

République Algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université SAAD DAHLEB BLIDA



Faculté de Technologie
Département d'Électronique

**Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme
Master en Microélectronique**

Présenté par :
ABDALLAH SARRA
DJILALI RABAH HADJER

**Étude et simulations d'une cellule solaire
double jonction à base de CGS/Si**

Proposé par :
Nacer Said

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

Tous d'abord nous voudrions remercier Allah tout-puissant de nous avoir donné la force et le courage pour achever ce travail.

Nous tenons à remercier notre promoteur le professeur NACER SAID pour son aide, sa disponibilité, son suivi, sa patience, et surtout ses judicieux conseils, qui contribué à alimenter notre réflexion.

Nous tenons à remercier les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'assister à notre soutenance et d'évaluer ce travail avec attention.

Nous adressons notre sincère gratitude à tous les enseignants et le personnel du Département de génie électrique, en particulier les enseignants de microélectronique.

Nous tenons également à remercier nos parents pour leur prière et leurs conseils.

Je souhaite personnellement remercier mon binôme SARA, avec laquelle j'ai pris beaucoup de plaisir à travailler.

Je souhaite remercier mon binôme HADJER, ma partenaire de mémoire, avec laquelle j'ai beaucoup de plaisir à travailler.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents.

Mon cher marie Karim

Merci énormément

Mes frères et mes sœurs.

Toute ma famille.

Tous mes amis.

Tous mes collègues.

Tous ceux qui m'ont aidé pour accomplir ce mémoire.

*Tous les professeurs qui nous ont enseigné car si nous sommes là
aujourd'hui c'est bien grâce à vous tous, donc un grand merci pour vous.*

Sarra Abdallah

Dédicace

Je tiens avec grand plaisir que je dédie ce modeste travail :

À l'être le plus chère de ma vie, ma mère.

À celui qui mon fait de moi un homme, mon père

À mes chères sœurs et mon frère.

À mon cher mari Founes.

À ma copine Fasmine.

À tous mes amis de 2eme année master en microélectronique.

À tous les enseignants de département.

Hadjer Djilali Rabah

Résumé

Le sujet de ce mémoire porte sur l'étude et l'optimisation d'une cellule solaire double jonctions CGS/Si. L'étude s'est faite en variant les épaisseurs des couches absorbantes des deux cellules (supérieure et inférieure) tout en observant la variation de leurs paramètres caractéristiques (J_{cc} , V_{co} , P_{max} , η , FF). Ensuite, on a procédé à l'optimisation où on a fixé l'épaisseur de la couche Si à sa valeur optimale de $120\mu\text{m}$, quant à celle de la couche CGS, elle était variable entre $0,1$ à $3\mu\text{m}$. L'épaisseur optimale assurant l'égalité des courants de court-circuit des cellules supérieure et inférieure est $0,7\mu\text{m}$. La structure optimale présente un rendement maximal de $27,6\%$, une densité de courant de court-circuit de $22,9\text{ (mA/cm}^2\text{)}$ et une tension de circuit-ouvert de 1.65(V) . L'outil de modélisation et de simulation est le logiciel COMSOL Multiphysics.

Mots clés : modélisation, cellule solaire, multijonction, CIGS, Si, rendement, couches minces, COMSOL Multiphysic

ملخص

يتمحور موضوع هذه الأطروحة حول دراسة وتحسين الخلية الشمسية مزدوجة التوصيل CIGS/Si. تمت الدراسة بتغيير سمك الطبقات الماصة العلوية والسفلية مع ملاحظة تغيرات الخصائص المميزة (J_{cc} , V_{co} , P_{max} , η , FF)، تطرقنا بعدها إلى تحسين أداء الخلية وذلك بتثبيت سمك الطبقة Si بـ $120\mu\text{m}$ ، أما بالنسبة للطبقة CIGS فتم تغييرها من 0.1 إلى $3\mu\text{m}$. يبلغ سمك الطبقة المثالي $0.7\mu\text{m}$ الذي يسمح لنا بالحصول على الكفاءة المثلى والتي تقرب بـ 27.6% هذه القيمة تحقق شرط تساوي كثافة التيار للدائرة القصيرة في الخليتين، مع العلم أن $J_{cc} = 22.9\text{ (mA/cm}^2\text{)}$. وتوتر الدائرة المفتوحة $V_{co} = 1.65\text{(V)}$.

أما بالنسبة لأداة المحاكاة والنمذجة المستعملة فتتمثل في برنامج COMSOL Multiphysic والكلمات المفتاحية: المحاكاة، الكفاءة، Si، CIGS، COMSOL Multiphysic.

Abstract

The topic of this paper is the study and optimization of a solar cell with double CGS/Si junctions. The study was carried out by varying the thickness of the absorbent layers of the two cells (upper and lower) while observing the variation of their characteristic parameters (J_{cc} , V_{co} , P_{max} , η , FF). Then the optimization was carried out where the thickness of the layer was fixed If at its optimum value of $120\mu\text{m}$, as for the layer CGS, it was variable between $0,1$ and $3\mu\text{m}$. The optimum thickness ensuring equal short-circuit currents of the upper and lower cells is $0.7\mu\text{m}$. The optimal structure has a maximum efficiency of 27.6% , a short-circuit current density of $22.9\text{ (mA/cm}^2\text{)}$ and an open-circuit voltage of 1.65(V) . The modeling and simulation tool is the COMSOL Multiphysics software.

Keywords : modeling, solar cell, multijunction, CIGS, Si, yield, thin layers, COMSOL Multiphysic

Table des matières :

Introduction générale.....	06
Chapitre 01 : Généralités sur les semi-conducteurs	08
I.1 Introduction :.....	09
I.2 Les semi-conducteurs :	09
I.3 Types de semi-conducteurs :	09
I.3.1 Semi-conducteurs intrinsèques :	09
I.3.2 Semi-conducteurs extrinsèques :	10
I.4 L'énergie de Gap :	12
I.5 L'absorption :	13
I.6 Génération optique :	13
I.7 Recombinaison :	14
I.8 Équations de transport dans les semi-conducteurs :.....	14
I.9 La jonction PN :	16
I.10 Diagramme énergétique :	17
I.11 Propriétés du matériau CIGS :	18
I.11.1 Propriétés optiques :	20
I.11.2 Propriétés électroniques :	20
I.12 Propriétés du silicium Si :	21
I.13 Conclusion :	22
Chapitre 02 : les cellules solaires	23
II.1 Introduction :	24
II.2 Rayonnement solaire :	24
II.3 L'énergie solaire (photovoltaïque) :	26
II.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :	26
II.5 Paramètres caractérisant une cellule photovoltaïque :	27
II.5.1 Densité de courant de court-circuit J_{cc} :	28
II.5.2 Tension de circuit ouvert V_{co} :	28

II.5.3 Puissance maximale :	28
II.5.4 Rendement de la cellule (ou rendement de conversion) :	28
II.6 Cellule solaire en couche-mince :	29
II.7 multi-jonction en couches minces:	29
II.7.1 Intérêt des cellules multi-jonctions :	30
II.8 Cellule tandem :	30
II.9 cellules cascade :	30
II.10 Cellule solaire en CIGS :	31
II.11 Jonction p-n et diagramme d'énergie :	33
II.12 Avantages de la fabrication des cellules solaires en CIGS:	34
II.12.1 Fabrication peu coûteuse :	34
II.12.2 Flexible :	35
II.12.3 Poids léger :	36
II.13 Avantages et inconvénients de la cellule solaire à base de CIGS:	36
II.14 Conclusion :	36
Chapitre 03 : résultats de la simulation et discussion	37
III.1 Introduction :	38
III.2 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics :	38
III.3 Présentation de la cellule à étudier :	38
III.4 Paramètres de simulation :	39
III.5 L'organigramme :	39
III.6 Effet de l'épaisseur de la couche absorbante CGS dans la cellule supérieure :	40
III.6.1 Caractéristique courant tension J(V) :	40
III.6.2 Caractéristique puissance tension P(V) :	40
III.6.3 Densité de courant de court-circuit Jcc :	41
III.6.4 Tension de circuit ouvert Vco :	41
III.6.5 Puissance maximale Pmax :	42
III.6.6 Le rendement η :	42
III.6.7 Facteur de forme FF :	43
III.7 Effet de l'épaisseur de la couche absorbante Si dans la cellule inférieure :	43
III.7.1 Caractéristique courant tension J(V) :	43

III.7.2 Caractéristique puissance tension P(V) :	44
III.7.3 Densité de courant de court-circuit Jcc :	44
III.7.4 Tension circuit ouvert Vco :	45
III.7.5 Puissance maximale Pmax :	46
III.7.6 Le rendement η (%) :	46
III.7.7 Le facteur de forme FF :	47
III.8 Caractéristiques de la cellule solaire CGS/Si :	47
III.9 Caractéristiques de la cellule CGS/Si tandem optimisée :.....	49
III.10 Conclusion :	49
Conclusion générale	50
Références bibliographiques.....	52

Listes des figures

Chapitre I : Généralité sur les Semi-conducteurs

Figure.I.1 : Structure en bandes d'énergie des matériaux : Isolants, Semi-conducteurs et Métaux.

Figure.I.2 : Populations des porteurs du semi-conducteur intrinsèque et niveau de Fermi.

Figure.I.3 : a) Électron libre dans un semi-conducteur de type N, ion positif de l'atome donneur b) Trou mobile dans un semi-conducteur de type P, ion négatif de l'atome accepteur

Figure.I.4 : Distribution des porteurs de charge : dans un semi-conducteur type N les électrons n sont majoritaires et les trous p sont minoritaires par contre dans un semi-conducteur type P les électrons n sont minoritaires et les trous p sont majoritaires

Figure.I.5 : Le gap direct et indirect dans le semi-conducteur.

Figure.I.6 : Types de recombinaison.

Figure I.7 : EC1 : Variation de la différence de densités de donneurs et d'accepteurs pour une jonction abrupte

Figure I.8: Représentation schématique des liaisons électroniques pour une jonction PN de semi-conducteurs silicium (Si). Le dopage N est obtenu par de l'arsenic (As) et le dopage P par du Bohr (B).

Figure I.9 Jonction PN à l'équilibre thermodynamique. a) Charge d'espace, b) Champ électrique, c) Potentiel électrostatique.

Figure I.10 : Diagramme d'énergie d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique.

Figure.I.11 : Structure cristalline de la chalcopyrite

Figure.I.12 : Largeurs de bande interdite et paramètre de maille à de certaines chalcopyrites.

Chapitre II : la cellule solaire

Figure.II.1 : Radiation spectral pour différent air masses.

Figure.II.2 : Spectre solaire et la réponse des matériaux CIGS.

Figure II.3 la cellule solaire

Figure.II.4 Structure et diagramme de bande d'une cellule solaire.

Figure II.5 Le tracé des caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque

Figure.II.6 : Principe de la cellule solaire multi-jonctions.

FigureII.7 : cellules tandem

FigureII.8 : cellules cascade

Figure.II.9 : composition d'une cellule à base de couches minces CIGS

Figure.II.10 : Structure de bande d'une cellule solaire $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$.

Figure.II.11 : Le processus de fabrication " roll-to-roll " de la cellule solaire CIGS.

Chapitre III : Résultats de simulation et discussion

FigureIII1 Schéma de la structure de la cellule solaire CIGS/SI simulée.

FigureIII2 caractéristique courant-tension pour différentes épaisseurs de la couche CIGS de la cellule supérieure.

FigureIII3 caractéristiques puissance-tension pour différentes valeurs de l'épaisseurs de la couche CIGS de la cellule supérieure.

FigureIII4 : La variation de la densité de courant court-circuit I_{cc} en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS de la cellule supérieure.

FigureIII5 La variation de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS de la cellule supérieure.

Figure III6 La variations de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS de la cellule supérieure.

Figure III7 La variations de rendement en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS de la cellule supérieure.

Figure III.8 La variation de facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS de la cellule supérieure

Figure III9 Caractéristique courant-tension pour différentes valeurs de l'épaisseurs de la couche Si de la cellule inférieure.

Figure III10 Caractéristiques puissance-tension pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche Si de la cellule inférieure.

Figure III11 La variation de courant court-circuit en fonction de l'épaisseur de la couche Si de la cellule inférieure.

Figure III12 La variation de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la couche Si de la cellule inférieure.

Figure III13 La variation de la puissance en fonction de l'épaisseur de la couche Si de la cellule inférieure

Figure III14 La variation de rendement en fonction de l'épaisseur de la couche Si de cellule inférieure

Figure III.15 La variation de facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche Si de cellule inférieure

Figure III.16 la variation du courant court-circuit I_{cc} dans la cellule supérieure en CIGS et la cellule inférieure en Si. En fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS dans la cellule tandem CIGS/Si.

Figure III.17 Représentation des caractéristiques $I(V)$ des deux cellules après l'optimisation.

Figure III.18 Représentation des caractéristiques $P(V)$ des deux cellules après l'optimisation.

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les semi-conducteurs

Tableau I.1 : Les caractéristiques de matériau silicium

Chapitre II : la cellule solaire en CIGS

Tableau II.1 : Paramètres physiques des matériaux de la cellule solaire en CIGS.

Chapitre III : Résultats de simulation et discussion

Tableau III.1 Les paramètres de simulation

Tableau III.2 Caractéristiques des cellules (supérieure en CIGS, inférieure en Si et la cellule CIGS/Si tandem)

Nomenclature – symboles – acronymes

K : Constante de Boltzmann.

q : Charge élémentaire.

e : Charge de l'électron.

T : Température.

c : Vitesse de la lumière.

J : Densité de courant.

V_{co} : Tension de circuit ouvert.

J_{cc}: Courant de court-circuit.

FF : Facteur de forme.

η : Rendement de conversion

E_g: Gap d'énergie.

E_c: Bande de conduction.

E_v: Bande de valence.

hν : Energie de photon.

N_a : La concentration de dopant donneurs ionisés dans le matériau P.

N_d : La concentration de dopant donneurs ionisés dans le matériau N.

N_i : La concentration intrinsèque des porteurs libres.

α : Coefficient d'absorption.

p : Densité des trous.

n : Densité des

électrons.

N_c : Densité d'états effectifs dans la bande de conduction.

N_v: Densité d'états d'effectifs dans la bande de valence.

ε_r : La permittivité diélectrique.

X : Affinité électronique.

CIGS: copper indium gallium selenide.

Si : Silicium

Introduction générale

L'énergie est l'un des moteurs de développement des sociétés, elle est aussi le pilier de l'économie moderne. Elle est l'étincelle qui permet l'accomplissement de toute activité humaine. Ses sources se sont diversifiées au cours du temps afin de satisfaire les besoins toujours accrus de l'industrie et des consommateurs. Une des solutions les plus prometteuses pour la future énergétique de l'humanité est le photovoltaïque (cellule solaire).

La cellule solaire est un composant électronique qui peut convertir la lumière du soleil en électricité, cette conversion se produit au sein de matériaux semi-conducteurs, qui ont comme propriété de libérer leurs porteurs de charge (électrons et trous) sous l'influence d'une excitation extérieure. Actuellement l'objectif de multiples recherches est de réaliser la meilleure cellule avec un haut rendement énergétique et un prix de revient bas. Pour diminuer à la fois le poids et le prix de ces dispositifs tout en augmentant leurs surfaces et leurs souplesses, des cellules en couches minces ont été réalisées.

Les cellules solaires en couches minces qui utilisent le séléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium (CIGS) représentent l'approche la plus prometteuse au plan de réduction des coûts de production. L'avantage de ce matériau est son élaboration facile, une excellente stabilité et une grande résistance aux rayonnements [1,2], cette cellule est caractérisée actuellement par un rendement très élevé de 22,6% et sa durée de vie est très élevée [3,4].

A cause des coûts élevés de l'expérimentation, les chercheurs se sont dirigés à l'utilisation de logiciels de simulation numérique tel que le logiciel COMSOL Multiphysics pour prédire la réponse des structures à base de matériaux préparés pour la conversion photovoltaïque. Ces logiciels permettent des centaines de combinaisons de paramètres avant la fabrication réelle du dispositif. C'est un moyen rapide, consistant et pas cher pour le design de cellules solaires. Il permet, entre autres, la visualisation des paramètres qui influencent le comportement des cellules solaires.

Les cellules multijonction résident dans leur aptitude à convertir une partie beaucoup plus importante du spectre solaire que les cellules de première génération (avec une seule jonction) grâce à l'utilisation de différents matériaux semi-conducteurs de gaps différents.

L'objectif de ce présent mémoire est l'étude par simulation numérique de la cellule solaire à base de CIGS/Si.

Pour ce faire, notre travail est divisé en trois chapitres comme suit :

- ✓ Dans le premier chapitre : nous allons présenter les propriétés physiques des semi-conducteurs en général et le semi-conducteur CIGS en particulier constituant la cellule solaire.
- ✓ Le deuxième chapitre est une étude sur les cellules solaires en général et les cellules solaires en CIGS en particulier. Nous décrivons le principe de fonctionnement et les caractéristiques de ces cellules solaires.
- ✓ Le troisième chapitre présente le logiciel COMSOL Multiphysics utilisé pour la simulation de la cellule solaire et nous présenterons et discuterons les résultats obtenus, et à la fine conclusion.

Chapitre I

Généralités sur les

Semi-conducteurs

I.1 Introduction

L'objectif de ce travail est basé sur la simulation et l'optimisation de la cellule solaire. Différents phénomènes se passent dans la cellule, pour comprendre ces phénomènes il faudrait comprendre les différents phénomènes des semi-conducteurs. Dans ce chapitre nous allons aborder les généralités sur les semi-conducteurs et les propriétés des matériaux CIGS et Si.

I.2 Les semi-conducteurs

Le matériau semi-conducteur se situe entre les métaux (conducteurs) et les isolants (non conducteurs). La résistivité ρ varie de 10^{-3} à $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$. La conduction électrique se fait par les électrons et les trous, ou de façon préférentielle par l'un ou l'autre type de porteurs. Un semi-conducteur peut être soit pur (intrinsèque), soit dopé par des impuretés (extrinsèque) qui permettent de contrôler sa résistivité. Si on prend, par exemple, du Silicium assez pur et qu'on lui ajoute un atome de Bore ou de Phosphore pour 10^5 atomes de Silicium, sa résistivité passe de 10^3 à $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ environ. Dans la figure I.1 sont représentées les structures des bandes d'énergie de l'isolant, le semi-conducteur et le métal [5].

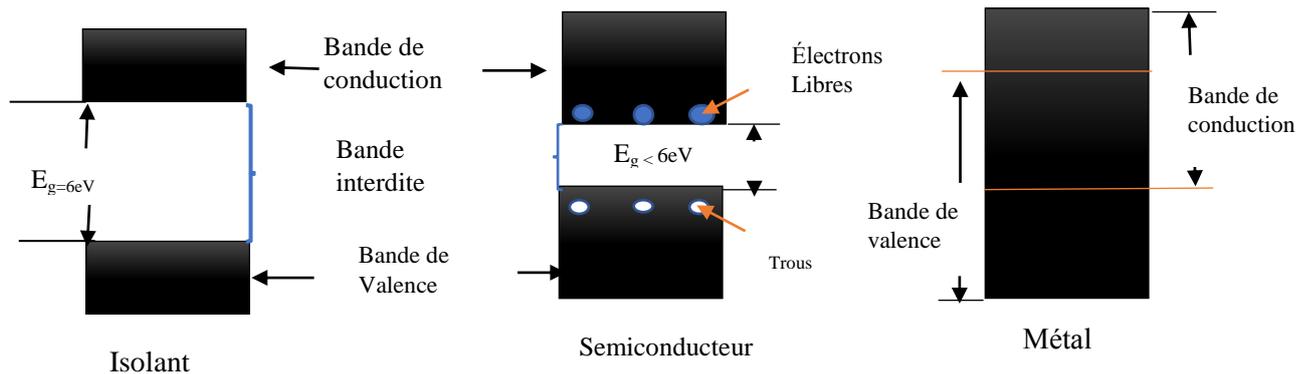


Figure I.1 Structure en bandes d'énergie des matériaux : Isolants, Semi-conducteurs et Métaux.

I.3 Types de semi-conducteurs

I.3.1 semi-conducteurs intrinsèques

Ce sont des semi-conducteurs très purs et très bien cristallisés (présentant un réseau cristallin parfaitement périodique) et ayant un taux d'impuretés très faible (moins d'un atome d'impureté pour 10^{13} atomes de l'élément semi-conducteur). Ils se comportent comme des isolants à très basse température et leurs conductivités augmentent avec la température. A température constante, un équilibre s'établit (Figure I.2) entre les phénomènes d'ionisation thermique et de recombinaison ; les électrons libres et les ions de silicium apparaissant en quantités égales. La concentration en électrons libres n et en trous libres p sont égales à n_i la concentration intrinsèque.

Les densités totales (n électrons) dans la bande de conduction et (p trous) dans la bande de valence) s'expriment selon les lois :

$$n = N_c \exp\left(-\frac{\Delta E_n}{kT}\right) \quad p = N_v \exp\left(-\frac{\Delta E_p}{kT}\right) \quad (\text{I.1})$$

Où N_c et N_v sont respectivement la densité effective d'états des électrons dans la bande de conduction et la densité effective d'états des trous dans la bande de valence. Ces deux coefficients évoluent avec la température selon une loi en $T^{3/2}$

- ΔE_n Et ΔE_p représentent deux différences d'énergies liées à un niveau dit de Fermi qui indique les écarts de population entre les électrons et les trous.

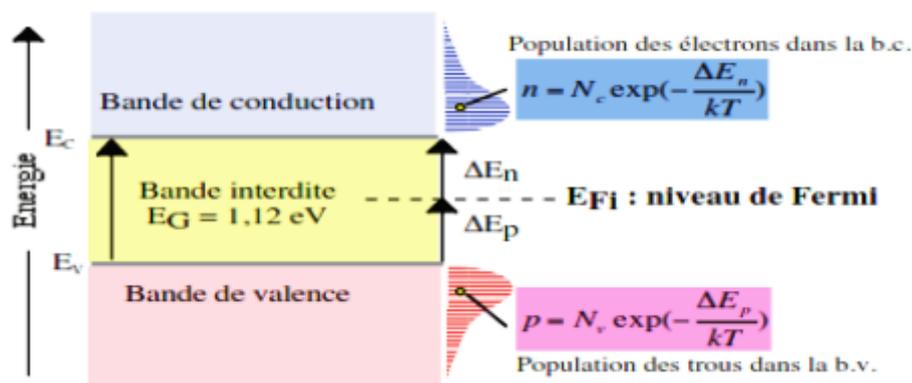


Figure I.2 Populations des porteurs du semi-conducteur intrinsèque et niveau de Fermi [5]

La concentration intrinsèque en électrons libres et en trous libres par cm^3 dépend de la hauteur de la bande interdite E_g et de la température T selon la loi :

$$n = p = n_i = AT^{\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) \quad (\text{I.2})$$

A : Constante du matériau

E_g : Hauteur de la bande interdite (eV)

k : Constante de Boltzmann

T : température absolue en K.

I.3.2 Semi-conducteur extrinsèques

La technique du dopage augmente, selon la nature des atomes introduits, la densité des porteurs de charge à l'intérieur du matériau semi-conducteur. Si elle augmente la densité d'électrons, il s'agit d'un dopage de type N. Si elle augmente celle des trous, il s'agit d'un dopage de type P. Nous allons expliquer le phénomène de dopage et ses conséquences sur le nombre d'électrons et de trous ainsi que sur la position du niveau de Fermi dans le semi-conducteur.

a) Les semi-conducteurs extrinsèques dopés N

En introduisant des atomes pentavalents tels que le phosphore P, l'arsenic As dans un cristal (figure I.3), certaines liaisons se cassent laissant place à ces extra atomes qui ont cinq électrons de valence, ce qui comble les liaisons en laissant un électron libre dans le cristal peu lié au noyau ($E=0.01eV$) et passe aisément dans la bande de conduction.

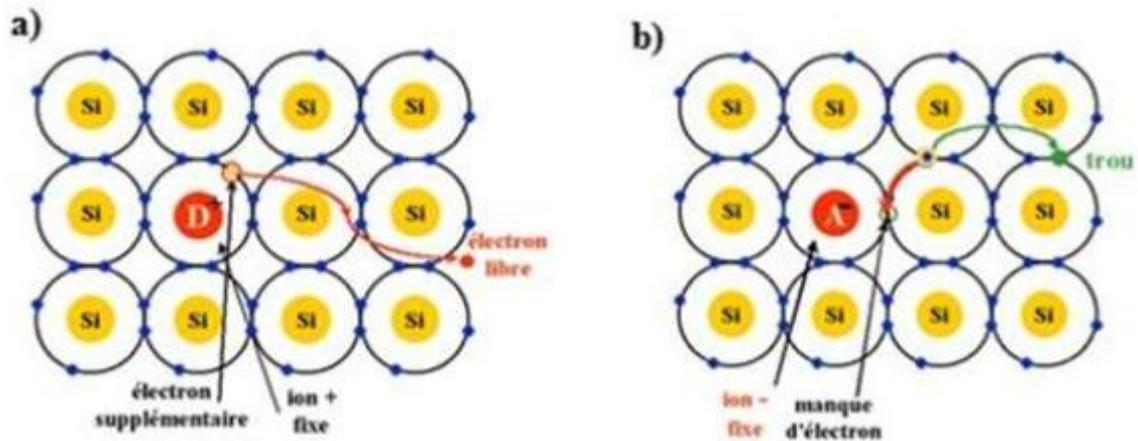


Figure I.3 a) Électron libre dans un semi-conducteur de type N, ion positif de l'atome donneur b) Trou mobile dans un semi-conducteur de type P, ion négatif de l'atome accepteur Les atomes pentavalents (donneurs) deviennent des ions positifs après le passage des électrons excédentaires dans la bande de conduction. Ce qui augmente considérablement la conductivité du matériau dopé. Les charges négatives (électrons) sont dites majoritaires.

Dans un semi-conducteur dopé N, les charges mobiles négatives (les électrons libres) sont majoritaires, les charges mobiles positives (les trous) sont minoritaires.

b) Les semi-conducteurs extrinsèques dopés P :

Dans ce cas on introduit des atomes trivalents tels que gallium Ga, l'indium In, le bore B, L'aluminium Al (figure I.3.b). Il manque, alors, à l'impureté un électron de valence pour assurer les 4 liaisons avec les atomes de silicium voisins. Un faible apport d'Énergie (0.05eV) suffit, pour qu'un électron d'un silicium voisin soit capté par l'impureté ; il y a formation d'un trou peu lié et donc mobile. Les atomes trivalents (accepteurs) deviennent des ions négatifs par capture d'un électron. Compte tenu des taux de dopage, ces trous sont beaucoup plus nombreux que les porteurs intrinsèques du cristal pur.

Dans un semi-conducteurs dopé P, les charges mobiles positives sont majoritaires, les charges mobiles négatifs sont minoritaires. Les ions négatifs sont fixes dans le cristal.

La figure (I.4) présente le bilan des charges électriques dans les semi-conducteurs extrinsèques type N et P ainsi que les structures de bandes associées [6].

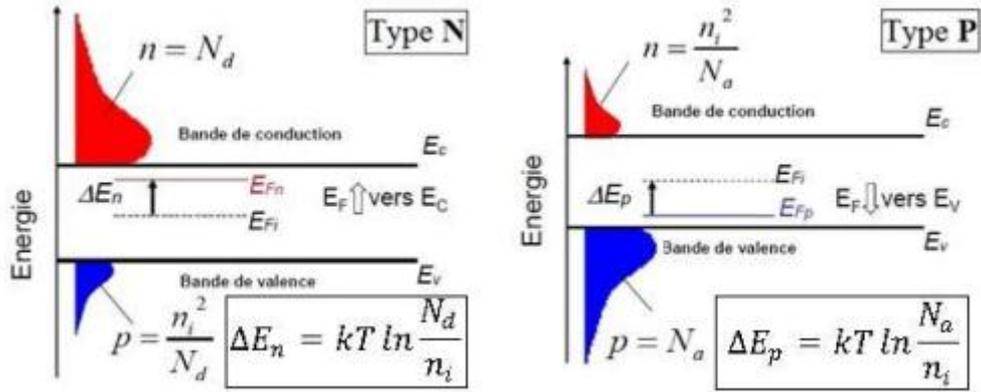


Figure I.4 Distribution des porteurs de charge : dans un semi-conducteur type N les électrons n sont majoritaires et les trous p sont minoritaires par contre dans un semi-conducteur type P les électrons n sont minoritaires et les trous p sont majoritaires [6]

I.4 L'énergie de gap

L'énergie de gap est la différence d'énergie que nécessite un électron pour passer de la bande de valence vers la bande conduction.

En effet L'essentiel des phénomènes électroniques (et optiques) concernent les électrons situés en bas de la bande de conduction et en haut de la bande de valence, c'est à dire aux zones caractérisées par le maximum de densité de porteurs. Le diagramme des bandes permet de classer les semi-conducteurs en deux catégories :

- a. **Les semi-conducteurs à gap direct** : le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction sont face à face. C'est le cas du GaAs (L'arséniure de gallium) ou le CIGS (Cuivre Indium Gallium Sélénium).
- b. **Les semi-conducteurs à gap indirect** : Le maximum de la bande de valence n'est pas en face du minimum de la bande de conduction. C'est le cas du Si (Silicium).

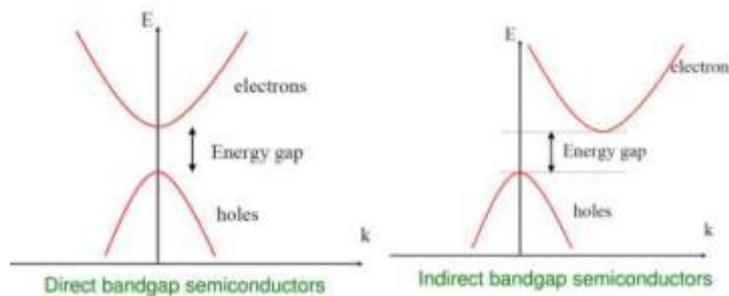


Figure I.5 Le gap direct et indirect dans le semi-conducteur.

I.5 L'absorption

La lumière absorbée par le matériau photovoltaïque est transformée en énergie électrique. En effet les spectres solaires sont exploités différemment par le matériau avec une certaine efficacité par laquelle il transforme le rayonnement d'une longueur d'onde en énergie électrique. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau, l'une de ces caractéristiques est le coefficient d'absorption α . Il définit la quantité de lumière absorbée par le matériau et peut être exprimé par :

$$\alpha = \alpha_0 \sqrt{E - E_g} \quad (\text{I.3})$$

Avec :

- α_0 : constante qui dépend du matériau.
- E : énergie du photon.
- E_g : énergie de gap.

I.6 Génération optique

Il existe deux types de générations : génération intrinsèque (bande à bande) et génération extrinsèque (par l'intermédiaire du niveau de dopage ou de piège). La génération bande à bande peut se produire quand un électron passe directement dans la bande de conduction. Ceci peut se produire par l'absorption de la lumière : photo génération. Les centres d'impuretés peuvent être utilisés pour la génération, l'électron n'aurait pas besoin d'autant d'énergie pour atteindre la bande de conduction comme le cas de génération bande à bande.

En général pour être efficace, l'excitation d'un électron du sommet de la bande de valence vers la bande de conduction exige une énergie lumineuse supérieure à la bande interdite [7].

L'expression du taux de génération est :

$$G_{\text{opt}} = (1 - R) \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha x} \quad (\text{I.4})$$

Avec :

- R : Coefficient de réflexion.
- x : La profondeur.
- α : Le coefficient d'absorption

I.7 Recombinaison

La recombinaison est à l'opposé de la génération. Elle correspond aux mécanismes conduisant à la perte de paires électron-trou, avec l'énergie excédentaire émise sous forme de phonons ou de photons. Expérimentalement, elle correspond à une durée de vie des porteurs minoritaires incapable d'être mesurée. Celle-ci correspond au temps moyen au bout duquel

un pair électron -trou générée se recombine. La valeur de ce paramètre peut être déterminée, permettant de définir les taux de recombinaison R_n pour les électrons, R_p pour les trous par :

$$R_{n,p} = \frac{\Delta n,p}{\tau_{n,p}} \quad (\text{I.5})$$

Avec :

$\Delta_{n,p}$: Densité des porteurs générés.

$\tau_{n,p}$: Durée de vie de ces porteurs.

L'interprétation de la durée de vie n'est pas simple car il existe différents mécanismes de recombinaison intervenant simultanément en surface et en volume d'un échantillon. On définit donc une durée de vie effective, qui tient compte de l'ensemble de ces mécanismes.

En général, la recombinaison peut être caractérisée comme suit :

- Recombinaison directe (de bande à bande).
- Recombinaison indirecte (de bande aux impuretés avec l'aide de piège).

Recombinaison Auger.

- Recombinaison de surface.

Ces processus sont présentés dans la figure (I.6).

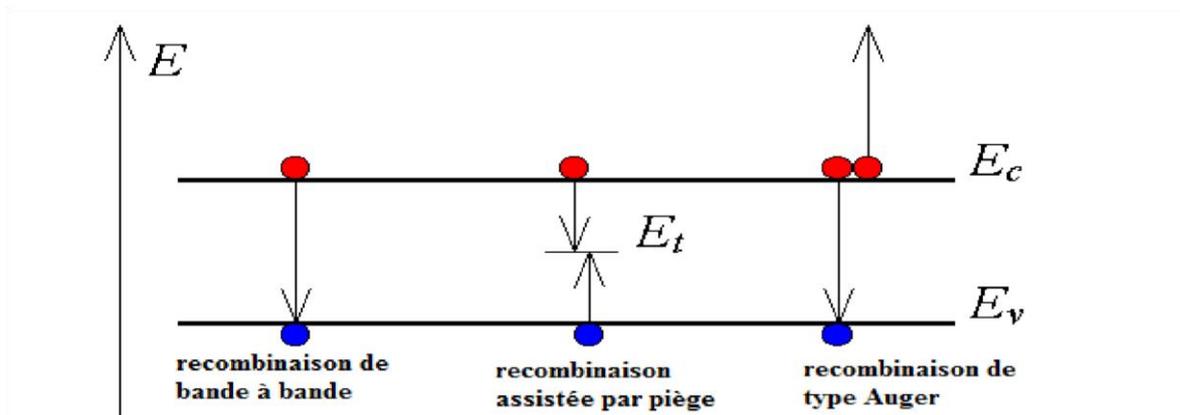


Figure I.6 Types de recombinaisons

I.8 Équation de transport dans les semi-conducteurs :

a. Équation de continuité :

Pour les électrons :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{e} \frac{\partial J_n}{\partial x} + G_n - R_n \quad (\text{I.6})$$

Pour les trous :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{e} \frac{\partial J_p}{\partial x} + G_p - R_p \quad (\text{I.7})$$

Avec

- G : le taux de génération

- R : le taux de recombinaison
- n,p : densités des porteurs

$J_{n,p}$: densités de courants des électrons et des trous

b. Équation de Poisson :

Dans un semi-conducteur, l'équation de Poisson, issue des équations de Maxwell, reste bien évidemment valable. Nous nous limiterons au modèle unidimensionnel :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = - \frac{\rho}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (\text{I.8})$$

Avec :

V : Potentiel

ρ : Concentration de charge en C/cm^3

$\epsilon_r \epsilon_0$: Permittivité du semi-conducteur en F/cm

Dans cette équation, ρ est une concentration de charges totales, exprimée en coulomb par centimètre cube. Dans un semi-conducteur, dopé par les deux types de dopant, la concentration de charge totale tient compte des porteurs libres et des atomes ou impuretés ionisés :

$$\rho = q(p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (\text{I.9})$$

c. Les densités de courant des électrons et des trous :

$$J_n = -en\mu_n \frac{dv}{dx} + eD_n \frac{dn}{dx} \quad (\text{I.10})$$

$$J_p = -en\mu_p \frac{dv}{dx} - eD_p \frac{dp}{dx} \quad (\text{I.11})$$

Sachant que :

$$\frac{D_{n,p}}{\mu_{n,p}} = \frac{kT}{e}$$

Avec :

- μ_n et μ_p : mobilité des électrons et des trous.
- n et p : concentration des électrons et des trous.
- D_n et D_p : coefficient de diffusion des électrons et des trous.
- k : constante de Boltzmann.
- T : température.

I.9 La jonction PN

Une jonction PN est la mise en contact entre un semi-conducteur type N et un semi-conducteur type P issus d'un même cristal. La différence des densités de donneurs et d'accepteurs $N_D - N_A$ passe « brusquement » d'une valeur négative pour la région P à une valeur positive pour la région N. La loi de variation de cette différence est donnée par deux constantes pour une jonction dite abrupte.

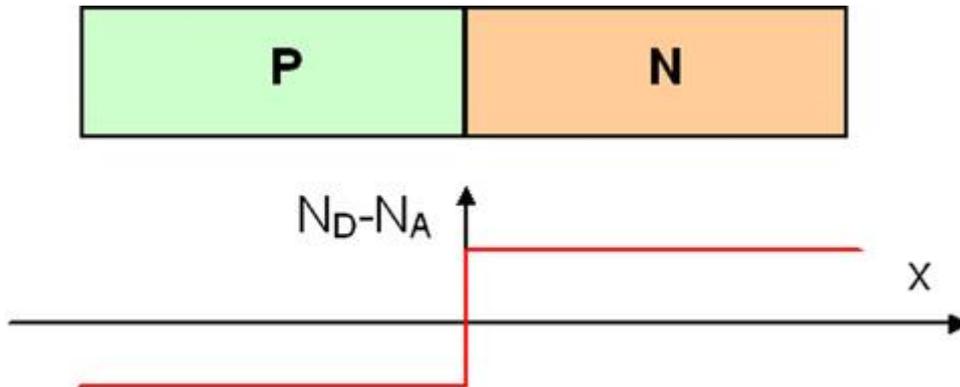


Figure I.7. Variation de la différence de densités de donneurs et d'accepteurs pour une jonction abrupte

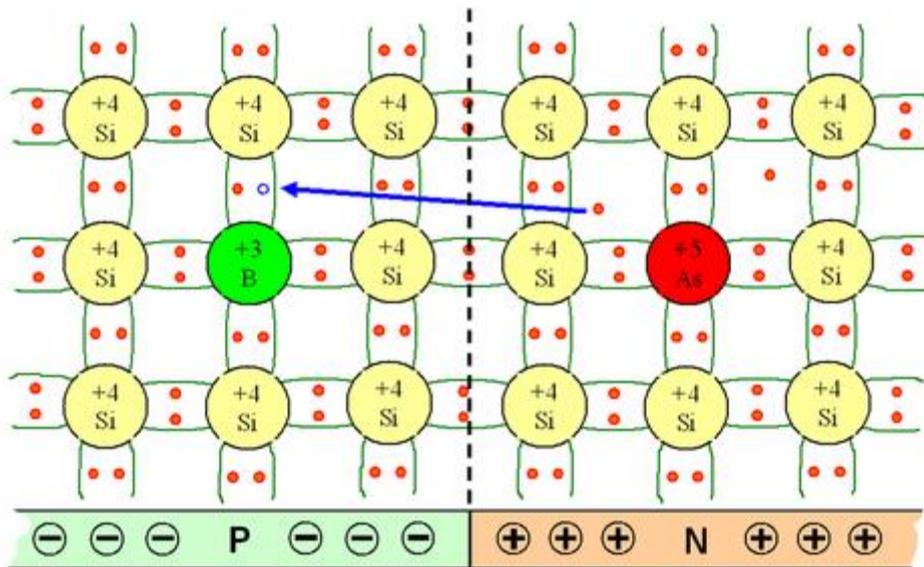


Figure I.8: Représentation schématique des liaisons électroniques pour une jonction PN de semi-conducteur silicium (Si). Le dopage N est obtenu par de l'arsenic (As) et le dopage P par du Bohr (B).

La figure I.10 permet de mieux comprendre l'effet du rapprochement des deux semi-conducteurs sur le bilan électronique de la jonction. Nous observons ainsi qu'à proximité de la jonction les électrons de conduction excédentaires coté N passent coté P pour se recombiner avec des trous. Ainsi, une charge d'espace statique négative se crée coté P et

une charge d'espace statique positive se crée coté N. Le lieu où réside cette charge d'espace est appelé zone de charge d'espace ou zone de déplétion. En raison de la présence, dans cette zone, d'un champ électrique intense, la densité de porteurs libres dans cette région est négligeable à l'équilibre thermodynamique. En outre les frontières entre la zone dépeuplée et les zones neutres de la jonction sont très abruptes.

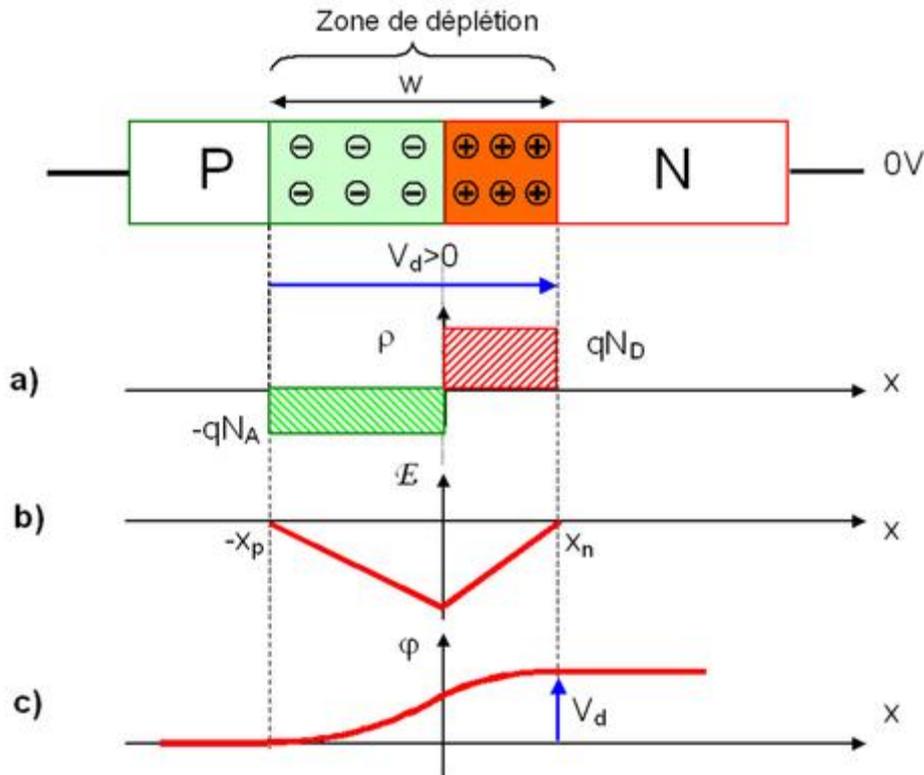


Figure I.9 Jonction PN à l'équilibre thermodynamique. a) Charge d'espace, b) Champ électrique, c) Potentiel électrostatique.

Après la mise en contact des deux semi-conducteurs de dopage différent, une barrière de potentiel pour les trous et les électrons est constituée. En effet, la double couche de charges négatives coté P et positives coté N, crée un champ électrique dirigé de N vers P qui empêche la diffusion et maintient la séparation des trous coté P et des électrons coté N. Par ailleurs à cause de cette double couche, le potentiel électrostatique varie brusquement dans la zone de la jonction et la d.d.p. V_d , appelée tension de diffusion, atteint des valeurs non négligeables.

I.10 Diagramme énergétique

Pour la jonction et à l'équilibre thermodynamique, le niveau de Fermi coté dopé P et coté dopé N est identique. Le diagramme d'énergie de la jonction PN comporte donc une courbure des bandes de conduction et de valence. Cette courbure fait apparaître une différence d'énergie potentiel électrostatique de qV_d .

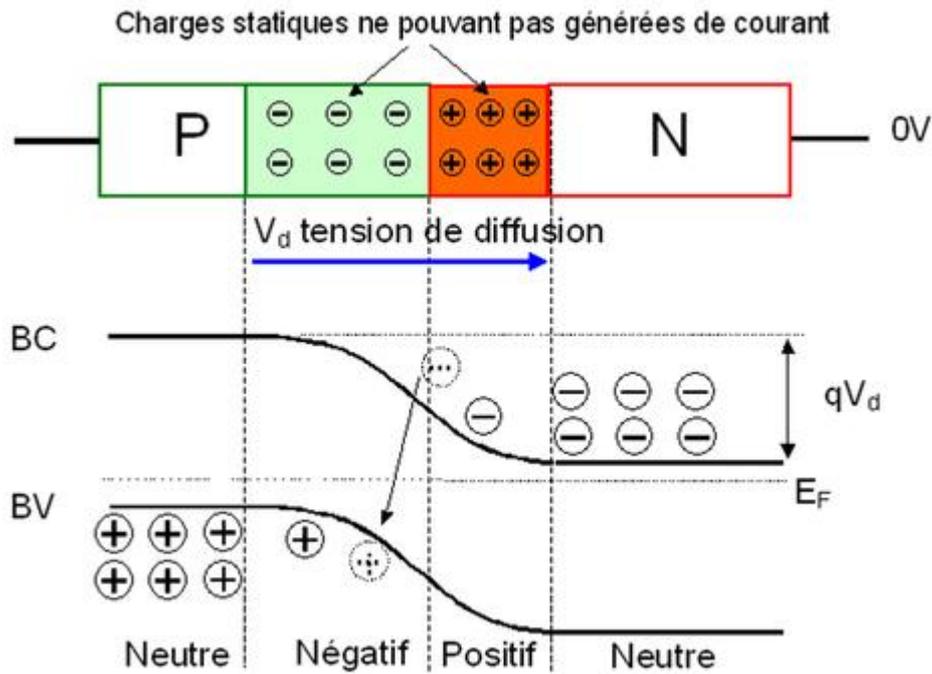


Figure I.10 : Diagramme d'énergie d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique.

I.11 Propriétés du matériau CIGS

Le rendement d'une cellule solaire à base de CIGS est fortement dépendant des propriétés du matériau absorbant. Comme dans le cas d'autres semi-conducteurs, la structure cristalline du CIGS ainsi que sa composition peuvent fortement influencer sur ses propriétés optiques et électroniques. La bonne compréhension de la structure de ce matériau est donc nécessaire dans le but d'optimiser un dispositif à base de CIGS

Le CIGS, un acronyme de sélénure de cuivre-indium gallium ($CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$), est un semi-conducteur quaternaire en solution solide où x représente la portion du gallium. La concentration d'indium et de gallium peut varier du sélénure de cuivre et d'indium pur ($x=0$, CIS) à du sélénure de cuivre et de gallium pur ($x=1$, CGS). Ainsi, son gap varie continuellement avec x , de 1 eV pour CIS à environ 1,7 eV pour le CGS. Cristallographiquement, le CIGS est un tétraèdre appartenant à la famille des I-III-VI₂ avec une structure de chalcopyrite

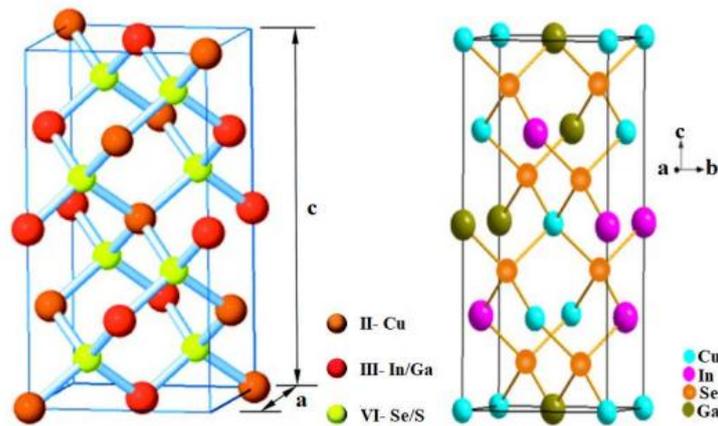


Figure.I.11 Structure cristalline de la chalcopyrite

Les paramètres de maille sont contrôlés par la composition du ternaire (CuInSe_2 , CuGaSe_2 , CuInS_2 , CuGaS_2 ...), ils suivent la loi de Vegard. Pour les chalcopyrites intégrant les atomes les plus petits (Ga au lieu de In, S au lieu de Se), la maille cristalline se contracte, donc le paramètre de maille a diminué (Fig.I.13), et inversement pour les atomes les plus gros. Les variations de composition ont également une influence sur les valeurs de bande interdite, les énergies des bandes interdites varient entre 1,0 eV pour CuInSe_2 et 2,4 eV pour CuGaS_2 [8]. D'une façon tout à fait qualitative, on peut dire que pour des atomes plus lourds avec une polarisabilité plus grande (In par rapport au Ga ou Se par rapport au S), les bandes de valence/conduction s'élargissent, et la valeur de la bande interdite de la chalcopyrite diminue. La figure I.13 représente la valeur de la bande interdite en fonction de la valeur du paramètre de maille a, pour différentes chalcopyrites. Ce diagramme montre que la largeur de la bande interdite varie entre 1 et 1.68 eV pour les deux composés CuInSe_2 et CuGaSe_2 respectivement en variant la composition en Ga dans l'alliage $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}, \text{Ga}_x)\text{Se}_2$.

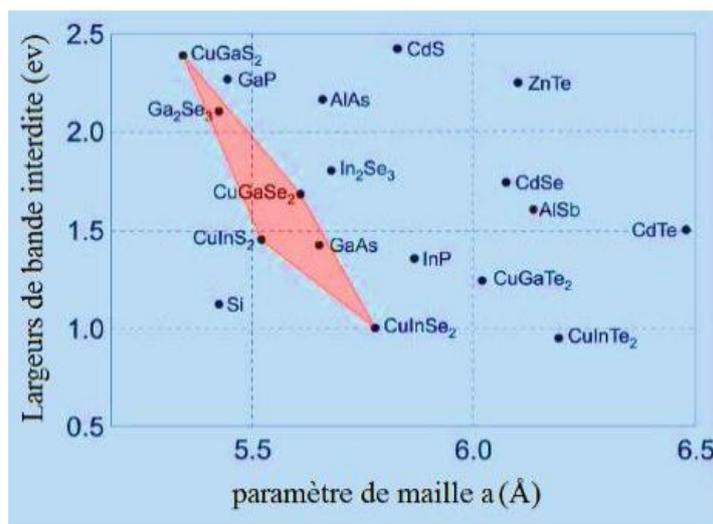


Figure.I.12 : Largeurs de bande interdite et paramètres de maille a de certaines chalcopyrites

I.11.1 Propriétés optiques

Le coefficient d'absorption de CuInSe_2 est très élevé et de l'ordre de 10^5 cm^{-1} [9] dans le domaine du visible et du proche infrarouge.

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

$$E = \frac{hc}{q\lambda} \quad (\text{I.12})$$

Avec : E : l'énergie d'irradiation en eV. h : la constante de Planck, c : la vitesse de la lumière dans le vide, λ : la longueur d'onde incidente en m. La valeur de l'énergie du gap du CuInSe_2 permet d'absorber les photons ayant des longueurs d'onde inférieures à 1192 nm, ce qui indique que la gamme d'absorption de ce ternaire est située dans la région optimale du spectre solaire.

I.11.2 Propriétés électroniques

a. Structure des bandes

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

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

$$E_g = 1.035 + 0.65x - 0.264x(1 - x) \quad (\text{I.13})$$

Le CIGS est donc un matériau dont E_g peut être ajusté entre 1,035eV et 1,68eV en fonction du taux de gallium. La valeur optimale de E_g dépend de plusieurs facteurs. Du point de vue de l'absorption des photons, il est préférable d'avoir une valeur de E_g réduite, permettant d'absorber un spectre plus large (plus grandes longueurs d'onde). Il en résulte un courant plus important délivré par la cellule solaire (J_{SC}). Cependant, c'est la valeur de E_g qui détermine la tension maximale délivrée par la cellule. Afin de maximiser le rendement de conversion, il est donc nécessaire d'obtenir un compromis idéal entre courant et tension. La plupart des résultats expérimentaux publiés dans le domaine des cellules CIGS montrent que les meilleurs rendements sont obtenus avec un gap d'environ 1.2eV, ce qui correspond à un taux de Ga proche de 30%.

L'énergie de la bande interdite est liée à la longueur d'onde du photon par :

$$E_g(eV) = \frac{1,24}{\lambda(\mu\text{m})} \quad (\text{I.14})$$

b. Dopage

Le CIGS utilisé dans les cellules standard est de type p. Ce dopage est dû à la présence de défauts cristallins générant des états accepteurs (dopage intrinsèque). Dans le cas du CIGS, ces valeurs varient dans de faibles proportions en fonction du taux de Ga.

Les niveaux accepteurs sont principalement dus aux lacunes de cuivre (VCu) et d'indium (VIn), ainsi qu'aux substitutions d'indium par le cuivre (CuIn). Cependant le dopage p du CIGS est essentiellement lié aux VCu pour deux raisons. Premièrement, ils génèrent un niveau accepteur très proche (0.03 eV) du maximum de la bande de valence. Deuxièmement, leur énergie de formation est la plus favorable ($E_{\text{formation}} = 0,6\text{eV}$). Quant aux défauts générant des niveaux donneurs (InCu et CuI), ils possèdent une énergie de formation beaucoup élevée que les VCU. C'est donc l'abondance de ce dernier défaut dans le CIGS qui est à l'origine de son dopage p.

I.12 Propriétés du silicium Si

Le silicium est un élément chimique de la famille des cristallogènes, de symbole Si et de numéro 14.

C'est l'élément le plus abondant dans la croûte terrestre après l'oxygène, soit 25.7% de sa masse. Il n'existe pas à l'état libre, mais sous forme de composés : sous forme de dioxyde de silicium (SiO_2), la silice ou d'autres silicates.

Il est utilisé depuis très longtemps sous forme d'oxyde de silicium amorphe (SiO_2) comme composant essentiel de verre, il a depuis le milieu du XXe siècle de nouveaux usages en électronique, pour la production de matériaux tels que silicones ou, pour fabriquer des panneaux solaires photovoltaïques.

Le silicium est un semi-conducteur sa conductivité électrique est particulièrement inférieure à celle des métaux [10].

Permittivité relative	11.7
Durée de vie des électrons, SRH (μs)	10
Durée de vie des trous, SRH (μs)	10
Bande interdite (eV)	1.12
Affinité électronique (eV)	4.05
Densité efficace d'états, bande de valence (cm^{-3})	2.8×10^{19}
Densité efficace d'états, bande de conduction (cm^{-3})	1.04×10^{19}
Mobilité électronique ($\text{Cm}^2/\text{V. s}$)	1450
Mobilité des trous ($\text{Cm}^2/\text{V. s}$)	500

Tableau I.1 Les caractéristiques de matériaux silicium

I.13 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu quelques généralités de base sur la physique des semi-conducteurs et quelques propriétés du matériau CIGS utilisé dans la conception de la cellule solaire à étudier dans ce travail. Ces propriétés concernent les propriétés structurales, électroniques, électriques et optiques.

On constate que le matériau CIGS est caractérisé par un coefficient d'absorption très élevé et un gap direct.

Chapitre II

Les cellules solaires

II.1 Introduction

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique au moyen d'une cellule solaire. L'effet photovoltaïque a été utilisé au début des années cinquante dans les applications pour l'espace (alimentation des satellites) et ses premières utilisations au niveau de la terre est dans les années soixante-dix.

L'élément de base dans la conversion du rayonnement de la lumière est la cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont associées dans un module. Un ensemble de modules sont groupés en panneaux eux même associés pour former le champ photovoltaïque.

Les cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser le meilleur rapport entre le rendement énergétique et le prix de revient.

Dans ce chapitre, nous débuterons par donner les caractéristiques du rayonnement solaire et les cellules photovoltaïques, puis on va présenter les paramètres caractérisant les performances d'une cellule solaire. Ensuite, nous décrivons le principe de fonctionnement et les caractéristiques des cellules solaires en général et les cellules solaires en CIGS en particulier.

II.2 Rayonnement solaire

La vitesse de la lumière est d'un peu plus de 3×10^8 m/s, les rayons du soleil mettent donc environ 8 min à nous parvenir.

Le rayonnement reçu par la terre en incidence normale avoisine les 1400 W/m^2 avant d'aborder la couche atmosphérique.

Pour tenir compte de l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire incident (Figure II.1), on introduit un coefficient appelé nombre de masse (AM) défini par :

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (\text{II.2})$$

Où θ est l'angle que fait le soleil avec son zénith. Par définition, AM1 correspond aux Conditions hors atmosphère.

Quand le soleil fait un angle de 48° par rapport au zénith, la lumière incidente est dit AM1.5. Le nombre de masse d'air caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire (83.3 mW/cm^2 pour AM1.5) et de plus, sert de standard pour quantifier les performances de nouveaux dispositifs photovoltaïques.

Les conditions standard de caractérisation sont définies par les normes IEC-60904 de l'International Electrotechnique Commission (IEC) selon une distribution spectrale AM1.5G global (somme des rayonnements directs et diffus), d'intensité 100 mW/cm^2 et pour une température de cellule de 25°C .

Au sol, le rayonnement solaire a au moins deux composantes : une composante directe et un composant diffusé (rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle : nuages, sol) formant le rayonnement global.

La figure II.1 montre le spectre d'émission solaire sous AM 1.5G global normalisé à 100 mW/cm^2 [11].

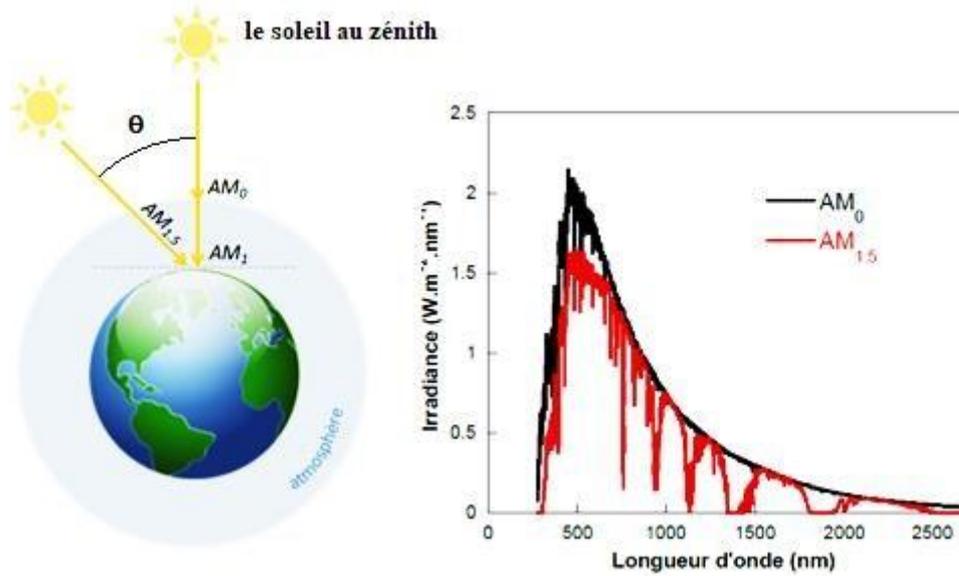


Figure.II.1 : Radiation spectral pour différents air masses.

Le spectre solaire c'est sa décomposition en longueurs d'onde ou "couleurs". La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnements de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, elles sont porteuses d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation (I.12) :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} \quad (\text{II.3})$$

La figure II.2 représente le spectre solaire et la réponse spectrale des matériaux en CIGS.

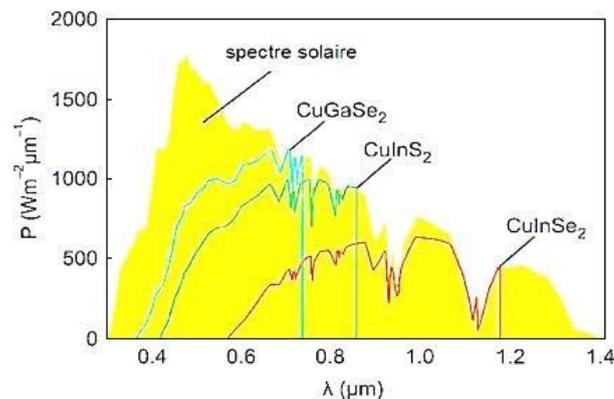


Figure II.2: Spectre solaire et la réponse des matériaux en CIGS

II.3 L'énergie solaire (photovoltaïque)

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire. L'énergie produite par une centrale solaire photovoltaïque est dite renouvelable, car sa source est considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humaine. Cette énergie n'est cependant pas totalement renouvelable, car la fabrication des panneaux photovoltaïques, leur installation et leur exploitation consomment de l'énergie issue en grande partie de sources non renouvelables ; mais un système photovoltaïque produit entre 20 et 40 fois plus d'énergie que ce qui a été utilisé pour le fabriquer.

La cellule photovoltaïque est le composant électronique de base. Elle utilise l'effet photoélectrique pour convertir les ondes électromagnétiques émises par le soleil en électricité. Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module solaire photovoltaïque, plusieurs modules regroupés forment une installation solaire. L'électricité est soit consommée ou stockée sur place, soit transportée par le réseau de distribution et le réseau de transport.

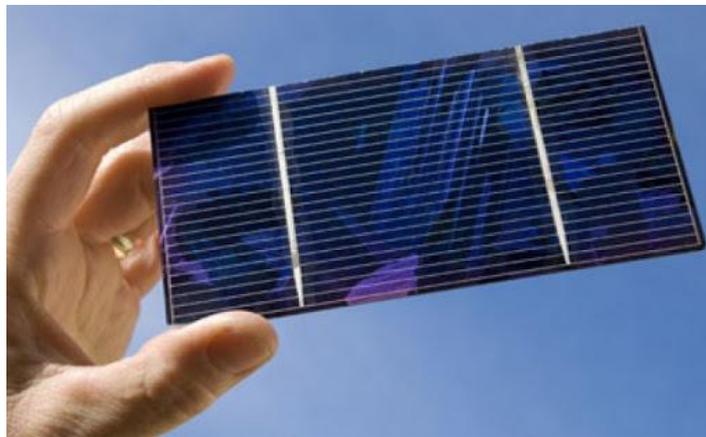


Figure II.3 la cellule solaire

II.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

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 :

- Une jonction p-n avec un même semi-conducteur que l'on appelle homojonction
- Une jonction p-n avec deux semi-conducteurs différents que l'on appelle hétérojonction
- Un contact métal/semi-conducteur de type Schottky.

Le principe de fonctionnement d'une cellule à jonction p-n à homojonction est décrit dans la figure II.4.

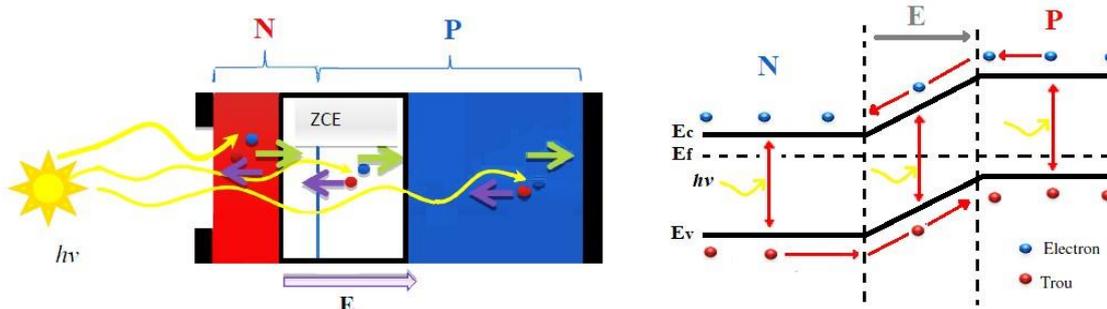


Figure.II.4 : Structure et diagramme de bande d'une cellule solaire.

Les photons incidents créent des paires électron-trou dans les régions N et P et dans la zone de charge d'espace : [12,13]

- Si une paire est générée dans une zone électriquement neutre (P ou N), les porteurs diffusent. Si les porteurs minoritaires atteignent la zone de charge d'espace alors ils sont propulsés par le champ électrique dans la zone où ils deviennent porteurs majoritaires. Ces porteurs contribuent ainsi au courant par leur diffusion et il se crée un courant de diffusion.
- Si une paire électron-trou est générée dans la zone de charge d'espace, l'électron et le trou sont séparés par le champ électrique et chacun est propulsé dans la région où il est porteur majoritaire (région N pour l'électron et région P pour le trou). Ces porteurs donnent naissance à un courant de génération.

Ces deux contributions donnent naissance à un photocourant qui contribue au courant inverse de la diode formée par la jonction. Le courant inverse d'une jonction p-n est fonction des densités de porteurs minoritaires dans les régions neutres de la diode et de la génération de paires électron-trou dans la zone de charge d'espace. L'éclairement augmente le courant inverse par la création de porteurs minoritaires dans les zones neutres et la génération de paires électron-trou dans la zone de charge d'espace [14].

II.5 Paramètres caractérisant une cellule photovoltaïque :

La cellule solaire est définie par des paramètres essentiels, et auxquels on se réfère. Ces paramètres sont le courant (ou densité de courant) de court-circuit J_{cc} , la tension de circuit ouvert V_{co} , la tension maximum P_{max} , le rendement η .

Pour cela, il faut établir le tracé de la variation du courant en fonction de la tension $I(V)$ ou sinon la puissance en fonction de la tension $P(V)$ comme le montre la figure II.5.

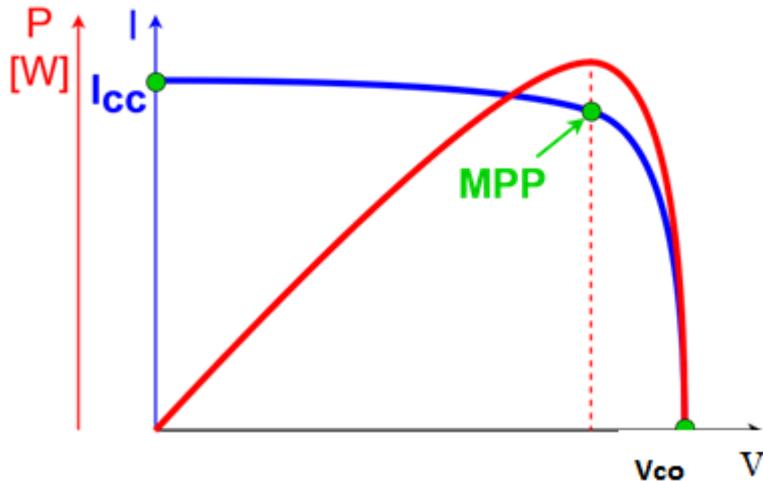


Figure II.5 Le tracé des caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque

II.5.1 Densité de courant de court-circuit J_{cc} :

C'est le courant fourni par la cellule solaire qui correspond à une tension appliquée nulle $V=0$.

II.5.2 Tension de circuit ouvert V_{co} :

C'est la tension mesurée à vide, c'est-à-dire qu'il n'y a aucune charge aux bornes de la cellule et qui correspond à un courant nul $I=0$.

II.5.3 Puissance maximale :

C'est la puissance maximale que peut délivrer une cellule solaire et qui correspond au produit du courant et de la tension maximums.

$$P_{max} = I_{max} \cdot V_{max}$$

(II.4)

II.5.4 Rendement de la cellule (ou rendement de conversion) :

Le rendement est le paramètre décisif pour démontrer la performance d'une cellule. Il exprime la capacité de la conversion des photons lumineux (ou l'énergie lumineuse) en énergie électrique d'ailleurs on le calcule à partir du rapport entre la puissance maximale P_{max} et la puissance incidente P_{in}

Sachant que :

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} = FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}$$

(II.5)

On obtiendra alors :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_{in}}$$

(II.6)

II.6 Cellule solaire en couche-mince

Par principe, 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).

Dans le domaine des couches minces, il existe trois principales filières :

- La filière silicium amorphe et microcristallin noté TFSi (Thin-Film Silicon).
- La filière CdTe (Tellure de Cadmium).
- La filière Cu(In, Ga)Se₂ (Cuivre-Indium/Gallium-Sélénium) noté CIGS.

II.7 multi-jonction en couches minces

Le principe d'une cellule solaire multi-jonction étant d'absorber plus de longueurs d'onde du spectre solaire, naturellement l'idée viendrait d'ajouter des diodes supplémentaires avec des matériaux à gaps décroissants pour augmenter encore plus le rendement [15] (fig.II.6).

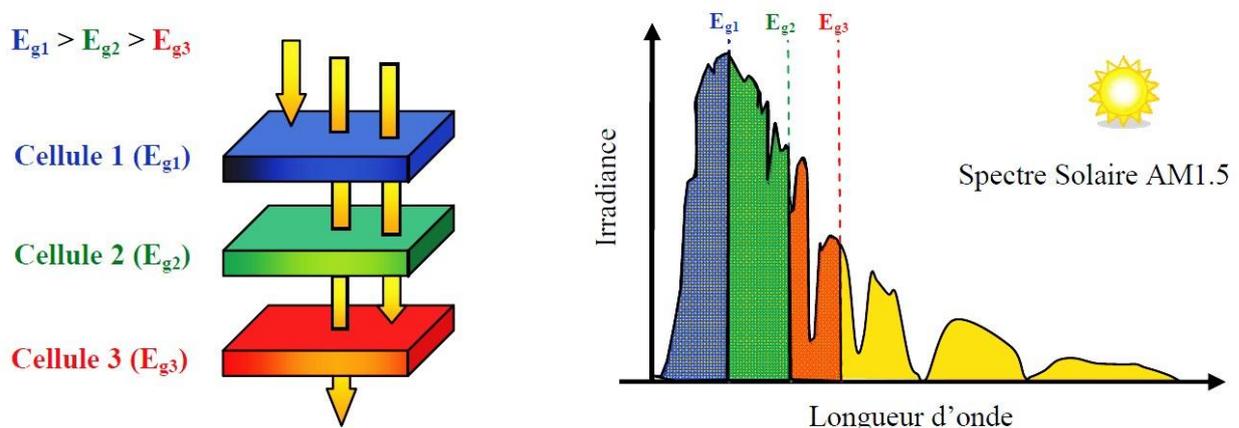


Figure.II.6 : Principe de la cellule solaire multi-jonctions.[39]

Pour les cellules multi-jonctions en semi-conducteurs III-V (GaAs, AlGaAs, InGaAsP), de très bons rendements sont obtenus avec cette filière mais les coûts de fabrication sont plus élevés (bâti sous ultravide, croissance très lente). Ces cellules sont destinées à des applications spatiales, un rendement de 32 % a été obtenu avec une triple jonction GaInP/GaAs/Ge sans concentrateur et 41 % avec concentrateur [16].

II.7.1 Intérêt des cellules multi-jonctions

Les cellules multi-jonctions vont permettre d'inventer de nouvelles techniques de production d'électricité à travers les panneaux solaires. Un semi-conducteur comme le silicium ne peut produire de l'électricité qu'à partir d'une certaine longueur d'onde de rayon solaire.

Le principal intérêt des cellules MJ réside dans leur aptitude à convertir une partie beaucoup plus importante du spectre solaire que les cellules de première génération (avec une seule jonction) grâce à l'utilisation de différents matériaux semi-conducteurs de gaps différents.

Ainsi, une cellule MJ composée d'une infinité de cellules mono-jonction de gaps différents convertirait le spectre solaire de façon optimale.

II.8 Cellule tandem

Dans la configuration tandem, les cellules sont placées en série donc reliées électriquement, d'où les contraintes : les matériaux des cellules doivent avoir des paramètres de maille voisins afin que les interfaces soient exemptes de défauts qui piègent les électrons et réduisent donc le rendement de la cellule.

Le courant dans les cellules en série est le même et donc limité par le plus faible courant des différentes cellules

Le rendement d'une cellule tandem sera donné par :

$$\eta = \frac{\sum V_{co} \cdot \min(j_{cc})}{P_i} FF \quad (II.7)$$

F_0 : Flux incident

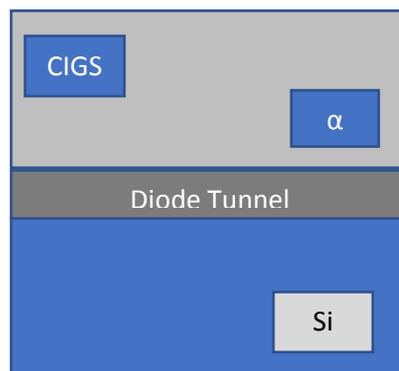


Figure II.7 Cellule tandem

II.9 cellules cascade

Dans la configuration cascade, les cellules sont fabriquées séparément ensuite reliées par une colle transparente. Les cellules sont isolées électriquement et dotées de contacts électriques.

Dans cette configuration, on s'affranchit des contraintes citées précédemment. Les matériaux des cellules peuvent avoir des paramètres de maille et des courants différents.

Cependant, la réalisation de ces cellules est plus complexe.

Le rendement d'une cellule cascade sera donné par :

$$\eta = \frac{\sum P_m}{P_i} \quad (\text{II.8})$$



Figure II.8 Cellule cascade

II.10 Cellule solaire en CIGS

Le développement de cellules solaires à base de CIGS a débuté dans les années 1970. Les rendements de conversion des dispositifs dépassent 22% en laboratoire et atteignent 16% à l'échelle industrielle [18]. Bien qu'une cellule CIGS soit constituée d'au moins 6 matériaux différents, c'est principalement la compréhension et l'amélioration des propriétés du matériau absorbeur qui sont au cœur des progrès réalisés. L'utilisation de substrats métalliques à la place du verre constitue une véritable problématique additionnelle.

La cellule photovoltaïque à base de CIGS ou Cuivre Indium Gallium Sélénure (Copper Indium Gallium Selenide based solar cell) dans sa configuration la plus répandue, est l'empilement de plusieurs matériaux en couches minces déposés successivement sur un substrat, ce dernier peut être un support en plastique, en verre de silicate sodocalcique de 1 à 3 mm d'épaisseur, ou sur des feuilles métalliques.

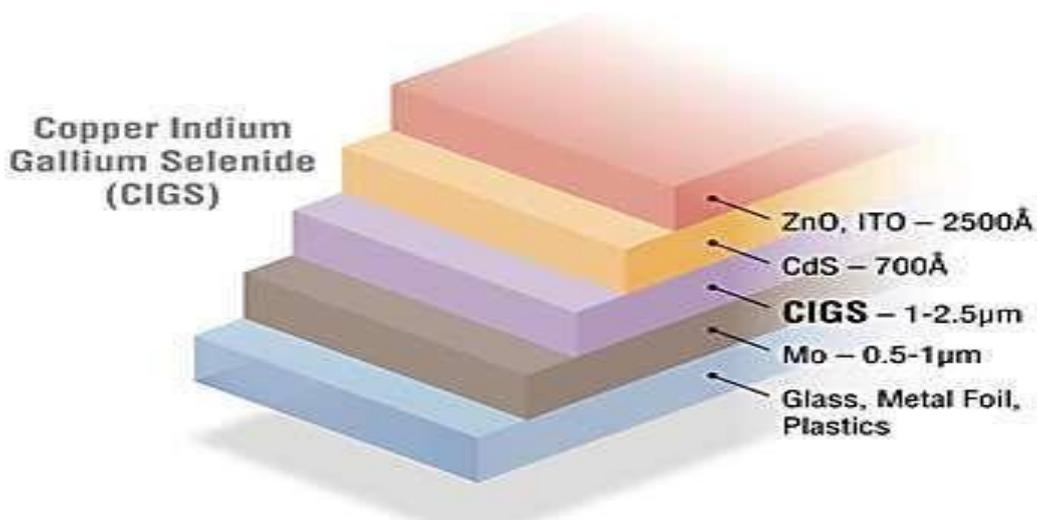


Figure.II.9 : composition d'une cellule à base de couches minces CIGS

La première couche déposée sur le substrat est l'électrode de contact arrière. Elle a pour rôle principal de collecter les charges générées dans la cellule. D'un point de vue électrique, elle constitue le pôle positif du générateur photovoltaïque. Cette couche est composée de molybdène (Mo) et son épaisseur est d'environ 300 nm à 1000 nm. La méthode de dépôt la plus utilisée pour le contact arrière est la pulvérisation cathodique. La couche située directement au-dessus du contact arrière est composée du matériau absorbant, le CIGS. Il s'agit d'un semi-conducteur de type p qui forme la première partie de l'hétérojonction p-n. C'est aussi dans ce matériau que la majorité des photons est absorbée pour former les paires électron-trou. Son épaisseur est d'environ 1 µm à 3.5 µm. Les méthodes de dépôt du CIGS sont variées, les plus communes étant la co-évaporation et le recuit de précurseurs métalliques en présence de vapeurs de sélénium. L'hétérojonction p-n avec le CIGS est formée en ajoutant une couche appelée « couche tampon ». Cette dénomination provient du fait qu'elle joue aussi un rôle de protection physique du CIGS lors du dépôt par pulvérisation cathodique des couches suivantes. [19]

Actuellement, les meilleurs rendements sont obtenus en utilisant des couches tampon à base de sulfure de cadmium (CdS). Aussi, c'est le matériau le plus utilisé. Cependant, en raison de la toxicité du cadmium, d'importants efforts sont tournés vers le développement de couches tampon alternatives comme le Zn(O,S), (Zn,Mg)O, In₂(S,Se)₃, etc. L'épaisseur typique d'une couche tampon en CdS est d'environ 50 nm. La méthode la plus courante de dépôt du CdS est le bain chimique (Chemical Bath Deposition, CBD). La couche tampon est recouverte d'une couche fenêtre (Window Layer). Cette couche est composée d'un dépôt d'oxyde de zinc (ZnO) et d'un dépôt d'oxyde transparent conducteur (Transparent Conducting Oxide, TCO). La couche de ZnO est résistive et sert à limiter la formation de court-circuit dans les zones présentant un recouvrement imparfait du CIGS par la couche tampon [20]. Les TCO les plus utilisés sont le ZnO dopé aluminium (ZnO : Al) et l'oxyde d'indium et d'étain (Indium Tin Oxide, ITO) déposés par pulvérisation cathodique. Le TCO permet à la couche fenêtre de constituer en partie le contact avant de la cellule photovoltaïque tout en étant transparente au rayonnement solaire, ce dernier devant être absorbé dans la couche de CIGS. L'épaisseur de la couche fenêtre est de l'ordre de 300 nm à 500 nm. Le contact avant final est réalisé en

ajoutant à l'empilement une grille qui collectera les charges générées par le dispositif. Cette grille est composée d'une couche de nickel et d'une couche d'aluminium. Le Ni sert de couche d'accroche et permet d'éviter l'oxydation de l'Al liée à la présence sous-jacente du TCO. Les grilles sont déposées en général par évaporation en utilisant un masque de dépôt. [21]

II.11 Jonction p-n et diagramme d'énergie

La jonction p-n dans les cellules solaires CIGS est formée entre le semi-conducteur type p (CIGS) et le type n (CdS). Le diagramme d'énergie de bande de cette cellule est représenté sur la figure (II.10). La différence des affinités électroniques des deux matériaux constituant la jonction se traduit par une discontinuité de bande interdite. La courbure de la bande de conduction ou ΔE_c (Conduction Band Offset) entre le CIGS et le CdS est par convention positive, ce qui signifie que la bande de conduction de CdS est supérieure à celle de CIGS.

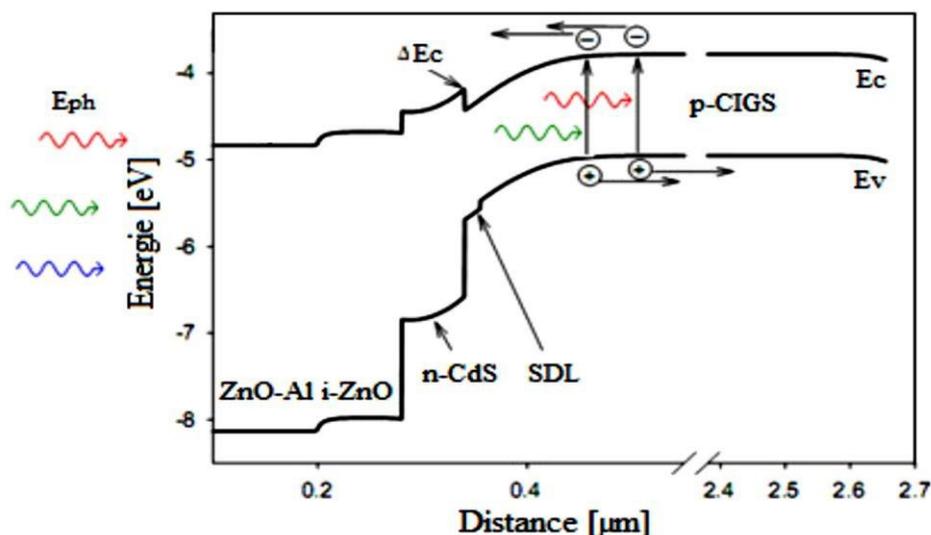


Figure.II.10 : Structure de bande d'une cellule solaire $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$.

La valeur optimale de la courbure de la bande de conduction est $\Delta E_c = 0,3 \text{ eV}$ est obtenue pour un gap de CIGS=1,15 eV. Une courbure de la bande de conduction supérieure à 0,5 eV crée une barrière forte pour les électrons photo- générés limitant ainsi, le transport du courant. En revanche, une courbure de la bande de conduction nulle ou négative conduit à une augmentation de la recombinaison à l'interface, ce qui limite la tension de la cellule. [22 ;23].

Le tableau II.1 regroupe certains paramètres physiques de la cellule à base de CIGS.

Propriété	CIGS	CdS	ZnO
$E_g(\text{eV})$	Varie (1.011/1.68)	2.4	3.3
$\chi_e (\text{cm}^{-3})$	4.58	4.4	4.4
ϵ_r	13.6	10	9
$N_c(\text{cm}^{-3})$	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}
$N_v(\text{cm}^{-3})$	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}
$\mu_n(\text{cm}^2/\text{Vs})$	100	100	100
$\mu_p(\text{cm}^2/\text{Vs})$	25	25	25
$N_a \text{ Ou } N_d(\text{cm}^{-3})$	$N_a = 2 \times 10^{16}$	$N_d = 10^{17}$	10^{17}
m_e	$0.2m_0$	$0.9m_0$	$0.9m_0$
m_t	$0.8m_0$	$0.8m_0$	$0.8m_0$
$\tau_n \text{ ou } \tau_p (\text{s})$	$\tau_n = 2 \times 10^{-9}$	$\tau_p = 10^{-13}$	/
$S_n \text{ ou } S_p (\text{cm/s})$	$S_n = 10^7$	$S_p = 10^7$	/

Tableau II.1 : Paramètres physiques des matériaux de la cellule solaire en CIGS [24]

II.12 Avantages de la fabrication des cellules solaires en CIGS

L'utilisation de cellules solaires en CIGS a le potentiel de diriger le marché des cellules solaires en couches minces. Cela est dû aux nombreux avantages que les cellules en CIGS offrent à la fois au fabricant et au consommateur. Comme la recherche continue à améliorer à la fois le rendement des cellules et la réduction des coûts de fabrication, les cellules solaires en CIGS ont le potentiel d'acquiescer la majorité de la part du marché des couches minces [25].

II.12.1 Fabrication peu coûteuse

Un des principaux avantages de cellules en CIGS est qu'elles peuvent être commercialement fabriquées à une fraction du coût par rapport aux cellules solaires en Si. Les cellules cristallines de Si doivent être fabriquées avec le silicium extrêmement pur. Une fois qu'un fabricant a abouti au silicium avec une assez grande pureté, le matériau doit être chauffé à des températures extrêmement élevées pour se former dans une structure cristalline. Le lingot du silicium cristallin est ensuite découpé en plaquettes qui doivent subir de nombreuses étapes de gravure et de dopage avant qu'un produit final soit atteint [26]. Ce processus est très long et coûteux pour le fabricant.

Les cellules solaires en couches minces, comme en CIGS peuvent être produites de manière beaucoup plus efficace. Le matériau CIGS peut être déposé sur le substrat et le contact arrière par un procédé appelé déposition qui permet aux éléments de s'adhérer sur le substrat à une température suffisamment élevée. Ce processus ne nécessite pas des tolérances élevées par rapport aux cellules en Si et il est globalement un processus plus facile pour la fabrication [27]. En plus des avantages de la déposition, le CIGS peut être fabriqué avec une technique appelée sur rouleaux ("roll-to-roll"). La fabrication "roll-to-roll" est illustrée sur la figure II.11.

Avec la technique de fabrication "roll-to-roll", les sociétés peuvent produire des cellules solaires à grande échelle. Une fois le substrat flexible est déroulé, il subit plusieurs processus qui consistent à déposer l'ensemble des couches sur le substrat. Le processus réduit considérablement le temps de production mais permet également un cycle de production continu. Plutôt que de couper des plaquettes individuelles de Si, la fabrication roll-to-roll supporte une feuille continue de cellules solaires produites. Ce processus est si efficace qu'il a permis à des sociétés comme Miasolé et Solibro d'offrir des cellules solaires CIGS avec un prix de 1 \$ / W [28].

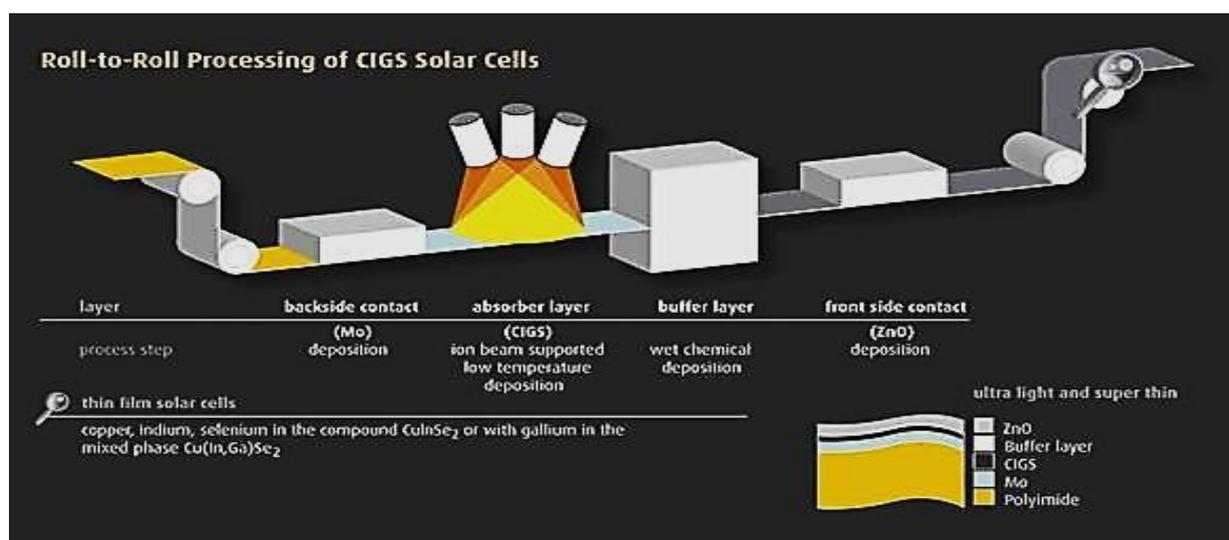


Figure.II.11 : Le processus de fabrication "roll-to-roll" de la cellule solaire CIGS.

II.12.2 Flexible

La flexibilité des cellules CIGS produites sur un substrat métallique mince est aussi un avantage énorme. Cette flexibilité donne au CIGS un avantage par rapport aux cellules Si conventionnelles en ce qui concerne le montage. Une cellule Si standard possède des propriétés compatibles avec un panneau en verre qui rend une cellule Si rigide mais cassante, ceci limite les options de mise en œuvre de panneaux solaires. La nature flexible de cellules solaires CIGS leur permet d'être montées sur des structures qui ne peuvent pas être parfaitement plates. La recherche a montré que le montage des cellules CIGS est très pratique et avec une grande dureté sur des avions sans pilotes [29].

II.12.3 Poids léger

En plus d'être mince et flexible, la cellule CIGS est aussi légère. Étant léger a ses avantages pour les personnes qui souhaitent prendre leurs cellules solaires avec eux lorsqu'ils voyagent. Leur portabilité reste hors de portée pour les cellules à base de Si.

II.13 Avantages et inconvénients de la cellule solaire à base de CIGS

a. Les avantages :

Un rendement élevé.

Résiste mieux à la température.

Travaille sous de faibles éclairagements.

Coefficient d'absorption élevé (qui dépasse 10^5 cm^{-1}).

Ne contient pas d'éléments toxiques (sauf dans la couche tampon mais en infimes quantités).

Ductile et légère, ce qui facilitera le transport des panneaux.

b. Inconvénients :

La cellule est relativement chère pour sa contenance en Indium et le Gallium.

II.14 Conclusion :

Dans le présent chapitre, nous avons présenté les bases fondamentales à la compréhension de la cellule solaire. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres qui influent sur leurs caractéristiques. Nous avons aussi présenté la structure et quelques notions sur les cellules solaires à base de CIGS.

Chapitre III

Résultats de simulation et discussion

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de la simulation numérique par le logiciel COMSOL Multiphysics de la cellule solaire en CGS /Si et l'interprétation des résultats trouvés.

Nous avons d'abord étudié la variation des paramètres caractéristiques (densité de courant de court-circuit J_{CC} , la tension à circuit ouvert V_{CO} , la puissance maximale P_{max} ainsi que le rendement η) en fonction des épaisseurs pour les deux cellules séparément, ensuite, nous avons optimisé la cellule CGS/Si de telle sorte que les courants délivrés par les deux cellules soient égaux, et enfin nous avons déduit les caractéristiques de la cellule photovoltaïque à double jonction optimisée.

III.2 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques.

Les principales étapes pour faire la simulation avec ce logiciel sont :

- Mettre en place l'environnement modèle
- Construire la géométrie
- Spécifier les propriétés des matériaux
- Définir les conditions limites de la physique.
- Créez le maillage.
- Exécutez la simulation.
- Post-traiter les résultats.

III.3. Présentation de la cellule à étudier :

La structure à étudier est constituée de deux cellules solaires, la cellule supérieure en CGS avec une large bande interdite ($E_g=1,69\text{eV}$) dont l'épaisseur sera réglable, la cellule inférieure en Si avec une petite bande interdite ($E_g=1,12\text{eV}$) dont l'épaisseur sera fixe. L'objectif de cette structure double jonction est de convertir une large gamme de photons incidents sur la cellule pour qu'elle génère plus de puissance.

La figure (III.1) ci-dessous indique la structure de la cellule CGS/Si. La cellule est soumise à un éclairage de spectre solaire AM0 d'une densité de puissance de 1300 W/m^2 , on supposera également que les rayons solaires sont normaux à la surface.

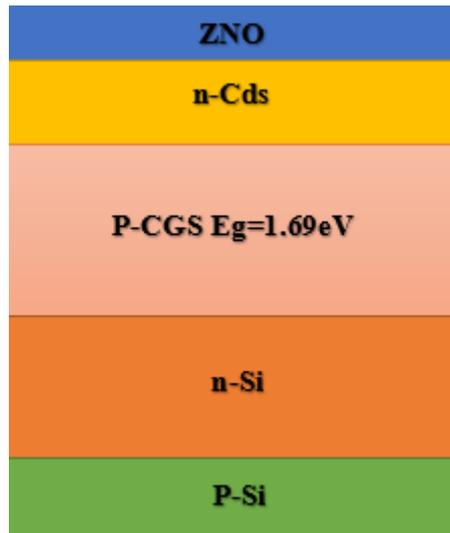


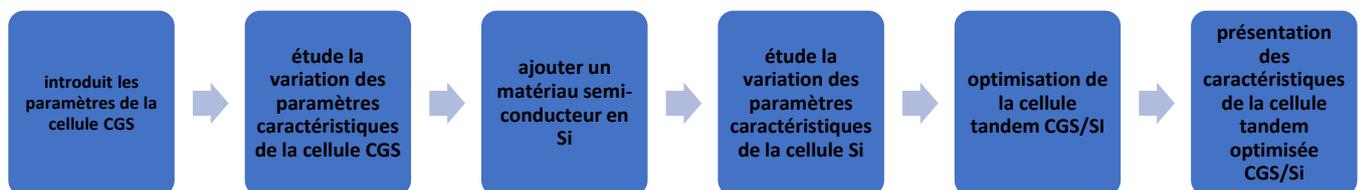
Figure III.1 Schéma de la structure de la cellule solaire CIGS/Si simulée.

III.4 Paramètres de simulation

	n-ZnO	n-Cds	P-CGS	n-Si	P-Si
E_g (eV)	3.3	2.4	1.65	1.12	1.12
X(eV)	4.45	4.45	4.45	4.05	4.05
ϵ_r	10	10	13.6	11.7	11.7
N_c (cm^{-3})	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	1.04×10^{19}	1.04×10^{19}
N_v (cm^{-3})	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	2.8×10^{19}	2.8×10^{19}
μ_n ($cm^2/V \cdot s$)	100	100	100	1450	1450
μ_p ($cm^2/V \cdot s$)	25	25	25	500	500

Tableau III.1 Les paramètres de simulation

III.5 L'organigramme :



III.6 Effet de l'épaisseur de la couche absorbante CGS dans la cellule supérieure

III.6.1 Caractéristiques courant tension J(V):

La figure (III.2) représente les caractéristiques J(V) pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche CGS. Le courant augmente avec l'augmentation de l'épaisseur avec une valeur optimale de $W_3=2,5 \mu\text{m}$, la variation devient de plus en plus faible. Quant à la tension de circuit ouvert, elle varie faiblement.

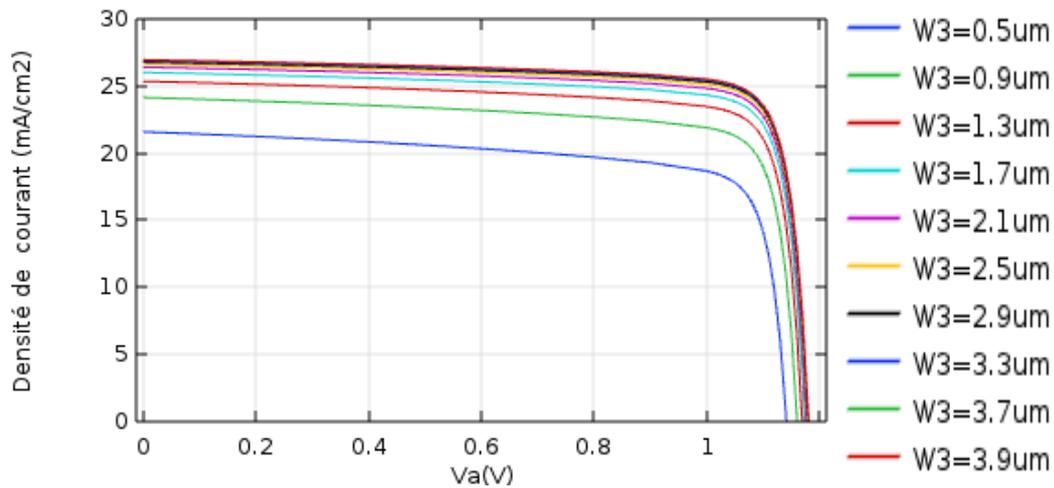


Figure III.2 caractéristiques courant-tension pour différentes épaisseurs de la couche CGS de la cellule supérieure.

III.6.2 Caractéristiques puissance-tension P(V) :

La figure (III.3) représente les caractéristique P(V) pour différentes valeurs de l'épaisseur, On remarque que la puissance augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante jusqu'à $W_3=2,5 \mu\text{m}$, ensuite la variation devient très faible. Quant à la tension de circuit ouvert, elle varie très faiblement.

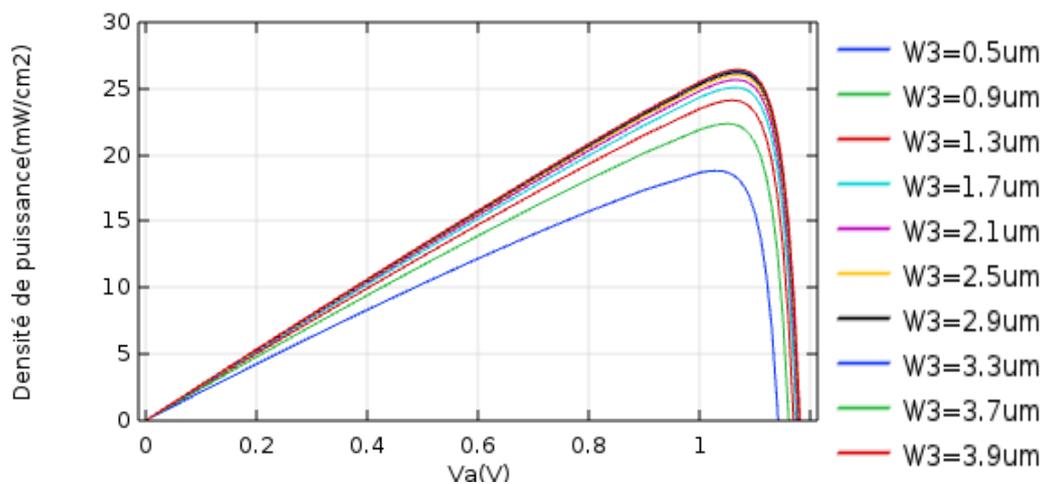


Figure III.3 caractéristiques puissance-tension pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche CGS de la cellule supérieure.

III.6.3 Densité de courant de court-circuit J_{cc}

La figure III.3 montre la variation de la densité de courant de court-circuit en fonction de différentes valeurs de l'épaisseur de la couche absorbante CGS. On remarque que le courant augmente très rapidement entre $0,5\mu\text{m}$ et $2\mu\text{m}$, La variation devient faible à partir de $W_3=3\mu\text{m}$.

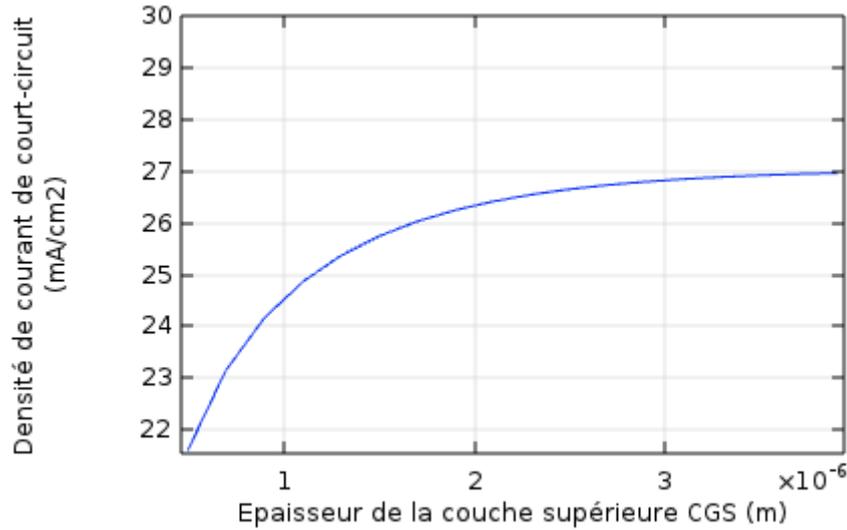


Figure III.4 : Variation de la densité de courant de court-circuit J_{cc} en fonction de l'épaisseur de la couche CGS de la cellule supérieure.

III.6.4 Tension de circuit ouvert V_{co}

La figure (III.5) représente la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur W_3 . On remarque que l'épaisseur a une très faible influence sur la tension de circuit ouvert V_{co} .

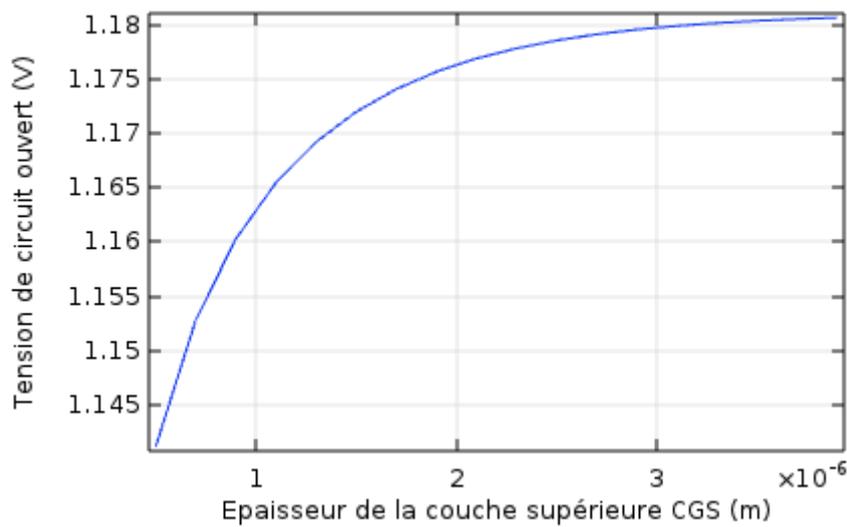


Figure III.5 Variation de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la couche CGS de la cellule supérieure.

III.6.5 Puissance maximale Pmax :

Dans la figure (III.6) on constate que la puissance maximale augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche CGS. La puissance commence à se stabiliser à partir de $W_3=3 \mu\text{m}$.

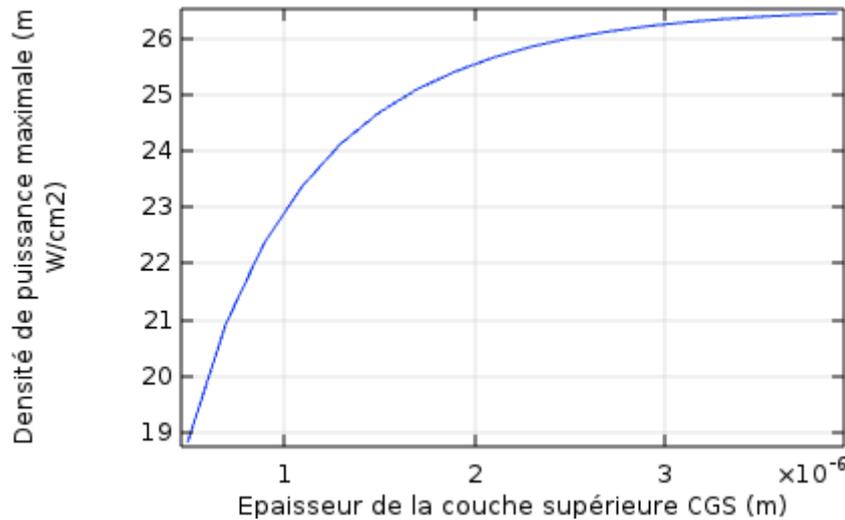


Figure III.6 Variations de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur de la couche CGS de la cellule supérieure.

III.6.6 Le rendement η :

La variation du rendement en fonction de W_3 est illustrée dans la figure (III.7). On remarque que le rendement augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante. Le rendement commence à stabiliser à partir de $W_3=3 \mu\text{m}$. On obtient un rendement maximal de l'ordre de 20,5% pour une épaisseur de la couche CGS de l'ordre de 4 μm .

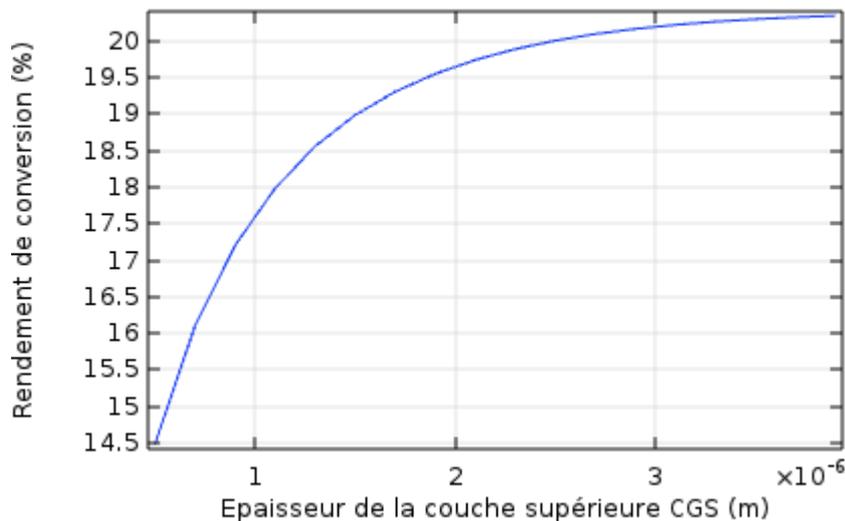


Figure III.7 Variations du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche CGS de la cellule supérieure.

III.6.7 Le facteur de forme

La figure (III.8) représente la variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CGS dans la cellule supérieure. On remarque que le facteur de forme augmente avec l'augmentation de l'épaisseur, mais cette variation est faible, puis il tend à se stabiliser vers une valeur de 0,82 approximativement.

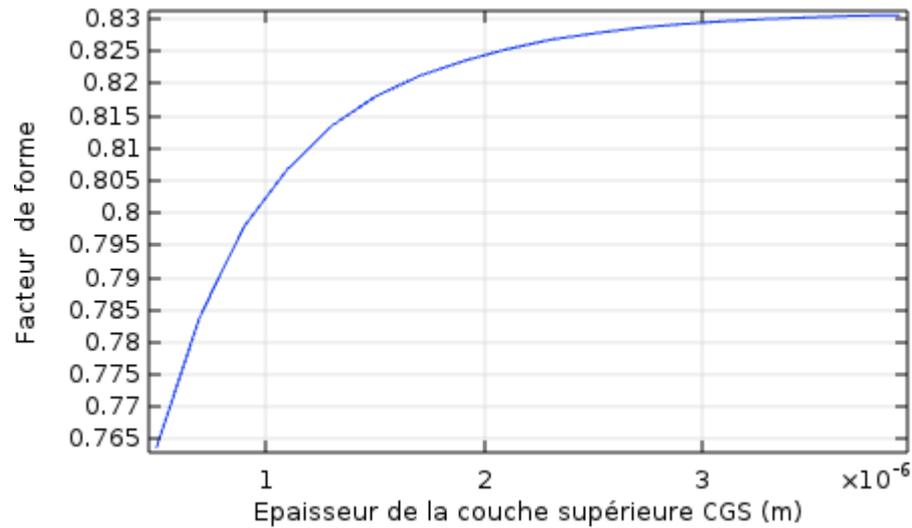


Figure III.8 Variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche CGS de la cellule supérieure

III.7 Effet de l'épaisseur de la couche absorbante Si de la cellule inférieure

III.7.1 Caractéristiques courant-tension J(V) :

La figure (III.9) représente les caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de l'épaisseur de la cellule inférieure Si (W_4). On constate que le courant augmente avec l'augmentation de l'épaisseur W_4 jusqu'à la valeur $W_4=120\mu\text{m}$. La variation devient de plus en plus faible. Quant à la tension de circuit ouvert, elle augmente faiblement.

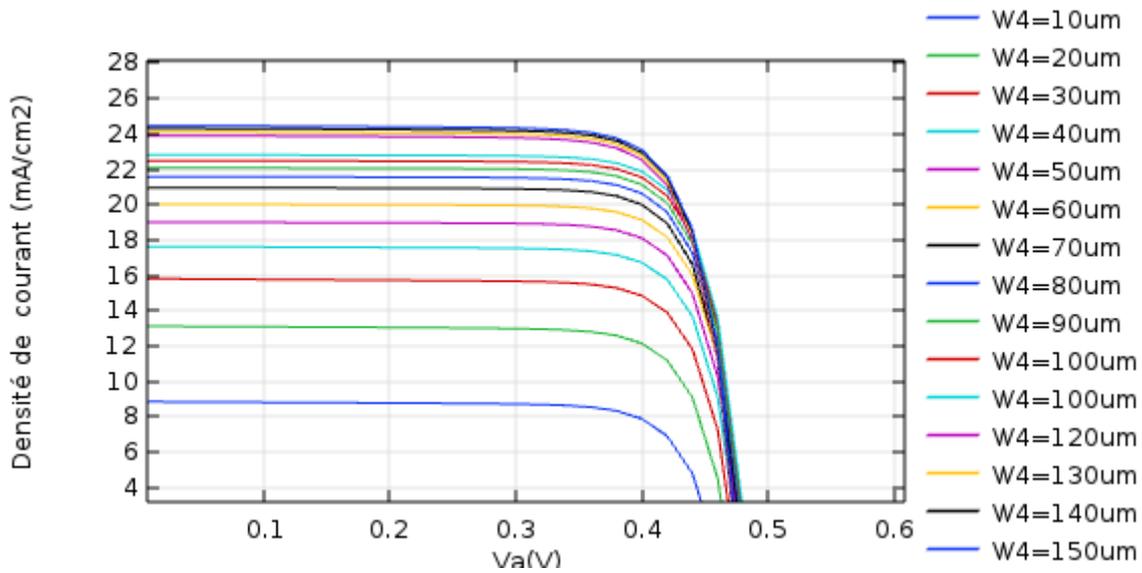


Figure III.9 Caractéristique courant-tension pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche Si de la cellule inférieure.

III.7.2 Caractéristiques puissance-tension P(V) :

La figure (III.10) présente les caractéristique P(V) pour différentes épaisseurs de la cellule Si. On remarque que la puissance augmente avec l'augmentation de l'épaisseur, La variation devient très faible à partir de $W_4=120\mu\text{m}$. Quant à la tension de circuit ouvert, elle augmente très faiblement.

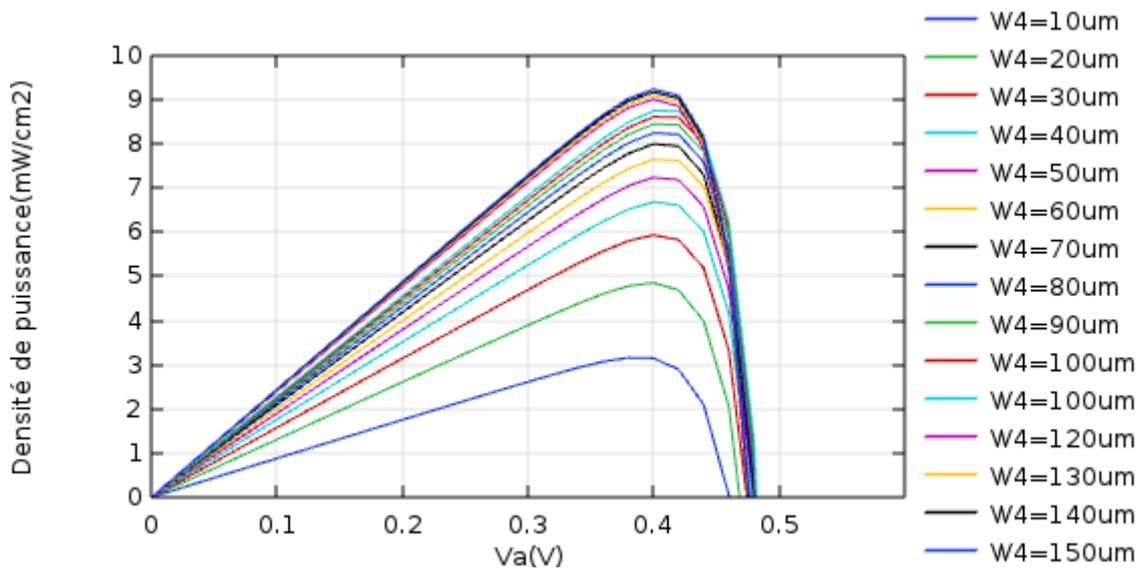


Figure III.10 Caractéristiques puissance-tension pour différentes valeurs de l'épaisseur de la cellule inférieure Si

III.7.3 Densité de courant de court-circuit Jcc

La figure III.11 montre la variation de la densité de courant de court-circuit en fonction de différentes valeurs de l'épaisseur W_4 de la couche absorbante Si. On remarque que le courant

augmente très rapidement de 10 μm jusqu'à 120 μm et commence à stabiliser à partir de $W_4=120\ \mu\text{m}$

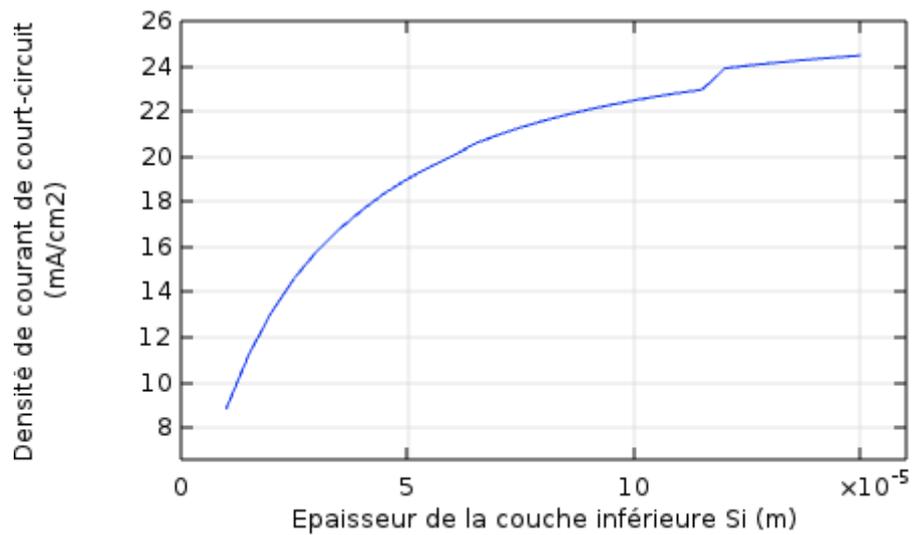


Figure III.11 Variation du courant de court-circuit en fonction de l'épaisseur de la couche Si de la cellule inférieure.

III.7.4 Tension de circuit ouvert V_{co} :

L'influence de l'épaisseur de la couche absorbante Si sur la tension de circuit ouvert dans la cellule inférieure est représentée sur la figure (III.12). On voit que l'épaisseur de la couche absorbante a une faible influence sur la tension de circuit ouvert V_{co} .

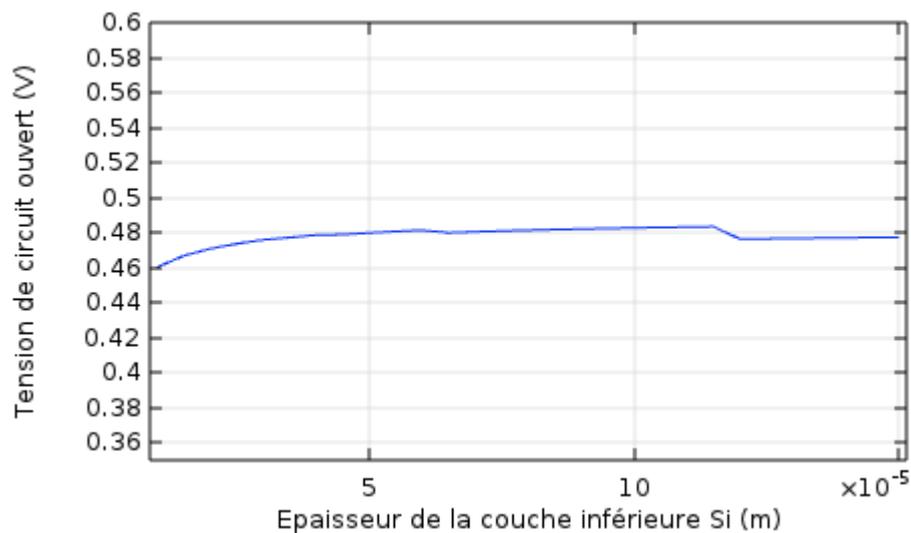


Figure III.12 Variation de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la couche Si de la cellule inférieure.

III.7.5 Puissance maximale Pmax :

Dans la figure (III.13) on constate que la puissance maximale augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche Si. La puissance commence à se stabiliser à partir de $W_4=120\mu\text{m}$.

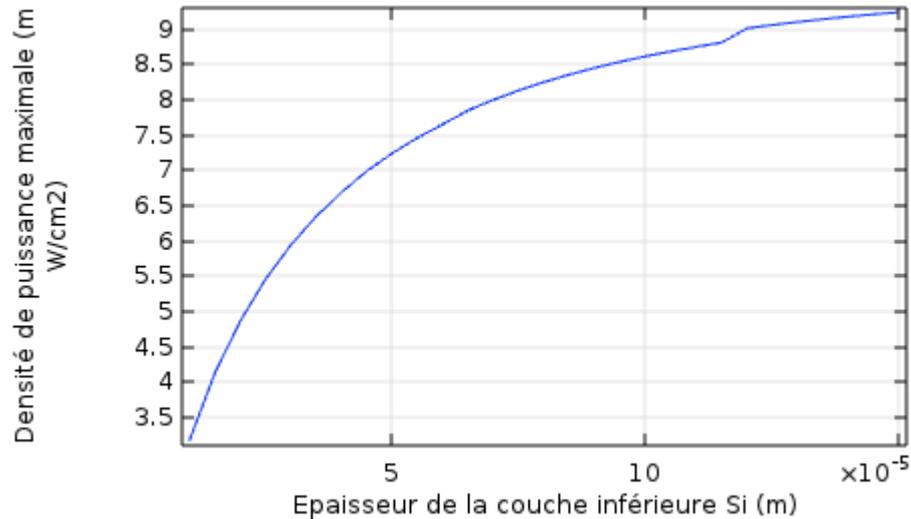


Figure III.13 Variation de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur de la couche Si de la cellule inférieure

III.7.6 Le rendement η (%) :

La variation du rendement de la cellule inférieure en fonction de W_4 est illustrée dans la figure (III.14). On remarque que le rendement augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante. Le rendement commence à se stabiliser à partir de $W_4=120\mu\text{m}$.

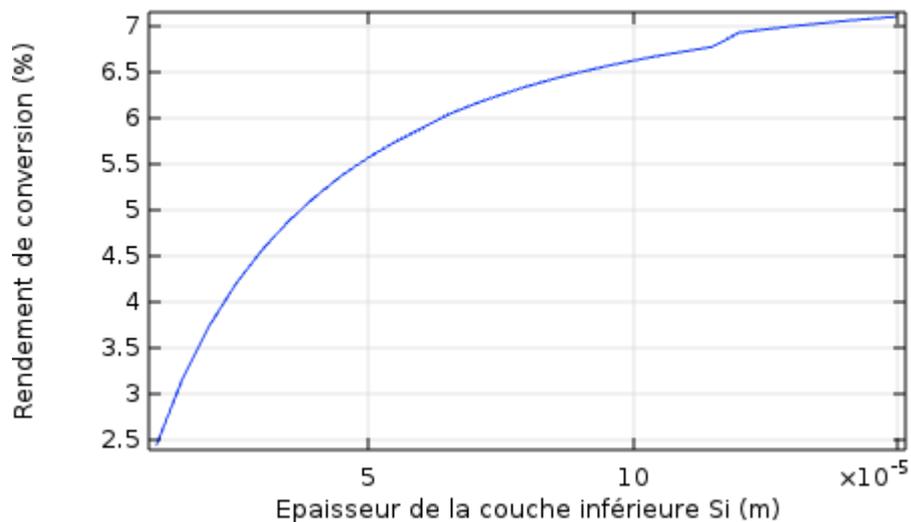


Figure III.14 La variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche Si de la cellule inférieure

III.7.7 Le Facteur de Forme :

Dans la figure (III.15), est représentée la variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante Si dans la cellule inférieure. On remarque que le facteur de forme varie faiblement et se stabilise à une valeur de 0.79.

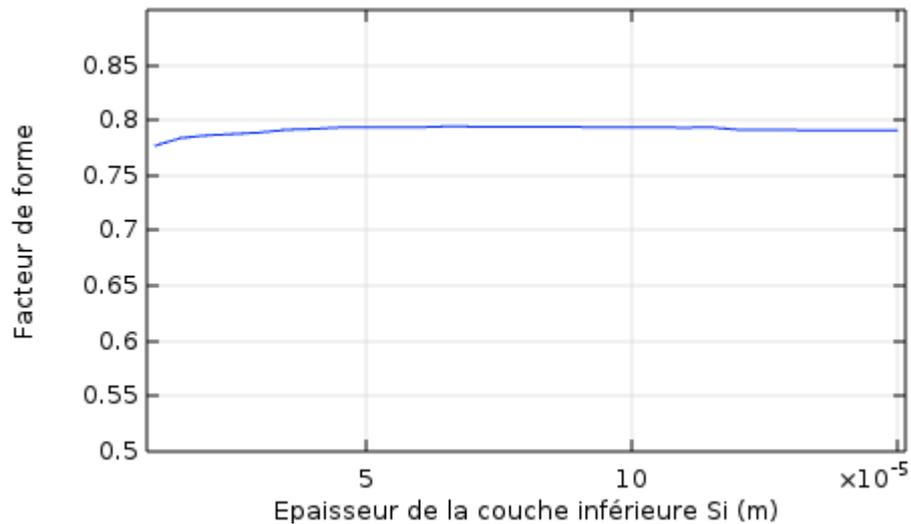


Figure III.15 Variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche Si de cellule inférieure

III.8 Caractéristiques de la cellule solaire CGS/Si

La figure (III.14), présente la variation des densités de courant de court-circuit des cellules CGS et Si, en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CGS. La variation s'est faite de 0,1 à $3\mu\text{m}$.

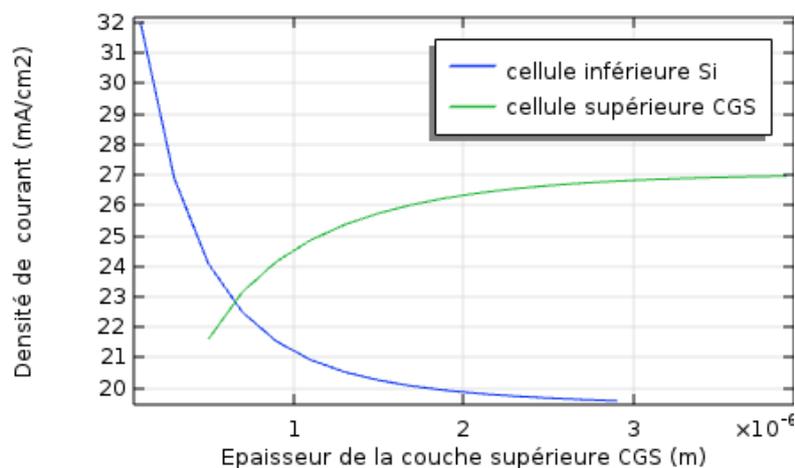


Figure III.16 Variation des courants de court-circuit des cellules CGS et Si en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CGS dans la cellule tandem CGS/Si.

D'après la représentation graphique de la variation des deux courants, nous remarquons que les deux courbes se rencontrent dans un point d'intersection, la valeur du point représente le courant optimal qui est égale à 22,9 mA/cm² qui correspond à une épaisseur de la couche CGS égale à 0,7µm. Les caractéristiques J(V) et P(V) des deux cellules après optimisation sont représentées dans les figures (III.17) et (III.18) respectivement.

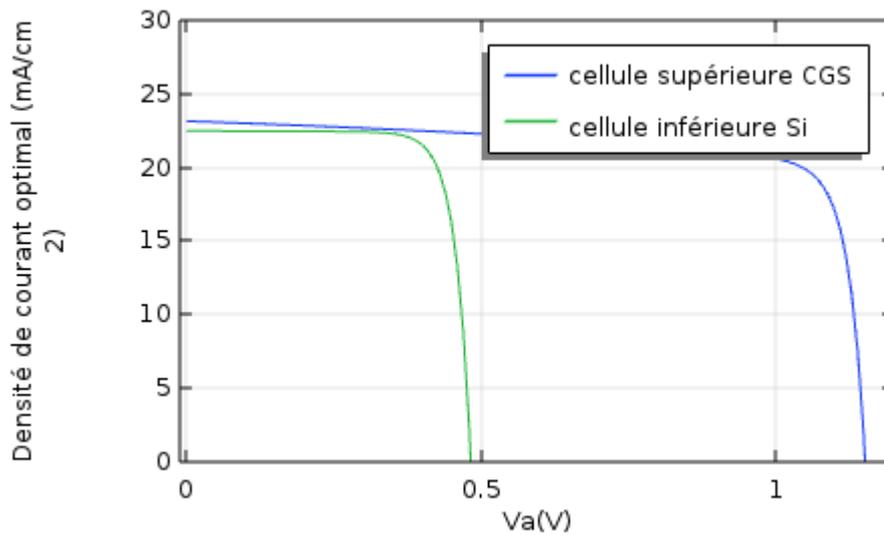


Figure III.17 Représentation des caractéristiques J(V) des deux cellules après l'optimisation.

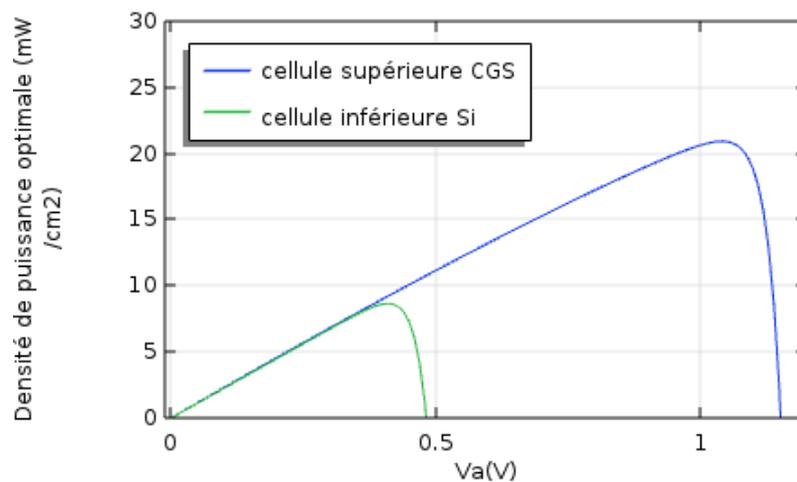


Figure III.18 Représentation des caractéristiques P(V) des deux cellules après l'optimisation.

III.9 Caractéristiques de la cellule CGS/Si tandem optimisée

Le tableau (III.2) est un résumé des caractéristiques de la cellule supérieure en CGS et la cellule inférieure en Si après l'optimisation ainsi que la cellule CGS/Si tandem optimisée :

Types de cellule	J_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	P_{max} (mW/cm ²)	η (%)	FF
Cellule supérieure CGS	22,9	1,18	21,2	16,3	0,78
Cellule inférieure Si	22,9	0,47	9	6,9	0,83
Cellule tandem CGS/Si	22,9	1,65	30,2	23,2	0,79

Tableau III.2 Caractéristiques des cellules (supérieure en CGS, inférieure en Si et la cellule CGS/Si tandem)

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats obtenus de la simulation de la cellule à double jonction CGS/Si, et cela en étudiant le comportement de la cellule supérieure et inférieure, puis nous avons procédé à l'optimisation, pour obtenir le meilleur rendement. Pour cela nous avons fixé l'épaisseur de la couche Si de la cellule inférieure à sa valeur optimale qui est de 120 μ m, quant à la cellule supérieure nous avons fait varier l'épaisseur de sa couche absorbante en CGS jusqu'à obtenir la valeur optimale de 0.7 μ m qui nous permet d'avoir un rendement de 23,2 % et une puissance délivrée de 35,6mW/cm².

Conclusion générale

Actuellement, Il existe des filières en plein essor basées sur des technologies dites des couches minces. Elles permettent de convertir le plus de photons possibles en électricité en utilisant le minimum de matériaux réactifs possibles. La réduction du coût de fabrication grâce à une réduction de matières premières et à une méthode d'intégration totale sont deux points aujourd'hui à fort potentiel de développement. Contrairement aux filières de silicium cristallin, ces technologies ne nécessitent ni découpe ni post-assemblage de cellules pour aboutir à un module commercial réduisant les coûts de fabrication. Trois grandes familles de matériaux sont actuellement en plein essor : l'alliage Cu(In,Ga)Se_2 noté CIGS qui revendique un rendement record en laboratoire de plus de 22%.

Dans le premier chapitre nous avons étudié les différents phénomènes des semi-conducteurs qui se passent dans la cellule, nous avons aussi abordé les différentes caractéristiques des matériaux CIGS et Si, on constate que le matériau silicium caractérisé par un gap indirect et le matériau CIGS par un gap direct variant de 1.03eV à 1.68eV et un coefficient d'absorption très élevé de l'ordre de 10^5 cm^{-1} dans le domaine du visible et du proche infrarouge.

Dans le deuxième chapitre, nous avons abordé la cellule solaire et son principe de fonctionnement, les multijonctions en couche mince en générale, Puis la cellule à base de CIGS en particulier tout en énumérant leurs avantages et inconvénients.

Ce travail s'est fixé comme objectif d'étudier et d'optimiser des structures de cellules solaires double jonction à base de CGS/Si et déterminer leurs caractéristiques.

Les résultats obtenus dans cette étude on permis de constater que les performances optimales de notre structure sont obtenues pour une épaisseur de la couche absorbante de la cellule supérieure CGS de l'ordre de 2.5 μm et de la cellule inférieure Si de l'ordre de 120 μm et un rendement de conversion optimale de l'ordre de 23.2 %.

Tous ces résultats simulés permettent de conclure que le l'optimisation des paramètres de la structure est prometteuse et peut améliorer le rendement de la cellule solaire en CIGS.

En perspective, la suite de ce travail peut être envisagée en considérant d'autres matériaux pour la cellule supérieure tels que CZTS ou pérovskite.

Liste de références bibliographiques :

- [1] Ullal HS, Zweibel K, Von Roedern B, Proc. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., Anaheim, CA, USA; 1997, p. 301.
- [2] M. Yamaguchi, "Radiation resistance of compound semiconductor solar cells", J. Appl. Phys, Vol 78, 1995, p1476.
- [3] M. Kemell, Academic Dissertation, Université de Helsinki, Finland, (2003).
- [4] Philip Jackson et al., "Effects of heavy alkali elements in Cu(In,Ga)Se₂ solar cells with efficiencies up to 22.6%" , ZSW, Germany, 2016.
- [5] Doctorat LMD en Electronique (Etude pa simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS à multi-jonction par le logiciel Tcad Silvaco).
- [6] Doctorat en sciences en Electronique (Etude et simulation des cellules solaires multi-jonctions à base de matériaux semi-conducteurs III-V).
- [7] Mémoire de fin d'études en master : Etude et simulation d'une cellule solaire à base couches minces CZTS, présenté par : OUBOUCHOU Amina, 2019.
- [8] Jaffe, J.E. and A. Zunger, Theory of the Band-Gap Anomaly in ABC₂ Chalcopyrite Semiconductors. Physical Review B, 1984. 29(4): p. 1882-1906.
- [9] Assia Bouraiou, "Elaboration et Caractérisation des Couches Minces CuInSe₂ par Électrodéposition", thèse de doctorat, université de Constantine, 2009, p34.
- [10] <http://www.physique-etmatiere.com/silicium.php>.
- [11] Wenham S. R., Green M. A. and Watt M. E, «Applied Photovoltaic», Bridge Printer, Sidney,1994.
- [12] Mecheri Abdeslem, Sandali Abd Elaziz, « Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction : a-Si:H(n)/c-Si(p) », Thème De Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015, p 13, 20
- [13] Djicknoum DIOUF, « Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure inter digitée en face arrière », Thèse De Doctorat, Université Paris-Sud 11, 2010, p8-10
- [14] Djicknoum DIOUF, « Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure inter digitée en face arrière », Thèse De Doctorat, Université Paris-Sud 11, 2010, p8-10
- [15] OUSSIDHOUM Samira, "etude comparative des performances des cellules solaires à jonctions simple et multiple", thème de magister, Université mouloud Mammeri de tizi-ouzou ,2015, p18
- [16] M. Mezghache, B. Hadjoudja, "Improved performance in bilayer-CIGS solar cell", IEEE, 2013.

- [17] these doctorat 'Etude et simulation des cellules solaires multi-jonctions à base de matériaux semi-conducteurs III-V'.
- [18] <http://www.nrel.gov/pv/copper-indium-gallium-diselenide-solarcells.html>.
- [19] N. Naghavi, D. Abou-Ras, N. Allsop, N. Barreau, S. Bücheler, A. Ennaoui, C.-H. Fischer, C. Guillen, D. Hariskos, J. Herrero, R. Klenk, K. Kushiya, D. Lincot, R. Menner, T. Nakada, C. Platzer-Björkman, S. Spiering, A.N. Tiwari, and T. Törndahl. Bufferlayers and transparent conducting oxides for chalcopyrite $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ based thin film photovoltaics: present status and current developments. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 18(6) :411–433, September 2010.
- [20] U. Rau, P. O. Grätz, and J. H. Werner. Resistive limitations to spatially inhomogeneous electronic losses in solar cells. Applied Physics Letters, 85(24) :6010, 2004.
- [21] Charles Roger, Développement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats métalliques, Université de Grenoble, 2013.
- [22] K. Granath, M. Bodegard and L. Stolt, « The effect of NaF on $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ thin film solar cells », Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 60, 2000, pp. 279.
- [23] F. Kessler, D. Herrmann and M. Powalla, « Approaches to flexible CIGS thin-film solar cells », Thin Solid Films, Vol. 480-481, 2005, pp. 491.
- [24] K. Orgassa, H. W. Schock and J. H. Werner, « Alternative back contact materials for thin film $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ solar cells », Thin Solid Films, Vol. 431–432, 2003, pp. 387.
- [25] R. J. Matson, O. Jamjoum, A. D. Buonaquisti, P. E. Russell, L. L. Kazmerski, P. Sheldon and R. K. Ahrenkiel, « Metal contacts to CuInSe_2 », Solar cells, Vol. 11, 1984, pp. 301.
- [26] N. Kohara, S. Nishiwaki, Y. Hashimoto, T. Negami and T. Wada, « Electrical properties of the $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2/\text{MoSe}_2/\text{Mo}$ structure », Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 67, 2001, pp. 209.
- [27] M. Kemell, M. Ritala and M. Leskelä, « Thin Film Deposition Methods for CuInSe_2 Solar Cells », Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, Vol. 30, 2005, pp. 1.
- [28] M. Powalla and B. Dimmler, « Scaling up issues of CIGS solar cells », Thin Solid Films, Vol. 361–362, 2000, pp. 540.
- [29] A. Duchatelet, « Synthèse de couches minces de $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ pour cellules solaires par électro dépôt d'oxydes mixtes de cuivre-indium-gallium », Thèse de Doctorat, université de Lille1, 2012.
- [30] D. Schmid, M. Ruckh, F. Grunwald and H. W. Schock, « Chalcopyrite/defect chalcopyrite heterojunctions on the basis of CuInSe_2 », Journal of Applied Physics, Vol. 73, 1993, pp. 2902.

- [31] S. M. Lee, S. Ikeda, Y. Otsuka, W. Septina, T. Harada and M. Matsumura, « Homogeneous Electrochemical deposition of in on a Cu-covered Mo Substrate for fabrication of efficient solar cells with a CuInS₂ photo absorber », *Electrochimica Acta*, Vol. 79, 2012, pp.189.
- [32] Y. Yan, K. M. Jones, J. Abushama, M. Young, S. Asher, M.M. Al-Jassim and R. Noufi, « Microstructure of surface layers in Cu(In,Ga)Se₂ thin films », *Applied Physics Letters*, Vol. 81, 2002, pp.1008.
- [33] M. Gloeckler, A. L. Fahrenbruch, et J. R. Sites, in *Proc. 3rd World Conf. Photovoltaic Energy Conversion*, vol. 1, (2003) pp. 491–494.
- [34] R. Noufi and K. Zweibel, “High efficiency CdTe and CIGS thin-film solar cells: highlights and challenges” in *Conf. Record of the IEEE 4th World Conf., Photovoltaic Energy Conversion*, Waikoloa, HI, 2006, pp. 317-320.
- [35] Solar World, Solar Energy 101, Making Solar Panels [online]. Available <http://www.solarworld-usa.com/solar-101/making-solar-panels>
- [36] H. Sankaranarayanan, “Fabrication of CIGS absorber layers using a two-step process for thin film solar cell applications,” Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Univ. South Florida, Tampa, FL, 2004.
- [37] Optics.Org. (2010 Nov. 01). Taiwan investors push Solarion to mass production [online]. Available <http://optics.org/news/1/6/2>
- [38] J. V. Coba, “Application of Copper Indium Gallium Diselenide photovoltaic cells to extend the endurance and capabilities of the Raven RQ-11b unmanned aerial vehicle,” M.S. thesis, Dept. Elec. Eng., NPS, Monterey, CA, 2010.
- [39] Kalache salim Mémoire fin d’Étude « étude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS »