domaine visible du spectre solaire. Le coefficient d'absorption de films en CIGS est 100 fois plus grand que celui du Si dans le domaine visible du spectre solaire [11]. Le rendement maximal de la meilleure cellule solaire en CIGS fabriquée sur des substrats en acier inoxydable est de 17.5 % sous l'illumination AM1.5G [12].

La cellule solaire en CIGS de fraction molaire $x=0.3$ correspond à une énergie du gap de 1.1-1.2 eV et fabriquée sur des substrats en verre a un rendement de 20 % sous AM1.5G [13], comme rapporté par l'équipe de recherche de NREL (National Renewable Energy Laboratory). Dans ces dernières années, des progrès ont abouti à de meilleures cellules dont la couche en CIGS d'épaisseur entre 2.5 et 3 μm , et un gap d'énergie dans la gamme entre 1.2 et 1.3 eV dépassant le rendement 20 % et ayant atteint un nouveau record mondial de 20.3 % [14]. L'amélioration du rendement de la cellule solaire en CIGS est principalement par l'utilisation des cellules solaires double (tandem), triple ou multi-jonctions qui sont composées par des couches ayant des énergies du gap différentes afin d'exploiter les différentes régions des énergies du spectre solaire [11]. La modélisation d'une cellule solaire est l'outil performant qui nous permettra de lier les caractéristiques de cette cellule avec les propriétés du matériau afin d'améliorer les performances de la cellule. L'objectif de ce travail présenté dans ce mémoire est de faire une simulation d'une cellule solaire en couche mince de structure P-N à base de $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ en vue d'optimiser par simulation les caractéristiques physiques et géométriques des différentes couches de la cellule. Dans ce travail, Nous avons utilisé le logiciel de simulation SCAPS 3308, afin d'étude les performances d'une cellule solaire en CIGS. Notre travail consiste à trois chapitres : Le premier chapitre représente une description générale sur les cellules solaire en couche mince. Dans le deuxième chapitre nous rappelons une étude sur les caractéristique de structure des couche mince et dans dernière chapitre, nous présentons le logiciel de simulation SCAPS 3308 et les résultats de la simulation, leurs interprétations et la discussion. Enfin Nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale.

Chapitre I

Cellules solaires en couches minces

I.1. Introduction

Comme simple définition, une source d'énergie est dite renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. Donc une source d'énergie inépuisable comme le cas de l'énergie solaire, l'énergie du vent (éolienne), etc., ce qui n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires. L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle, elles ont été exploitées par l'homme depuis l'aube de l'humanité, bois de feu, traction animale, bateau à voile, moulin à vent, etc. Ces dernières années, et suite aux changements climatiques sévères dues à la pollution et au réchauffement climatique (effet de serre) ainsi qu'à l'épuisement des ressources (pétrole, gaz, charbon et uranium), il y a eu prise de conscience qu'un développement économique, basé sur des sources alternatives respectueuses de l'environnement, est absolument nécessaire et inévitable.

Les énergies renouvelables constituent une meilleure alternative aux énergies fossiles sur plusieurs points:

- ✚ Propres du fait qu'elles ne dégagent pas de gaz à effet de serre, ni de déchets toxiques.
- ✚ Inépuisables.
- ✚ Permettent une production décentralisée adaptée aux besoins locaux.
- ✚ Solution efficace pour connecter les zones isolées par l'électricité
- ✚ Réduction des coûts de production, de connexion et de consommation.
- ✚ Alimentation des systèmes d'irrigation
- ✚ Eclairage public.

I.2. Les principales sources d'énergie renouvelables :

I.2.1. L'énergie solaire :

L'énergie solaire est considérée comme l'une des ressources renouvelables les plus abondantes sur terre. Le flux d'énergie solaire reçu annuellement sur la surface terrestre est environ 15000 fois la consommation d'énergie. L'énergie solaire est issue directement de l'exploitation du rayonnement solaire. Afin de répondre besoins humains énergie, il existe aujourd'hui des moyens technologiques, aisément maîtrisables et adaptables à toutes les régions permettant la transformation de l'énergie solaire à savoir:

- A l'aide des cellules solaires (panneaux solaires photovoltaïques) : conversion de la lumière en électricité. Les panneaux photovoltaïques composés de cellules à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons.
- A l'aide du solaire thermique comme les chauffe-eau solaire, et panneaux solaires thermiques: capter la chaleur des rayons solaire et la rediffusée et produire de l'électricité dans certain cas. En Europe par exemple, plus de 600.000 familles ont en équipé leurs habitations [15]
- Le solaire thermodynamique ou CSP : conversion du flux solaire en électricité par l'intermédiaire d'une conversion en énergie thermique



Fig-I.1 : Panneau solaire thermique [Web-1].

I.2.1.1. Caractéristiques du rayonnement solaire sur Terre :

L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de

- L'énergie solaire envoyée
- Taux de réflexion avec la nébulosité (nuages, brouillards, vent de sable, etc.)
- La latitude, les interactions atmosphériques la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du soleil dans le ciel et donc l'énergie reçue par unité de surface au sol.

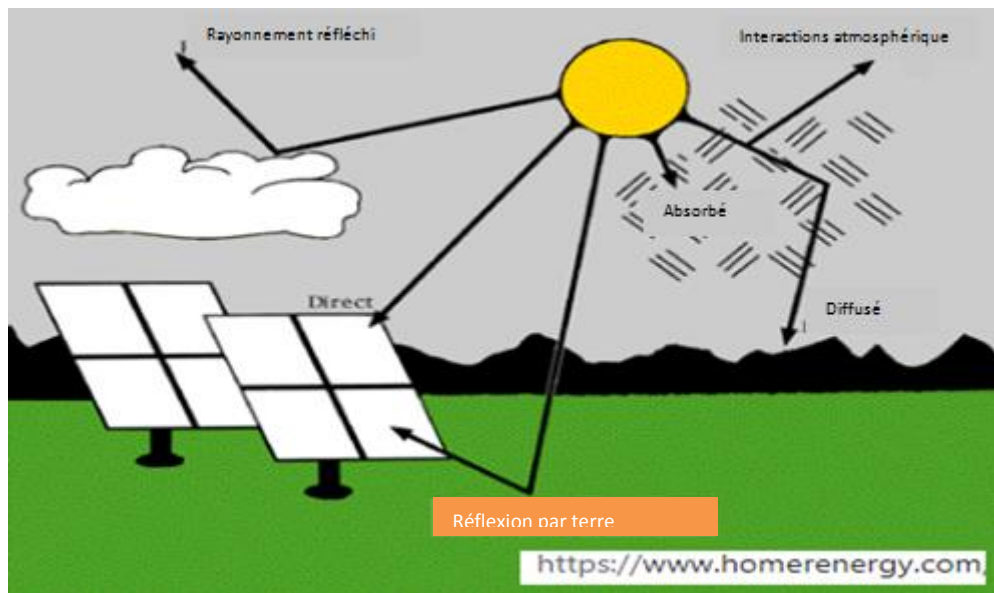


Fig-I.2 :Représentation du flux solaire incident sur terre.

La figure 1.3 montre la répartition de la radiation solaire incidente sur une surface horizontale sur quelque pays notamment l'Algérie.

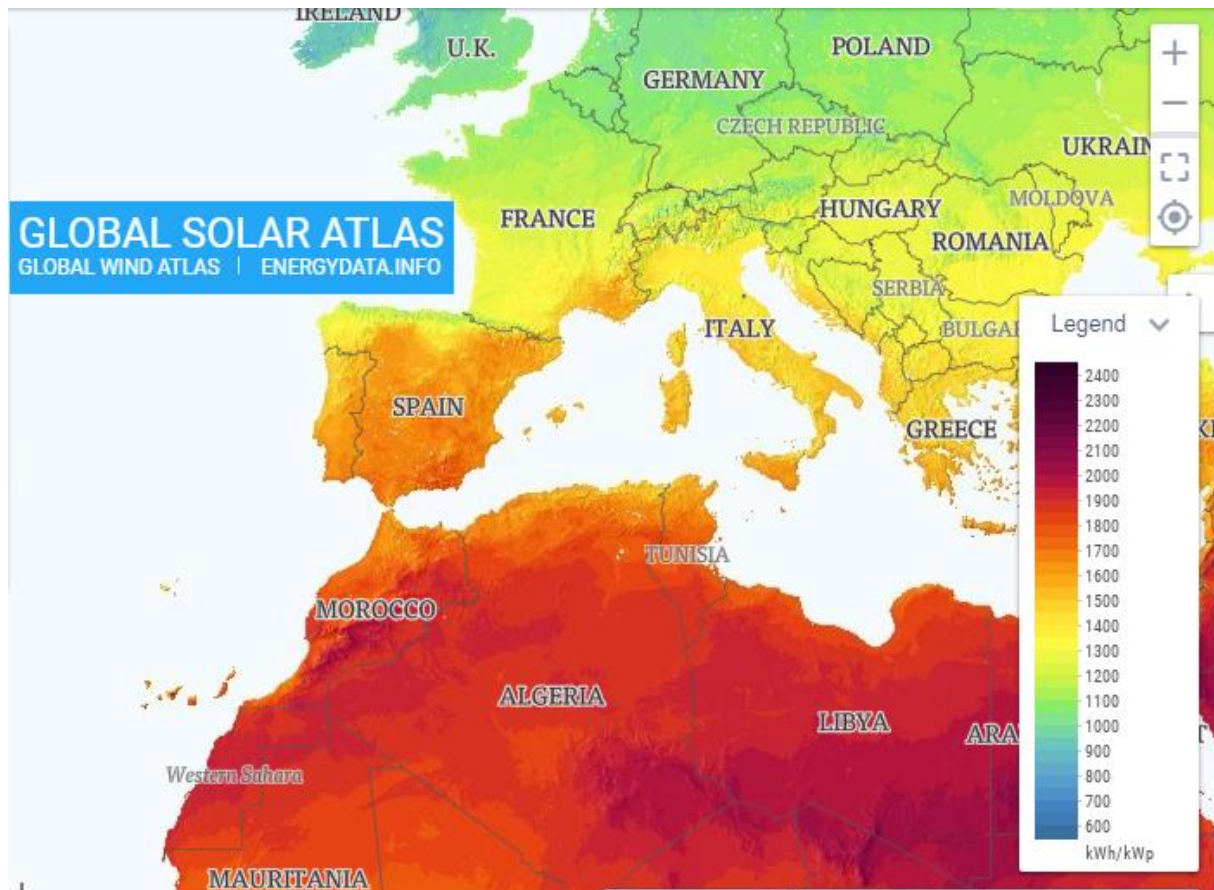


Fig-I.3 :Cartographie de la répartition la répartition de la radiation solaire incidente (Global Horizontal Irradiance : **GHI**)

En outre, l'installation des systèmes photovoltaïques a considérablement augmenté l'augmentation du marché mondial, ce qui en fait l'une des principales sources de production d'électricité [Web-2]. Dans le scénario mondial actuel, le PV a une plus grande capacité installée que toute autre SER comme l'hydroélectricité et l'éolien. La figure 1.4 montre le scénario de la capacité photovoltaïque cumulée dans le monde pour la période 2018-2022. Aussi, La disponibilité des panneaux photovoltaïques et son accessibilité financière encouragé les installations domestiques qui peuvent électrifier les zones rurales comme dans les régions Afrique [Web-3]. De plus, l'utilisation des modules PV en masse et dans tout les secteurs, peut réduire considérablement, les factures d'électricité des propriétaires et également soutenir le réseau avec une production locale.

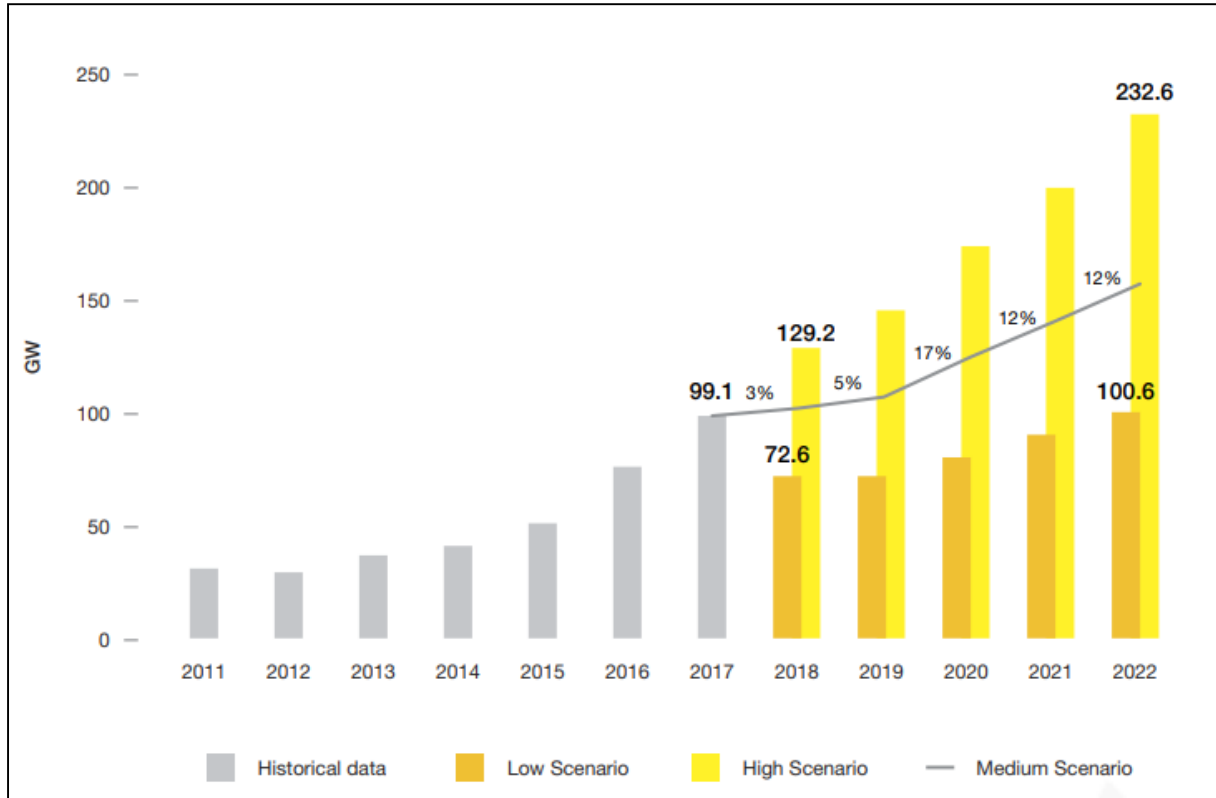


Fig-I.4 :Scénarios annuel mondial du marché solaire photovoltaïque 2018 – 2022[Web-3]

I.2.2. Énergie éolienne

Le vent est une source d'énergie renouvelable propre, gratuite et facilement disponible. Partout dans le monde, des éoliennes sont installées afin de capter les vents et convertissent leur puissance en électricité. Comme pour l'énergie photovoltaïque La production d'énergie éolienne joue un rôle de plus en plus important dans la façon dont nous alimentons notre monde - d'une manière propre et durable.

Comment l'énergie éolienne est-elle créée?

Les éoliennes nous permettent d'exploiter la puissance du vent et de la transformer en énergie. Lorsque le vent souffle, les pales de la turbine (voir figure ci-dessous) tournent dans le sens des aiguilles d'une montre, captant l'énergie. Cela déclenche la rotation de l'arbre principal de l'éolienne, connecté à une boîte de vitesses à l'intérieur de la nacelle. La boîte de vitesses envoie cette énergie éolienne au générateur, la convertissant en électricité.

L'électricité se déplace ensuite vers un transformateur, où les niveaux de tension sont ajustés pour correspondre au réseau. [Web-4]. Dans la figure 1.6 nous présentons des statistiques sur la puissance éolienne installée dans quelques pays.



Fig-I.5 : Turbine éoliennes

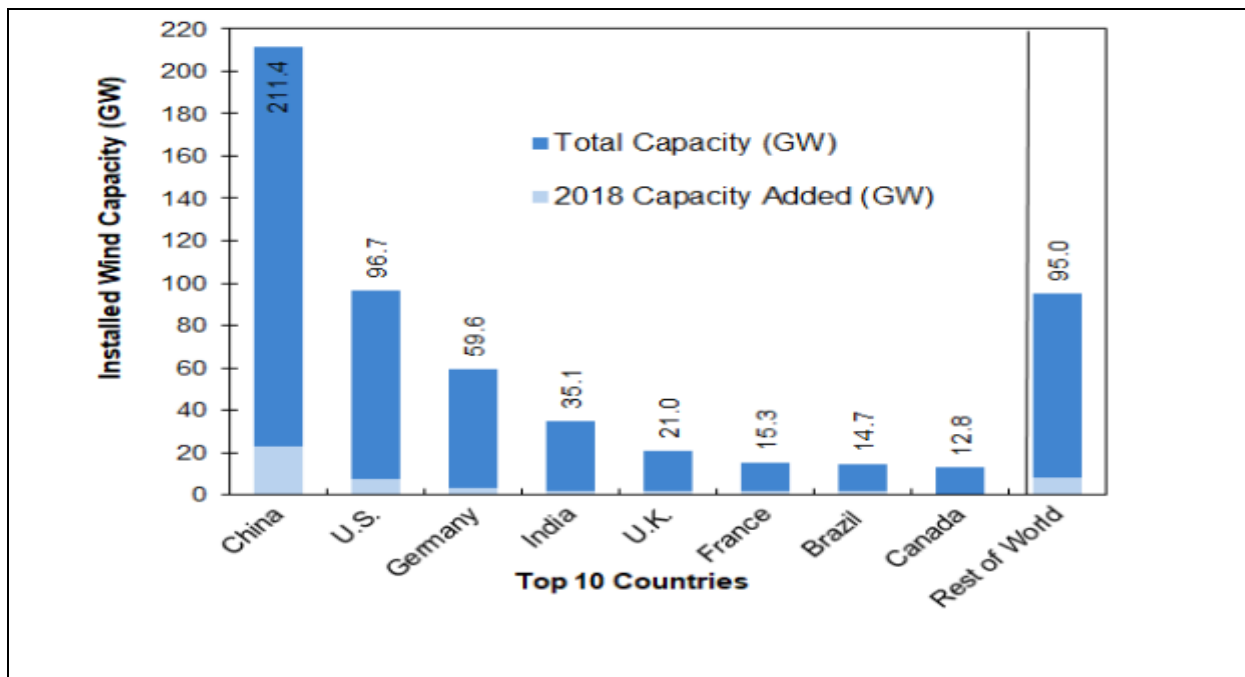


Fig-I.6 :Présentation de la puissance éolienne installée dans quelques pays [Web-5].

3

I.2.3. Centrales hydrauliques:

Grâce la force d'eau, ces systèmes consistent à produire de l'électricité à partir des centrales hydroélectriques. L'énergie hydraulique est au cycle de l'eau et la force ce dernier dépend soit de la hauteur de la chute d'eau soit du débit des fleuves et des rivières. .



Fig-I.7 :Centrale hydraulique [Web-6]

Une centrale hydraulique comprend:

- Le barrage pour retenir l'eau
- le barrage pour la production de l'électricité.
- Les lignes électriques qui servent à l'évacuation et le transport de l'électricité produite.

II.2.4. Biomasse

La biomasse est une matière organique d'origine récente produite directement ou indirectement par des organismes vivants. La biomasse dans la matière végétale est produite par le processus de photosynthèse dans lequel le carbonele dioxyde et l'eau de

l'environnement sont convertis, en utilisant l'énergie de la lumière du soleil, en glucides (sucres, amidons, cellulose et lignine) qui constituent la plante.

Des animaux qui se nourrissent des plantes et / ou d'autres animaux sont aussi une forme de biomasse, tout comme les déchets organiques produits par ces animaux. Donc la biomasse, couvre toutes matières organiques d'origine végétale ou animale. L'énergie solaire est ainsi stockée sous forme d'énergie chimique dans les différentes formes de biomasse.

Les principales formes de l'énergie de biomasse sont:

- Les biocarburants pour le transport, qui sont produits essentiellement des céréales, d'oléagineux et d'huiles usagées.
- Les chauffages domestiques (au bois) : la combustion de bois et de déchets dans des centrales produisant de l'électricité, de la chaleur ou les deux au même temps.

La biomasse forestière résiduelle est constituée des résidus résultant des activités de récolte, de première et de deuxième transformation. Le bois de déconstruction sans adjuvant et non contaminé peut également être considéré (voir figure ci-dessous).

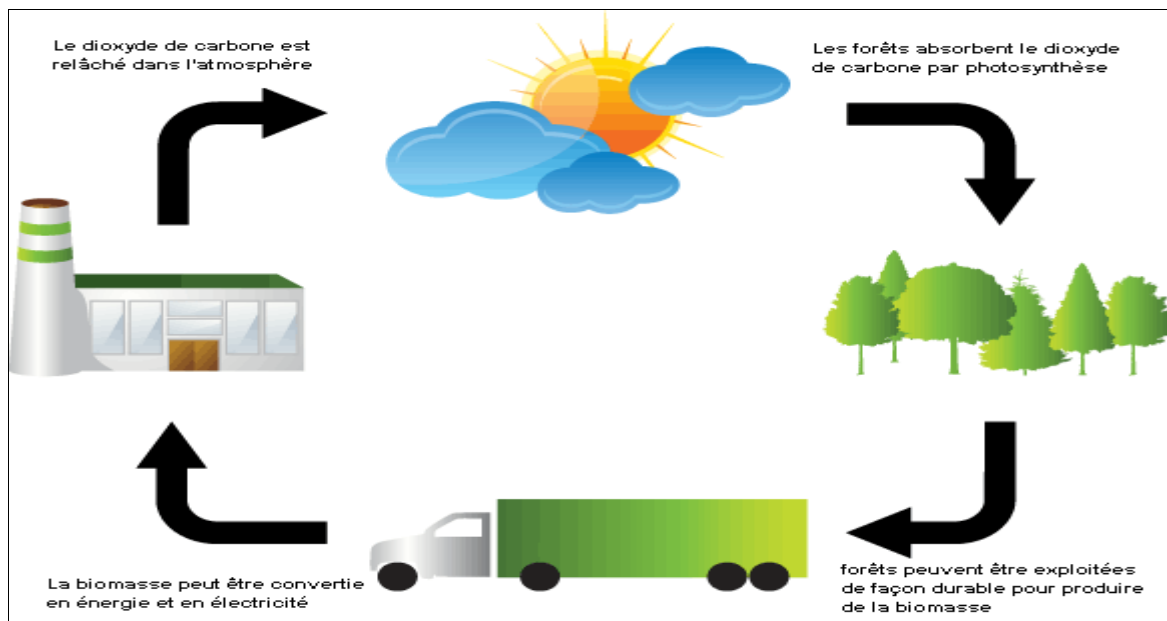


Fig-I.8 :Cycle de la biomasse [Web-7]

I.3. Les cellules solaires

I.3.1. Historique des cellules photovoltaïque

En 1839, Antoine Becquerel publie un mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires relatif à une expérience menée par son fils Edmond avec une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide. Cette pile est capable de fournir un courant dès l'instant où elle est éclairée [16, 17]. En 1873 L'ingénieur américain Willoughby Smith découvre les propriétés photo – sensibles du sélénium [18], en 1877, W. G. Adams et R. E. Day découvrent l'effet photovoltaïque du sélénium [19], et C. Fritts met au point le premier panneau photovoltaïque à base de cellules au sélénium [20]. En 1905 qu'Albert Einstein publie un article convaincant sur l'effet photoélectrique [21], ce qui lui a valu le prix Nobel en 1921. Mais il a fallu attendre jusqu'au 1954 pour que des chercheurs des Bell Telephone Laboratories (États-Unis), D. M. Chapin, C. S. Fuller et G. L. Pearson [22], annoncent la mise au point d'une cellule dont le rendement de conversion énergétique atteint 6%, marquant ainsi véritablement la naissance de l'électricité photovoltaïque [23]. Jusqu'aujourd'hui, le développement des techniques utilisées dans l'industrie des semi-conducteurs pour la photovoltaïque a permis de faire progresser la qualité des matériaux utilisés et des structures.

I.3.2. Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique, est basé sur deux phénomènes:

- création de paires électron-trou par photo-ionisation du semi-conducteur par un rayon lumineux d'énergie supérieure à celle de la bande interdite.
- séparation des charges et collection avant leur recombinaison.

I.3.2.1. Interaction photon/semi-conducteur

Les semi-conducteurs possèdent des gaps dont la valeur est de quelques eV. Le gap est la différence énergétique entre l'énergie du minimum de la bande de conduction et celle du maximum de la bande de valence appelée aussi la bande interdite est une caractéristique intrinsèque pour chaque matériau semi-conducteur. Ce paramètre varie avec la température et la composition chimique (pour les matériaux composés). La figure 1.9 présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap.

Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des k , il s'agit d'un gap direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives (figure 1.9 (a)). Ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires III-V, tels que le GaAs, beaucoup utilisés en optoélectronique. Dans le cas du silicium, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron [24], afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon (figure 1.9 (b)). Notons que la valeur du gap indirect du silicium est de 1,12 eV à 300K (ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107 nm), mais celle du premier gap direct vaut 3,4 eV (soit 365 nm) [25]. Donc le gap et sa nature gouverne les performances électroniques et optiques d'un dispositif électronique à base de matériaux semi-conducteurs. Le gap fixe la température maximale de fonctionnement alors que sa nature fixe l'efficacité des transitions radiatives donc la performance pour les applications optoélectroniques.

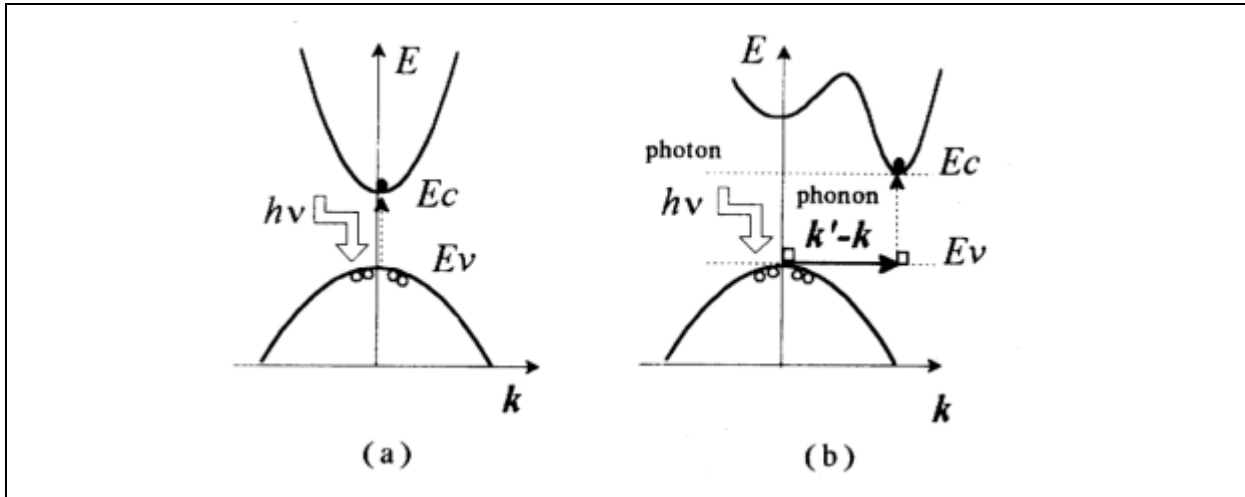


Fig-I.9 : Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas(a) correspond à un semi-conducteur à gap direct (Si), le cas(b) à un gap indirect(GaAs).

L'aptitude d'un matériau semi-conducteur à absorber la lumière est définie par le coefficient d'absorption α (en m⁻¹) qui dépend de la longueur d'onde des photons incidents, ainsi que du coefficient d'extinction k , selon la relation suivante :

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \tag{Eq-I.1}$$

En général les faibles longueurs d'ondes (très énergétiques) sont donc plus facilement absorbées. Cependant, le coefficient d'extinction d'un matériau varie également avec la longueur d'onde, ce qui peut faire varier cette tendance. Le phénomène d'absorption est décrit par la loi de Beer-Lambert :

$$I = I_0(\exp^{-\alpha x}) \tag{Eq-I.2}$$

Avec I_0 représente Intensité de la lumière incidente (W), I : Intensité de la lumière sortante (W)

α : Coefficient d'absorption (m⁻¹), x : Longueur du trajet optique (m)

I.3.3. Définition d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque solaire, un dispositif utilisant l'effet photovoltaïque, permet de convertir directement le rayonnement solaire en énergie électrique. Un système photovoltaïque consiste en un ensemble de cellules montées en panneaux qui sont reliées en série, en parallèle ou de façon combinée.

I.3.4. Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques

La conversion photovoltaïque est basée sur trois principes:

- L'absorption du maximum de l'énergie lumineuse (photons),
- La conversion, de cette énergie absorbée, en charges électriques libres,
- La collecte sans perte de ces charges dans un circuit électrique extérieur.

Le fonctionnement de toute cellule photovoltaïque est basé sur l'existence d'un champ interne afin de séparer les paires électron-trou générées par l'absorption de la lumière. Cette barrière de potentiel peut être créée par l'utilisation d'une jonction p-n avec un même semi-conducteur que l'on appelle homojonction ou une jonction p-n avec deux semi-conducteurs différents que l'on appelle hétérojonction, comme un contact métal/semi-conducteur de type Schottky peuvent également être utilisées. Pour effectuer la collecte des porteurs photo générés, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur, l'une qui recouvre la totalité de la face arrière pour assurer le contact avec la zone p, et l'autre en forme de grille sur la face avant, la géométrie de cette grille étant un compromis entre une faible occultation du rayonnement et un bon contact électrique avec la zone n [26]. Pour certaines technologies, il est possible d'utiliser des électrodes transparentes comme l'ITO (oxyde d'indium-étain) ou le ZnO [27, 28] Dans ce cas, le problème de la grille ne se pose plus puisque cette couche recouvre toute la cellule, une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [29].

La texturation de surface peut se faire par voie chimique [30], par voie mécanique [31], par gravure plasma [32] ou par utilisation de silicium poreux [33] afin de piéger le maximum du rayonnement incident. La figure 1.10 présente la structure d'une cellule photovoltaïque standard

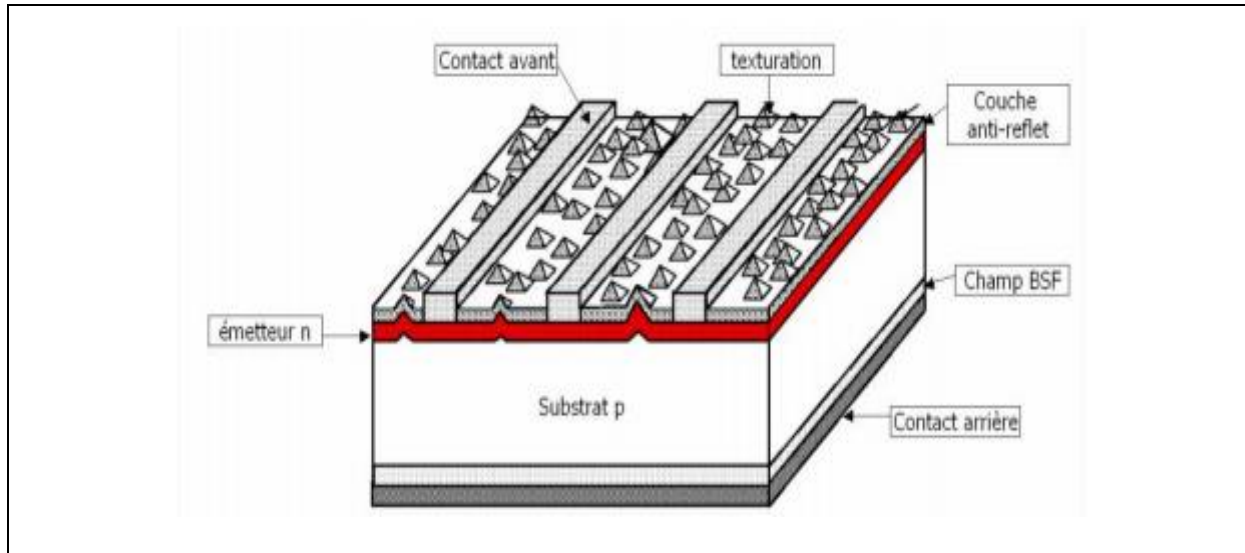


Fig-I.10 : Structure photovoltaïque standard [34]

Dans la figure 1.11 on présente les caractéristiques photovoltaïques d'une simple cellule solaire à jonction p-n. La figure 1.11(a) représente le diagramme énergétique d'une jonction p-n au silicium. Les niveaux d'énergie impliqués pour l'absorption des photons sont le haut niveau de la bande de valence (E_v) et le bas niveau du bas de la bande de conduction (E_c). Ces deux niveaux sont séparés par la bande d'énergie interdite E_g . Seuls les photons d'énergie supérieure à E_g sont absorbés (1), créant des paires électron-trou (2). La zone de charge d'espace, créée à l'interface entre les régions n et p (notée W) permet de séparer les paires électron-trou grâce à la présence d'un champ électrique et de générer un courant électrique (le photo courant de génération), les paires électrons-trous peuvent également se recombiner par l'intermédiaire de centres de recombinaisons situés dans la bande interdite (4).

Le photo-courant généré est par la suite collecté dans un circuit extérieur sous une tension électrique (V) correspondant à la différence entre les niveaux de Fermi de part et d'autre de la jonction, dans l'une des régions n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont envoyés par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. Il en résulte un photo-courant de diffusion. Ces deux contributions s'ajoutent pour créer une photo courant I_{ph} résultant qui contribue au courant inverse de la diode.

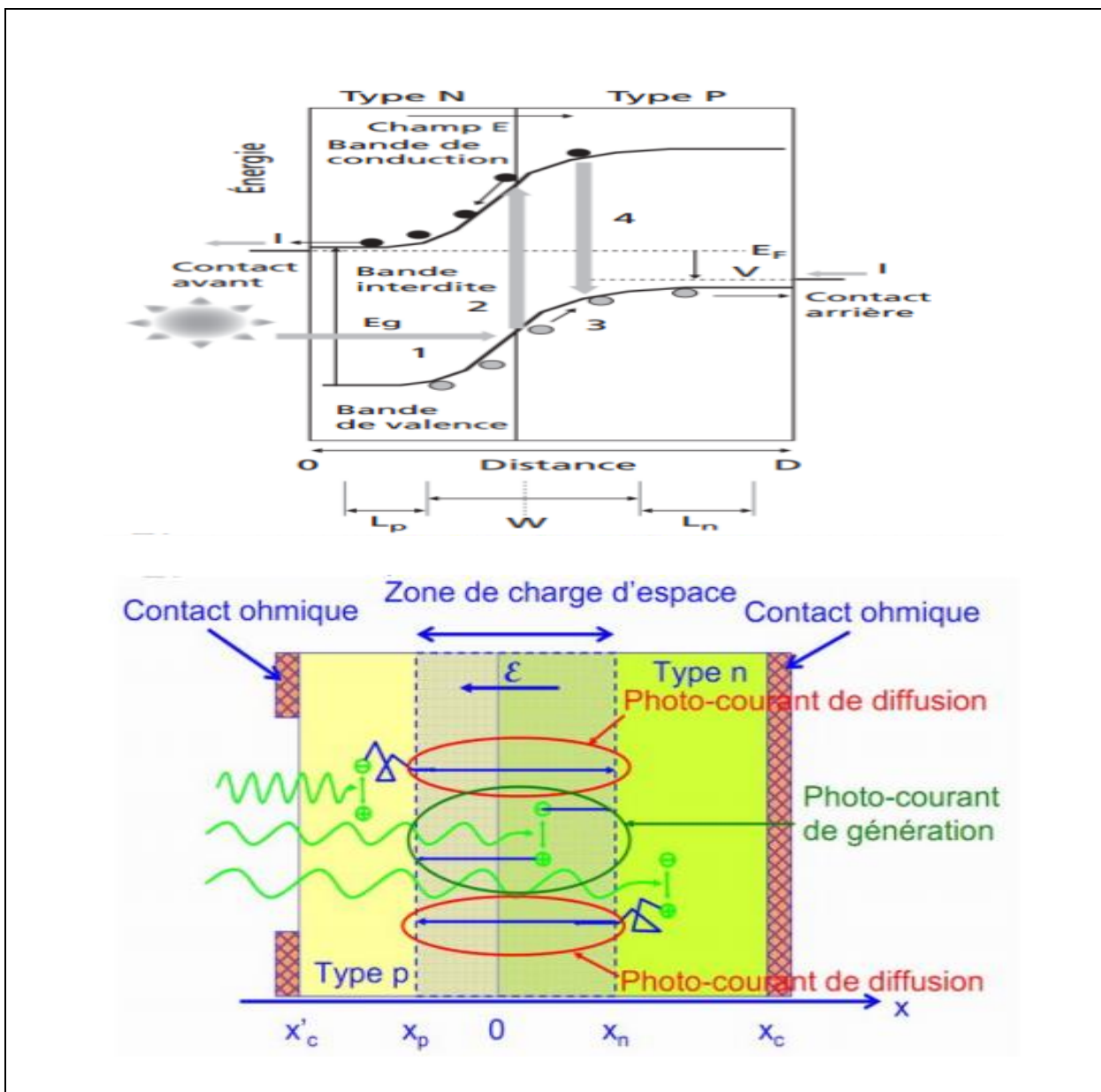


Fig-I.11 : (a) Diagramme de bande et (b) Structure d'une cellule photovoltaïque

I.3.5. Structure de la cellule solaire

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte deux couches Sublimes d'un semi-conducteur. Les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons. La première structure de la cellule solaire était incapable d'offrir des performances élevées et de délivrer une puissance satisfaisante aux charges. Cette structure présentant beaucoup d'inconvénients dues aux pertes par réflexion ainsi que les contacts ohmiques et la recombinaison a subi plusieurs modifications au cours de ces dernières années. La structure actuelle tient à optimiser les performances de la structure classique. Elle est constituée de plusieurs couches, l'élément de base de ces structures est la jonction P-N [35]. La jonction comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau diffusent dans le matériau p comme schématisé sur la Fig1.12

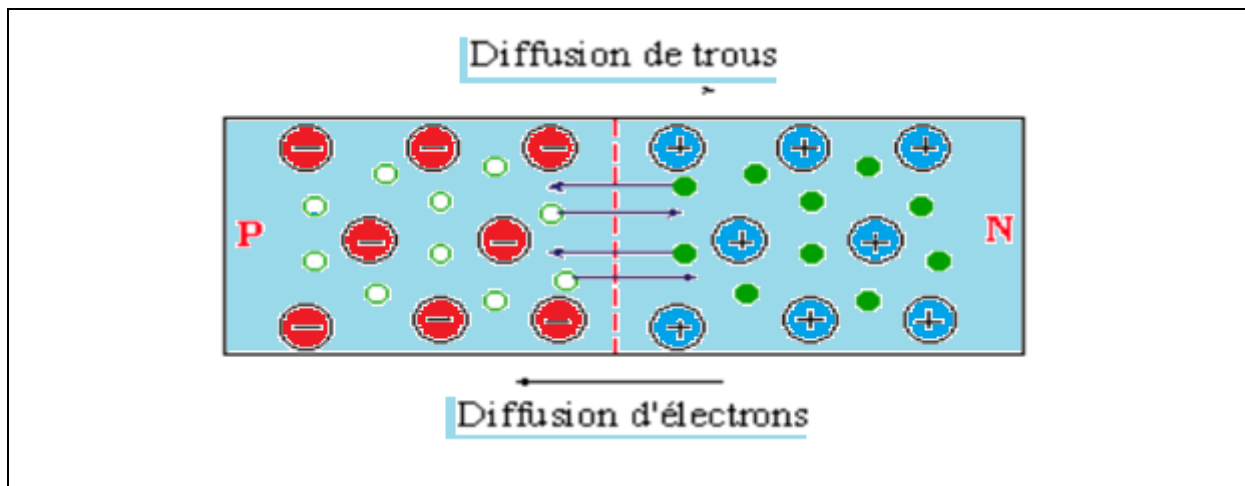


Fig-I.12 : Schéma descriptif d'une jonction PN [36]

La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P devient chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P, Fig.1.13 Une jonction (dite p-n) a été formé. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est ainsi obtenue.

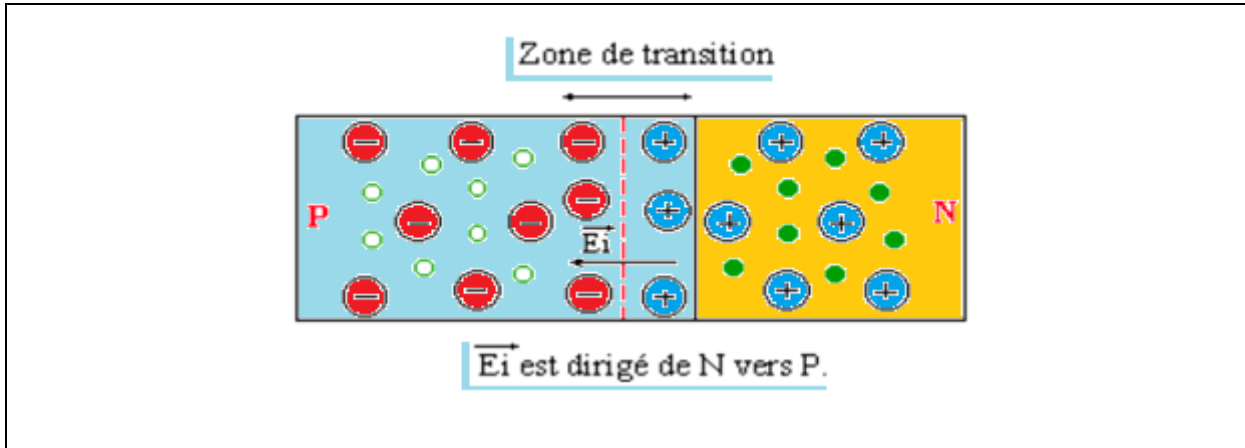


Fig-I.13 : Schéma descriptif d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique [35]

I.3.6. Caractérisation physique des cellules photovoltaïques

I.3.6.1. Caractéristique courant/tension et schéma équivalent

La Fig. 1.14 représente les caractéristiques courant-tension $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque sous obscurité et sous éclairement.

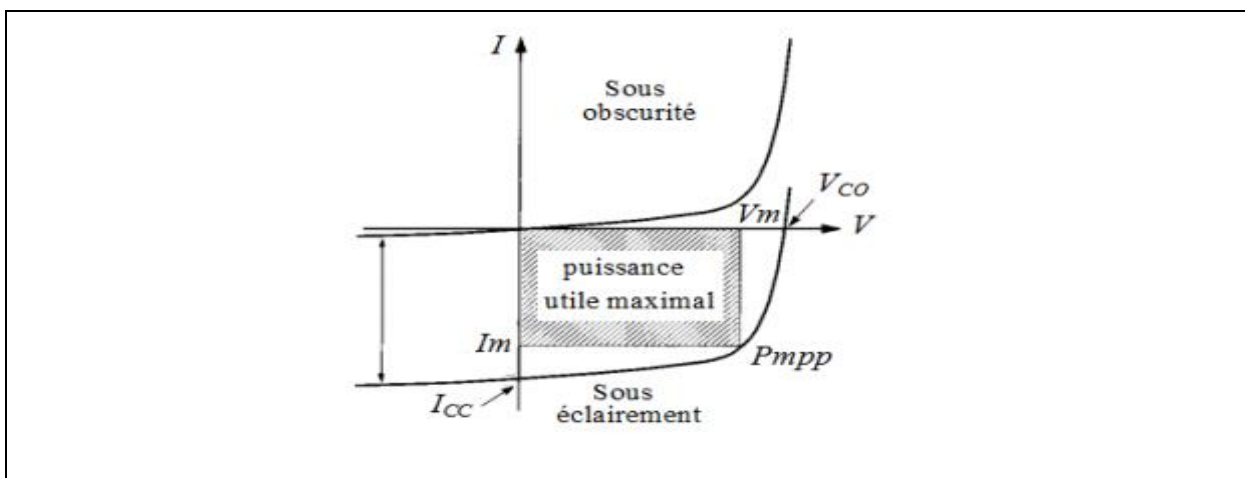


Fig-I.14 : Caractéristiques courant-tension $I=f(V)$ sous obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque [36]

Pour une cellule solaire sous obscurité et polarisée par une tension V , la courbe obéit à l'équation de Shockley suivante:

$$I_{\text{obs}} = I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nkt}\right) - 1 \right) \quad \text{Eq-I.3}$$

Où I_{obs} est le courants d'obscurité, I_s est le courant de saturation, q la charge de l'électron, k la constante de Boltzmann, T la température et n le facteur d'idéalité de la diode qui tient compte des recombinaisons (dans le cas idéal, il est égale à 1).

Sous éclairement, les paires électron-trou créées dans le semi-conducteur, sont balayées par le champ électrique interne et produisent un courant I_{ph} . Le courant I_{ph} passe dans le circuit extérieur à travers une résistance de charge R_{ch} , ce qui induit une auto polarisation V de la cellule. Dans le modèle le plus simple (modèle linéaire), qui stipule la superposition des courants d'obscurité et d'illumination, I et V sont reliés par :

$$I(V) = I_{\text{obs}}(V) - I_{\text{ph}} \quad \text{Eq-I.4}$$

Dans le cas réel, des résistances de contacts (résistivité des électrodes et des interfaces métal-matériaux organiques) et des pertes ohmiques (dues à la résistivité des couches organiques) ainsi que des courants de fuite (des courants de court-circuit) apparaissent à travers la cellule.

I.3.6.1.1. Schéma équivalent

La Fig1.15 propose un modèle électrique de la cellule photovoltaïque : On y retrouve le générateur de courant I_{ph} correspondant au courant photo généré ainsi que les résistances complémentaires, R_s (résistance série) et R_p (résistance parallèle), et un diode d (le courant diode représente le courant d'obscurité I_{obs}).

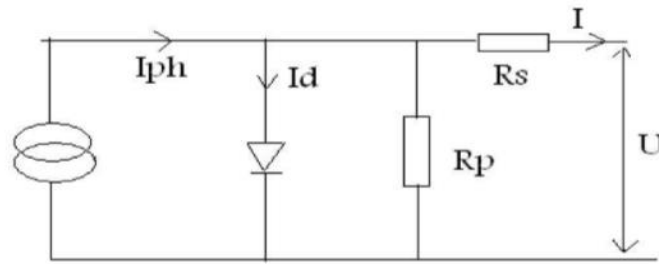


Fig-I.15 : Circuit électrique équivalente d'une cellule solaire. [37]

- La résistance série est une résistance liée à la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, à savoir l'émetteur, la base et l'impédance des électrodes.
- La résistance parallèle R_p est également connue sous le nom de résistance de court-circuit. Elle traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur. Ces résistances donnent dans le cas réel une évaluation des imperfections de la diode.

Les paramètres des cellules photovoltaïques, extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques. Ces paramètres sont définis comme suit :

a) Courant de court-circuit (I_{cc})

Le courant de court-circuit est le courant qui circule à travers la jonction sous illumination sans application de tension. Il croît 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.

b) Tension de circuit ouvert (V_{co})

La tension de circuit ouvert est la tension mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans le dispositif photovoltaïque. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction P N, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts : couche active- électrode. Aussi, cette tension dépend fortement de l'éclairement de la cellule.

On peut facilement avoir l'expression de V_{co} dans le cas d'un courant nul:

$$V_{co} = \left(\frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s}\right) - 1 \right) \quad \text{Eq-I.5}$$

Avec :

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

I_s : courant de saturation

Facteur de forme FF :

On peut définir le facteur de remplissage ou facteur de forme FF par la relation suivante:

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad \text{Eq-I.6}$$

Avec :

V_m : tension correspondante à la puissance maximale fournie

I_m : courant correspondant à la puissance maximale fournie.

Remarque :

Le point de fonctionnement est imposé par la résistance de charge et non par la cellule elle-même. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra donc d'obtenir la puissance maximale, soit $P_m = I_m \cdot V_m$.

I.4. Les technologies des cellules solaires

Selon la nature des matériaux utilisés on distingue deux grandes classes : les cellules Photovoltaïques inorganiques et les cellules photovoltaïques organiques :

I.4.1. Les cellules photovoltaïques inorganiques [38]

Les cellules photovoltaïques inorganiques qui dites aussi au silicium, représentent 99 % des ventes mondiales de panneaux solaires, la technologie de cette filière est la plus avancée, pour preuve, la faible différence entre le rendement théorique de 27 % et les meilleurs modules de laboratoire d'un pied carré qui ont un rendement de 20,8 % ; ainsi le rendement du meilleur module commercial de grande taille ($1m^2$), est de 15,3 %. On peut distinguer plusieurs grandes filières :

I.4.2. La filière silicium

La filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques comme le montre la Figure 1.16. Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque silicium détaillées ci-après ; d'une part les cellules à base de silicium massif (monocristallin, poly cristallin, rubans,...) dites de « première génération » et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques commercialisés et d'autre part la technologie à base de silicium en couche mince.

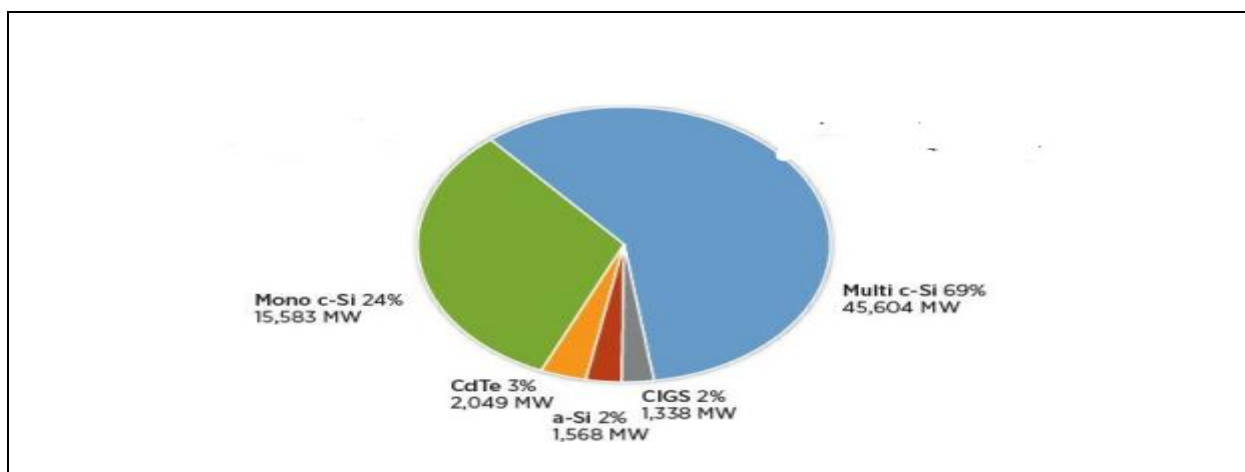


Fig-I.16 : Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque 2016 [39]

I.4.2.1. Cellules au silicium monocristallin :

Il existe deux méthodes par lesquelles il est possible d'obtenir du silicium monocristallin de qualité microélectronique, mais nécessitant cependant une dépense d'énergie considérable proche du MWh. [40] Les siliciums obtenus sont appelés Cz (méthode Czochralski) et FZ (« Float Zone »), et permettent d'obtenir des rendements de conversion records en laboratoire de l'ordre de 25% pour des cellules de 4 cm² [38] , soit supérieurs de huit points à ceux de l'industrie. Les inconvénients de cette technologie sont les rendements faibles obtenus sous un faible éclairage et surtout le coût prohibitif de production des matériaux.

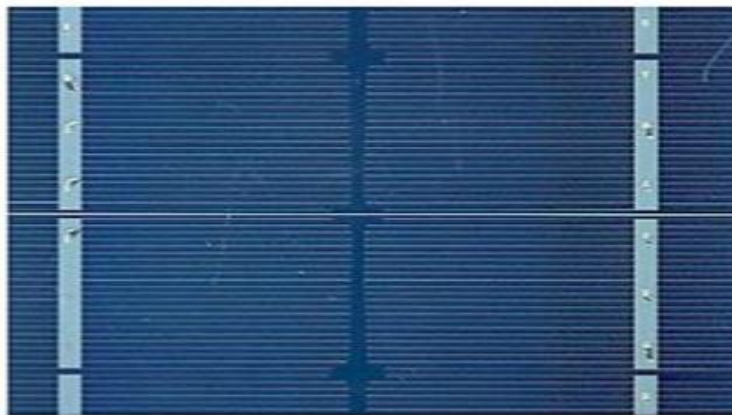


Fig-I.17 : La cellule en silicium monocristallin [41]

Avantage :

- Très bon rendement (23% en théorie et environ 17% dans la pratique).

Inconvénients :

- Coût élevé
- Rendement faible sous un faible éclairage

I.4.2.2. Cellules au silicium poly-cristallin

Le silicium poly-cristallin est produit par des techniques de croissance qui assurent la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux (dénommé silicium multi-cristallin) afin de limiter les effets néfastes des joints de grains. Cependant, le matériau multi-cristallin est d'une part contraint et disloqué, et d'autre part contaminé par des impuretés résiduelles de la matière première de silicium. Cette dernière est en partie constituée par des rebuts de l'industrie de la microélectronique, c'est-à-dire le silicium monocristallin Cz ou FZ. Les rendements de conversion industriels, qui étaient de l'ordre de 8 à 10% avant 1980, sont actuellement de 16 à 17 % pour des grandes plaquettes de 200 m^2 [40]. Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché du photovoltaïque car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin.



Fig-I.18 : La cellule poly-cristalline. [Web-8]

Avantage

- Bon rendement 13%, mais cependant moins bon que le monocristallin.
- Moins cher que le monocristallin
- Meilleur rapport qualité/prix.

Inconvénient :

- Rendement faible sous un faible éclairement.

I.4.2.3. Silicium en ruban autosupporté

Les techniques de production de silicium cristallin en rubans autosupportés ont été très séduisantes sur le plan technologique. La plus connue est basée sur l'effet de capillarité entre deux lèvres de carbone. Ces rubans ont connu de nombreux développements au niveau de la recherche et, pour certains d'entre eux, jusqu'à la conception de chaînes de production préindustrielles. Cependant, la vitesse de croissance linéaire extrêmement lente (quelques cm/min) pousse les industriels à abandonner progressivement cette technologie. Les meilleurs rendements obtenus sont néanmoins de l'ordre de 15 %. [40]

I.4.2.4. Silicium amorphe :

Depuis les années 1970, des recherches intensives ont été entreprises pour utiliser du silicium non cristallisé, c'est-à-dire à l'état amorphe. Ce sont les cellules des calculatrices ou des montres dites « solaires ». Le silicium amorphe présente plusieurs avantages, en particulier son fonctionnement possible en intérieur sous faible éclairement contrairement Au silicium cristallin, son fort coefficient d'absorption, sa faible consommation énergétique durant le cycle de production et son aptitude à être déposé sur des grandes surfaces (de l'ordre de $1m^2$). Cependant, les cellules photovoltaïques à base de silicium amorphe présentent de faibles rendements (inférieurs à 10 % au niveau industriel) et une diminution assez rapide de leurs performances au cours du temps [40]. L'avenir des couches de silicium amorphe passera probablement, par un mariage avec le silicium cristallin. En effet, l'hétéro-structure à base de silicium amorphe/silicium cristallin (structure HIT de Sanyo) présentent des rendements de laboratoire de plus de 21 % et de 16 % en production industrielle.

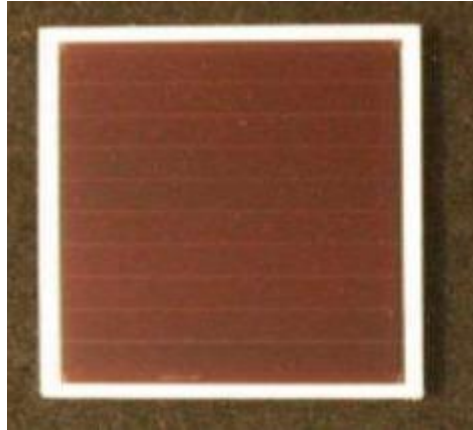


Fig-I.19 : Cellule PV à base de Silicium amorphe [Web-9]

Avantage :

- Fonctionnent avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).
- Moins chères que celles que nous avons citées précédemment.

Inconvénients :

- Rendement faible en plein soleil (environ 6%).
- Performances qui diminuent sensiblement avec le temps.

I.4.3 Cellule à base de Chalcopyrite :

Ces dernières années des avancées remarquables ont été obtenues sur un autre type de matériaux de structure chalcopyrite, il est considéré comme les matériaux les plus utilisés comme des couches absorbantes dans la fabrication des cellules solaires. Les cellules solaires à base de ces matériaux atteignent des rendements très élevés, elles sont très stables et leur durée de vie est très élevée. Ils sont considérés comme une classe importante des matériaux et cela grâce à l'ajustement de leur paramètre du réseau, le gap énergétique, l'indice de réfraction, les constantes optique et d'autre paramètre physique [2].

Parmi les avantages des chalcopyrites on cite [3]:

- Ils sont fabriqués en couches minces, soit de type p soit de type n, ce qui permet une production à faible coût d'une variété de composants en homo, et hétérojonction.
- Ce sont des semi-conducteurs à gap direct, et ils ont une énergie de gap située dans l'intervalle optimal pour la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. On peut dire que l'importance de ces matériaux réside dans leurs applications optoélectroniques, en particulier dans le visible, et l'infrarouge par l'intermédiaire des cellules solaires, les diodes électroluminescentes, ou les détecteurs infrarouges.

L'émergence des cellules solaires, basées sur les matériaux à structures chalcopyrites, a fait suite à la réalisation de détecteurs photovoltaïques CuInSe₂/CdS par S. Wagner et Coll. de Bell Téléphone en 1974-1975 [4]. S. Wagner et coll. Avaient rapporté la préparation hétérojonctions p-n CuInSe₂/CdS à partir d'un monocristal CuInSe₂, dont la conductivité est de type p, sur lequel une couche mince de CdS de 5-10 μm d'épaisseur avait été déposée. La réponse photovoltaïque de ces détecteurs pour une lumière incidente à travers la couche fenêtre CdS donnait lieu à de très hauts rendements quantiques (>70%) uniformes entre 0,55 et 1,25 μm. Ces hétérojonctions savaient des rendements solaires de l'ordre de 5%.

Les composés ternaires chalcopyrites qui peuvent jouer le rôle d'absorbeur sont principalement : CuGaSe₂, CuInS₂, Cu (In,Al) Se₂ et Cu(In,Ga)Se₂, Du fait de leurs grands coefficients d'absorption optique, une épaisseur de 1,5 à 2 μm est suffisante pour absorber la partie utile du spectre solaire[5].

| matériau | A(nm) | C(nm) | Eg(eV) |
|---------------------|-------|-------|--------|
| CuGaSe2 | 0.560 | 1.099 | 1.67 |
| CuInS2 | 0.551 | 1.106 | 1.53 |
| Cu(InA1) Se2 | 0.575 | 1.145 | 1.16 |
| CuInSe2 | 0.577 | 1.155 | 1.02 |
| Cu(InG) Se2 | 0.572 | 1.143 | 1.12 |

Tab-I.1 : les caractéristiques structurales, optiques de chaque couche mince [5]

Les deux principales méthodes de préparation de la couche absorbante de modules à hauts rendements sont la co-évaporation et le dépôt séquentiel des différents constituants ou des métaux précurseurs suivi d'un recuit. Cependant, d'autres techniques sont aussi utilisées telle que la méthode de dépôt par voie électrochimique, procédé de faible coût, qui permet le dépôt des différents composants de la cellule solaire avec des rendements prometteurs. Le matériau le plus prometteur semble être le cuivre d'indium sélénium CIS. Cependant, sa faible bande interdite (1,02 eV) limite la tension de circuit ouvert et donc le rendement de la cellule. Aussi, les travaux sur les cellules solaires à base de CIS portent aujourd'hui sur des alliages quaternaires Cu(InGa) Se2 (CIGS). On introduit le Ga, qui se substitue partiellement à In, de façon à élargir sensiblement la bande interdite [6]

Références bibliographiques

- [1] : Amar Hichem, « Propriétés Electriques De Cellule Solaire A Base De Diséléniure De Cuivre Indium Galium Cuin (1-X) Gaxse2 (Cigs) », Mémoire De Magister En : Electronique, Université Mohamed Khider – Biskra, (Algérie) 2014.
- [2] : DECHOUCHA Djamel, « Etude des propriétés électronique et optique linéaire pour le chalcopyrite CuAlTe2 », Mémoire de Master en Electronique, Université Mohamed Boudiaf - Msila, 2015
- [3] : REGUIEG Soumia, «Etude et modélisation du composé CuInS2 pour son utilisation comme Couche absorbante dans la cellule solaire», Mémoire de Magister en physique, Université Abou-Bekrbelkaid-Tlemcen,(Algérie),(2012).
- [4] : S. Wagner, J.L. Shay, P. Migliorato, H.M. Kasper, CuInSe2/CdShétérojonction photovoltaic detectors, Appl. Phys. Lett. 25 (1974) 434.
- [5] : BOUAFIA Mounir, DEBLAOUI Laid, « Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'indium et de Gallium « CIGS », Mémoire de Master en Electronique Industriel, Université KasdiMerbah Ouargla,(Algérie),2012
- [6] : A. Luque, "Practical Handbook of Photovoltaïques"(Second Edition)-2012.
- [7] : David L. Jones, „“ The Leaching of Chalcopyrite,,“, Thèse de doctorat, University of British Colombia, Vancouver 8, Canada, (1974).
- [8] :DAKHOUCHE Oussama, BERRABAH Mohamed lamine, “Etude des propriétés optoélectronique du ternaire semi-conducteur (CuGaTe2)”, Mémoire de Master en Electronique, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, (Algérie), 2017
- [9] : Carmen Varea De Alvarez, „“Electronic structure of Diamond, Zincblende and chalcopyrite semiconductors,,“, Thèse, InorganicMaterialsResearch Division, Lawrence Berkeley Laboratory and department of physics, University of California.
- [10] :Ouahrani Tarik, “ Calcul des propriétés structurales, thermiques et optiques des composés chalcopyrites par la méthode FP-(L)APW “, Thèse de doctorat en physique, Université de Tlemcen, 2011.

- [11] :Chahed Abbes, “Etude Ab-initio des propriétés structurales, électroniques et optiques des semi-conducteurs chalcopyrites $AgXY_2$ ($X=Al, Ga, In$ et $Y=S, Se, Te$), thèse de doctorat d’état en physique, université de Sidi Bel Abbes,2006.
- [12] :Wanxiang Feng, Jun Ding, Di Xiao, and Yugui Yao, Phys. Rev. Lett. 106, 016402 – 2011
- [13] : J. E. Jaffe and Alex Zunger, PhysicalReview B, Vol 30, N° 2 – p741, (1984).
- [14] :Kerroum Djamel Eddine,«Etude des propriété structurales, électroniques, élastiques Et Optiques des chalcopyrites $CuInX_2$ ($X= S, Se,Te$)»,Mémoire de Magister en Physique Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf- Oran,(Algérie),(2013).
- [15]:ABDELHAMID LILIA, ‘‘contribution a l’amélioration des performances des générateurs éoliens évaluation de l’impact’’, thèses, université de batna, 2012.
- [16]: A. Becquerel, Originalarbeit zur Einwirkung von Licht auf Elektroden, (1839).
- [17] : E. Becquerel, Des Effets chimiques et électriques produits sous l'influence de la lumière solaire, thèse de physique présentée et soutenue à la Faculté des sciences de Paris, le août 1840, par Edmond Becquerel, F. Didot frères, 1840.
- [18]: W. Smith, Nature (issue of 20 February 1873), 303 (1873).
- [19]: W.G. Adams, R. Day, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 167 (1877) 313-349.
- [20]: C.E. Fritts, American Journal of Science, (1883) 465-472.
- [21] : A. Einstein, Œuvres choisies 1 Quanta, (1905) 132-148..
- [22]: H.J. Queisser, Slow Solar Ascent, in: Advances in Solid State Physics, Springer, 2004, pp. 3-12.
- [23]: R. Easton, M. Votaw, Review of Scientific Instruments, 30 (1959) 70-75.
- [24]: R. Braunstein, A.R. Moore, F. Herman, Physical review, 109 (1958) 695.
- [25]: C. Honsberg, S. Bowden, Sydney, Australia: University of new south wales, (1998).
- [26] : B. Equer, physique et technologie de la conversion photovoltaïque, 1 ed., Paris, 1993.
- [27]: E. Fortunato, D. Ginley, H. Hosono, D.C. Paine, MRS bulletin, 32 (2007) 242- 247.

- [28]: A. Aktaruzzaman, G. Sharma, L. Malhotra, Thin Solid Films, 198 (1991) 67-74.
- [29] : L. Protin, S. Astier, Techniques de l'ingénieur. Génieélectrique, 5 (1997) D3360. 3361-D3360. 3319.
- [30]: S. De Wolf, P. Choulat, E. Vazsonyi, R. Einhaus, E. Van Kerschaver, K. De Clercq, J. Szlufcik, Towards industrial application of isotropic texturing for multi- crystalline silicon solar cells, in: Proc. 16th Euro. Photovoltaic Solar Energy Conf, 2000, pp. 1521-1523.
- [31]: C. Gerhards, A. Fischer, P. Fath, Mechanical microsturization for multicrystalline Si solar cells, in: 16th Euro. Photovoltaic Solar Energy, 2000, pp. 1390-1393.
- [32]: R.R. Bilyalov, L. Stalmans, L. Schirone, C. Lévy-Clément, Electron Devices, IEEE Transactions on, 46 (1999) 2035-2040.
- [33]: M. Green, J. Zhao, A. Wang, S. Wenham, Solar energy materials and solar cells, 65 (2001) 9-16.
- [34] :Abdelilah SLAOUI, « Électricité photovoltaïque – Principes », Laboratoire des Sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie (ICUBE), CNRS et Université de Strasbourg, p 6, 7,8.
- [35] :Les cellules photovoltaïques. /Professeur accompagnateur : M. Dietschy Groupe n°33
- [36] : H. Mathieu, (1990).
- [37] :» banchera abdennebi« Étude de transfert des films minces de silicium monocristallin dans la réalisation de cellule solaire à faible budget thermique » , Université de Tlemcen
- [38] : prof Jean-Marie Tarascon Le photovoltaïque: principes et filières inorganiques, organiques, hybrides2 Mars 2011.
- [39]: M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawaet W. Warta, Progress in Photovoltaïques: Research and Applications 2008, 16, 61
- [40] :semanticscholar.org-Extraction de bore par oxydation du silicium liquide pour applications photovoltaïques
- [41] : J.-C. Muller, Techniques de l'Ingénieur, dossier BE8579

Les site web:

[Web-1]:<https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2018/09/Global-Market-Outlook-2018-2022.pdf> (accessed on 2 February 2020).

[Web-2]:Karekezi, S.; Kithyoma, W. Renewable energy strategies for rural Africa: Is a PV-led renewable energy strategy the right approach for providing modern energy to the rural poor of sub-Saharan Africa? *Energy Policy* **2002**, *30*, 1071–1086. [CrossRef].

[Web-3]:Global: <https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2018/09/Global-Market-Outlook-2018-2022.pdf>

[Web-4]: [Windenergy].

[Web-5]:[www.http://css.umich.edu/factsheets/windenergfactsheet](http://css.umich.edu/factsheets/windenergfactsheet)

[Web-6]:<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-hydraulique>.

[Web-7]:<http://blogpeda.ac-poitiers.fr/developpement-durable-5-2/2017/01/16/le-fonctionnement-dune-centrale-biomasse/>

[Web-8]:<https://www.pacte-energie-solidarite.fr/eco-travaux/panneaux-solaires/panneau-monocristallin>

[Web-9]:

www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/silicium_polycristallin.php4

Chapitre II

**Etude des caractéristiques des cellules
en couches minces : CIGS**

II.1. Introduction

Le contrôle des propriétés optoélectroniques du semi-conducteur en fonction de la teneur en éléments Cu, In, Ga et Se et Se rend compte d'une ingénierie fine du matériau à maîtriser, afin d'en accroître les performances. Les corrélations sont donc mises en évidence pour rendre compte des possibilités offertes par ce matériau. Enfin, les technologies pour fabriquer le CIGS seront explicitées. L'objectif de ce chapitre est de présenter les caractéristiques optoélectroniques des composés chalcopyrites : CIGS ainsi que les caractéristiques des cellules à base de ce matériau.

II.2 Définition d'une couche mince

Une couche mince est une fine couche d'un matériau déposé sur un autre matériau, appelé "substrat" dont l'une des dimensions qu'on appelle l'épaisseur a été fortement réduite de telle sorte qu'elle varie de quelques "nm" à quelques " μm ", (typiquement ce sont des couches de 10 ... 100 nanomètres d'épaisseur). Cette faible distance entre les deux surfaces limites entraîne une perturbation de la majorité des propriétés physiques, très souvent un tel petit nombre de couches atomiques possède des propriétés très différentes. Par exemple la réflexion optique ou l'absorption peuvent être maîtrisées de manière très précise, de même pour la conductivité électrique. La différence essentielle entre le matériau à l'état massif et celui en couches minces est liée au fait que dans l'état massif on néglige, généralement avec raison le rôle des limites dans les propriétés, tandis que dans une couche mince ce sont, au contraire, les effets liés aux surfaces limites qui sont prépondérants.[1]

II.2.1 Avantage de la couche mince

Les technologies photovoltaïques en couches minces offrent plusieurs avantages :

- ✚ Utilisent souvent des matériaux semi-conducteurs qui ont une bande interdite directe, et donc ont des coefficients d'absorption très élevés. Par conséquent, seule une faible épaisseur, généralement de quelques micromètres, est suffisante pour absorber la totalité de la lumière incidente sur la couche absorbante. Celle-ci prédit d'importantes économies dans le coût des matériaux.
- ✚ Peuvent utiliser les matériaux rares et coûteux, en raison de la faible dimension du matériau actif de la cellule solaire.
- ✚ Utilisent une variété de techniques relativement peu coûteuses de dépôt sous vide pour le traitement des cellules solaires à couches minces. Ce qui réduit les coûts de traitement.
- ✚ Des films minces peuvent être déposés sur des substrats flexibles, substrats légers, ce qui rend les cellules viables pour une plus grande variété d'applications[1]

II.2.2 Inconvénients

Les cellules en couches minces nécessitent une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses.

II.3. Les technologies de la couche mince à base du CIGS

Le matériau CIS avec une largeur de bande interdite de 1 eV est un matériau très prometteur pour la conversion PV. De plus la substitution partielle d'atomes d'indium par des atomes de gallium permet d'augmenter la largeur de bande interdite jusqu'à 1,7 eV. Le rendement record obtenu avec un matériau de type CIGS est de 21,7 % [2]

La figure 2.1 montre que la technologie à base de l'alliage Cu(In,Ga)Se_2 (Cuivre-Indium/Gallium-Sélénium) ainsi que du semi-conducteur Poly-cristallin CdTe et dominant actuellement le marché du photovoltaïque en couches minces.

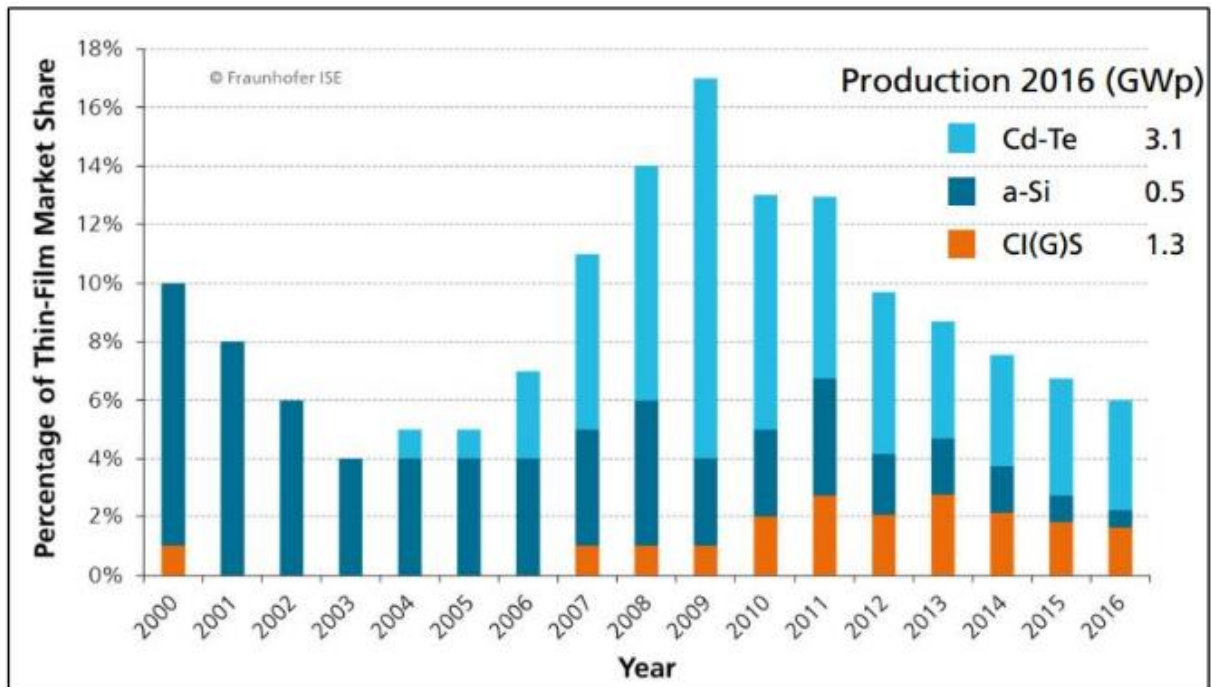


Fig-II.1: pourcentage de marché des couches minces [1]

La nature du substrat peut fortement influencer sur les performances de la cellule. L'un des avantages majeurs des cellules en couches minces est qu'elles permettent l'utilisation de substrats légers, flexibles ou encore conformables. Cela ouvre de nouvelles applications, notamment en termes de mobilité. Par exemple, il est possible d'emporter une plus grande surface active avec un module photovoltaïque qui peut être roulé. De plus, les substrats flexibles permettent d'utiliser des procédés de fabrication de type roll-to-roll, qui ont pour intérêt de réduire les coûts de fabrication. Ces applications sont illustrées dans la figure 2.2.

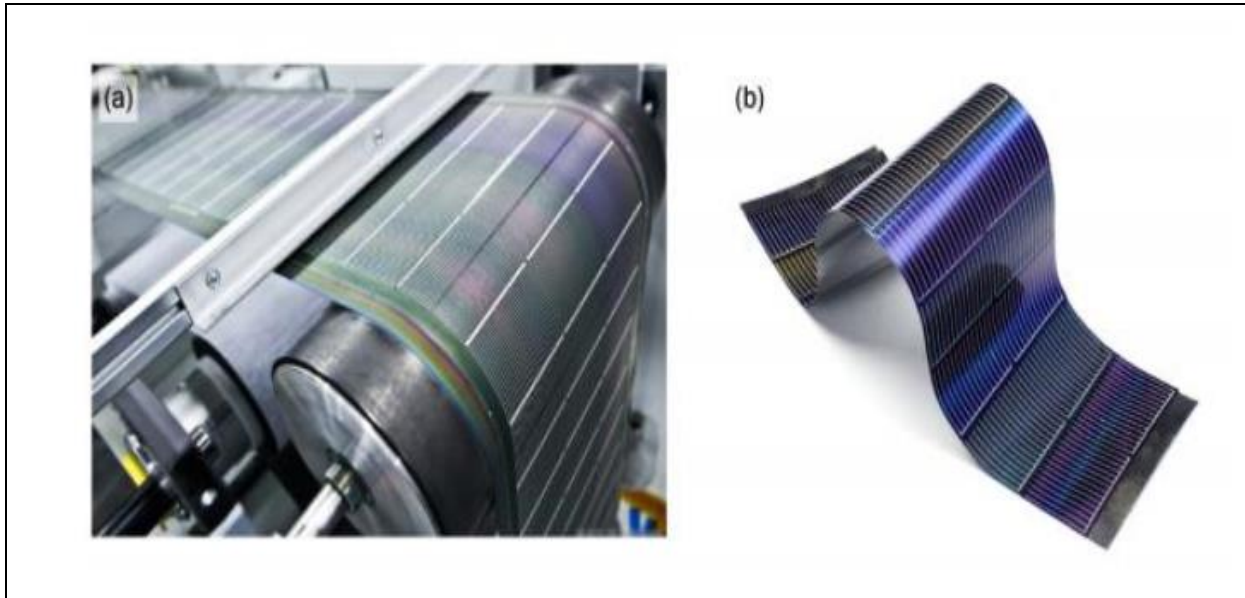


Fig-II.2 : –a) Fabrication de cellules en couches minces par procédé roll-to-roll. b)

Cellule flexible à base de CIGS (Global Solar) [3]

II.4. Développement technologique des cellules solaires à base de Cu(In,Ga)Se_2

L'histoire de la technologie des cellules solaires à base de CIGSe constitue une formidable aventure scientifique et technologique dont les efforts ont permis d'augmenter les rendements des cellules solaires de 9 % dans les années 80 à plus de 20 % aujourd'hui. Les progrès scientifiques qui ont permis la réalisation de cellules solaires en couche mince à très haut rendement ont eu lieu par sauts technologiques successifs. L'étude du passé de cette technologie et en particulier l'étude de ces différentes étapes clés sont indispensables pour comprendre la complexité de la structure d'une cellule solaire à base de CIGSe standard.

Les premières cellules solaires de type CIGSe ont été fabriquées dans le laboratoire Bell au début des années 70. Destinées à la fabrication de Photo-détecteurs, les cellules étaient constituées de monocristaux de CuInSe_2 (CISe) évaporés sur un substrat alumine/molybdène.

A partir de 1975, devant les difficultés de croissance des monocristaux de CISE, Kazmerskiet al., envisagèrent la réalisation de couches minces de CISE. L'intérêt pour l'application photovoltaïque a très vite grandi devant les bons rendements autour de 9 % obtenus par BOEING en 1981. Le molybdène déposé sur un substrat de verre borosilicate constituait l'électrode arrière. LeCuInSe₂ déposé par co-évaporation constituait l'absorbeur de la cellule solaire et la fine couche de (Cd,Zn)S constituait la couche tampon. Enfin, la fenêtre optique était assurée par une couche de ZnO:Al.

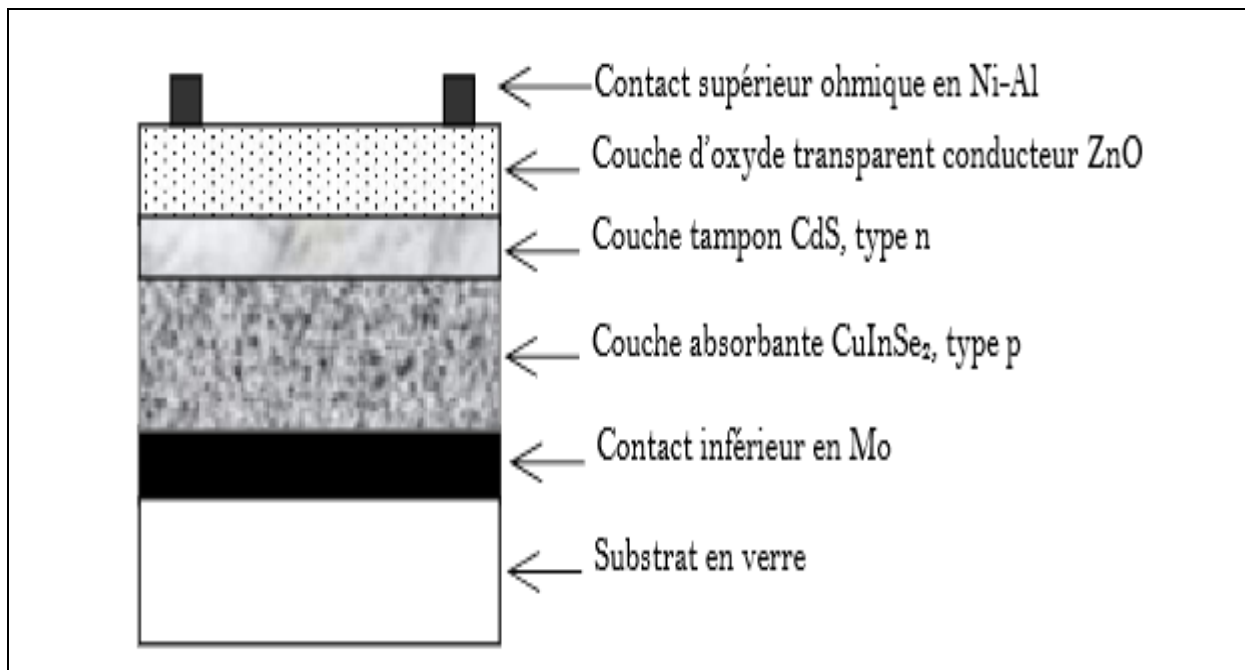


Fig-II.3. Schéma représentatif d'une cellule solaire typique à base de CuInSe₂.

Pour la fabrication des cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées. Généralement on utilise comme contact avant une grille métallique en Ni-Al, et le Mo ou l'ITO pour le contact arrière.[4]

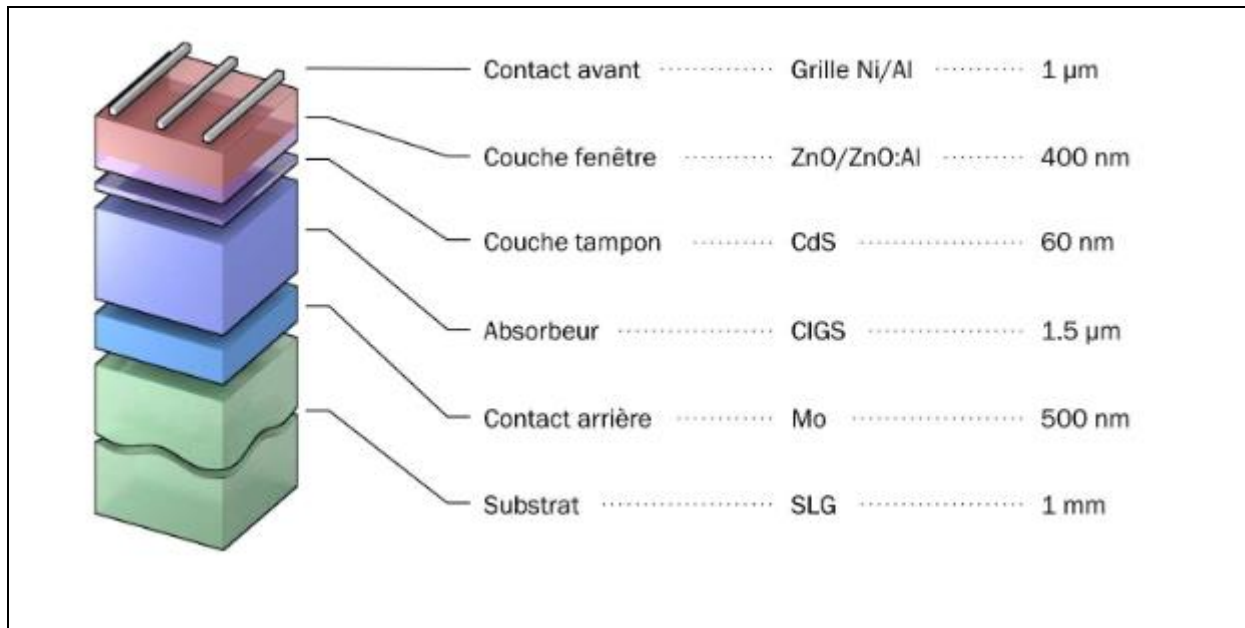


Fig-II.4 : Structure standard d'une cellule à base de CIGS. [5]

II.4.1. Effet de l'introduction du gallium

A partir de 1987, Chen et al. tentèrent d'incorporer des atomes de gallium à la structure CIGSe [5]. La substitution partielle de l'indium par le gallium a permis d'améliorer les performances électriques de la cellule solaire.

II.4.2. Influence du sodium

Dans les années 90, Hedstrom et al. se rendirent compte de l'effet bénéfique du sodium pour les propriétés de la couche absorbante. En voulant changer le substrat initial par du verre sodé afin de réduire les coûts, ils s'aperçurent que les performances des cellules solaires étaient fortement améliorées. Ils attribuèrent par la suite l'effet bénéfique observé à l'influence du sodium provenant du verre sur le dopage de la couche de CIGSe.

II.5. Propriétés du CIGS

Le matériau à la base du CIGS est le CIS (CuInSe_2). C'est un semi-conducteur I-III-VI₂ qui possède une structure tétragonale de chalcopyrite, correspondant à la superposition de deux structures zinc-blende des matériaux II-VI comme le ZnS (figure 2.5 (a)). Sa maille unitaire est à face centrée de paramètres : $a = 5.785 \text{ \AA}$, $c = 11.612 \text{ \AA}$ et $c/a = 2.006$ [11]. La structure chalcopyrite de la forme tétragonale est caractérisée par l'alternance des atomes de Cu et d'In. Chaque atome de Se est lié tétraédriquement à deux atomes de Cu et d'In, tandis que chaque atome de Cu ou d'In est entouré par quatre atomes de Se. La longueur de la liaison Cu-Se est de 2.43 \AA et celle de In-Se est de 2.57 \AA , ce qui donne une distorsion tétragonale de l'unité de 0.3% . La figure 2.5 (b) montre la structure de la molécule en CIS.

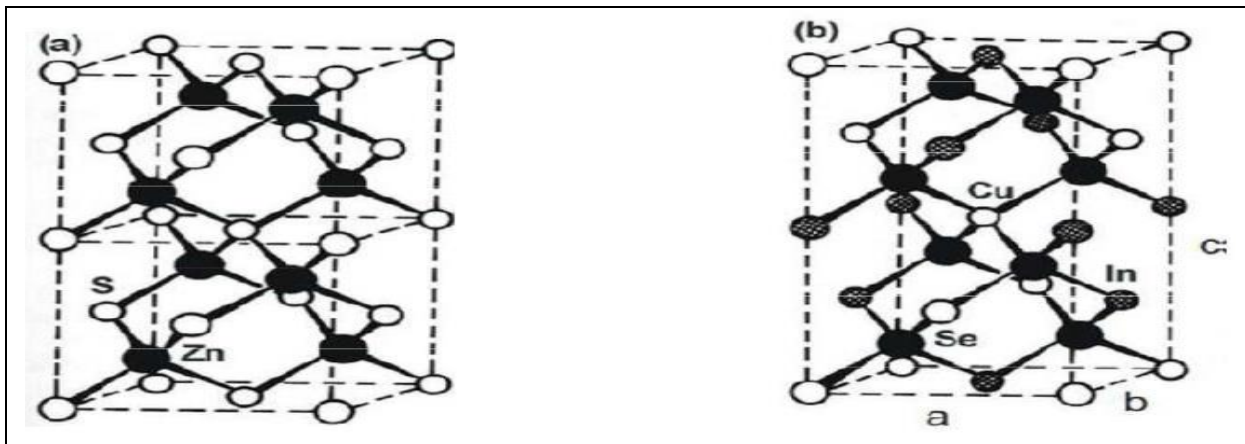


Fig-II.5 :(a) Structure de la maille élémentaire du zinc-blende (ZnS), (b) Structure de la maille élémentaire de la chalcopyrite du CuInSe

Dans le cas du CIGS, les sites des atomes du groupe III sont donc occupés par des atomes d'In ou de Ga, dans des proportions dépendant de la composition de l'alliage. En d'autres termes, le CIGS est une solution solide de CuInSe_2 et de CuGaSe_2 .

La figure 2.6 présente les différences de structure cristalline entre trois semi conducteurs utilisés dans le photovoltaïque : Si, CdTe et CIGS

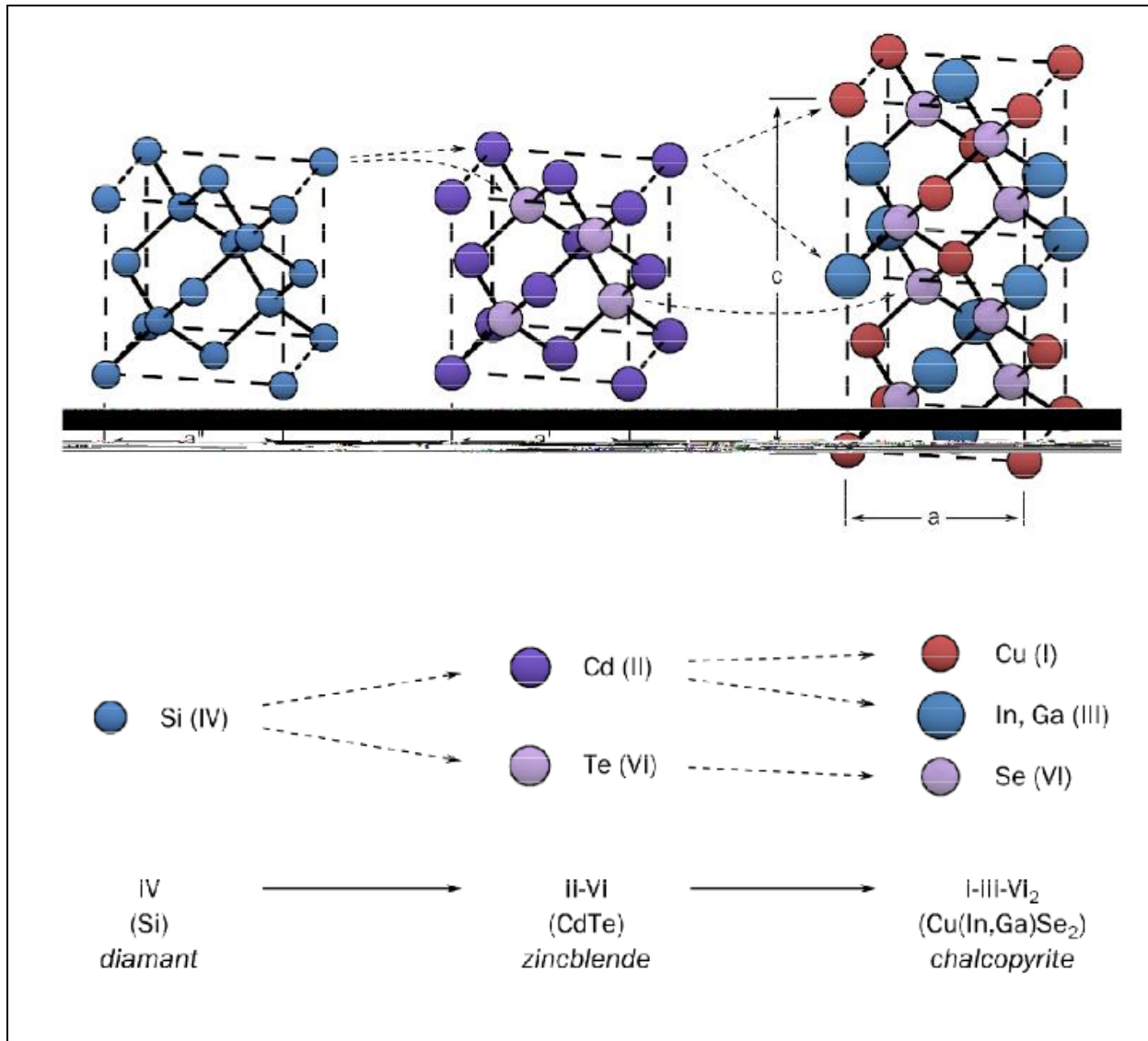


Fig-II.6 : Comparaison des mailles élémentaires des structures cristallines du Si, du CdTe et du CIGS. Structure chalcopyrite d'après. [6]

Les différents alliages dérivés du CuInSe_2 sont groupés sous le terme $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ où $x = \text{Ga}/(\text{Ga} + \text{In})$ est la composition en Ga représentant le taux d'atomes de gallium qui remplacent les atomes d'indium dans la structure. Les différentes solutions solides quaternaires de type $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ ont été caractérisées par de nombreux auteurs.

L'évolution des paramètres de mailles suit la loi de Vegard [7; 8 ; 9], c'est-à-dire que les paramètres évoluent linéairement entre les valeurs des deux ternaires associés. L'évolution des paramètres de maille du quaternaire $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ est représentée sur la figure 2.7

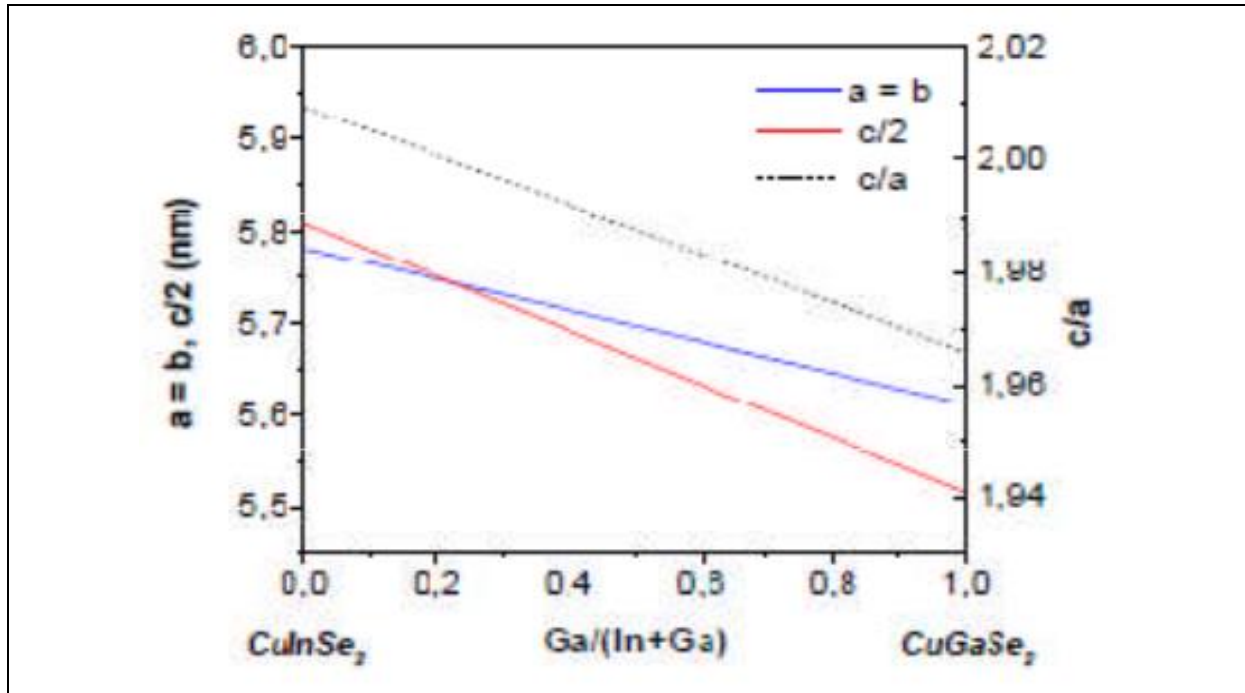


Fig-II.7 : Evolution des valeurs de paramètres de maille a et c, et du rapport c/a en fonction du rapport $\text{Ga}/(\text{Ga}+\text{In})$ pour $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$

Le diagramme présenté sur la figure 2. 8, représente l'évolution de la largeur de la bande interdite en fonction du paramètre de maille a pour les éléments CuInSe_2 , CuGaSe_2 , CuInS_2 , CuGaS_2 . Ce diagramme montre que la largeur de la bande interdite varie entre 1 et 1.67 eV pour les deux composés CuInSe_2 et CuGaSe_2 respectivement en variant la composition x en Ga dans l'alliage $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$.

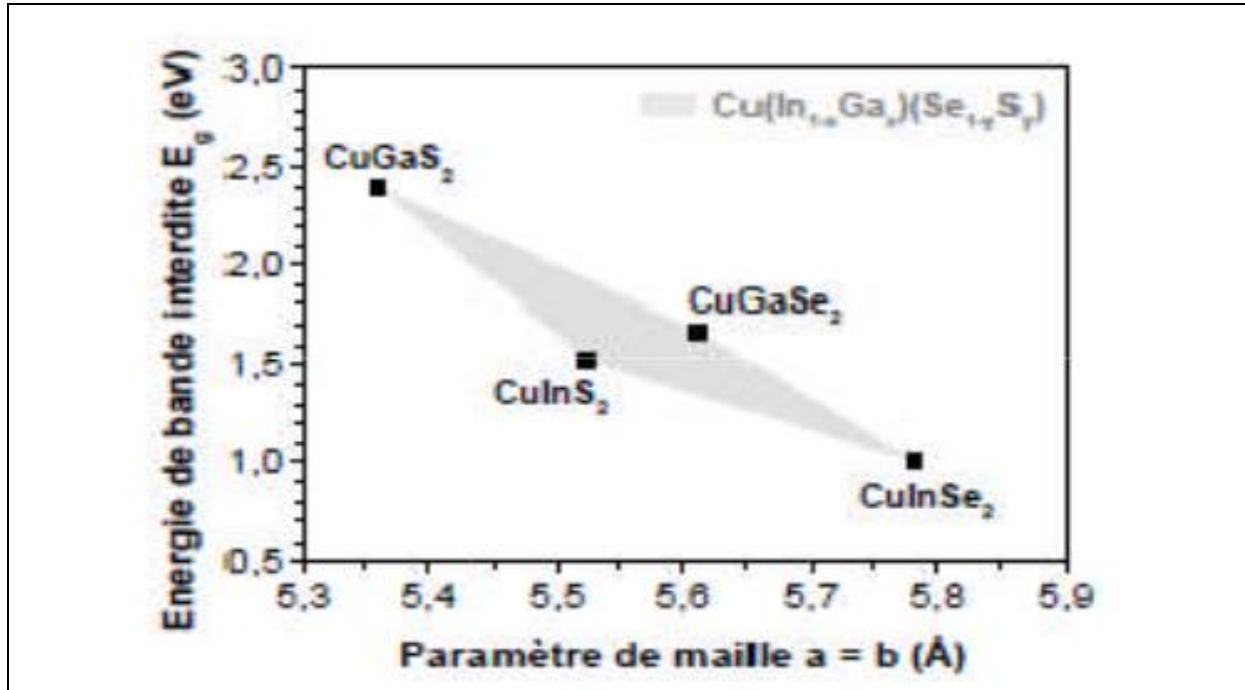


Fig-II.8 : Diagramme représentant l'évolution de la largeur de la bande interdite E_g en fonction du paramètre de maille a pour l'alliage Quincke $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{1-y}\text{S}_y)$ [10].

II.6. Notions de gap graduel du CIGS

Tous les paramètres de calque peuvent être notés. Les principes des algorithmes utilisés pour simuler une cellule solaire graduée les structures ont été présentées dans [3]. Donner une description appropriée et orientée vers les matériaux du classement dès les différents paramètres des matériaux, SCAPS dérive tous les paramètres de manière cohérente à partir du classement de composition une couche. Chaque couche est supposée avoir la composition $A_{1-y}B_y$. L'utilisateur définit les propriétés du pur composés A (par exemple $A = \text{CuInSe}_2$) et B (par exemple $B = \text{CuInS}_2$), et la composition classant y (x) sur l'épaisseur de la couche: définissant ainsi les valeurs de composition y à gauche et à droite de la couche, et parspécifiant une loi de classement entre les deux. Toutes les propriétés des matériaux P sont alors dérivées dule paramètre de composition y (x), c'est-à-dire $P [y(x)]$ est évalué. Plusieurs lois de classement sont mises en œuvre dans SCAPS et offerte par l'interface utilisateur: uniforme, linéaire, logarithmique, parabolique (deux lois), loi de puissance, exponentielle, Support effectif, à partir d'un fichier et d'une fonction Beta.

Ces lois de classement peuvent être utilisées pour définir la composition classer $y(x)$ sur un calque, ainsi que pour définir la dépendance de composition $P(y)$ d'une propriété. Ces classements. Les lois et leurs paramètres peuvent être définis dans le panneau Notation, voir Figure 3.9. Les niveaux de classement utilisés sont résumés dans le tableau 3.1.

Tableau II.1 Lois de base de classement disponible. SCAPS prend en charge d'éventuels problèmes numériques, qui pourraient survenir pendant très petits ou très grands arguments; par conséquent, ces lois ne sont pas toujours strictement suivies mais sont plus compliquées sous circonstances spécifiques.

| Name | P(y) | Remarque |
|-------------|---|--|
| Uniform | $PA = PB$ | <p>B : facteur de courbure.</p> <p>Il y a deux paraboles, un de chaque côté de la pointe $[y_0, P_0]$ qui peut être donné dans l'interface utilisateur. Pour extrapolation un quatrième l'équation d'ordre est utilisé.</p> <p>P0 : valeur de fond LA, B : longueurs caractéristiques</p> |
| Linear | $\frac{PA(yB - y) + PB(y - yA)}{yB - yA}$ | |
| Parabolic | $\frac{PA(yB - y) + PB(y - yA)}{yB - yA} \cdot b \frac{(yB - y)(y - yA)}{(yB - yA)^2}$ | |
| Logarithmic | $PA \frac{yB - y}{yB - yA} \times PB \frac{y - yA}{yB - yA}$ | |
| Exponential | $P_0 + (PA - P_0) \frac{\sinh(\frac{yB - y}{LA})}{\sinh(\frac{yB - yA}{LA})} + (PB - P_0) \frac{\sinh(\frac{y - yA}{LB})}{\sinh(\frac{yB - yA}{LB})}$ | |

Tab II.1 : Lois de base de classement disponible.

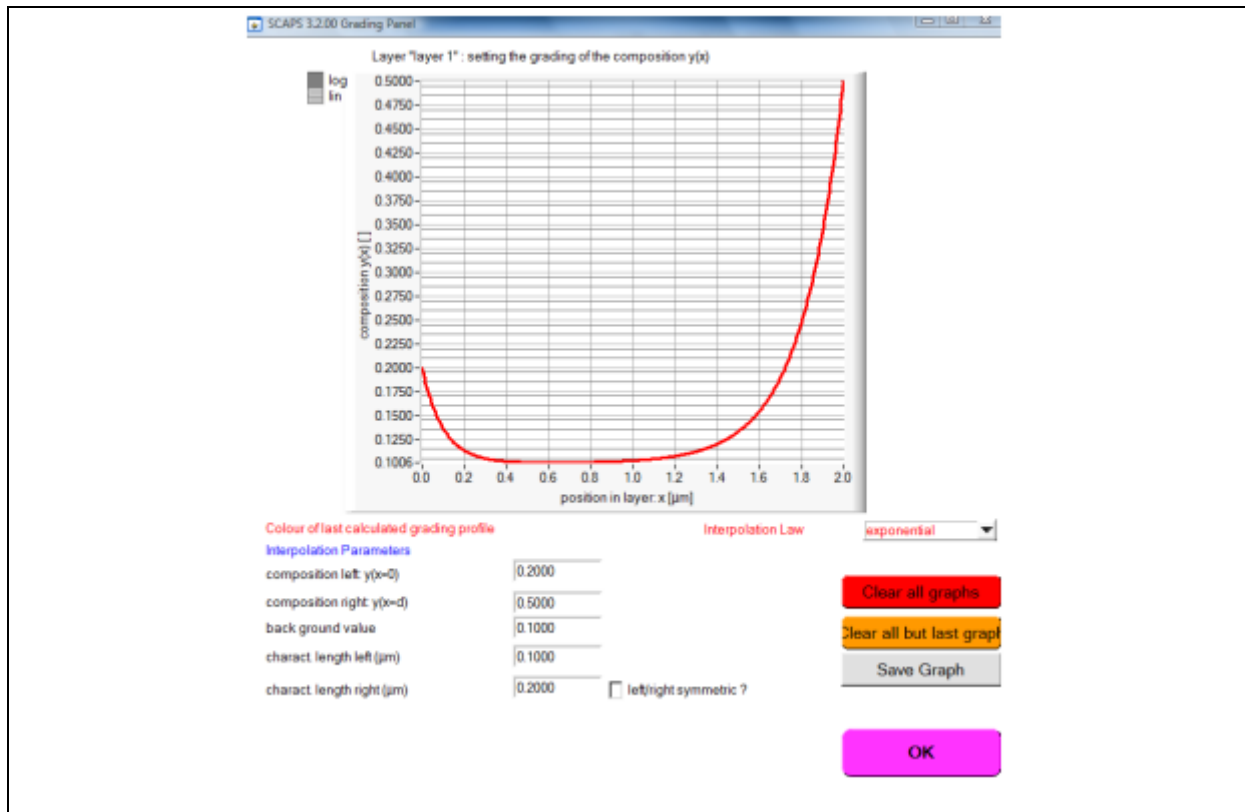


Fig-II.9 : Le panneau Gradue dans cet exemple un classement de composition exponentiel est défini.

II.7 Effet du gap graduel sur les propriétés des cellules CIGS

La gradation de la composition $y(x)$ est la gradation de base de la couche et a des lois de gradation supplémentaires possibles: la définition de l'uniforme est un peu plus compliquée pour le classement des paramètres. Le classement peut être chargé à partir d'un fichier. La gradation de la composition peut être définie en cliquant sur «Type de gradation de la composition du calque», voir Figure 3.10, qui affiche le «Panneau de notation»

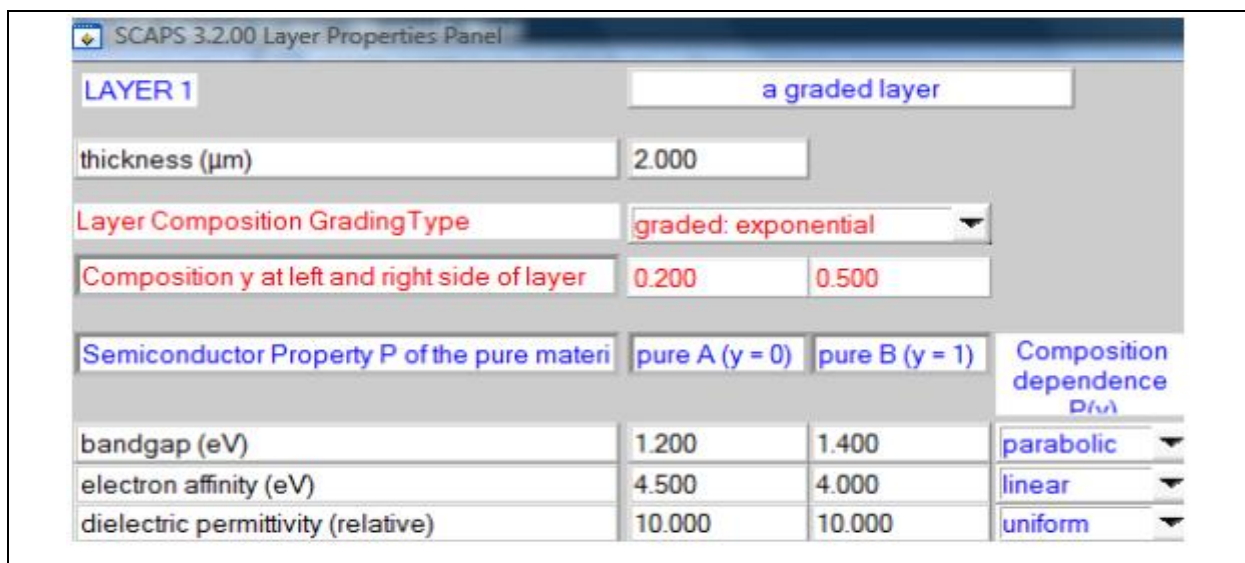


Figure II.10 Définition de la notation de composition $y(x)$.

Sélectionnez une loi de talus pour la composition (dans cet exemple exponentiel). Les valeurs $y_{\text{left}} = 0,2$ et $y_{\text{right}} = 0,5$ ne sont ici que des indications. Vous ne pouvez les définir que sur le panneau de notation qui apparaît lors de la sélection d'une loi de gradation.

Classement uniforme de la composition

Il existe trois définitions possibles du terme «uniforme»:

- «A uniforme pur ($y = 0$)». La composition de ce calque est $y = 0$ pour toutes les positions x . Vous ne voyez que le colonne des propriétés des matériaux du matériau pur A ($y = 0$), sans bouton disponible pour définir un classement de ces paramètres. Tous les paramètres p obtiennent la valeur $p(y = 0)$. Classement de position du dopage et la densité des défauts est toujours possible, par ex. $NA(x)$, ...

- «B pur uniforme ($y = 1$)». La composition de ce calque est $y = 1$ pour toutes les positions x . Vous ne voyez que la colonne des propriétés du matériau pur B ($y = 1$), sans bouton disponible pour définir un classement de ces paramètres. Tous les paramètres p ont la valeur $p(y = 1)$. Classement de position du dopage et la densité des défauts est toujours possible, par ex. $NA(x)$, ...
- «Uniforme y , $0 < y < 1$ ». La composition de ce calque est $y =$ constante pour toutes les positions x , et vous pouvez définir cette composition constante dans le panneau de classement.

Vous voyez les deux colonnes des propriétés des matériaux du matériau pur A ($y = 0$) et B ($y = 1$), et vous pouvez définir une notation de chacun de ces paramètres, pour leur donner la valeur uniforme $p(y)$.

Même s'il est possible de définir une gradation (en fonction de la position) des densités de dopage et de défaut lorsque le classement de la composition de la couche est soit uniforme A, soit uniforme B, il est fortement conseillé d'utiliser l'uniforme option y .

Références bibliographiques

- [1] : CHADEL ASMA, Optimisation et simulation numérique du profil de la couche absorbante et des différentes couches des cellules photovoltaïques à base de CIGS.
- [2] : Vincent FONCROSE, Nano cristaux, films et cellules photovoltaïques de $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{SSe})_4$ par impression d'encre.
- [3] : Baghdâdi Souad, Etude des performances d'une cellule solaire de type $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga}) \text{Se}_2$ (CIGS)) Université Abou Baker Belkaid Tlemcen.
- [4] : H. Miyazaki, R. Mikami, A. Yamada, M. Konagai, Jpn. J. Appl. Phys. 43 (2004) 4224.
- [5] : Charles Roger, Développement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats métalliques.
- [6] : A. Bouloufa, K. Djessas, A. Zegadi, Thin Solid Films 515 (2007) 6285–6287.
- [7] : M. Mezghache, B. Hadjoudja, (2013) IEEE.
- [8] : 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion May 11-18.2003 Osaka. Japan
- [9] : [S. H. Song, K. Nagaich, E. S. Aydil, R. Feist, R. Haley, and S. A. Campbell, (2010) IEEE
- [10] : M. Richter, C. Schubert, P. Eraerds, I. Riedel, J. Keller, J. Parisi, T. Dalibor, A. Avellán-Hampe, Thin Solid Films 535 (2013) 331–3.

Chapitre III

Simulation et Résultats

III.1 Introduction

La simulation est un moyen performant d'analyse et de compréhension des phénomènes physiques dans les dispositifs à semi-conducteurs. En effet, il existe une panoplie d'algorithmes et de logiciels différents pour simuler, comprendre, prédire et optimiser le fonctionnement des dispositifs à semi-conducteurs, notamment les cellules solaires, qui peuvent être déterminés à partir de la solution d'équations différentielles bien connues dans la littérature traitant les semi-conducteurs qui sont : l'équation de Poisson et les équations de continuité des électrons et des trous. Ces équations rendent compte des phénomènes de conduction dans le volume du semi-conducteur et aussi dans les régions sièges de charge d'espace. A cause de l'aspect non linéaire de ces équations, il est impossible de résoudre analytiquement le système d'équations et l'emploi des méthodes numériques s'avère indispensable. Dans ce contexte, et après avoir discuté dans les chapitres précédents, les bases théoriques liées aux caractéristiques et au fonctionnement des cellules solaires en couches mince à base de Chalcopyrites (CIGS), nous allons présenter dans ce chapitre les résultats de simulation des performances électriques de ces cellules extraites. Les résultats sont extraits en utilisant l'outil de simulation numérique SCAPS-1D.

III.2 Présentation de la cellule étudiée

La cellule étudiée est une cellule en couches mince est un empilement de plusieurs couches déposés successivement où le matériau CIGS, à gap gradué, est utilisé comme couche absorbante (voir figure 3.1). La couche CdS est considérée comme une couche morte vu que le CdS dopé n'a presque pas de zone de charge d'espace ainsi que la durée de vie des porteurs est très limitée. L'oxyde ZnO assure la liaison électrique et réduit les pertes par recombinaison au niveau du contact.

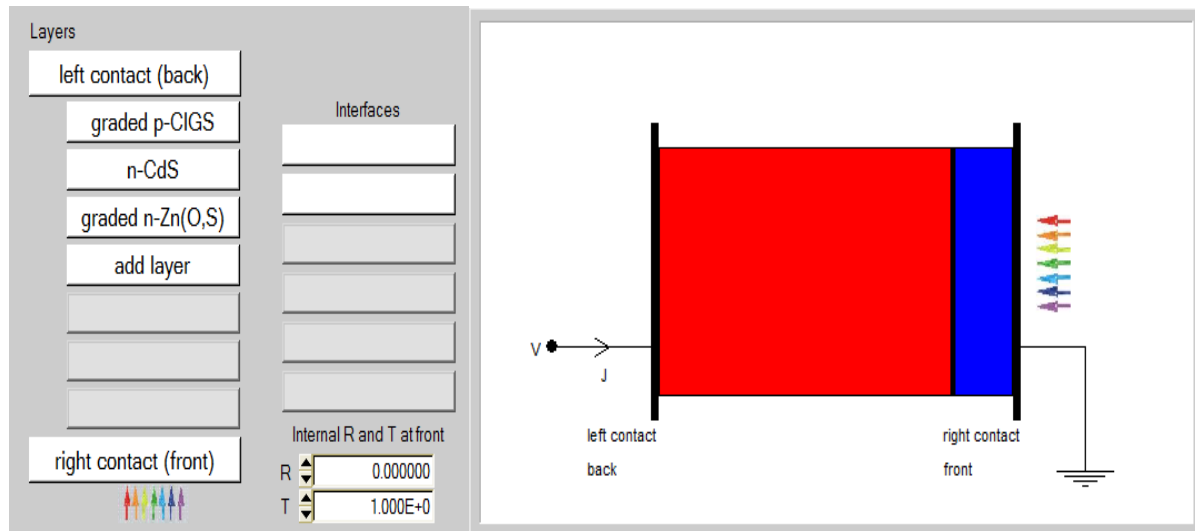


Figure-III.1: Structure de la cellule CIGS

Les paramètres physiques et géométriques de chaque couche sont donnés dans le tableau ci-dessous :

| La couche | | Graded p_ CIGS | n _ CdS | n _ Zn (oS |
|--|------------------------|-------------------|------------|------------|
| Paramètre | | | | |
| Epaisseur de la couche (nm) | P | 100 | - | - |
| | N | - | 10 | 200 |
| Gap (Ev) | | 1 | 2.4 | 3.3 |
| dopage | Na (cm ⁻³) | 1.000E +16 | 1.000E +16 | 1.000E +17 |
| | Nd(cm ⁻³) | 2.000 E +16 | 1.000E +0 | 1.000E +0 |
| Affinité Electronique(e v) | | 4.5 | 4.2 | 4.450 |
| Permittivité diélectrique(relative) | | 13.6 | 10 | 9 |
| CB densité effective d'état (1/cm ³) | | 2.200 E+18 | 2.200 E+18 | 2.200 E+18 |
| VB densité effective d'état (1/cm ³) | | 1.800 E+19 | 1.800 E+18 | 1.800 E+18 |
| Vitesse thermique des électrons (cm/s) | | 1.000 E+7 | 1.000 E+7 | 1.000 E+7 |
| Vitesse thermique des trous (cm/s) | | 1.000 E+7 | 1.000 E+7 | 1.000 E+7 |
| Mobilité électronique (cm ² /vs) | | 1.000 E+2 | 1.000 E+2 | 1.000 E+2 |

Tab-III.1 : Les paramètres géométriques et physiques des matériaux des couches ZnO, CdS et CIGS

III.3 Résultats de simulation

D'une manière générale, une difficulté rencontrée lors de la simulation des dispositifs électroniques réside dans le choix et l'optimisation des paramètres physiques et géométriques de ces matériaux semi-conducteurs utilisés et les dispositifs eux même. Dans ce qui suit, on s'est intéressé à l'extraction des performances de la cellule solaire à base du CIGS à gap gradué tout en optimisant ses grandeurs de sortie : densité de courant de court-circuit (J_{sc}), rendement de conversion électrique, tension de circuit ouvert (V_{co}) ainsi que le facteur de forme (FF). Ses grandeurs sont déduites à partir de la caractéristique courant-tension. Cette caractéristique reste indispensable dans toute étude du fonctionnement des cellules solaires. Aussi, l'optimisation des grandeurs de sortie est effectuée en analysant l'effet de la température, le flux de lumière incident, le dopage et l'épaisseur pour quatre différent profils du gap du CIGS : linéaire, parabolique, exponentielle, et logarithmique.

III.3.1 Caractéristiques J (V) sous obscurité et en présence de la lumière

Les caractéristiques courant-tension enregistrées sous obscurité et sous lumière, pour une tension de polarisation allant de 0V à 0.8V sont donnée dans la figure ci-dessous. Sous obscurité la caractéristique est similaire à une diode simple. Le rendement dans ce cas est nul. Sous l'effet d'un flux lumineux AM1.5G; un courant dû à photons incidents s'ajoute à la variation de la densité de courant. Dans ce cas on peut extraire les grandeurs électriques de la cellule. Ces grandeurs sont regroupées dans le tableau III.2.

| Cellule | $V_{co}(V)$ | $J_{sc} (ma/cm)$ | FF ($^{\circ}/^{\circ}$) | η ($^{\circ}/^{\circ}$) |
|---------|-------------|------------------|----------------------------|--------------------------------|
| CIGS | 0.5456 | 43.639684 | 72.35 | 17.23 |

Tab-III.2: Les caractéristiques électriques d'une cellule CIGS.

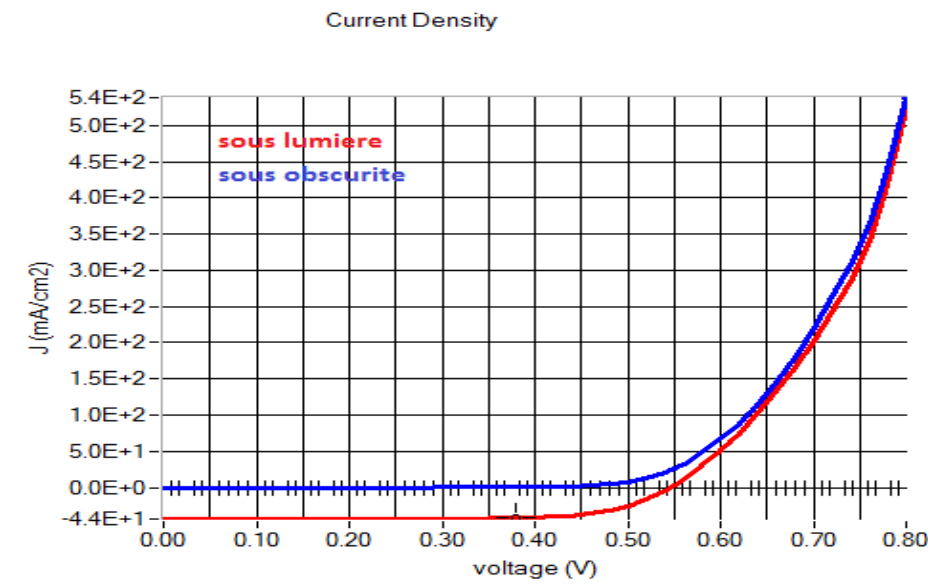


Fig-III.2 :Caractéristiques J (V) sous obscurité et en présence de la lumière

III.3.2 Effet de la température

Lorsque la cellule solaire fonctionne dans des conditions extérieures, la variation de la température pour une tension de fonctionnement donnée, modifie les paramètres de la cellule. Dans cette partie, nous avons étudié le changement de la température.

Dans les applications terrestres, la cellule solaire est exposée à des températures variant entre 0°C (273.15 K) à 45°C (318.15K). Par conséquent, l'effet potentiel de la température sur les performances de la cellule CIGS, est déterminé pour différents profils du gap gradué de la cellule températures. Les simulations sont effectuées sous un flux lumineux AM1.5G.

L'évolution avec la température de la densité de courant de court-circuit (I_{cc}), de la tension en circuit ouvert (V_{co}), le rendement de la conversion photovoltaïque (η) et le facteur de forme (FF) est montré dans Le tableau (3.3). L'effet principal de la température sur les cellules solaires résulte de la variation de trois principaux paramètres, qui sont habituellement employés pour caractériser les performances de la cellule solaire, ceux-ci sont : le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (FF); Le FF montre habituellement une dépendance inverse avec la température [3].

On observe que l'augmentation de la température provoque une augmentation de la densité de courant du court-circuit (J_{cc}), en même temps on assiste à une diminution nette de la tension en circuit ouvert (V_{co}). Concernent le rendement de la conversion PV η en fonction de la température, nous constatons que la valeur maximum de η est 21.30% au-dessous de la température de $00C^\circ$. Dans notre gamme de température $00C^\circ$ - $45C^\circ$; La variation de FF avec la température pour les cellules solaires augmente légèrement avec l'augmentation de la température.

| Température | Profile du gap | Vco(V) | Jsc (mA/cm) | FF (%) | η (%) |
|-------------|----------------|--------|-------------|--------|------------|
| 00 C° | Linéaire | 0.8079 | 34.925029 | 75.50 | 21.30 |
| | Exponentielle | 0.5963 | 43.700949 | 69.89 | 18.21 |
| | Parabolique | 0.752 | 39.256309 | 72.80 | 20.15 |
| | Logarithmique | 0.7705 | 36.346167 | 74.73 | 20.93 |
| 15 C° | Linéaire | 0.7771 | 34.967095 | 76.76 | 20.86 |
| | Exponentielle | 0.5666 | 43.713999 | 71.52 | 17.72 |
| | Parabolique | 0.6750 | 39.298283 | 74.23 | 19.69 |
| | Logarithmique | 0.7401 | 36.390309 | 76.02 | 20.47 |
| 25 C° | Linéaire | 0.7568 | 34.994401 | 77.30 | 20.47 |
| | Exponentielle | 0.5469 | 43.722573 | 72.18 | 17.26 |
| | Parabolique | 0.6549 | 39.325380 | 74.86 | 19.28 |
| | Logarithmique | 0.7199 | 36.418899 | 76.58 | 20.08 |
| 35 C° | Linéaire | 0.7366 | 35.021699 | 77.64 | 20.03 |
| | Exponentielle | 0.5271 | 43.731680 | 72.54 | 16.72 |
| | Parabolique | 0.6347 | 39.352626 | 75.26 | 18.80 |
| | Logarithmique | 0.6996 | 36.447469 | 76.92 | 19.61 |
| 45 C° | Linéaire | 0.7163 | 35.049457 | 77.79 | 19.53 |
| | Exponentielle | 0.5074 | 43.741770 | 72.61 | 16.11 |
| | Parabolique | 0.6145 | 39.380640 | 75.43 | 18.25 |
| | Logarithmique | 0.6794 | 36.476501 | 77.06 | 19.10 |

Tab-III.3: Les caractéristiques électriques de cellule CIGS à gap gradué pour des températures allant de $0C^\circ$ à $45C^\circ$.

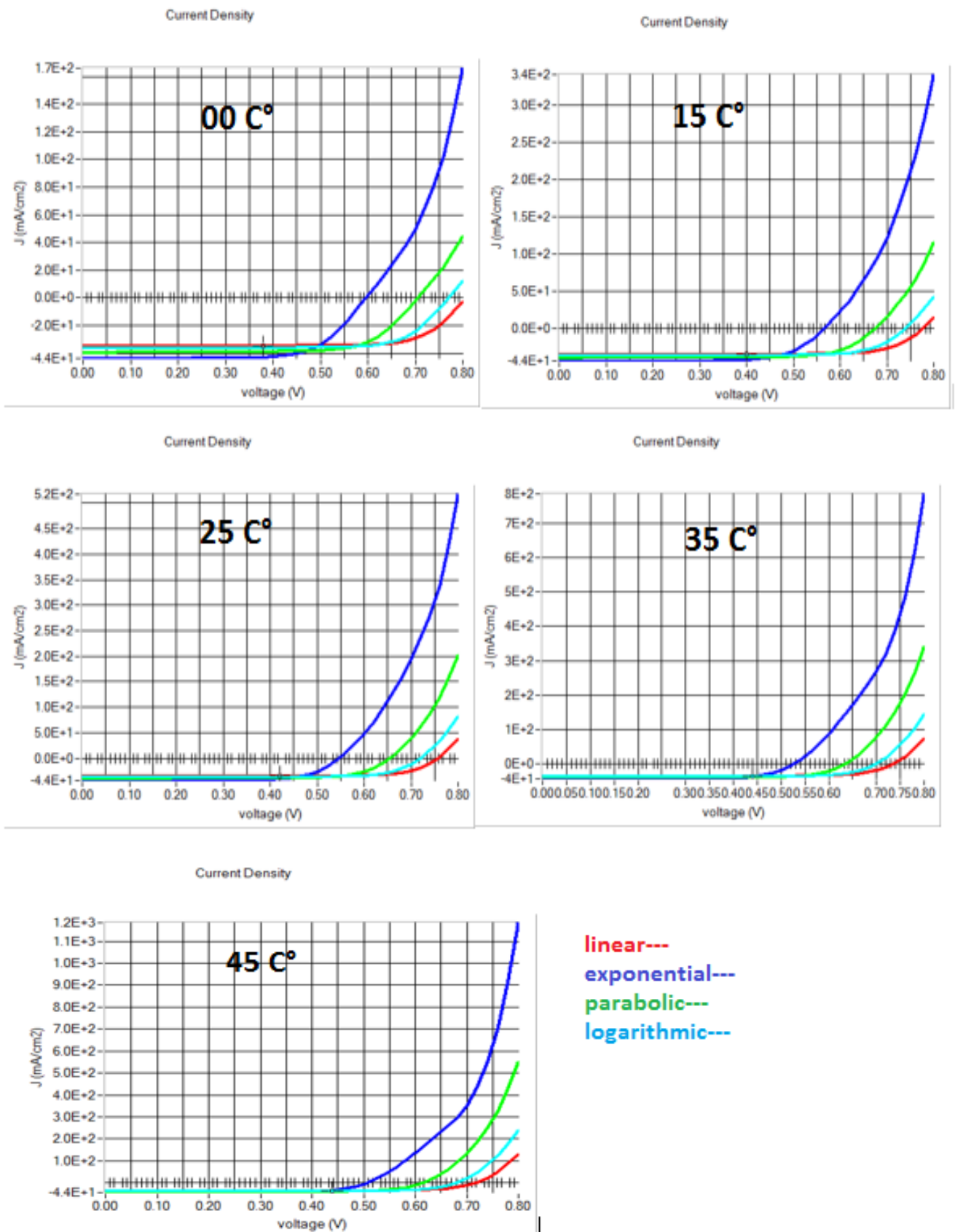


Fig-III.3 : Caractéristiques courant-tension de la cellule CIGS à gap gradué pour différentes températures et profils du gap d'énergie.

III.3.3 Effet de l'intensité de la lumière transmise

La lumière solaire est composée de toutes sortes de rayonnements, de couleurs différentes, caractérisées par différentes longueurs d'ondes. Des photons (grains de lumière) composent ce rayonnement. La fréquence de la lumière détermine sa couleur. Dans cette partie, nous allons analyser l'effet de l'intensité lumineuse incidente variant de 30% à 100% sur la caractéristique courant-tension de la cellule et par la suite sur ces paramètres électriques de sortie. Les résultats enregistrés sont donnés dans le tableau 3.3.

| Intensité de Lumière | Profile du gap | Vco(V) | Jsc (mA/cm) | FF (%) | η (%) |
|----------------------|----------------|--------|-------------|--------|------------|
| 100% | Linéaire | 0.7531 | 34.999437 | 77.38 | 10.40 |
| | Exponentielle | 0.5432 | 43.724204 | 72.27 | 17.17 |
| | Parabolique | 0.6511 | 39.330390 | 74.95 | 19.20 |
| | Logarithmique | 0.7161 | 36.424170 | 76.66 | 20.00 |
| 90% | Linéaire | 0.7499 | 31.499189 | 77.55 | 20.35 |
| | Exponentielle | 0.5398 | 39.351542 | 72.54 | 17.12 |
| | Parabolique | 0.6480 | 35.396937 | 75.16 | 19.15 |
| | Logarithmique | 0.7129 | 32.781423 | 76.84 | 19.95 |
| 70% | Linéaire | 0.7425 | 24.498893 | 77.89 | 20.24 |
| | Exponentielle | 0.5317 | 30.606373 | 73.12 | 17.00 |
| | Parabolique | 0.6405 | 27.530305 | 75.60 | 19.04 |
| | Logarithmique | 0.7055 | 25.496146 | 77.21 | 19.84 |
| 60% | Linéaire | 0.7326 | 17.498863 | 78.28 | 20.07 |
| | Exponentielle | 0.5214 | 21.861413 | 73.73 | 16.81 |
| | Parabolique | 0.6306 | 19.664037 | 76.08 | 18.87 |
| | Logarithmique | 0.6956 | 18.211162 | 77.61 | 19.66 |
| 30% | Linéaire | 0.7178 | 10.499110 | 78.67 | 19.76 |
| | Exponentielle | 0.5061 | 13.116664 | 74.36 | 16.46 |
| | Parabolique | 0.6158 | 11.798134 | 76.59 | 18.55 |
| | Logarithmique | 0.6808 | 10.926468 | 78.01 | 19.34 |

Tab-III.4: Caractéristiques de cellule solaire de CIGS.

Le tableau montre que le rendement η de la cellule solaire décroît avec l'augmentation de la lumière. Nous avons obtenu un rendement maximal de 20.35% avec une température de 90%.

Dans les figures ci-dessous nous donnant le tracé des caractéristiques courant-tension de la cellule étudiée pour différentes intensités lumineuses.

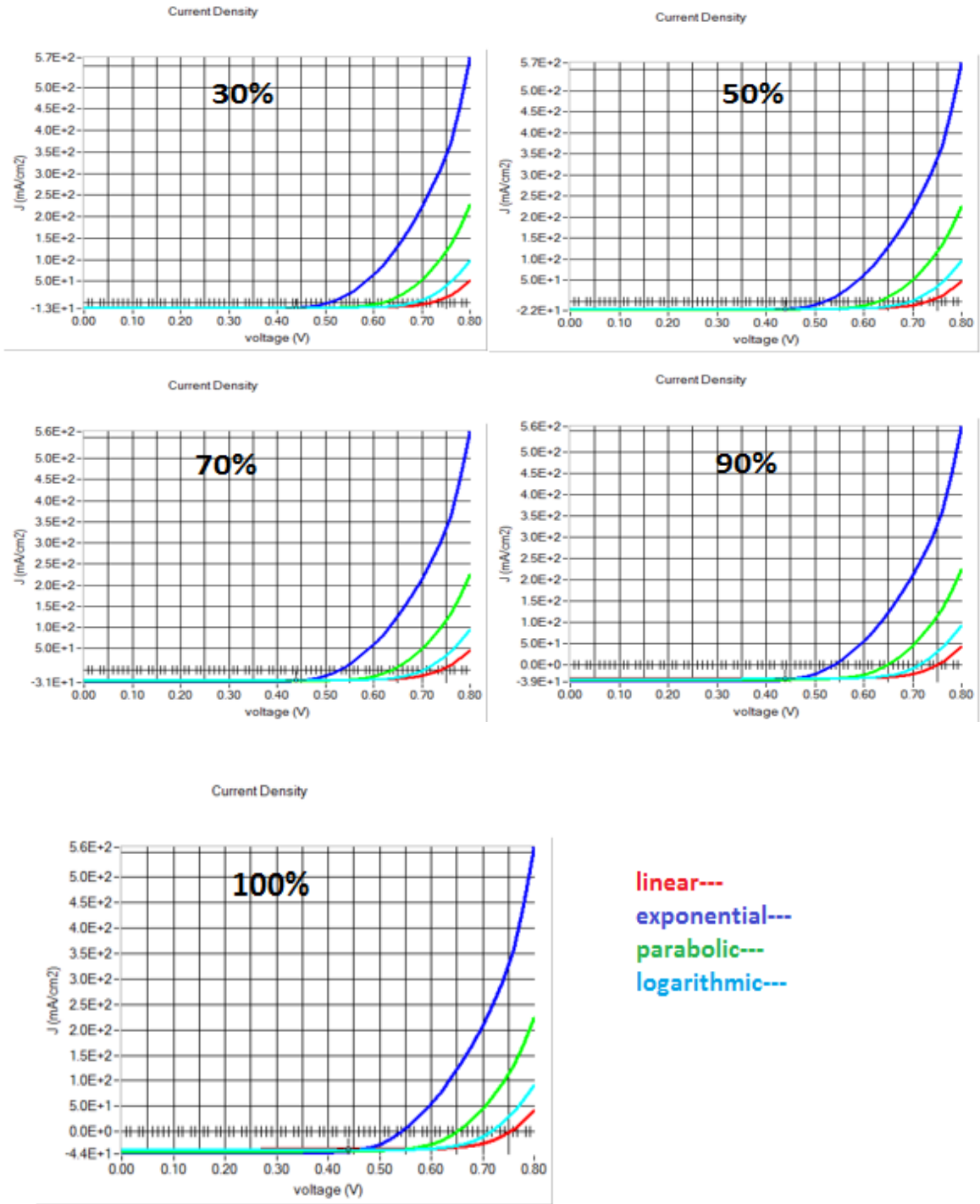


Fig-III.4 : Caractéristiques courant-tension de la cellule CIGS à gap gradué pour différentes intensités de lumière et profils du gap d'énergie.

III. 3.4 L'effet de l'épaisseur de la couche absorbante

Nous présentons ici les résultats de simulation de l'effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbante (P). Le tableau suivant résume les différentes caractéristiques de la structure pour différentes épaisseurs. A partir des résultats trouvés par la simulation que nous les représentons dans le tableau 3.4, nous observons que la densité de courant de court-circuit J_{sc} de la cellule photovoltaïque augmente lorsque l'épaisseur de la couche absorbante en CIGS augmente, puis elle décroît de 0.5260 pour une épaisseur supérieure à 1.5 μm . donc la valeur optimale de la couche absorbante en CIGS est 1.5 μm où le rendement est fixé à une valeur de 20.20 %, qu'il est le plus haut rendement.

Aussi nous remarquons que l'augmentation de l'épaisseur de la couche CIGS n'a pas beaucoup d'influence sur la tension de circuit ouvert V_{co} qu'elle est presque constante.

L'augmentation du rendement de conversion est dû principalement à l'accroissement de l'épaisseur de la couche absorbante de type p en CIGS. Plus l'épaisseur de cette couche augmente, plus de photons ayant des longueurs d'onde plus longues peuvent être collectés dans la couche absorbante [2.1]. Une couche absorbante très mince signifie physiquement que le contact en arrière et la région de déplétion sont très proches, ce qui favorise la capture d'électrons par ce contact. Cette forme de processus de recombinaison est préjudiciable aux performances de la cellule car il affecte V_{co} , J_{cc} et le rendement de conversion [1]

| Epaisseur | Profil du gap | V _{co} (V) | J _{sc} (mA/cm) | FF (%) | η (%) |
|-----------|---------------|---------------------|-------------------------|--------|-------|
| 100nm | Linéaire | 0.7741 | 26.701018 | 79.56 | 16.44 |
| | Exponentielle | 0.6702 | 30.811555 | 76.57 | 15.81 |
| | Parabolique | 0.6805 | 30.102614 | 77.29 | 15.83 |
| | Logarithmique | 0.7372 | 27.863278 | 78.86 | 16.20 |
| 800nm | Linéaire | 0.7552 | 35.030590 | 77.54 | 20.52 |
| | Exponentielle | 0.5546 | 43.515515 | 72.72 | 17.55 |
| | Parabolique | 0.6538 | 39.452575 | 75.22 | 19.40 |
| | Logarithmique | 0.7183 | 36.465305 | 76.81 | 20.12 |
| 1.5um | Linéaire | 0.7507 | 34.833560 | 77.24 | 20.20 |
| | Exponentielle | 0.5307 | 43.525573 | 71.58 | 16.43 |
| | Parabolique | 0.6488 | 38.891095 | 74.72 | 18.85 |
| | Logarithmique | 0.7137 | 36.242990 | 76.52 | 19.79 |
| 2.5um | Linéaire | 0.7498 | 34.662076 | 77.21 | 20.07 |
| | Exponentielle | 0.5260 | 43.095123 | 71.33 | 16.17 |
| | Parabolique | 0.6494 | 38.465625 | 74.76 | 18.67 |
| | Logarithmique | 0.7128 | 36.087878 | 76.49 | 19.68 |

Tab-III.5: Les caractéristiques électriques de cellule type CIGS pour une épaisseur variant de 100nm à 2.5um.

L'effet de la variation de l'épaisseur de la base de 100nm à 2.5μm sur la caractéristique J-V est représenté sur la figure 3.7.

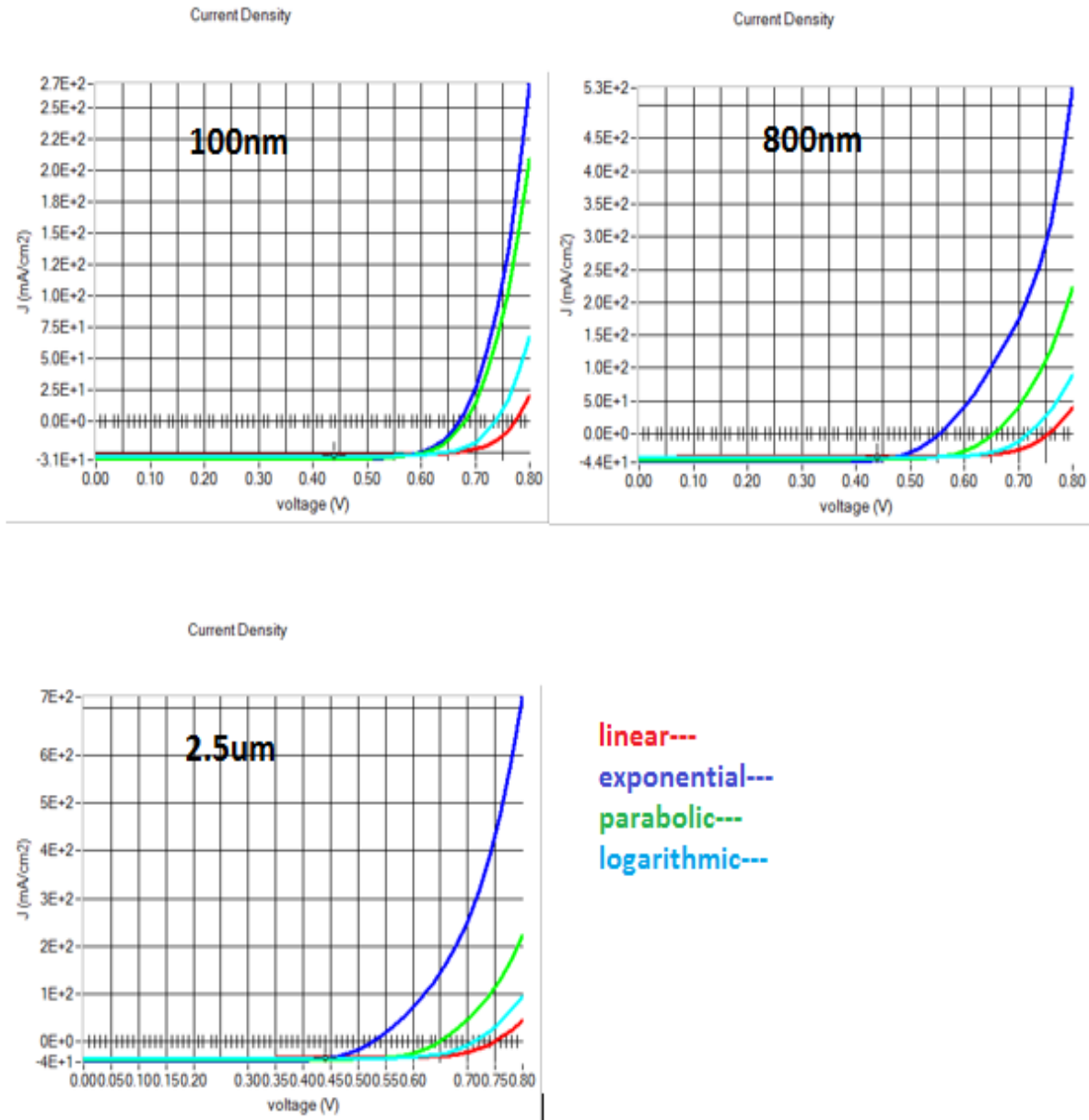


Fig-III.5 : Influence de l'épaisseur de la base sur la caractéristique J -V.

III.3.5 Effet de l'épaisseur de la couche i-ZnO

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de la couche i-ZnO sur les paramètres de sorties (V_{co} , I_{cc} , η et FF) des cellules solaires du type CIGS, l'épaisseur de la couche i-ZnO est variée de 100 nm jusqu'à 2.5um. Le tableau suivant montre l'évolution de ces paramètres en fonction de l'épaisseur de la couche d'oxyde de zinc (ZnO).

| Epaisseur | Profile du gap | Vco(V) | Jsc (mA/cm) | FF (%) | η (%) |
|-----------|----------------|--------|---------------|--------|------------|
| 100nm | Linéaire | 3.1393 | 1.440883 | 21.27 | 0.96 |
| | Exponentielle | 2.0791 | 1.309274 | 27.17 | 0.74 |
| | Parabolique | 2.7565 | 1.576434 | 23.76 | 1.03 |
| | Logarithmique | 1.9567 | 1.446200 | 29.10 | 0.82 |
| 800nm | Linéaire | 2.4375 | 732.310989E-3 | 25.70 | 0.46 |
| | Exponentielle | 2.5526 | 688.811312E-3 | 25.35 | 0.45 |
| | Parabolique | 2.3928 | 661.152074E-3 | 26.08 | 0.41 |
| | Logarithmique | 2.5472 | 688.984003E-3 | 25.38 | 0.45 |
| 1.5um | Linéaire | 2.4005 | 523.138705E-3 | 26.27 | 0.37 |
| | Exponentielle | 2.5394 | 644.534038E-3 | 25.51 | 0.42 |
| | Parabolique | 2.3772 | 535.252494E-3 | 26.55 | 0.34 |
| | Logarithmique | 2.5313 | 638.848609E-3 | 25.56 | 0.41 |
| 2.5um | Linéaire | 2.3091 | 461.979653E-3 | 27.16 | 0.29 |
| | Exponentielle | 2.5138 | 601.640510E-3 | 25.73 | 0.39 |
| | Parabolique | 2.2780 | 427.802865E3 | 27.49 | 0.27 |
| | Logarithmique | 2.5003 | 589.463915E-3 | 25.83 | 0.38 |

Tab-III.6 : Les caractéristiques électriques de la couche i-ZnO de cellule type CIGS pour une épaisseur variant de 100nm à 2.5um

Lorsque l'épaisseur du ZnO allant de 100 nm jusqu'à 2.5 Um, la tension de circuit ouvert diminue, le courant de court-circuit montre une diminution (de 461.979653E-3 mA), et aussi le rendement diminué une valeur minimal de 0.27 %.

Dans le tableau 3.6, nous représentons Les caractéristiques électriques de la couche i-ZnO de cellule type CIGS obtenus par la simulation tel que le courant de court-circuit Jsc, la tension de circuit ouvert Vco, le rendement et le facteur de forme. Nous remarquons que la variation de l'épaisseur de la couche en ZnO n'a pas d'une grande influence sur les performances de la cellule solaire, telle que les performances diminuent avec des petites valeurs. Donc on préfère que l'épaisseur de la couche ZnO soit la plus petite possible.

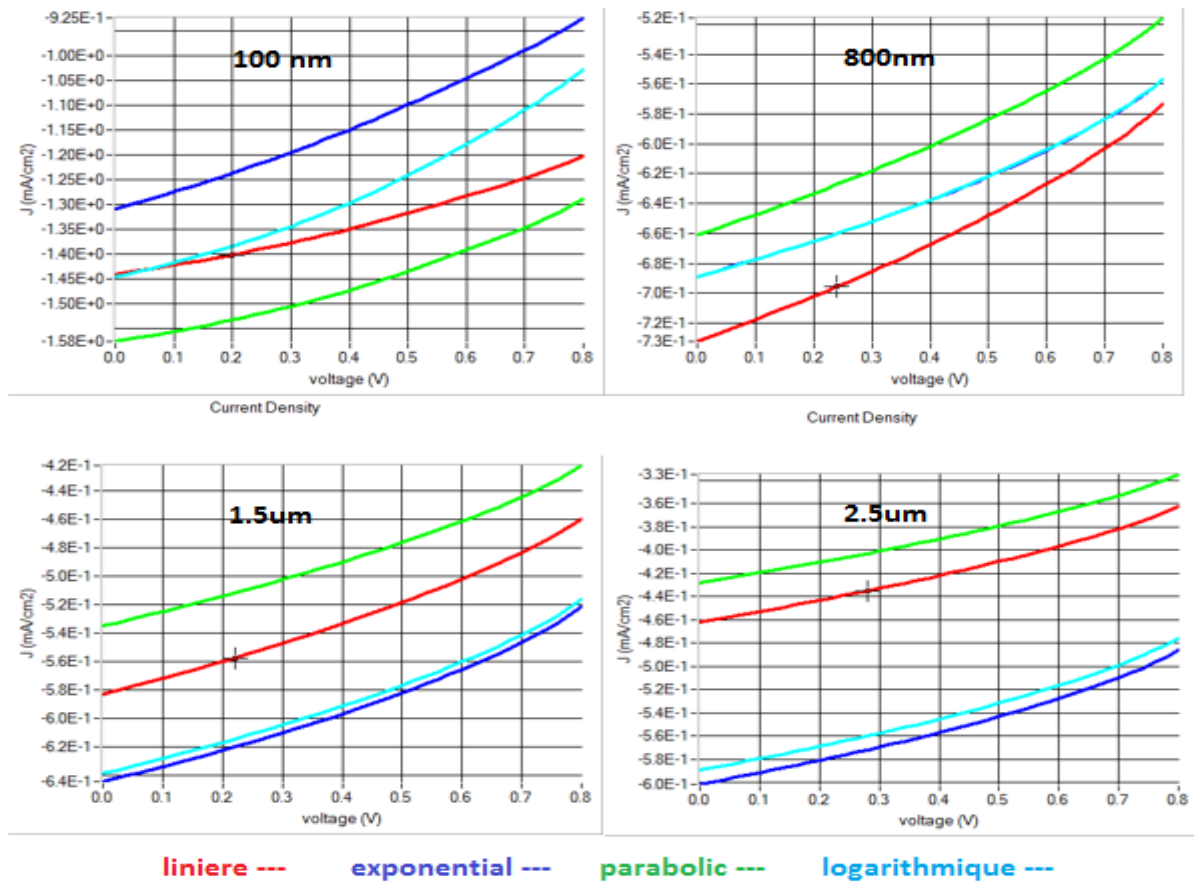


Fig-III.6 : Influence de l'épaisseur de la couche i-ZnO sur la caractéristique J-V

On va tracer les courbes pour la couche i-Zno sur une autre tension de 00V a 1.5V a la place de 0.8 V comme une valeur max dans le tableau suivant :

| Epaisseur | formule | Vco(V) | Jsc (ma/cm) | FF (°/°) | η (°/°) |
|-----------|---------------|--------|-------------|----------|---------|
| 100nm | linier | 0.5466 | 44.582613 | 72.37 | 17.64 |
| | exponentielle | 0.5461 | 44.204002 | 72.34 | 17.46 |
| | parabolique | 0.5465 | 44.497851 | 72.330 | 17.58 |
| | logarithmique | 0.5462 | 44.306377 | 72.31 | 17.50 |
| 800nm | linier | 0.5444 | 42.114687 | 72.51 | 16.63 |
| | exponentielle | 0.5449 | 42.773481 | 72.51 | 16.90 |
| | parabolique | 0.5444 | 42.101946 | 72.51 | 16.62 |
| | logarithmique | 0.5449 | 42.688863 | 72.51 | 16.86 |

| | | | | | |
|-------|---------------|--------|-----------|-------|-------|
| 1.5um | linier | 0.5430 | 40.428187 | 72.60 | 15.94 |
| | exponentielle | 0.5442 | 41.912760 | 72.56 | 16.55 |
| | parabolique | 0.5424 | 39.591402 | 72.63 | 15.60 |
| | logarithmique | 0.5430 | 40.412181 | 72.60 | 15.93 |
| 2.5um | linier | 0.5413 | 38.350829 | 72.70 | 15.09 |
| | exponentielle | 0.5433 | 40.793652 | 72.62 | 16.10 |
| | parabolique | 0.5403 | 37.219418 | 72.74 | 14.63 |
| | logarithmique | 0.5413 | 38.331607 | 72.70 | 15.08 |

Tab-III.7 : Les caractéristiques électriques de la couche i-ZnO de cellule type CIGS

Dans une épaisseur de 100nm à 2.5um

Lorsque l'épaisseur du ZnO allant de 100 nm jusqu'à 2.5 Um, la tension de circuit ouvert diminue, le courant de court-circuit montre une diminution (de 37.219418 mA), et aussi le rendement diminuera une valeur minimal de 14.63 %.

Malgré on a augmenté la tension max de 0.8v à 1.5v la même remarque quele tableau 3.6, le rendement atteint une valeur optimale de 17.64% tandis quela variation de l'épaisseur de la couche en ZnO n'a pasune grande influence sur les performances de la cellule solaire, où les performances diminuent avec des petites valeurs. Donc on préfère que l'épaisseur de la couche ZnO soit le plus petit possible.

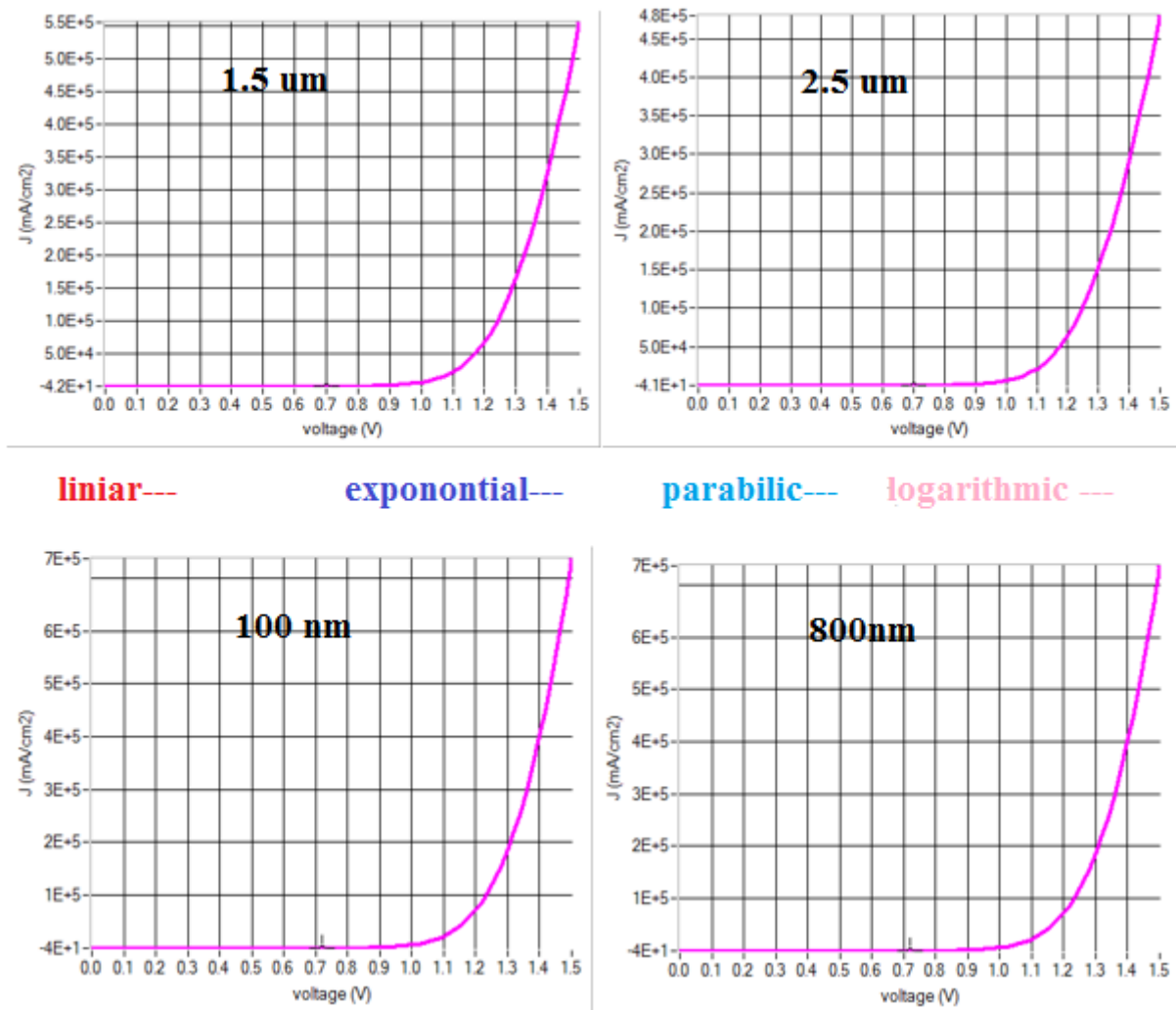


Fig-III.7 : Influence de l'épaisseur de la couche i-ZnO sur la caractéristique J-V

III.3.6 L'effet du dopage

Les cellules solaires comme tous composants électroniques sont basées sur la jonction PN. Il est donc important d'avoir de bons dopages (type N et P) afin d'obtenir des dispositifs efficaces. L'effet du dopage de la couche absorbante est considéré dans cette partie, tout en comparant les caractéristiques J-V obtenues. Le tableau 3-7 rassemble les valeurs obtenues pour V_{co} , J_{sc} , FF, η lors de la variation du dopage de la couche absorbante.

| Dopage (cm^{-3}) | Profil du gap | V _{co} (V) | J _{sc} (mA/cm) | FF (%) | η (%) |
|---|---------------|---------------------|-------------------------|-----------|------------|
| 1.10¹⁶ | Linéaire | 0.7408 | 35.632224 | 79.56 | 21.00 |
| | Exponentielle | 0.5347 | 44.124668 | 74.23 | 17.51 |
| | Parabolique | 0.6389 | 40.063931 | 77.42 | 19.82 |
| | Logarithmique | 0.7039 | 37.089453 | 78.90 | 20.60 |
| 1.10¹⁹cm⁻³ | Linéaire | 2.0334 | 1.448037 | 26.38 | 0.78 |
| | Exponentielle | 1.1517 | 1.304721 | 43.36 | 0.65 |
| | Parabolique | 1.2990 | 1.380984 | 38.50 | 0.69 |
| | Logarithmique | 1.8312 | 1.432803 | 28.63 | 0.75 |
| 2.10¹⁶cm⁻³ | Linéaire | 0.7531 | 34.999437 | 77.38 | 20.40 |
| | Exponentielle | 0.5432 | 43.724204 | 72.27 | 17.17 |
| | Parabolique | 0.6511 | 39.330390 | 74.95 | 19.20 |
| | Logarithmique | 0.7161 | 36.424170 | 76.66 | 20.00 |
| 2.10¹⁷cm⁻³ | Linéaire | 0.8564 | 30.350978 | 27.69 | 5.90 |
| | Exponentielle | 0.6669 | 23.911357 | 10.14 | 1.62 |
| | Parabolique | 0.7348 | 31.134618 | 17.91 | 4.10 |
| | Logarithmique | 0.7957 | 31.071074 | 21.79 | 5.39 |
| 2.10¹⁹cm⁻³ | Linéaire | 2.1295 | 1.437894 | 25.65 | 0.79 |
| | Exponentielle | 1.3801 | 1.315747 | 36.94 | 0.67 |
| | Parabolique | 1.5192 | 1.376942 | 33.77 | 0.71 |
| | Logarithmique | 1.9654 | 1.422772 | 27.55 | 0.76 |

Tab-III.8 : Caractéristiques de cellule solaire de CIGS pour quelques concentrations du dopage de la couches absorbante.

Nous remarquons aussi que le rendement et le facteur de forme subissent une augmentation pour un dopage 1.10^{16}cm^{-3} et 2.10^{16}cm^{-3} mais, diminue pour un dopage 2.10^{19}cm^{-3} et 2.10^{17}cm^{-3} et 1.10^{19}cm^{-3} . Le rendement le plus élevé est obtenu à la concentration de 1.10^{16} de 21%. Les caractéristiques des matériaux semi-conducteurs sont fortement influencées par les concentrations des impuretés ou les défauts. Ces derniers sont ajoutés pour augmenter la conductivité électrique ou le contrôle de la durée de vie, mais souvent ces impuretés ou ces imperfections dans le réseau, à partir d'un certain seuil, agissent comme facteurs de perte, par conséquent une concentration élevée de défauts défavorise le transport des porteurs, réduisant ainsi le rendement de conversion. Pour voir l'influence du dopage de la base CIGS nous avons procédé à la variation du dopage de 1.10^{16}cm^{-3} à 2.10^{19}cm^{-3} . L'influence du dopage de l'absorbeur CIGS sur la caractéristique IV est représentée sur la figure.

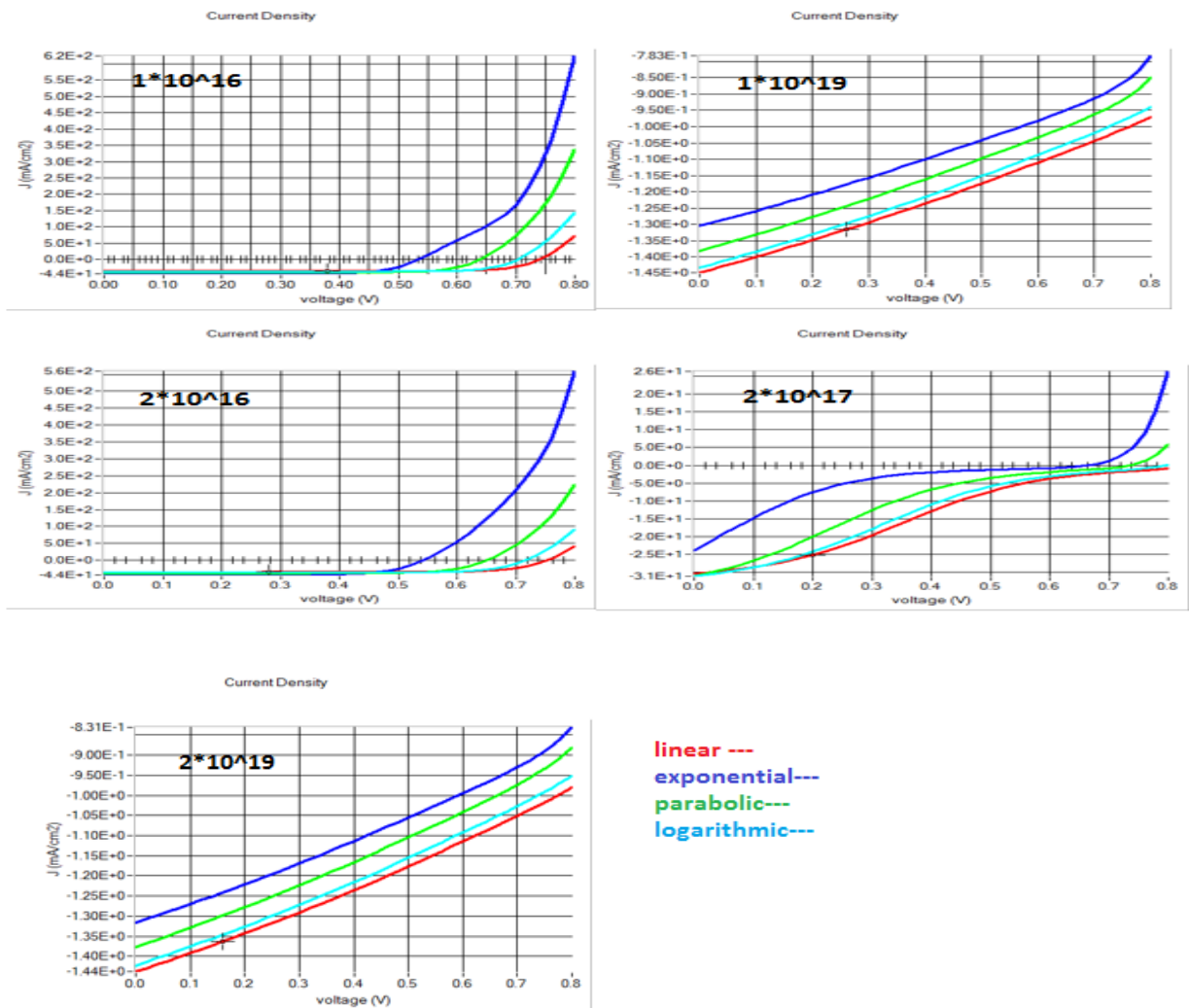


Fig-III.8 : Courbes courant-tension de la cellule CIGS en variant dans le dopage de la couche absorbante.

On va tracer les courbes pour la couche absorbante sur une autre tension de 00V a 1.5V a la place de 0.8 V comme une valeur max dans le tableau suivant

| Dopage (cm ⁻³) | formule | V _{co} (V) | J _{sc} (mA/cm) | FF (%) | η (%) |
|-------------------------------|---------------|---------------------|-------------------------|--------|-------|
| 1.10 ¹⁶ | linier | 0.7408 | 35.632224 | 79.56 | 21.00 |
| | exponentielle | 0.5347 | 44.124668 | 74.23 | 17.51 |
| | parabolique | 0.6389 | 40.063931 | 77.42 | 19.82 |
| | logarithmique | 0.7039 | 37.089453 | 78.90 | 20.60 |
| 1.10 ¹⁹ | linier | 0.9852 | 1.448073 | 55.17 | 0.79 |
| | exponentielle | 0.8736 | 1.304721 | 57.16 | 0.65 |
| | parabolique | 0.8887 | 1.380984 | 56.27 | 0.69 |
| | logarithmique | 0.9470 | 1.432803 | 55.49 | 0.75 |
| 2.10 ¹⁶ | linier | 0.7531 | 34.999437 | 77.38 | 20.40 |
| | exponentielle | 0.5432 | 43.724204 | 72.27 | 17.17 |
| | parabolique | 0.6511 | 39.330390 | 74.95 | 19.20 |
| | logarithmique | 0.7161 | 36.424170 | 76.66 | 20.00 |
| 2.10 ¹⁷ | linier | 0.8334 | 30.350978 | 23.31 | 5.90 |
| | exponentielle | 0.6669 | 23.911357 | 10.14 | 1.62 |
| | parabolique | 0.7348 | 31.134618 | 17.91 | 4.10 |
| | logarithmique | 0.7957 | 31.071074 | 21.79 | 5.39 |
| 2.10 ¹⁹ | linier | 1.0052 | 1.437894 | 55.49 | 0.80 |
| | exponentielle | 0.8953 | 1.315747 | 56.46 | 0.67 |
| | paralique | 0.9088 | 1.376942 | 55.82 | 0.71 |
| | logarithmique | 0.9670 | 1.422772 | 27.55 | 0.77 |

Tab-III.9 : Caractéristiques de cellule solaire de CIGS

Nous remarquons que le rendement et le facteur de forme subissent une augmentation pour un dopage 1.10^{16}cm^{-3} et 2.10^{16}cm^{-3} mais, diminuent pour un dopage 2.10^{19}cm^{-3} et 2.10^{17}cm^{-3} et 1.10^{19}cm^{-3} . Le rendement le plus élevé est obtenu à la concentration de 1.10^{16} de 21%. Les

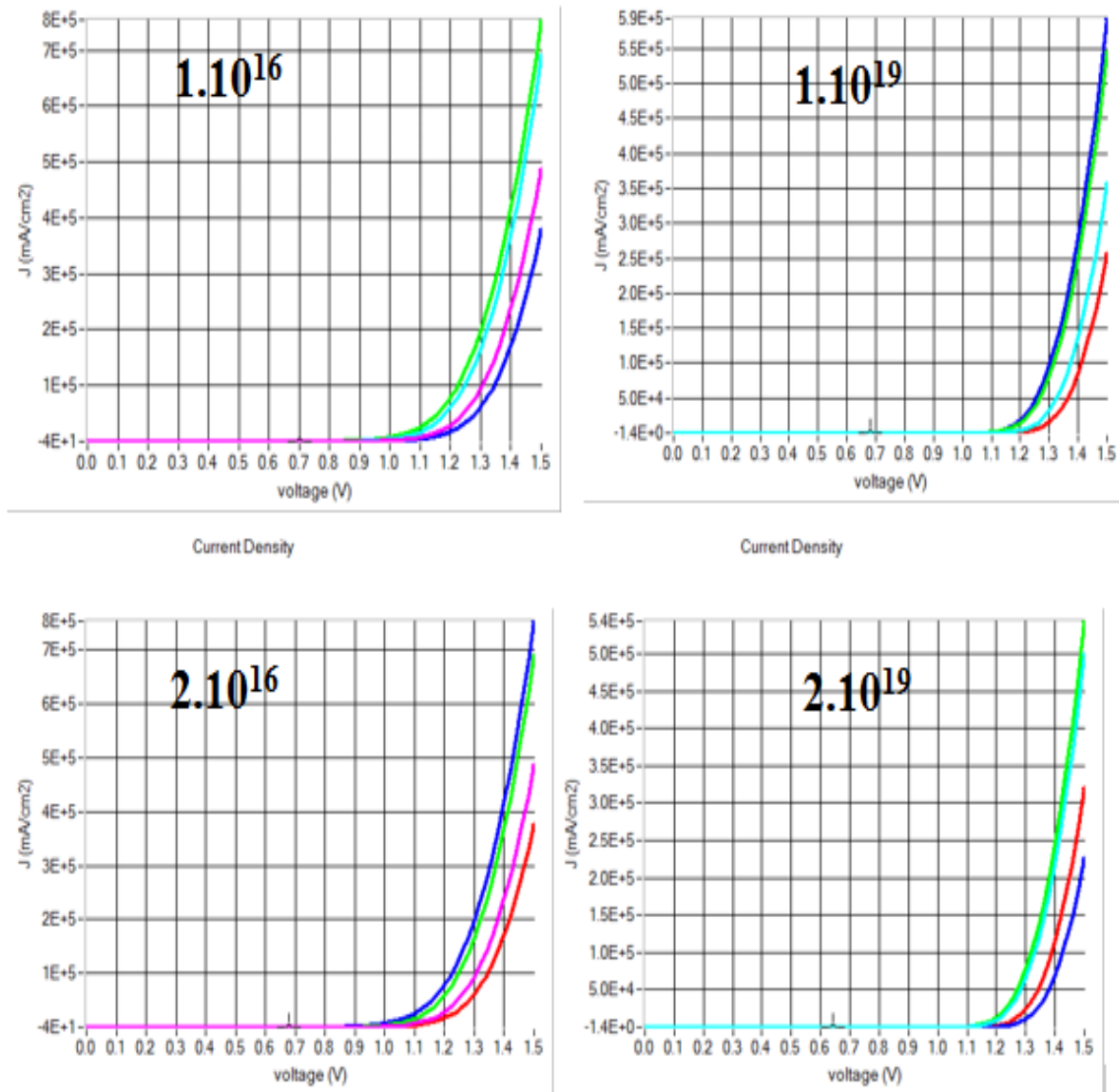


Fig-III.9 : Courbes courant-tension de la cellule type CIGS en fonction de la variation du dopage de la couche absorbante

III.3.7 L'effet du dopage de la couche CdS

Le tableau suivant résume les résultats obtenus de la variation du dopage de CdS, de l'influence du dopage de CdS sur le rendement de conversion.

| Dopage (cm^{-3}) | Profile du gap | Vco(V) | Jsc (mA/cm) | FF (%) | η (%) |
|--------------------------------|----------------|--------|-------------|--------|------------|
| 1.10^{16} | Linéaire | 0.5456 | 43.639684 | 72.35 | 17.23 |
| | Exponentielle | 0.5456 | 43.639684 | 72.35 | 17.23 |
| | Parabolique | 0.5456 | 43.639684 | 72.35 | 17.23 |
| | Logarithmique | 0.5456 | 43.639684 | 72.35 | 17.23 |
| 1.10^{19} | Linéaire | 0.5455 | 43.454331 | 78.24 | 18.55 |
| | Exponentielle | 0.5455 | 43.454331 | 78.24 | 18.55 |
| | Parabolique | 0.5455 | 43.454331 | 78.24 | 18.55 |
| | Logarithmique | 0.5455 | 43.454331 | 78.24 | 18.55 |
| 2.10^{16} | Linéaire | 0.5456 | 43.643286 | 72.95 | 17.37 |
| | Exponentielle | 0.5456 | 43.643286 | 72.95 | 17.37 |
| | Parabolique | 0.5456 | 43.643286 | 72.95 | 17.37 |
| | Logarithmique | 0.5456 | 43.643286 | 72.95 | 17.37 |
| 2.10^{17} | Linéaire | 0.5454 | 43.674969 | 77.36 | 18.43 |
| | Exponentielle | 0.5454 | 43.674969 | 77.36 | 18.43 |
| | Parabolique | 0.5454 | 43.674969 | 77.36 | 18.43 |
| | Logarithmique | 0.5454 | 43.674969 | 77.36 | 18.43 |
| 2.10^{19} | Linéaire | 0.5455 | 43.398643 | 78.24 | 18.52 |
| | Exponentielle | 0.5455 | 43.398643 | 78.24 | 18.52 |
| | Parabolique | 0.5455 | 43.398643 | 78.24 | 18.52 |
| | Logarithmique | 0.5455 | 43.398643 | 78.24 | 18.52 |

Tab-III.10: Influence de dopage du CdS sur les paramètres de sortie de la cellule.

Nous avons varié les valeurs de la concentration du dopage Nd de la couche en CdS de $1.10^{16} \text{ cm}^{-3}$ à $2.10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Nous remarquons que l'augmentation de la concentration de dopage Nd du couche CdS influe beaucoup plus sur le courant de court-circuit Jsc et le facteur de forme FF, où le Jsc et le FF croit avec l'augmentation de Nd. D après les résultats trouvés on peut dire que la valeur optimale de dopage Nd de CdS est $1.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ pour un rendement plus haut de 18.55 %

La figure suivante représente les caractéristiques J-V de notre cellule pour une variation du dopage de la couche tampon CdS .

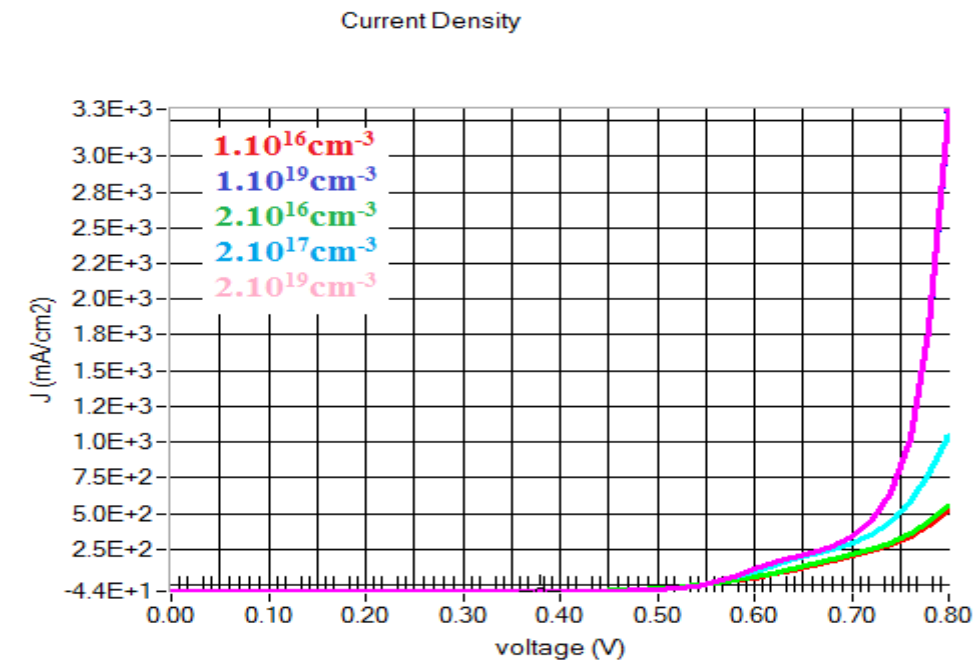


Fig-III.10 : Courant-tension de cellule type CIGS en variant dans le dopage de La couche CdS.

III.3.8 Effet de la concentration des défauts (accepteurs)

Le tableau suivant résume effet de la concentration des défauts. Nous pouvons voir que l'augmentation des défauts, entraîne une diminution importante du rendement de concentration $1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et $1.10^{20} \text{ cm}^{-3}$ et $2.10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Ceci est dû à une diminution du V_{co} et surtout à la dégradation du facteur de forme (FF). On a un bon rendement de 25.21% pour une concentration des défauts de $2.10^{10} \text{ cm}^{-3}$

| Concentration des Défauts (cm^{-3}) | Profil du gap | $V_{co}(V)$ | $J_{sc} (\text{mA/cm})$ | FF (%) | η (%) |
|--|---------------|-------------|-------------------------|--------|------------|
| 1.10^{14} | linier | 0.7530 | 35.001449 | 77.38 | 20.39 |
| | exponentielle | 0.5432 | 43.725972 | 72.26 | 17.16 |
| | parabolique | 0.6510 | 39.332953 | 14.96 | 19.19 |
| | logarithmique | 0.7160 | 36.426296 | 16.66 | 19.99 |
| 1.10^{18} | linier | 0.4436 | 25.268976 | 31.59 | 3.54 |
| | exponentielle | 0.2287 | 18.070770 | 26.00 | 1.07 |
| | parabolique | 0.3446 | 23.735613 | 27.88 | 2.28 |
| | logarithmique | 0.4069 | 25.080480 | 29.89 | 3.05 |
| 1.10^{20} | linier | 0.2183 | 398.612574E -3 | 24.99 | 0.02 |
| | exponentielle | 0.2183 | 398.612574E-3 | 24.99 | 0.02 |
| | parabolique | 0.1152 | 228.974525E-3 | 24.53 | 0.01 |
| | logarithmique | 0.1808 | 337.647312 E-3 | 24.84 | 0.02 |
| 2.10^{10} | linier | 0.7937 | 36.021171 | 81.83 | 23.39 |
| | exponentielle | 0.6868 | 44.671279 | 82.16 | 25.21 |
| | parabolique | 0.6988 | 40.640675 | 80.19 | 22.77 |
| | logarithmique | 0.7566 | 37.509058 | 81.18 | 23.04 |
| 2.10^{14} | linier | 0.7389 | 34.380470 | 75.70 | 19.23 |
| | exponentielle | 0.5243 | 43.029507 | 70.49 | 15.90 |
| | parabolique | 0.6366 | 38.533500 | 73.22 | 17.96 |
| | logarithmique | 0.7019 | 35.769257 | 74.97 | 18.82 |
| 2.10^{16} | linier | 0.5815 | 29.748070 | 63.31 | 10.95 |
| | exponentielle | 0.3706 | 35.998583 | 54.33 | 7.25 |
| | paralique | 0.4841 | 32.795048 | 59.58 | 9.52 |
| | logarithmique | 0.5450 | 30.857796 | 62.22 | 10.46 |

Tab-III.11: Influence de concentration des défauts dans la couche absorbante sur les paramètres de sortie de la cellule.

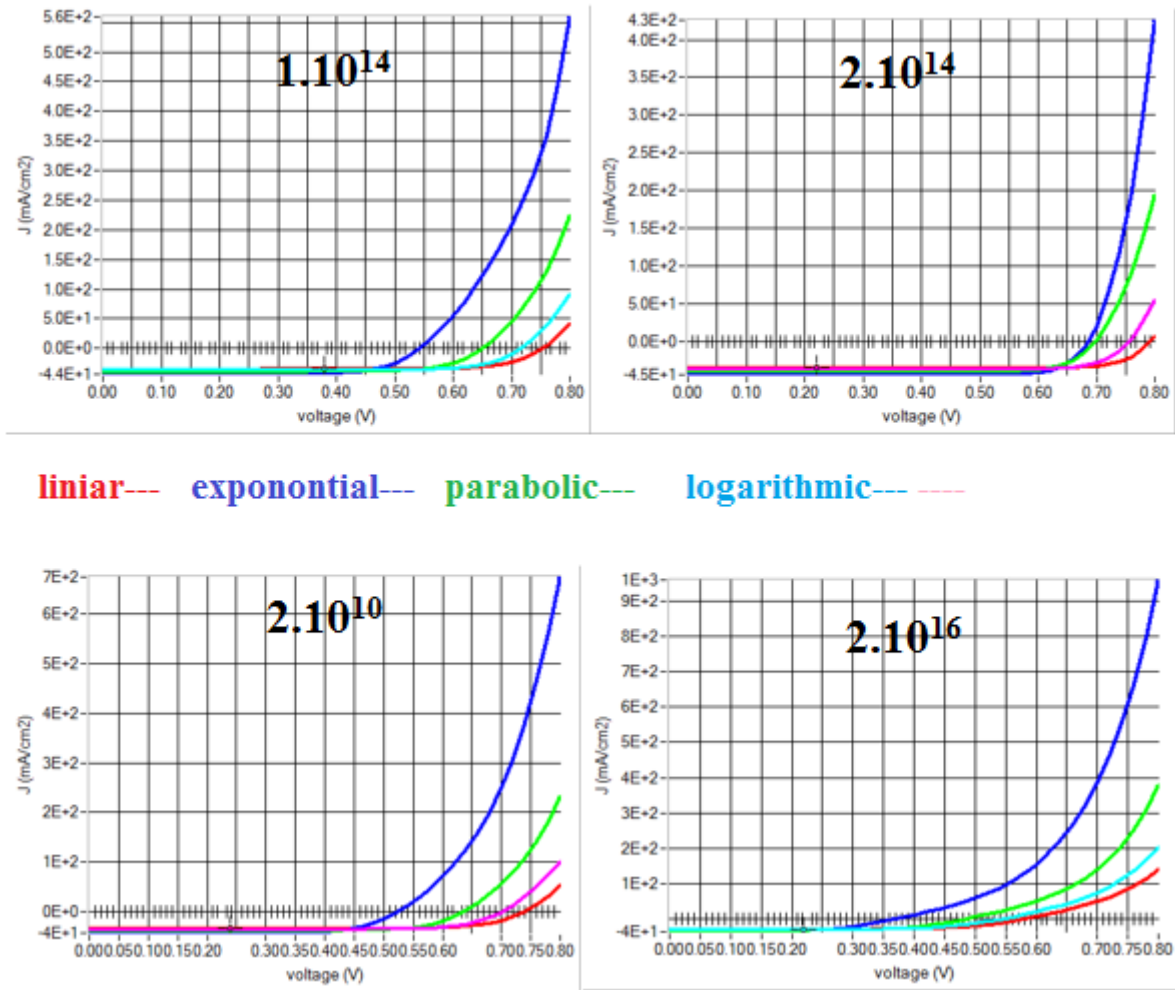


Fig-III.11 : Courbes courant-tension de la cellule CIGS en variant la concentration des défauts de la couche absorbante.

Références bibliographiques

[1] : Amar Hichem, « Propriétés électriques de cellule solaire à base de Sélénure de Cuivre Indium Galium $\text{CuIn}_{(1-x)}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS) », Mémoire de Magister en : Electronique, Université Mohamed Khider – Biskra.

[2] : Jiyon Song, T. J. Anderson, and Sheng S. Li, Photovoltaic Specialists Conference, 2008. PVSC '08. 33rd IEEE.

[3] : BENSALÉM SALAHEDDINE, « l'effet de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires », mémoire de magister en physique, université de FERHAT ABBAS 6 Setif, 2011.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire nous avons fait une étude sur une cellule photovoltaïque en couche mince à base de matériaux chalcopyrite, notamment le CIGS, En utilisant l'environnement de simulation numérique SCAPS 3308. Nous avons commencé notre mémoire par une présentation théorique des principales sources d'énergie suivi par des généralités sur les cellules photovoltaïques et spécifiquement en couches minces. Nous avons de même détaillé le fonctionnement et les caractéristiques de la cellule CIGS. Par la suite nous avons entamé la simulation numérique des performances de la cellule proposée. La simulation numérique de nous a permis d'extraire les paramètres électriques de sortie qui caractérisent la cellule solaire, qui sont : La densité du courant de court-circuit (J_{sc} (mA /cm²), la tension en circuit ouvert (V_{oc} (V), le facteur de forme FF et le rendement de conversion η . Donc, extraire les valeurs optimales de ces paramètres en fonction de la variation de : l'épaisseur et le dopage de chaque couche, l'intensité lumineuse ainsi que la température. Les paramètres optimaux correspondent aux bonnes performances afin d'améliorer l'efficacité de la cellule solaire. Pour cela, nous avons effectué une optimisation des grandeurs (épaisseur, dopage) des couches CIGS de type p et de type n et de la couche fenêtre en ZnO, par la simulation. On peut résumer les résultats de l'étude de simulation comme suite:

- L'augmentation de l'épaisseur de la couche en ZnO diminue le rendement de conversion de la cellule η .
- L'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbant de type p en CIGS entraîne une augmentation dans le rendement η et le facteur de forme FF avec des petites valeurs, où la tension de circuit ouvert V_{oc} presque constant.

- L'augmentation du dopage de la couche en CdS de 1.10^{16} à 2.10^{19} cm^{-3} due à la croissance du rendement et le facteur de forme FF.
- le rendement η et le facteur de forme FF croissent pour une variation de 1.10^{16} et 2.10^{16} de la concentration de dopage de la couche absorbant en CIGS, puis ils décroissent pour un dopage plus 2.10^{16} cm^{-3} .

Nous avons étudié l'effet de température sur les paramètres de la cellule photovoltaïque, où on peut résumer l'effet de température comme suite :

L'augmentation de la température provoque une augmentation de la densité de courant du court-circuit (J_{cc}), au même temps on assiste à une diminution nette de la tension en circuit ouvert (V_{co}). Concernant l'évolution du rendement de la conversion PV η en fonction de la température, il diminue avec l'augmentation de la température, telle que la valeur maximum de η est correspondant presque à la température ambiante.

Résumé

L'utilisation des couches minces pour les cellules solaires a fortement amélioré leur rendement. Parmi les matériaux utilisés on peut citer le silicium amorphe, les composés CdTe et Chalcopyrites. Ces derniers offrent l'avantage de posséder un coefficient d'absorption élevé. En se basant sur des outils de simulation nous tentons, dans ce travail, d'optimiser les performances électriques des cellules à base de matériaux chalcopyrite.

Mots clés : Chalcopyrite, cellule photovoltaïque, SCAPS 3308.

ملخص

أدى استخدام الأغشية الرقيقة للخلايا الشمسية إلى تحسين أدائها بشكل كبير. من بين المواد المستخدمة، يمكن ذكر يوفير الأخير ميزة وجود معامل امتصاص مرتفع. $CdTe$ و chalcopyrite السيلينيكون غير المتبلور، ومركبات استنادًا إلى أدوات المحاكاة، نحاول في هذا العمل تحسين الأداء الكهربائي للخلايا استنادًا إلى مواد الكالكوبيريت

الكلمات المفتاحية: الخلايا الشمسية الكالكوبيريت. SCAPS 3308