

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Université SAAD DAHLAB, Blida-1**  
**Faculté de technologie**  
**Département des Energies renouvelables**

**Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme**  
**Master en Énergies renouvelables**  
Option : Conversion photovoltaïque

**Présenté par :**  
**OUAAD Chanez Amira**

# **Étude et simulation d'une cellule solaire double jonction à base de couches minces CGS/CIGS**

**Proposé par :**  
**Pr. NACER Said**

**Année universitaire : 2019/2020**

## Résumé :

Le sujet de ce mémoire porte sur l'étude et l'optimisation d'une cellule solaire double jonctions CGS/CIGS. 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 ( $J_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $P_{max}$ ,  $\eta$ , FF). Ensuite, on a procédé à l'optimisation où on a fixé l'épaisseur de la couche CIGS à sa valeur optimale de  $3.5\mu m$ , quant à celle de la couche CGS, elle était variable entre  $0.1$  et  $1\mu m$ . L'épaisseur optimale correspondante à un rendement maximale de  $24.88\%$  est de  $0.58\mu m$ , cette condition assure l'égalité des courant de court-circuit des cellules supérieure et inférieure, sachant que  $J_{cc}=23.20$  ( $mA/cm^2$ ). L'outil de modélisation et de simulation est le logiciel COMSOL Multiphysics.

**Mots clés:** modélisation, cellule solaire, CIGS, CGS, rendement électrique de conversion, couches minces, COMSOL Multiphysics

## Abstract :

The subject of this thesis is the study and optimization of a CGS/CIGS dual-junction solar cell. The study was done by varying the thicknesses of the absorbent layers of the two cells (upper and lower) while observing the variation of their characteristic parameters ( $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $P_{max}$ ,  $\eta$ , FF). Then, the optimization was carried out where the thickness of the CIGS layer was set at its optimal value of  $3.5\mu m$ , while that of the CGS layer was varied between  $0.1$  and  $1\mu m$ . The optimal thickness corresponding to a maximum efficiency of  $24.88\%$  is  $0.58\mu m$ , this condition ensures the equality of the short-circuit currents of the upper and lower cells, knowing that  $J_{sc}=23.20$  ( $mA/cm^2$ ). The modeling and simulation tool is the COMSOL Multiphysics software.

**Key words:** Modeling, solar cell, CIGS, CGS, electrical conversion efficiency, thinfilms, COMSOL multiphysics.

## ملخص :

موضوع هذه الأطروحة يتناول دراسة و تحسين الخلية الشمسية المزدوجة التوصيل CIGS\CGS. تمت الدراسة بتغيير سمك الطبقات الماصة للخلية العلوية و السفلية مع ملاحظة تغيرات الخصائص المميزة ( $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $P_{max}$ ,  $\eta$ , FF). تطرقنا بعدها إلى تحسين أداء الخلية، و ذلك بتثبيت سمك الطبقة CIGS ب  $3.5\mu m$ ، أما بالنسبة للطبقة CGS فتم تغييرها من  $0.1$  إلى  $1\mu m$ . يبلغ سمك الطبقة المثالي  $0.58\mu m$  الذي يسمح لنا بالحصول على الكفاءة المثلى و التي تقدر ب  $24,88\%$ ، هذه القيمة تحقق شرط تساوي كثافة التيار للدارة القصيرة في الخليتين ، مع العلم ان  $J_{sc}=23.20(mA/cm^2)$

أما بالنسبة لأداة المحاكاة و النمذجة المستعملة فهي برنامج COMSOL Multiphysics

**كلمات مفتاحية:** الخلية الشمسية، المحاكاة، كفاءة التحويل الكهربائي، CIGS، CGS، COMSOL multiphysics

# **Abstract**

This thesis is about the study and modeling the CGS/CIGS dual junction solar cell, then we made an optimization in order to get the highest efficiency as possible.

The document is divided into four chapters:

- ❖ The first chapter is a reminder of the semiconductors physics; we started by defining what is a semiconductor, and the difference between a semiconductor, a conductor and an insulator material. Then we mentioned the types of the semiconductors, the different phenomena that occur (absorption, generation and recombination) and charge transport equations involved in this kind of physics. In the end of the chapter, we have explained the PN junction and its formation.

(See from page 10 to 21)

- ❖ The second chapter is centered on the solar cell and how it works; we have also shown the photovoltaic parameters like open-circuit voltage, short circuit current, maximum output power, fill factor and efficiency. By the end of the second chapter, we talked about the three generations of solar cells which are:

- Mono and poly crystalline silicon: made with wafers with 99.9999% as degree of purity.
- Thin film solar based cells: known for their reduced thickness, these solar cells are ductile and resistant to temperature such as: CIGS, CdTe and CZTS.
- Organic cells and the multi-junctions ones: the organic cell is a new field where the researches are still to improve their efficiency; however, there are two types: molecular organic photovoltaic cells and organic polymer photovoltaic cells. For the multi-junction cells, they were made from different cells in order to absorb as much as possible the solar spectrum, this kind of technology is usually used for space applications because of their costs and their high efficiency (46%).

(See from page 22 to 30)

- ❖ The third chapter is about CIGS based solar cell, we started by a definition of this type of cell, then the crystal structure of this kind of cells, then the band gap (or gap energy), after that we moved to the optical and electrical properties, and at the end of

the chapter we have discussed the advantages and disadvantages of this type of solar cells.

(See from page 30 to 39)

❖ The fourth chapter is a discussion of the results that we have obtained from the simulation with COMSOL Multiphysics software, we started by showing the simulated cell which is a double junction CGS/CIGS solar cell, then the simulation parameters. the study of this solar cell was made as following:

- We started by changing the thickness of the absorbing layer of each cell (top and bottom cell), while observing the variation of the parameters of the two cell.
- We noticed that the optimum thickness of the absorbing layer of the top cell was  $2.5\mu\text{m}$  and for the bottom cell, it was  $3.5\mu\text{m}$ . But the current which were delivered from the top cell was way bigger than the current from the bottom cell.
- The thickness of the absorbing layer (CIGS) of the bottom cell was fixed in its optimum value, while the thickness of the absorbing layer (CGS) of the top cell was variable from  $0.1$  to  $1\mu\text{m}$ .
- We plotted the two currents delivered as a function of the thickness of the CGS layer in the top cell; the intersection of these two curves represents the thickness that allows having the same delivered current; the value was  $0.58\mu\text{m}$ .
- Then we deduced the values of the photovoltaic parameters, the efficiency is  $24.88\%$  with a power delivery of  $32.35(\text{mW}/\text{cm}^2)$  and a current of  $23.2(\text{mA}/\text{cm}^2)$ .

(See from page 38 to 61)

# Remerciements:

Tout d'abord je tiens à remercier Allah le tout puissant pour m'avoir donné la force et le courage pour achever ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur le professeur NACER Said pour son aide, sa disponibilité, son suivi et pour toutes les informations qu'il m'a prodigué tout au long de la période du travail malgré les obstacles à fin de mener ce travail à bon port.

Je remercie également les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'assister à ma soutenance et d'évaluer ce travail avec attention.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance aux enseignants du département des énergies renouvelables qui ont contribué à ma formation et mon apprentissage tout au long de ces 5 dernières années, et sans qui je ne serais là où j'en suis aujourd'hui.

Et enfin je remercie toutes les personnes qui m'ont soutenu tout au long de cette période à savoir mes parents ma famille et mes amis, mais également Mr Doumaz et Mr.Charane pour leur aide et leurs conseils.

# Dédicaces:

Je dédie ce travail :

À mes chers parents.

À mon frère et ma sœur.

À toutes les personnes qui me sont chères.

## Nomenclature – symboles – acronymes :

$k$  : Constante de Boltzmann. ( $J.K^{-1}$ )

$q$  : Charge élémentaire. (c)

$e$  : Charge de l'électron. (c)

$T$  : Température. (K)

$c$  : Vitesse de la lumière.(m/s)

$J$  : Densité de courant. ( $A/m^2$ )

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

$J_{cc}$  : Courant de court-circuit. (A)

FF : Facteur de forme.

$\eta$  : Rendement de conversion.

$E_g$  : Gap d'énergie. (eV)

$E_c$  : Energie de la bande de conduction. (eV)

$E_v$  : Energie de la bande de valence. (eV)

$h\nu$  : Energie de photon. (eV)

$N_a$  : La concentration de dopant donneurs ionisés dans le matériau P. ( $cm^{-3}$ )

$N_d$  : La concentration de dopant donneurs ionisés dans le matériau N. ( $cm^{-3}$ )

$n_i$  : La concentration intrinsèque des porteurs libres. ( $cm^{-3}$ )

$\alpha$  : Coefficient d'absorption. ( $cm^{-1}$ )

$p$  : Densité des trous. ( $cm^{-3}$ )

$n$  : Densité des électrons. ( $cm^{-3}$ )

$N_c$  : Densité d'états effectifs dans la bande de conduction.( $cm^{-3}$ )

$N_v$  : Densité d'états d'effectifs dans la bande de valence. ( $cm^{-3}$ )

$\epsilon_r$  : La permittivité diélectrique relative.

$X$  : Affinité électronique. (eV)

CIGS : Copper Indium Gallium Selenide.

# Table des matières :

Introduction générale.....	7
Chapitre 01 : Généralités sur les semi-conducteurs. ....	10
I.1    Introduction : .....	11
I.2    Le semi-conducteur : .....	11
I.3    Types de semi-conducteurs : .....	12
I.3.1    Semi-conducteurs intrinsèques :.....	12
I.3.2    Semi-conducteurs extrinsèques :.....	12
I.4    L'énergie de Gap : .....	13
I.5    Niveau de Fermi : .....	14
I.5.1    Le niveau de Fermi pour un semi-conducteur type P :.....	14
I.5.2    Le niveau de Fermi pour un semi-conducteur type N :.....	15
I.6    L'absorption :.....	15
I.7    Génération optique : .....	16
I.8    Recombinaison :.....	16
I.9    Equations de transport dans les semi-conducteurs : .....	17
I.10    La jonction PN :.....	18
I.10.1    Diagramme énergétique : .....	19
I.10.2    Caractéristique électrique d'une jonction PN :.....	20
I.10.3    Types de jonction PN :.....	20
I.11    Conclusion :.....	21
Chapitre 02 les cellules solaires .....	22
II.1    Introduction : .....	23
II.2    Cellule solaire (ou cellule photovoltaïque) :.....	23
II.3    Principe de fonctionnement :.....	24
II.4    Paramètres caractérisant une cellule photovoltaïque :.....	24
II.4.1    Courant (ou densité de courant) de court-circuit $J_{cc}$ :.....	25
II.4.2    Tension de circuit ouvert $V_{co}$ :.....	25
II.4.3    Puissance maximale : .....	25
II.4.4    Facteur de forme $FF$ :.....	25
II.4.5    Rendement de la cellule (ou rendement de conversion) :.....	26
II.5    Les différentes technologies :.....	26

II.5.1	Première génération (silicium cristallin mono et poly) :.....	26
II.5.2	Deuxième génération (cellules à couches minces) :.....	27
II.5.3	Troisième génération (les cellules organiques et les cellules multi-jonctions) :.....	28
II.6	Conclusion :.....	30
Chapitre 03	: la cellule CIGS.....	31
III.1	Introduction :.....	32
III.2	La cellule CIGS :.....	32
III.3	Structure cristalline du CIGS :.....	33
III.4	La bande interdite :.....	34
III.5	Propriétés optiques :.....	35
III.6	Propriétés électriques :.....	37
III.7	Avantages et inconvénients de la cellule solaire à base de CIGS :.....	37
III.8	Conclusion :.....	38
Chapitre 04	: résultats de la simulation et discussion.....	39
IV.1	Introduction :.....	40
IV.2	Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics :.....	40
IV.3	Présentation de la cellule à étudier :.....	41
IV.4	Paramètres de simulation :.....	42
IV.5	Effet de l'épaisseur de la couche absorbante CGS dans la cellule supérieure :.....	43
IV.5.1	Caractéristique courant tension $J(V)$ :.....	43
IV.5.2	Caractéristique puissance tension $P(V)$ :.....	44
IV.5.3	Courant de court-circuit $J_{cc}$ :.....	45
IV.5.4	Tension de circuit ouvert $V_{co}$ :.....	46
IV.5.5	Puissance maximale $P_{max}$ :.....	47
IV.5.6	Le rendement de conversion $\eta(\%)$ :.....	48
IV.5.7	Facteur de forme FF :.....	49
IV.6	Effet de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS dans la cellule inférieure :.....	50
IV.6.1	Caractéristique courant tension $J(V)$ :.....	50
IV.6.2	Caractéristique puissance tension $P(V)$ :.....	51
IV.6.3	Courant de court-circuit $J_{cc}$ :.....	52
IV.6.4	Tension circuit ouvert $V_{co}$ :.....	53
IV.6.5	Puissance maximale $P_{max}$ :.....	54
IV.6.6	Le rendement de conversion $\eta(\%)$ :.....	55
IV.6.7	Le facteur de forme FF :.....	56

IV.7	Optimisation de la cellule solaire tandem CGS/CIGS :.....	57
IV.8	Les caractéristiques de la cellule CGS/CIGS tandem :.....	60
IV.9	Conclusion :.....	61
Conclusion générale.....		62
Références bibliographiques.....		64

# Liste des figures :

Figure 1 Les énergies renouvelables dans le monde.....	8
Figure I.1 Les bandes énergétiques de conduction et de valence dans les matériaux isolants, semi-conducteurs et conducteurs. [2] .....	11
Figure I.2 Semi-conducteur type N [2].....	12
Figure I.3 semi-conducteur de type P. [2] .....	13
Figure I.4 Le gap direct et indirect dans les semi-conducteurs. [2] .....	14
Figure I.5 Diagramme d'énergie d'un semi-conducteur type P. [24].....	14
Figure I.6 Diagramme d'énergie d'un semi-conducteur type N. [24] .....	15
Figure I.7 Schéma de la formation d'une jonction PN. [24] .....	19
Figure I.8 Diagramme énergétique d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique. [24] ..	19
Figure I.9 Caractéristique courant-tension d'une jonction PN à l'obscurité. [24] .....	20
Figure II.1 la cellule solaire [24] .....	23
Figure II.2 Schéma explicatif sur l'effet photovoltaïque. [24] .....	24
Figure II.3 Le tracé des caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque. [24] .....	25
Figure II.4 Évolution temporelle des rendements selon le NREL pour les différentes technologies [25] .....	26
Figure II.5 Deux cellules solaires à base de silicium mono et polycristallin. [24].....	27
Figure II.6 une cellule à base de CIGS. [24] .....	28
Figure II.7 cellules photovoltaïques organiques. [24] .....	29
Figure II.8 Schéma explicatif du principe de fonctionnement d'une cellule multi-jonctions. [24] .....	29
Figure III.1 composition d'une cellule à base de couches minces CIGS. [24] .....	32
Figure III.2 Comparaison des mailles élémentaires des structures cristallines du Si, du.....	34
CdTe et du CIGS. Structure chalcopyrite d'après [13]. .....	34
Figure III.3 Coefficient d'absorption optique $\alpha$ en fonction de l'énergie E des photons .....	36
incidents dans le CIS et le Si. [12] .....	36
Figure III.4 Coefficient d'absorption de $\text{CuInSe}_2$ et $\text{CuIn}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{Se}_2$ en fonction de longueur d'onde [15] .....	37
Figure IV.1 Schéma de la structure de la cellule solaire CGS/CIGS tandem simulée. ....	41
Figure IV.2 La variation des caractéristiques tension-courant en fonction des épaisseurs de la couche CGS dans la cellule supérieure. ....	43
Figure IV.3 La variation des caractéristiques puissance-tension en fonction de l'épaisseur de la couche CGS dans la cellule supérieure. ....	44
Figure IV.4 La variation de la densité de courant court-circuit $J_{cc}$ en fonction de l'épaisseur de la couche CGS dans la cellule supérieure. ....	45
Figure IV.5 La variation de la tension de circuit ouvert $V_{co}$ fonction de l'épaisseur de la couche CGS dans la cellule supérieure. ....	46
Figure IV.6 La variation de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur de la couche CGS dans la cellule supérieure. ....	47
Figure IV.7 La variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche CGS dans la cellule supérieure. ....	48

Figure IV.8 La variation du facteur de forme FF en fonction de la couche CGS dans la cellule supérieure. ....	49
Figure IV.9 La variation des caractéristiques tension courant en fonction des épaisseurs de la couche CIGS dans la cellule inférieure. ....	50
Figure IV.10 La variation des caractéristiques P(V) en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS dans la cellule inférieure. ....	51
Figure IV.11 La variation de la densité de courant court-circuit $J_{cc}$ en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS dans la cellule inférieure. ....	52
Figure IV.12 La variation de la tension de circuit ouvert $V_{co}$ fonction de l'épaisseur de la couche CIGS dans la cellule inférieure. ....	53
Figure IV.13 La variation de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS dans la cellule inférieure. ....	54
Figure IV. La variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS dans la cellule inférieure. ....	55
Figure IV.15 La variation du facteur de forme FF en fonction de la couche CIGS dans la cellule inférieure. ....	56
Figure IV.16 La variation du courant court-circuit $J_{cc}$ dans la cellule supérieure en CGS et la cellule inférieure en CIGS, en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CGS dans la cellule tandem CGS/CIGS. ....	58
Figure IV.17 La variation des caractéristiques J(V) des deux cellules après l'optimisation. ..	59
Figure IV.18 La variation des caractéristiques P(V) des deux cellules après l'optimisation. ..	59

## Liste des tableaux :

Tableau IV-1 Les paramètres utilisés dans la simulation. ....	42
Tableau IV-2 Paramètres photovoltaïques des cellules solaires (supérieure en CGS et inférieure en CIGS). ....	57
Tableau IV-3 les caractéristiques des cellules (supérieure en CGS, inférieure en CGS et la cellule CGS/CIGS tandem).....	60
Tableau IV-4 Résultats obtenus des différentes simulations de la cellule CGS/CIGS tandem	60

# **Introduction générale**

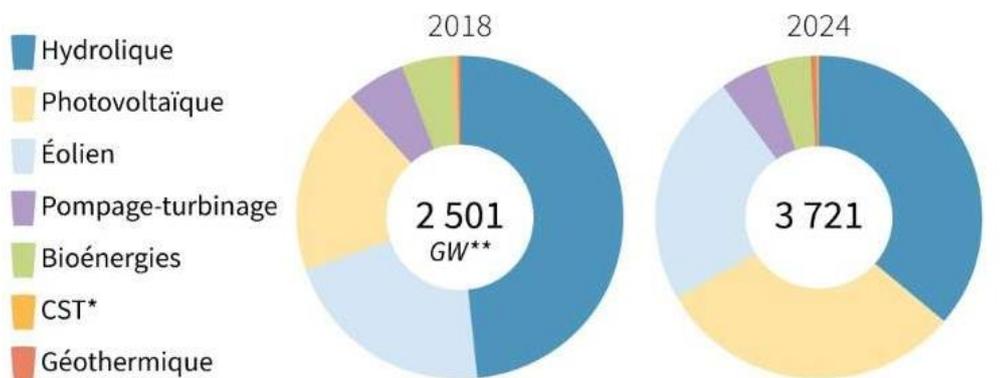
La politique énergétique mondiale s'est orientée vers une production d'énergies vertes, dans les horizons de 2030. En effet, on parle d'un déficit de 25 à 50% d'émission des gaz à effet de serre (GES) par rapport à celles de 2018 et de 0 émissions dans les environs de 2050.

Or pour en arriver à un tel résultat tout en satisfaisant le besoin mondial en énergie (qui est en croissance continue sous l'effet de la croissance économique ainsi que démographique), tout en préservant l'environnement, il est impérativement essentiel de développer la filière des énergies renouvelables, pour des productions à très grande échelle (on parle de 22 000MW de production d'électricité dans les horizons de 2030 pour l'Algérie).

Il est très connu aussi qu'actuellement une grande partie de la production mondiale en énergies renouvelables est basée notamment sur le solaire l'éolien et hydraulique, or, d'ici 2024, presque le tiers de cette production se fera via l'énergie photovoltaïque selon l'AIE (Agence internationale de l'énergie).

## Les énergies renouvelables dans le monde

Prévisions de capacité installée



Source : AIE \*Centrale solaire thermodynamique à concentration \*\*Gigawatts © AFP

Figure 1 : les énergies renouvelables dans le monde [1]

Cependant, le marché du photovoltaïque est reposé en grande partie sur les technologies en silicium cristallin (le taux était de 88% en 2011) [2], on parle également d'une consommation de près de 12 tonnes pour une capacité de 1MW-crête. Un chiffre assez important, lorsqu'on parle d'une ressource qui malgré sa disponibilité, risque de s'épuiser rapidement. De plus, c'est des technologies qui ne résistent pas aux températures élevées (au-dessus de 30°C on constate une diminution du rendement).

A cet effet, la recherche de nouvelles technologies et de nouveaux matériaux était nécessaire pour compenser en première partie, la production excessive du photovoltaïque en silicium, et en seconde partie pour plus de performances, on parle ici notamment du rendement. C'est ainsi que la filière des cellules à base de couches minces est née. Cette technologie est très performante en vue de son pouvoir d'absorption très élevé, qui nécessite moins de matériaux (quelques micromètres voir des nanomètres d'épaisseurs). De plus, ces cellules peuvent être déposées sur des substrats souples, ce qui multiplie le nombre d'applications.

On parle également des cellules solaires couches minces à base de CIGS (cuivre indium gallium sélénium), qui, en premier lieu, sont très souples et très performantes (Le rendement en laboratoire le plus élevé dans la technologie des couches minces est de 23,4% pour CIGS en juin 2020), et en second lieu, ne sont pas toxiques comme le CdTe, qui contient le cadmium, un élément très toxique.

Ce travail est une étude et une simulation d'une cellule solaire double jonction à base de couches minces CGS/CIGS à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics. Le travail a été réparti en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre on fera un rappel sur les notions de la physique des semi-conducteurs afin de mieux comprendre les équations et les phénomènes qui se produisent dans ce matériau.

Le deuxième chapitre aborde la cellule solaire, son fonctionnement, les paramètres caractérisant une cellule solaire ainsi que ses différentes technologies.

Le troisième chapitre sera réservé uniquement à la cellule solaire à base de couches minces CIGS et ses propriétés cristallines optiques et électriques.

Et enfin dans le quatrième chapitre, les résultats obtenus de la simulation seront présentés et discutés.

# **Chapitre 01 :**

# **Généralités sur les**

# **semi-conducteurs.**

## I.1 Introduction :

Le travail est essentiellement basé sur la simulation et l'optimisation de la cellule solaire, mais pour le faire, il faudrait déjà comprendre les différents phénomènes qui se passent. Dans ce chapitre nous allons aborder les généralités sur les semi-conducteurs.

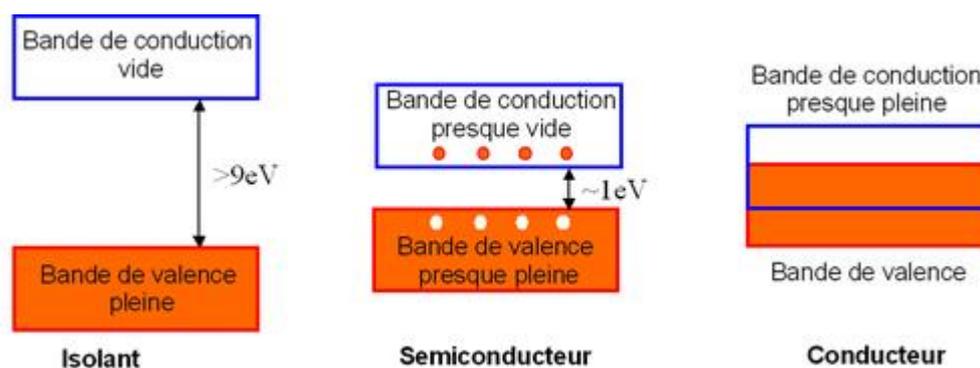
## I.2 Le semi-conducteur :

C'est un matériau électronique intermédiaire entre conducteur et isolant.

Dans les structures cristallines de solides, les électrons ne peuvent se situer que dans des bandes d'énergies bien définies. Si un semi-conducteur absorbe une quantité d'énergie assez suffisante sous forme de chaleur ou radiation, l'énergie reçue sera transférée aux atomes et causera ainsi la libération des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction.

Ainsi, les matériaux solides peuvent être classés en trois groupes que sont les isolants, les semi-conducteurs et les conducteurs. Cette classification se fait essentiellement par la différence d'énergie entre la bande de conduction et la bande de valence, appelée le gap «  $E_g$  » comme le montre la figure (I.1).

Pour les conducteurs, les bandes de valence et de conduction se chevauchent, pour l'isolant, l'espace entre les deux bandes est très élevé, quant au semi-conducteur la différence est assez faible ce qui permet à un électron de se déplacer depuis le niveau de valence vers le niveau de conduction dans le cas où il reçoit une énergie suffisante.



**Figure I.1** Les bandes énergétiques de conduction et de valence dans les matériaux isolants, semi-conducteurs et conducteurs. [2]

### I.3 Types de semi-conducteurs :

On peut distinguer deux types de semi-conducteurs :

#### I.3.1 Semi-conducteurs intrinsèques :

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur complètement pur sans aucune espèce de dopant significative présente. Par conséquent, les semi-conducteurs intrinsèques sont également appelés semi-conducteurs purs ou semi-conducteurs de type i.

Le nombre de porteurs de charge à une certaine température est donc déterminé par les propriétés du matériau lui-même au lieu de la quantité d'impuretés.

Et le nombre d'électrons excités ainsi que le nombre de trous sont égaux:  $n = p$ .

#### I.3.2 Semi-conducteurs extrinsèques :

Un semi-conducteur extrinsèque, ou semi – conducteur dopé, est un semi-conducteur, qui a été intentionnellement dopé dans le but de moduler ses propriétés électriques, optiques et structurales.

De ce fait, nous obtiendrons alors, deux types de semi-conducteurs extrinsèques :

##### a) *Semi-conducteur type N :*

C'est un semi-conducteur intrinsèque auquel on a introduit des impuretés pour augmenter le nombre d'électrons. Comme dans le cas du silicium qui possède 4 électrons dans la couche périphérique et auquel on introduit des impuretés pentavalentes (qui possèdent 5 électrons dans la dernière couche) comme le Phosphore, ce qui nous permet d'avoir un électron libre comme le montre la figure(I.2).

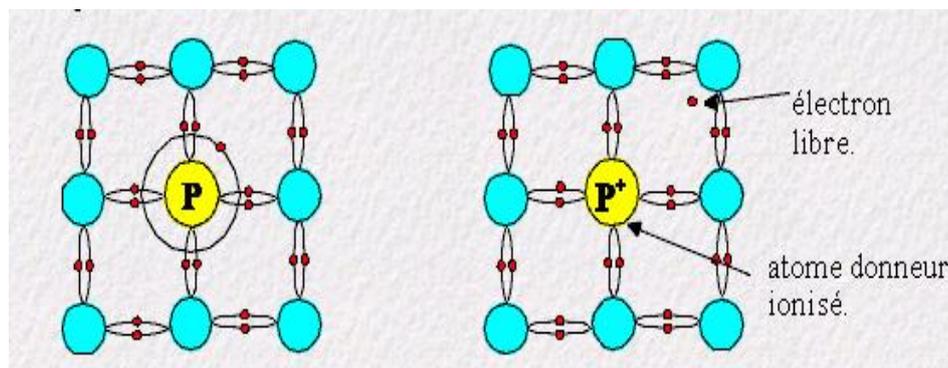


Figure I.2 Semi-conducteur type N [2]

➤ Donc c'est un semi-conducteur fortement concentré en électrons.

### b) *Semi-conducteur type P :*

C'est un semi-conducteur intrinsèque auquel on introduit des impuretés pour augmenter le nombre de trous. Dans le cas du silicium on introduit des impuretés trivalentes (qui possèdent 3 électrons dans la couche extérieure) comme le Bohr, ce qui nous donne un trou libre.

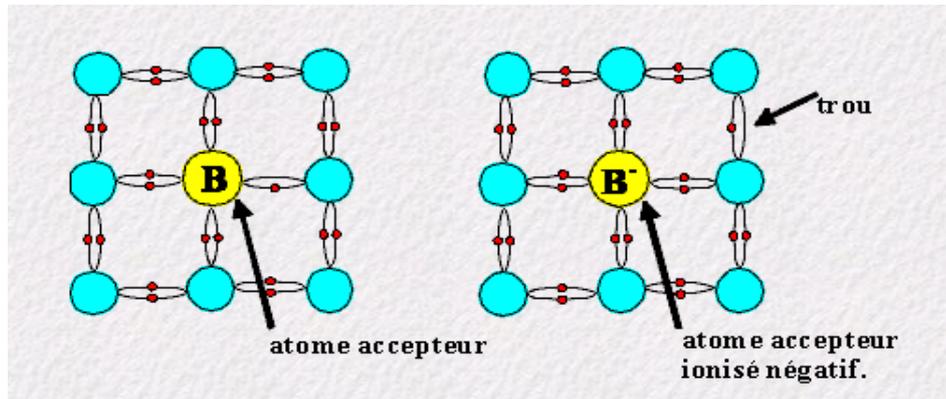


Figure I.3 semi-conducteur de type P. [2]

- Donc c'est un semi-conducteur fortement concentré en trous.

## I.4 L'énergie de Gap :

Comme nous l'avons cité dans le chapitre précédent, l'énergie du 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 :

- 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 Séléniure).
- 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).

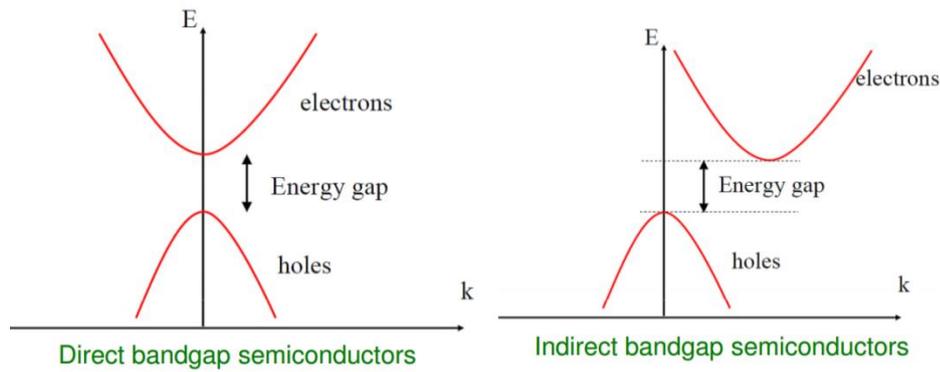


Figure I.4 Le gap direct et indirect dans les semi-conducteurs. [2]

## I.5 Niveau de Fermi :

Le niveau de Fermi est une caractéristique propre à un système qui traduit la répartition des électrons dans ce système en fonction de la température. La notion de niveau de Fermi est utilisée en physique et en électronique, notamment dans le cadre du développement des composants semi-conducteurs.

Concrètement, le niveau de Fermi est une fonction de la température mais il peut être considéré, en première approximation, comme une constante, laquelle équivaldrait alors au niveau de plus haute énergie occupé par les électrons du système à la température de 0 K.

### I.5.1 Le niveau de Fermi pour un semi-conducteur type P :

Plus la densité d'accepteurs est élevée plus le niveau de Fermi se rapproche de la bande de valence. A la limite si  $N_A = N_v$  le niveau de Fermi entre dans la bande de valence, on dit alors que le semi-conducteur est dégénéré.

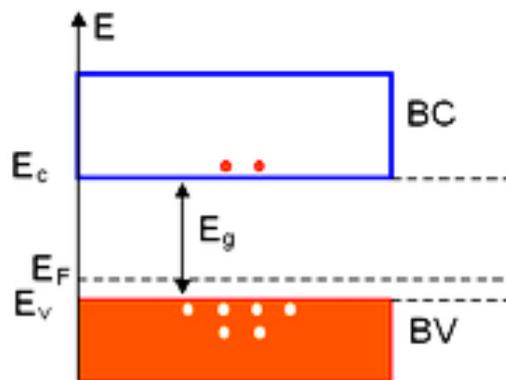


Figure I.5 Diagramme d'énergie d'un semi-conducteur type P. [24]

### I.5.2 Le niveau de Fermi pour un semi-conducteur type N :

Plus la densité de donneurs est élevée plus le niveau de Fermi se rapproche de la bande de conduction. A la limite si  $N_D=N_c$  le niveau de Fermi entre dans la bande de conduction, on dit alors que le semi-conducteur est dégénéré.

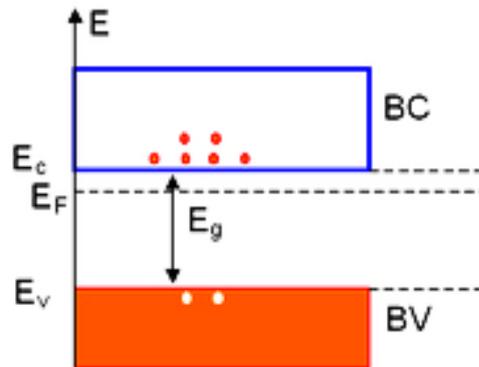


Figure L6 Diagramme d'énergie d'un semi-conducteur type N. [24]

### I.6 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  $\alpha$ . Il définit la quantité de lumière absorbée par le matériau et peut être exprimé par :

$$\alpha = \alpha_0 \sqrt{E - E_g} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

- $\alpha_0$  : constante qui dépend du matériau.
- $E$  : énergie du photon.
- $E_g$  : énergie de gap.

## I.7 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 band to band 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.[3]

L'expression du taux de génération est :

$$G_{opt} = (1 - R) \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha x} \quad (I.2)$$

Avec :

- R : coefficient de réflexion.
- x : la profondeur.
- $\alpha$ : le coefficient d'absorption.

## I.8 Recombinaison :

Le processus de génération de porteurs est équilibré par un processus de disparition appelé "recombinaison". Par définition la recombinaison est le retour de l'électron de l'état excité à l'état initial ou à la bande de conduction vers la bande de valence, car il ne peut rester dans un état excité que pour un temps faible ( $t < 10^{-8}$  s). [4 ]

La recombinaison peut être qualifiée de : [5]

### a) Par rapport au mécanisme de disparition :

- Directe (bande à bande) : l'électron passe directement de la BC à la BV.
- Indirecte : l'électron passe de la BC à un niveau d'énergie d'une impureté agissant comme "centre de recombinaison" et situé dans la bande interdite, puis il sera réémis vers la BV. Cette étape peut aussi être décrite, de façon équivalente, comme la capture par le centre recombinant d'un trou de la BV

### b) Par rapport aux échanges d'énergie :

- Radiative : l'énergie (de recombinaison) est cédée sous forme lumineuse (photon)
- Non radiative : l'énergie est cédée sous forme de phonons (vibrations du réseau) ou à un autre électron libre ("recombinaison Auger").

Comme pour la génération, on caractérise le processus de recombinaison par un "taux de recombinaison"  $R_n$  ( $m^{-3}s^{-1}$ ) pour les électrons et  $R_p$  pour les trous, sachant que :

$$R_{n,p} = \frac{\Delta n,p}{\tau_{n,p}} \quad (I.3)$$

Avec :

- $\Delta n,p$ ,  $\Delta n=(n-n_0)$  ;  $\Delta p=(p-p_0)$  (densité des porteurs générés).
- $n_0, p_0$  la densité des porteurs à l'équilibre.
- $\tau_{n,p}$  la durée de vie des porteurs.

## I.9 Equations de transport dans les semi-conducteurs :

Le comportement électrique d'une jonction PN est décrit par : [6]

### 1) Equation de Poisson :

$$\frac{dE}{dx} = \frac{-\rho(x)}{\epsilon} \quad (I.4)$$

Avec :

$$E = -\frac{\partial V}{\partial x} \quad (I.5)$$

$$\rho = p - n + N_D - N_A \quad (I.6)$$

- $N_A, N_D$  : concentration des 'A' accepteurs et des 'D' donneurs ionisés.
- $\epsilon$  : permittivité diélectrique du semi-conducteur.

### 2) Equation de continuité :

Pour les électrons :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{e} \frac{\partial J_n}{\partial x} + G_n - R_n \quad (I.7a)$$

Pour les trous :

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

Avec:

- G: le taux de génération.
- R : le taux de recombinaison.

### 3) Les densités de courant des électrons et des trous :

$$J_n = -en\mu_n \frac{dV}{dx} + eD_n \frac{dn}{dx} \quad (\text{I.8a})$$

$$J_p = -ep\mu_p \frac{dV}{dx} - eD_p \frac{dp}{dx} \quad (\text{I.8b})$$

Sachant que :

$$\frac{D_{n,p}}{\mu_{n,p}} = \frac{kT}{e} \quad (\text{I.9})$$

Avec :

- $\mu_n$  et  $\mu_p$  : 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.10 La jonction PN :

Considérons un semi-conducteur à l'état intrinsèque, en le dopant p d'un côté et n de l'autre. En raison des différences importantes des concentrations de porteurs de charges libres, les électrons de n diffusent vers p et occupent des trous vacants des liaisons covalentes de part et d'autres d'une surface de séparation des charges positives et des charges négatives apparaissent, ce qui crée un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous dans la zone P.

Il en résulte une zone chargée (ions positifs et négatifs) dépourvue de porteurs de charges libres appelée zone de charge d'espace (ZCE) ou zone de déplétion.

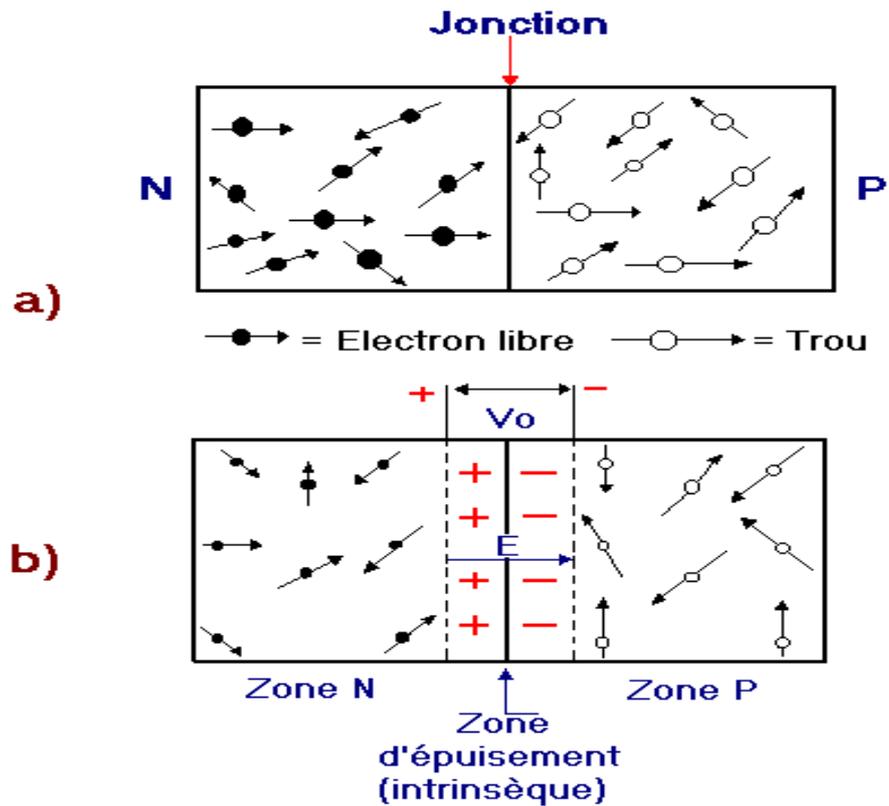


Figure L7 Schéma de la formation d'une jonction PN. [24]

### I.10.1 Diagramme énergétique :

Pour la jonction et à l'équilibre thermodynamique, le niveau de Fermi coté dopé P et coté dopé N est identique (alignement du niveau de Fermi). 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 potentielle électrostatique de  $qV_d$ .

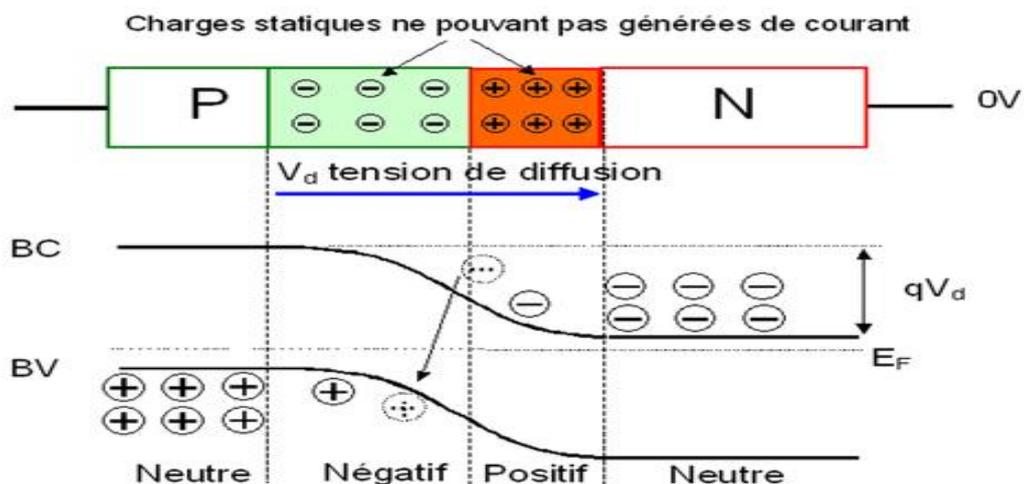


Figure L8 Diagramme énergétique d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique. [24]

### I.10.2 Caractéristique électrique d'une jonction PN :

La variation de la densité du courant en fonction de la tension à l'obscurité s'exprime selon la loi suivante :

$$J = J_s(e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (\text{I.10})$$

$J_s$  : est le courant de saturation.

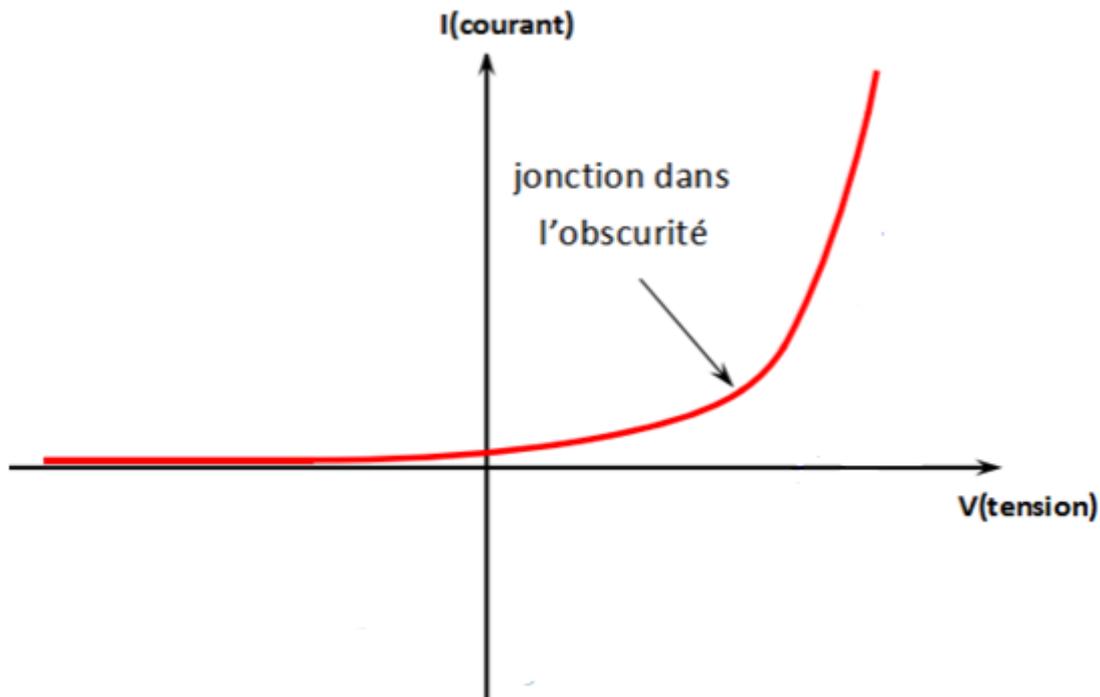


Figure I.9 Caractéristique courant-tension d'une jonction PN à l'obscurité. [24]

### I.10.3 Types de jonction PN :

On distingue deux types de jonction :

- 1) Une homo-jonction : lorsque les régions n et p sont constituées du même matériau, comme silicium.
- 2) Une hétérojonction : lorsque les régions n et p ne sont pas constituées du même matériau comme les cellules à base de CIGS, CZTS... mais également de gap différent. Sa réalisation s'effectue par croissance cristalline d'un matériau sur l'autre et nécessite l'utilisation de semi-conducteur ayant des propriétés cristallines voisines (la taille des atomes doit être assez proche).[3]

On en distingue également deux types d'hétérojonctions :

- ▶ Les hétérojonctions isotypes : quand les deux semi-conducteurs ont le même type dopage ou la même conductivité.
- ▶ Les hétérojonctions anisotypes : quand les deux semi-conducteurs n'ont pas le même type dopage ou n'ont pas la même conductivité.

### **I.11 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons évoqué les notions du semi-conducteur à commencer par la définition, ensuite les types, la génération et la recombinaison et les équations fondamentales de transport, et nous avons terminé ce chapitre en expliquant la formation de la jonction PN, ainsi que ses types.

# **Chapitre 02 :**

# **Les cellules solaires**

## II.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons aborder les cellules photovoltaïques. On va d'abord définir la cellule solaire, ensuite son principe de fonctionnement, puis on va présenter les paramètres caractérisant les performances d'une cellule solaire et à la fin du chapitre nous allons évoquer les différentes technologies.

## II.2 Cellule solaire (ou cellule photovoltaïque) :

Elle est essentiellement composée d'un matériau semi-conducteur de type n et de type p. Elle sert à transformer l'énergie lumineuse incidente en énergie électrique grâce à la création et aux déplacements des charges négatives et positives dans le matériau (électrons et trous). Le courant produit par la cellule est un courant continu.

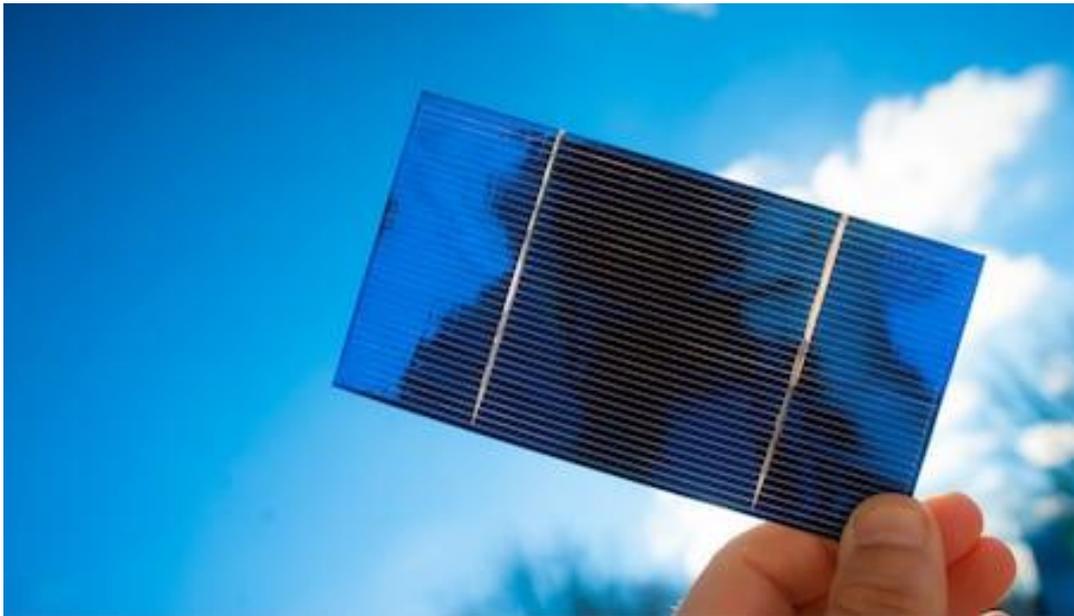


Figure II.1 la cellule solaire [24]

### II.3 Principe de fonctionnement :

La cellule solaire génère le courant électrique grâce au phénomène appelé l'effet photovoltaïque, ce dernier est dû à la transformation de l'énergie lumineuse en une énergie électrique via le biais d'un semi-conducteur.

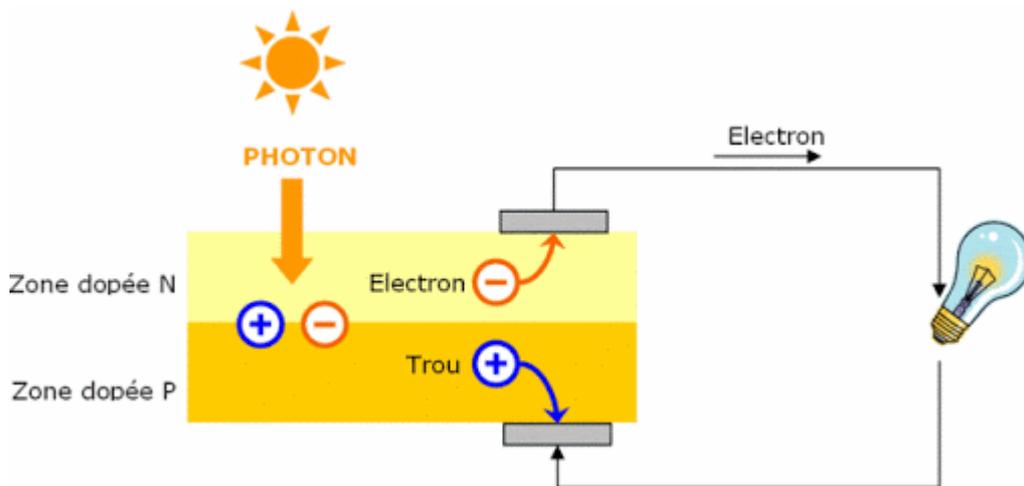


Figure II.2 Schéma explicatif sur l'effet photovoltaïque. [24]

Lorsque la surface d'une cellule solaire est heurtée par un photon qui a suffisamment d'énergie  $E$  qui doit être supérieure ou égale à  $E_g$  (énergie de gap), il y'aura une création de porteurs de charges dans les zones n, p et la ZCE (zone charge d'espace).

Le comportement des photos-porteur dépendra de la région : [3]

- Au niveau de la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace seront renvoyés par un champ électrique soit dans la zone p pour les trous ou la zone n pour les électrons. Leur accumulation permettra de créer un photo-courant de diffusion.
- Au niveau de la zone charge d'espace, les paires électrons /trous résultantes des photons incidents seront séparées par le champ électrique, d'où les électrons vont se diriger vers la région n et les trous vers la région p. ceci permettra de créer un courant de génération.

### II.4 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  $\eta$  et le facteur de forme FF.

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.3.

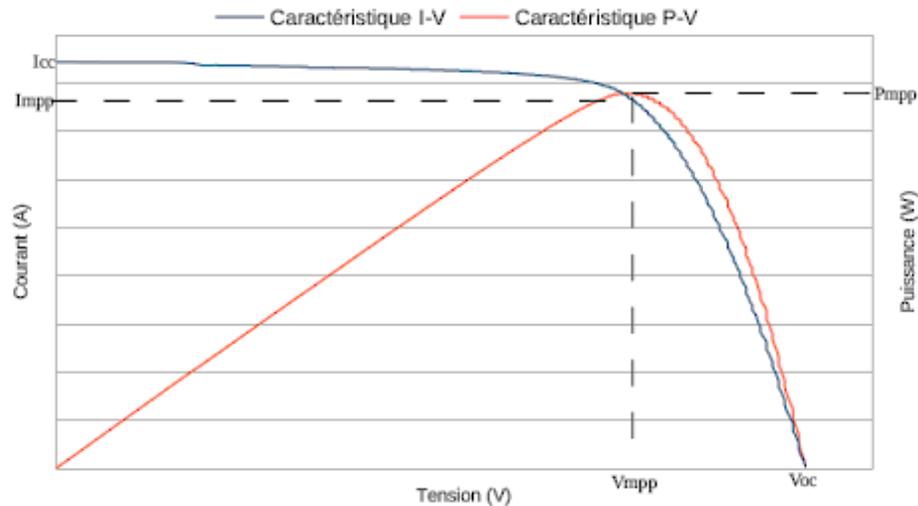


Figure II.3 Le tracé des caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque. [24]

#### II.4.1 Courant (ou 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.4.2 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.4.3 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.

$$P_{max}=I_{max}.V_{max} \quad (II.1)$$

#### II.4.4 Facteur de forme FF :

C'est un facteur de qualité de la cellule solaire, également utilisé pour avoir une idée sur le vieillissement de la cellule, dans le cas d'une cellule parfaite le facteur de forme sera égal à 1 et la courbe caractéristique I(V) aura la forme d'un rectangle.

Sa valeur est déterminée à partir du rapport de la puissance maximale  $P_{max}$  sur le produit du courant court-circuit  $I_{cc}$  et la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  :

$$FF=\frac{P_{max}}{V_{co}.I_{cc}} \quad (II.2)$$

## II.4.5 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  $P_{incidente}$ .

Sachant que :

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} = FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc} \quad (II.3)$$

On obtiendra alors :

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

## II.5 Les différentes technologies :

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs élaborés avec plusieurs technologies dont la plus part sont en phase de recherche et développement pour obtenir les meilleurs rendements possibles.

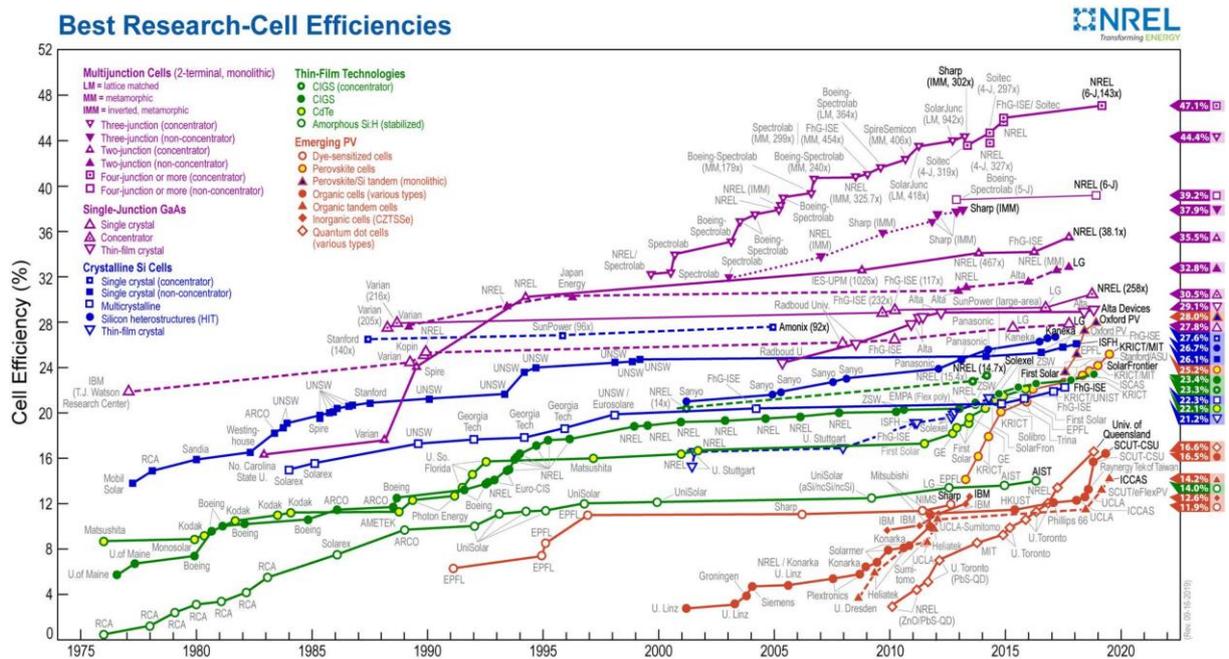


Figure II.4 Évolution temporelle des rendements selon le NREL pour les différentes technologies [25]

### II.5.1 Première génération (silicium cristallin mono et poly) :

C'est des cellules qui reposent surtout sur les wafers de silicium cristallin d'une pureté de 99.99999% en silicium. Ces cellules se subdivisent en 2 catégories : mono et poly cristallin selon le type de structure et le procédé de purification et de solidification différent (processus

Czochralski (Cz) et processus Siemens) et se distinguent aussi par rapport à leur plan de coupe qui est différent. [3]

Les rendements sont assez satisfaisants, 26.7% pour le silicium monocristallin et 22.3% pour le silicium polycristallin ont été obtenus en laboratoire en juin 2020[7]. De plus, les technologies en silicium dominent le marché du photovoltaïque grâce à la disponibilité de la matière première et par leurs prix attractifs, cependant l'inconvénient de ces cellules est qu'elles ne résistent pas aux températures au-dessus de 30°C, par conséquent, le rendement diminue.

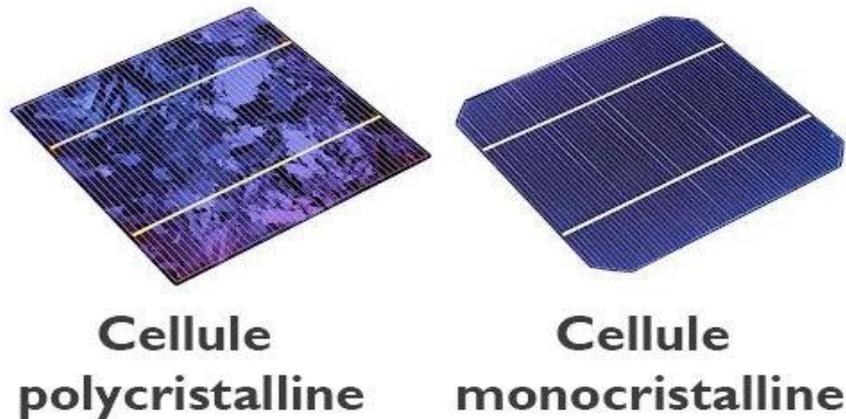


Figure II.5 Deux cellules solaires à base de silicium mono et polycristallin. [24]

### II.5.2 Deuxième génération (cellules à couches minces) :

Ces cellules sont réputées car les épaisseurs ont été réduites, ce qui explique la facilité des constructeurs à créer des panneaux photovoltaïques très souples, légers et faciles à installer. C'est pour cela que l'on appelle ces cellules des cellules à couches minces, car leur zone d'absorbance est de l'ordre de quelques micromètres voir des nanomètres.[8]

Ainsi grâce à ce changement de matériau, les cellules de deuxième génération sont plus pratiques, mais elles fonctionnent toujours sur le même principe que les cellules cristallines. On peut donc dénombrer plusieurs matériaux différents dans cette nouvelle génération tels que le silicium amorphe (substance minérale non cristallisée, c'est à dire ne possédant pas de structure atomique ordonnée), CdTe, CZTS, CIGS... etc.

À leur début, ces technologies ont été destinées aux applications spatiales, vu leurs prix et rendements élevés, mais avec l'augmentation des volumes de production, leurs prix sont devenus de moins en moins chères, voir compétitifs avec les technologies en silicium.

Les technologies comme le CIGS et CZTS sont presque dépourvues de matériaux toxiques (de très infimes quantités) contrairement aux CdTe qui contiennent le Cadmium en quantité assez importante, mais ce dernier est très connu pour sa résistance face à l'augmentation de la température.

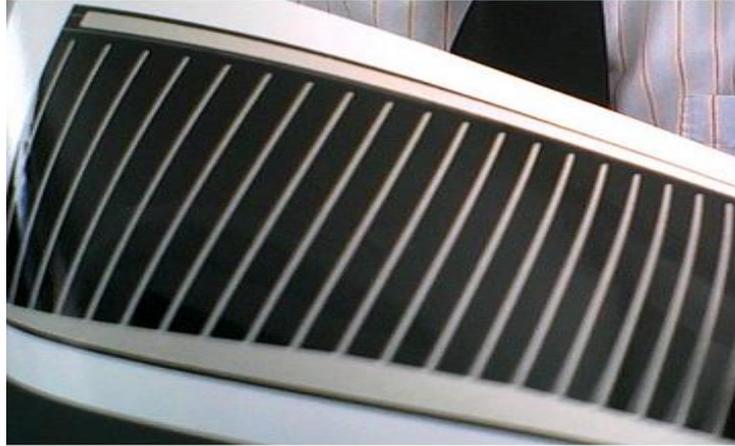


Figure II.6 une cellule à base de CIGS. [24]

### II.5.3 Troisième génération (les cellules organiques et les cellules multi-jonctions) :

#### II.5.3.1 Cellules organiques :

Les cellules organiques ou photo-électro-chimiques sont des cellules photovoltaïques dont la couche active est constituée de molécules organiques, on en distingue deux types :

- Cellules photovoltaïques organiques moléculaires.
- Cellules photovoltaïques organiques en polymère.

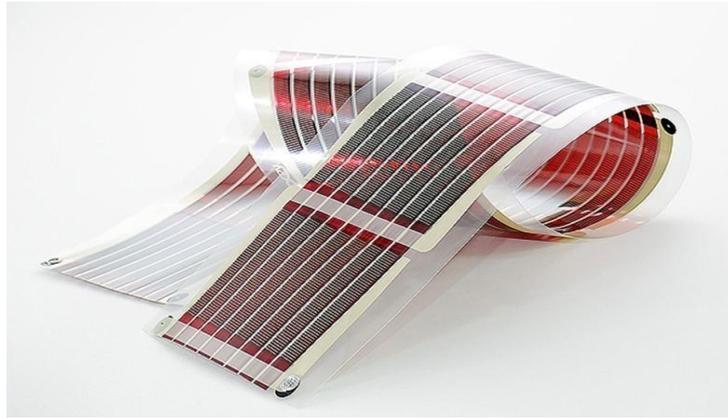


Figure II.7 cellules photovoltaïques organiques. [24]

### II.5.3.2 Cellules multi jonctions :

Les cellules solaires à jonctions multiples (MJ) sont des cellules solaires dotées de plusieurs jonctions p-n constituées de différents matériaux semi-conducteurs. La jonction pn de chaque matériau produira un courant électrique en réponse à différentes longueurs d'onde de la lumière. L'utilisation de plusieurs matériaux semi-conducteurs permet d'absorber une gamme de longueurs d'ondes plus large, améliorant l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire. Les rendements de ce type de technologies ont dépassé les 46% à base de matériaux (III-V) avec concentration [9], or ce type de technologie est destiné aux applications spatiales à cause de leurs prix très élevés.

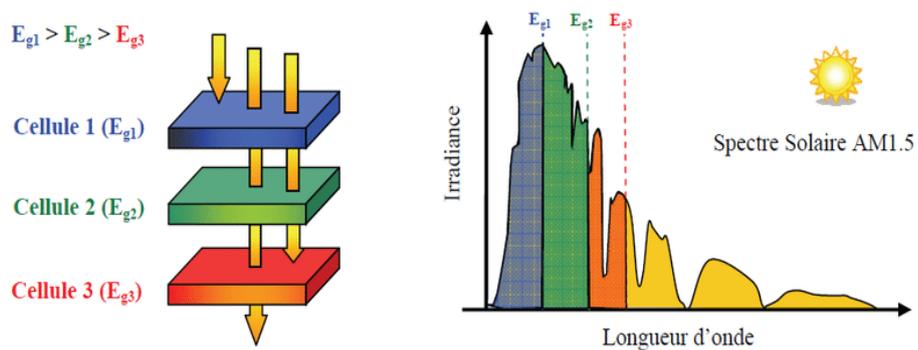


Figure II.8 Schéma explicatif du principe de fonctionnement d'une cellule multi-jonctions. [24]

## **II.6 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons vu c'est quoi une cellule solaire et son principe de fonctionnement, nous avons également abordé ses propriétés caractéristiques qui nous permettent de distinguer et de classer les cellules photovoltaïques par rapport à leurs performances, et à la fin du chapitre nous avons présenté les différentes technologies.

# **Chapitre 03 :**

# **La cellule CIGS**

### III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter les propriétés des cellules solaires à base de couches minces CIGS, à commencer par la définition, ensuite la structure cristalline, puis la bande interdite (ou l'énergie du gap), ensuite les propriétés optiques et électriques et à la fin du chapitre, nous allons évoquer les avantages et les inconvénients de ce type de cellules solaires.

### III.2 La cellule CIGS :

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.

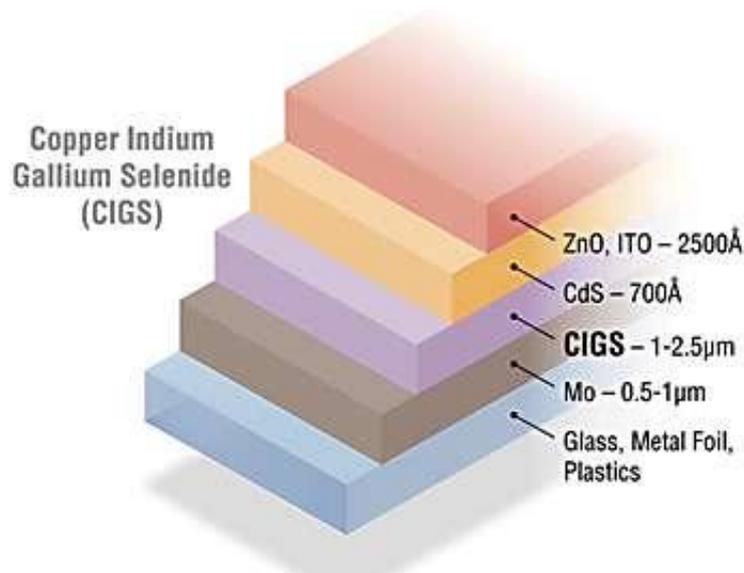


Figure III.1 composition d'une cellule à base de couches minces CIGS. [24]

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  $\mu\text{m}$  à 3.5  $\mu\text{m}$ . 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 [10]. 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, In<sub>2</sub>(S,Se)<sub>3</sub>, 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-circuits dans les zones présentant un recouvrement imparfait du CIGS par la couche tampon [11]. 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. [12]

### **III.3 Structure cristalline du CIGS :**

Le matériau à la base du CIGS est le CIS (CuInSe<sub>2</sub>). C'est un semi-conducteur I-III-VI<sub>2</sub> qui possède une structure cristalline chalcopyrite. Cette structure tétragonale peut être décrite comme un empilement de deux structures zinc-blende dans lesquelles les sites tétraédriques sont occupés par des atomes du groupe III (Se) (anions) et les autres sites sont occupés de manière ordonnée par des atomes des groupes I (Cu) et II (In) (cations). Le ratio des paramètres de maille c/a est légèrement différent de 2 (distorsion tétraédrique), ce qui est dû à des différences d'énergie entre les liaisons Cu-Se et In-Se. [12]

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  $\text{CuInSe}_2$  et de  $\text{CuGaSe}_2$ . La figure ci-dessous (III.2), présente les différences de structure cristalline entre 3 matériaux semi-conducteurs

utilisés dans le photovoltaïque : le Si, le CdTe et le CIGS.[12]

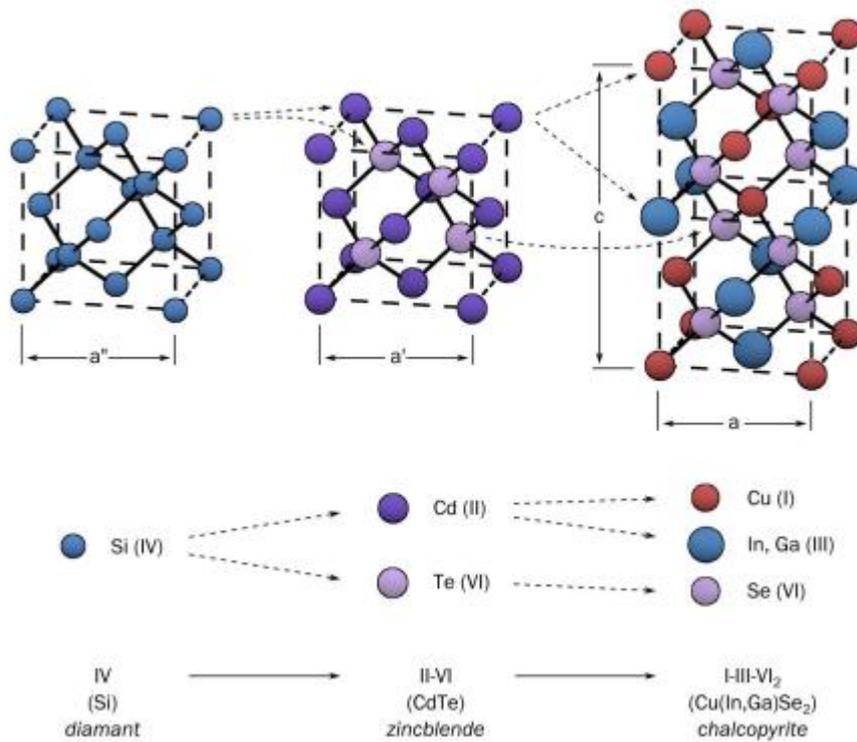


Figure III.2 Comparaison des mailles élémentaires des structures cristallines du Si, du CdTe et du CIGS. Structure chalcopyrite d'après [13].

#### III.4 La bande interdite :

Le ratio  $x = \frac{[\text{Ga}]}{([\text{In}] + [\text{Ga}])}$  détermine le taux d'atomes de Gallium qui remplacent les atomes d'Indium dans la structure. Le CIGS est un semi-conducteur à gap direct et l'addition du gallium dans la structure cristalline permet de faire varier le gap du matériau entre 1.011 eV et 1.68 eV (cette différence est majoritairement liée à une différence de minimum de la bande conduction (EC) [12]), selon la valeur de la fraction molaire  $x$ . [14]

La largeur de la bande interdite du CIGS varie en fonction de  $x$  entre les valeurs du pur CIS ( $x=0$ ) et du pur CGS ( $x=1$ ), selon la loi suivante: [14]

$$E_g = 1.011 + 0.664x - 0.249x(1 - x) \quad (\text{III.1})$$

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. 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. [14]

L'énergie de la bande interdite est liée à la longueur d'onde du photon par [14] :

$$E_g \text{ (eV)} = \frac{1.24}{\lambda(\mu\text{m})} \quad (\text{III.2})$$

Où  $E_g$  est l'énergie de la bande interdite en électrons volts (eV) et  $\lambda$  est la longueur d'onde de la lumière en micromètres ( $\mu\text{m}$ ). 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 [12], ce qui correspond à un taux de Ga proche de 30%.

### III.5 Propriétés optiques :

Si le CIGS est utilisable dans des dispositifs photovoltaïques en couches minces, c'est parce qu'il possède un gap direct. De ce fait, l'absorption des photons ayant une énergie proche du gap ne nécessite pas l'intervention de phonons et il en résulte un coefficient d'absorption optique  $\alpha$  élevé (comparé à un semi-conducteur à gap indirect comme le silicium). Pour une énergie de photon  $h\nu$  donnée, le coefficient d'absorption vaut approximativement [14] :

$$\alpha(h\nu) = \frac{A}{h\nu} \sqrt{h\nu - E_g} \quad (\text{III.3})$$

Cette relation illustre clairement l'influence du gap sur la plage d'énergies dans laquelle le CIGS absorbe. A est une constante de proportionnalité qui dépend des densités d'état liés à l'absorption des photons et l'énergie de l'irradiation.

La figure (III.3) compare le coefficient d'absorption optique du CIS (ce qui correspond au plus petit gap possible pour le CIGS, et donc la plage d'absorption maximale) à celui du Si en fonction de l'énergie des photons incidents. On remarque qu'il existe un écart d'un ordre de

grandeur entre le Si et le CIS, ce qui montre l'intérêt de ce dernier pour une utilisation en couches minces. Ainsi, une couche de CIGS d'une épaisseur de  $1\mu\text{m}$  suffit à absorber 95% du spectre solaire pour les photons dont l'énergie est supérieure à  $E_g$ . [12]

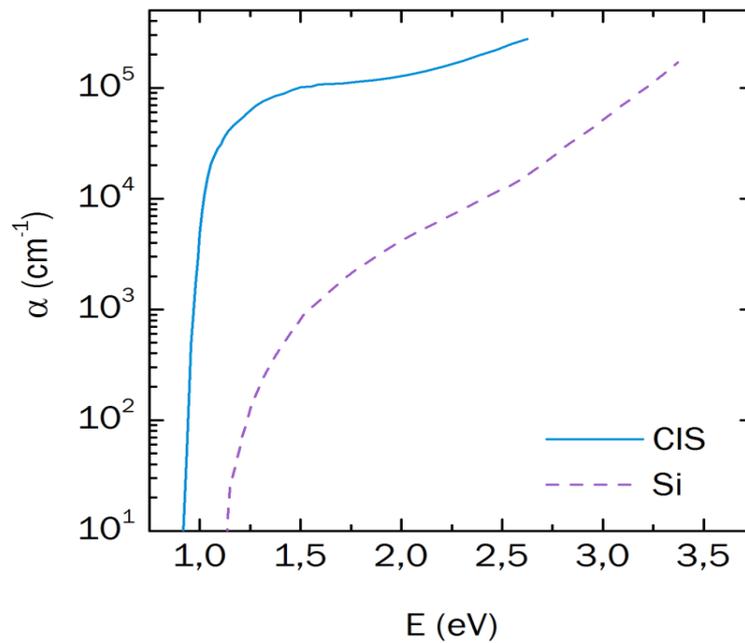


Figure III.3 Coefficient d'absorption optique  $\alpha$  en fonction de l'énergie  $E$  des photons incidents dans le CIS et le Si. [12]

La figure III.4 montre la variation du coefficient d'absorption du  $\text{CuInSe}_2$  et  $\text{CuIn}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{Se}_2$  en fonction de la longueur d'onde, on remarque que le coefficient est élevé et même supérieur à  $10^5$   $\text{cm}^{-1}$  dans le domaine du visible et le proche infrarouge. [15]

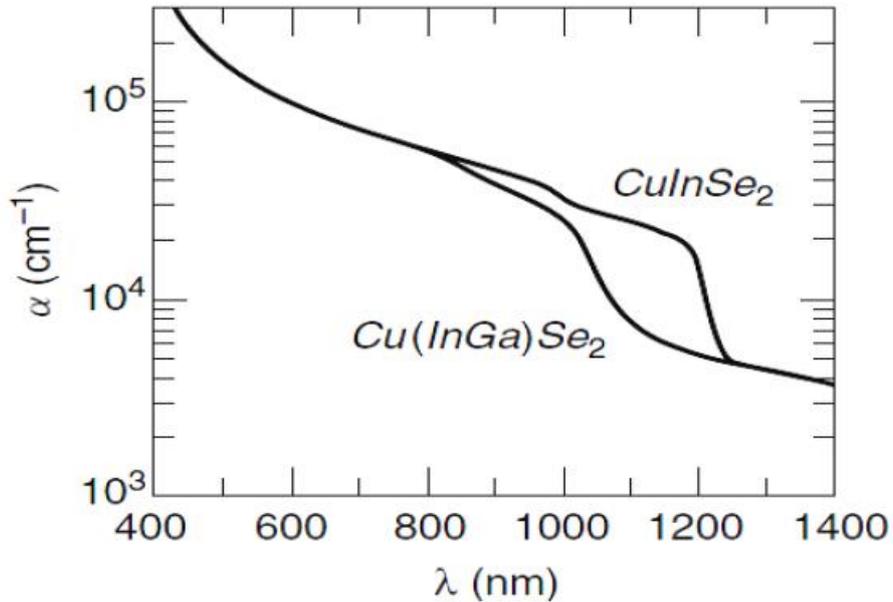


Figure III.4 Coefficient d'absorption de  $\text{CuInSe}_2$  et  $\text{CuIn}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{Se}_2$  en fonction de longueur d'onde [15]

### III.6 Propriétés électriques :

Les propriétés électriques (mobilité, conductivité...etc.) des matériaux semi-conducteurs utilisés dans les cellules solaires sont en relation avec leurs performances photovoltaïques. Le  $\text{CuInGaSe}_2$  est un matériau qui est intrinsèquement dopé, qui signifie que, lorsque le composé est formé, il prend un dopage de type p provenant de défauts cristallins intrinsèques générant des états accepteurs. Les défauts intrinsèques sont dus aux lacunes de cuivre ( $V_{\text{Cu}}$ ) et d'indium ( $\text{Cu}_{\text{In}}$ ) [12]. Quant aux défauts générant des niveaux donneurs ( $\text{In}_{\text{Cu}}$  et  $V_{\text{Se}}$ ), ils ne sont pas abondants dans le CIGS qui est à l'origine de son dopage de type p.[14]

### III.7 Avantages et inconvénients de la cellule solaire à base de CIGS :

#### 1. Les avantages :

- Un rendement élevé.
- Résiste mieux à la température. [14]
- Travaille sous de faibles éclairagements.
- Coefficient d'absorption élevé (qui dépasse  $10^5 \text{ cm}^{-1}$ ).
- 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.

## **2. Inconvénients :**

- Ce type de cellule contient l'indium, un élément dont les réserves ne cessent de diminuer.
- La cellule est relativement chère pour sa contenance en Indium et le Gallium.

## **III.8 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons d'abord introduit la cellule couche mince à base de CIGS, sa composition, sa conception ainsi que sa structure cristalline, puis nous avons défini ses propriétés (électriques et optiques), et à la fin du chapitre nous avons abordé les avantages ainsi que les inconvénients de ce type de cellule.

# **Chapitre 04 :**

# **Résultats de la**

# **simulation et**

# **discussion**

## IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de la simulation numérique par le logiciel COMSOL Multiphysics (version 5.3) de la cellule solaire tandem en CGS/CIGS et l'interprétation des résultats trouvés.

Nous avons d'abord étudié la variation des paramètres caractéristiques (courant de court-circuit  $J_{cc}$ , la tension à circuit ouvert  $V_{co}$ , la puissance maximale  $P_{max}$  ainsi que le rendement  $\eta$  et le facteur de forme FF) en fonction des épaisseurs pour les deux cellules séparément, ensuite, nous avons optimisé la cellule CGS/CIGS tandem 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.

## IV.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.

Le logiciel COMSOL et la société correspondante ont été créés en 1986 par des étudiants de Germund Dahlquist, dans la suite de son cours consacré à la simulation numérique à l'Institut royal de technologie à Stockholm en Suède. La première version de COMSOL Multiphysics est sortie en 1998. La version initiale (avant 2005) de COMSOL Multiphysics s'appelait FEMLAB.[16]

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.

### IV.3 Présentation de la cellule à étudier :

La structure simulée se compose 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, et une cellule inférieure en CIGS avec une petite bande interdite ( $E_g=1.16\text{eV}$ ) dont l'épaisseur sera optimale. Le but 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 (IV.1) ci-dessous montre la structure de la cellule CGS/CIGS tandem simulée, donc la cellule supérieure et la cellule inférieure sont des hétérojonctions n-CdS/p-CGS et n-CdS/p-CIGS respectivement, connectées par la couche de ZnO qui servira d'oxyde conducteur transparent (TCO), précédées par une couche fenêtre également en ZnO.

La cellule tandem est soumise à un éclairage de spectre solaire AM0 d'une densité de puissance de  $1300\text{ W/m}^2$ , on supposera également que les rayons solaires sont normaux à la surface.

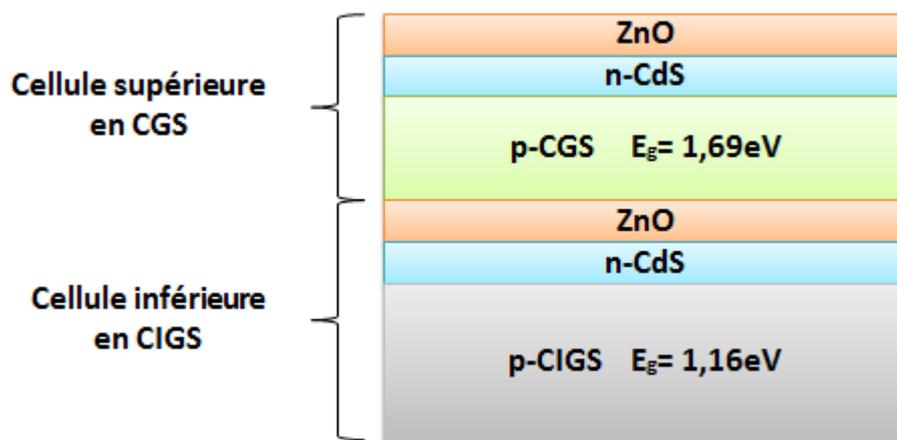


Figure IV.1 Schéma de la structure de la cellule solaire CGS/CIGS tandem simulée.

#### IV.4 Paramètres de simulation :

Les paramètres des différentes couches utilisées dans la simulation de la cellule CGS/CIGS tandem sont regroupés dans le tableau (IV-1) :

	<b>n-ZnO</b>	<b>n-CdS</b>	<b>p-CGS</b>	<b>p-CIGS</b>
<b><math>E_g</math> (eV)</b>	<b>3.3</b>	<b>2.4</b>	<b>1.65</b>	<b>1.16</b>
<b>X (eV)</b>	<b>4.45</b>	<b>4.45</b>	<b>4.45</b>	<b>4.8</b>
<b><math>\epsilon_r</math></b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>13.6</b>	<b>13.6</b>
<b><math>N_c</math> (cm<sup>-3</sup>)</b>	<b><math>2.2 \times 10^{18}</math></b>	<b><math>2.2 \times 10^{18}</math></b>	<b><math>2.2 \times 10^{18}</math></b>	<b><math>2.2 \times 10^{18}</math></b>
<b><math>N_v</math> (cm<sup>-3</sup>)</b>	<b><math>1.8 \times 10^{19}</math></b>	<b><math>1.8 \times 10^{19}</math></b>	<b><math>1.8 \times 10^{19}</math></b>	<b><math>1.8 \times 10^{19}</math></b>
<b><math>\mu_n</math> (cm<sup>2</sup>/V.s)</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<b><math>\mu_p</math> (cm<sup>2</sup>/V.s)</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>

Tableau IV-1 Les paramètres utilisés dans la simulation.

## IV.5 Effet de l'épaisseur de la couche absorbante CGS dans la cellule supérieure :

### IV.5.1 Caractéristique courant tension J(V) :

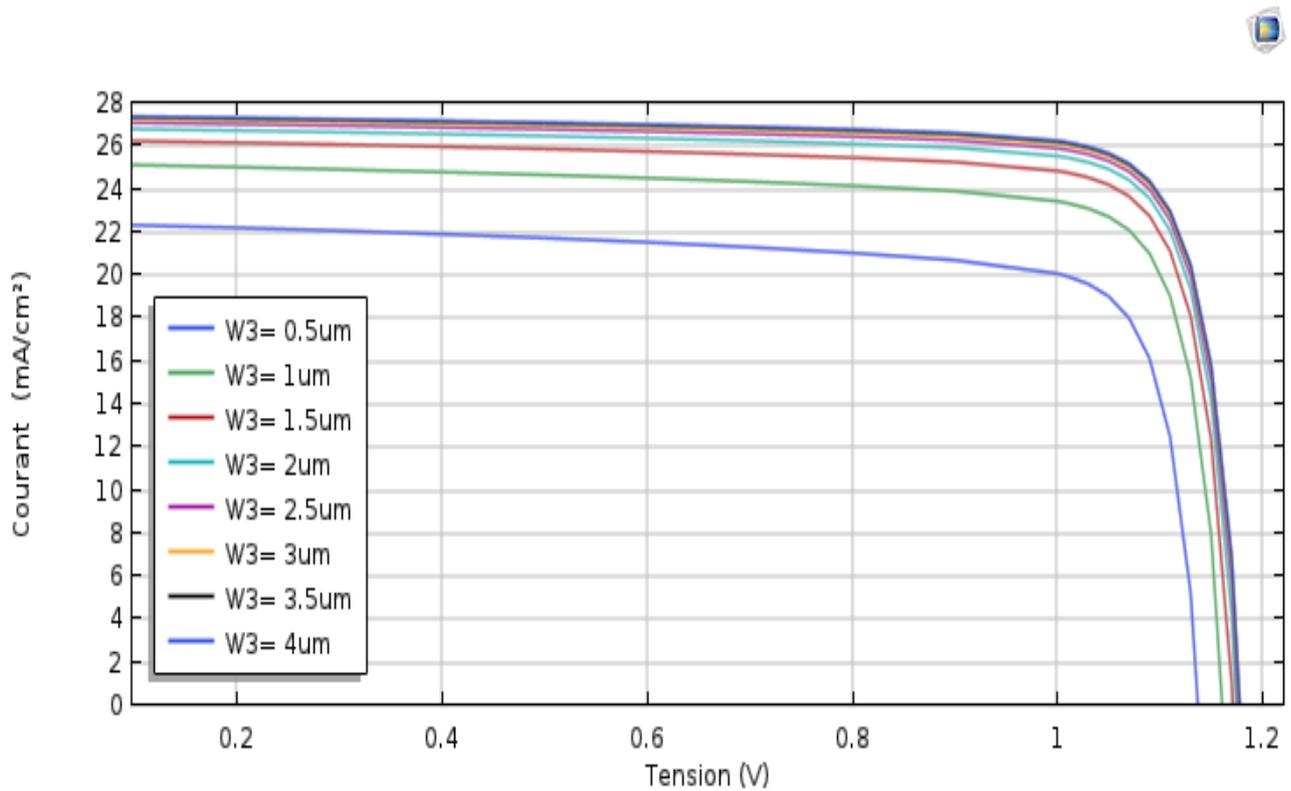


Figure IV.2 La variation des caractéristiques tension-courant en fonction des épaisseurs de la couche CGS dans la cellule supérieure.

La figure (IV.2) représente les caractéristiques J(V) pour différentes épaisseurs de la couche CGS dans la cellule supérieure. On voit que le courant augmente avec l'augmentation de l'épaisseur jusqu'à une valeur égale à 2.5µm, la variation devient de plus en plus faible.

Quant à la tension de circuit ouvert, elle varie faiblement.

Remarque : W3 représente la largeur de la couche CGS en (µm).

#### IV.5.2 Caractéristique puissance tension P(V) :

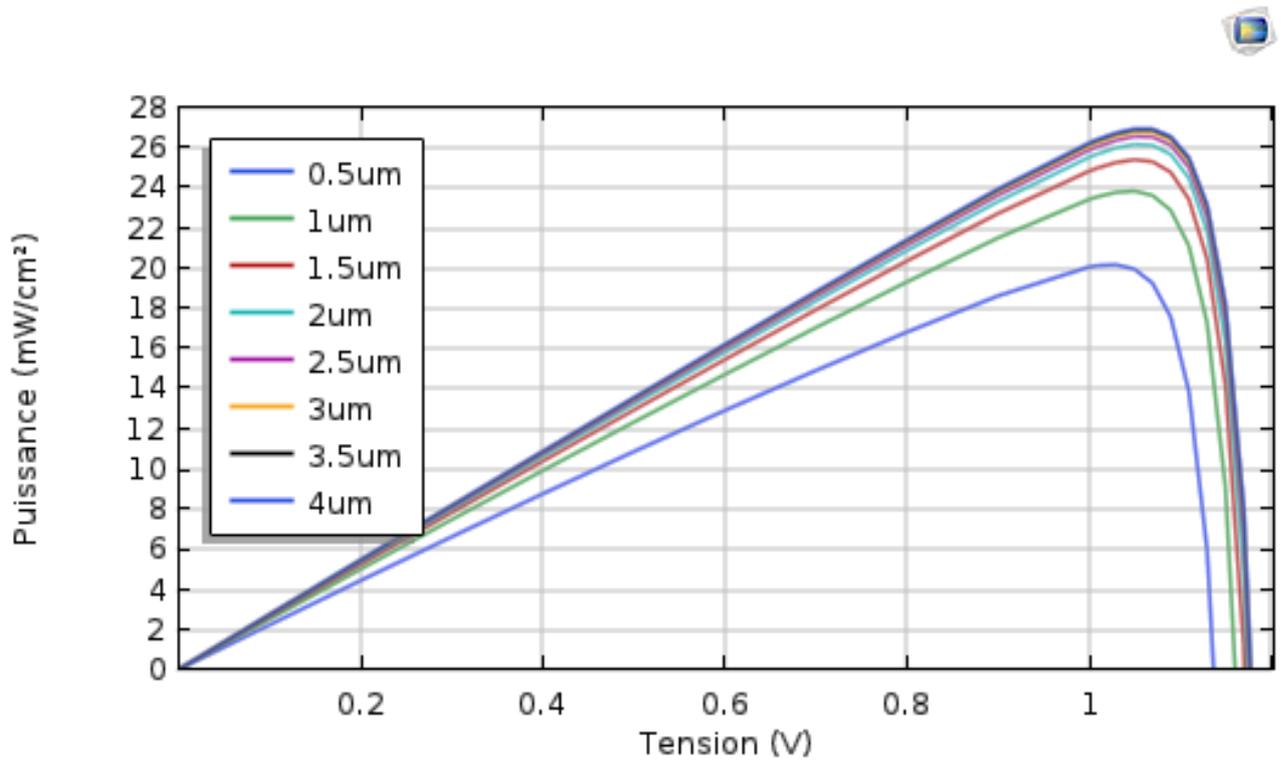


Figure IV.3 La variation des caractéristiques puissance-tension en fonction de l'épaisseur de la couche CGS dans la cellule supérieure.

La figure (IV.3) présente les caractéristiques P(V) en fonction des épaisseurs de la couche absorbante CGS dans la cellule supérieure. On remarque que la puissance augmente avec l'augmentation de l'épaisseur, la variation devient très faible à partir de 2.5  $\mu\text{m}$ .

Quant à la tension de circuit ouvert elle varie très faiblement.

### IV.5.3 Courant de court-circuit $J_{cc}$ :

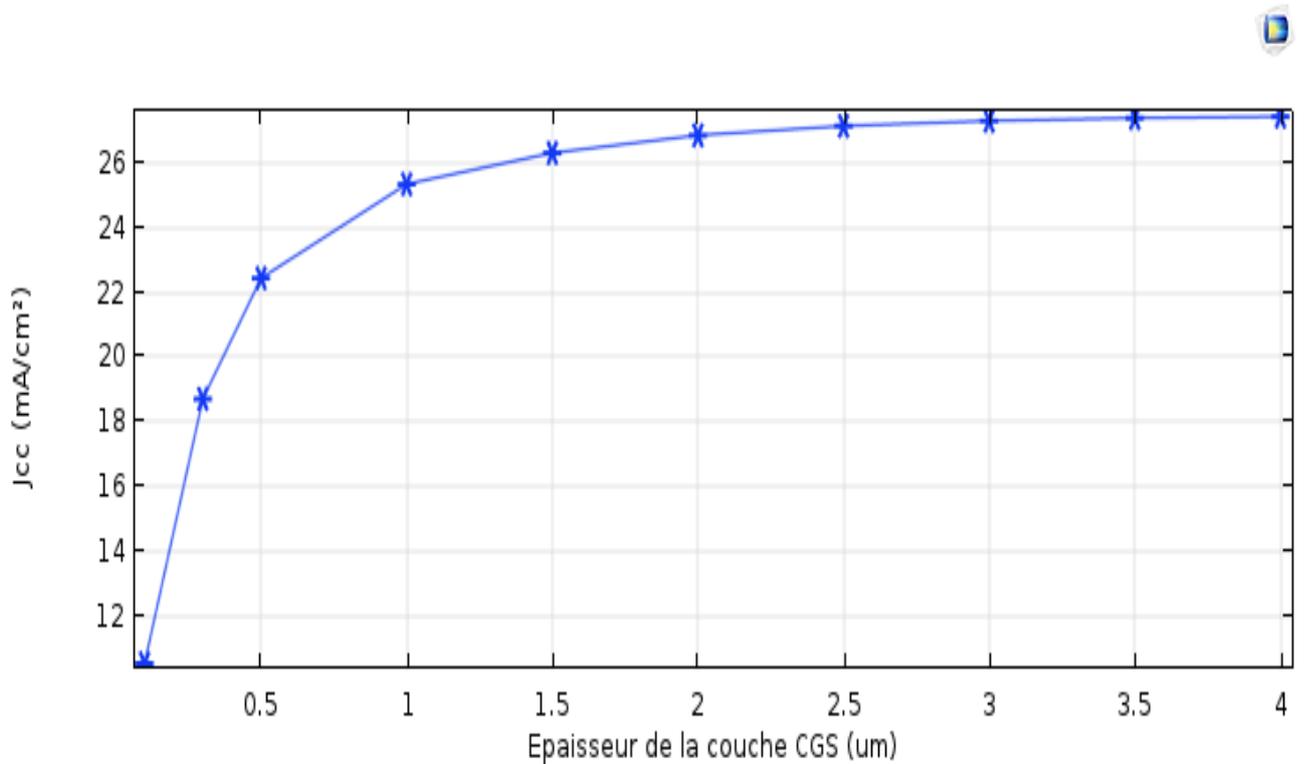


Figure IV.4 La variation de la densité de courant court-circuit  $J_{cc}$  en fonction de l'épaisseur de la couche CGS dans la cellule supérieure.

La variation de la densité de courant court-circuit  $J_{cc}$  en fonction de l'épaisseur de la couche CGS dans la cellule supérieure est illustrée dans la figure (IV.4). On remarque que le courant de court-circuit  $J_{cc}$  augmente très rapidement entre 0 et 1.5 μm. On remarque également qu'à partir de l'épaisseur de 2.5 μm, la variation du courant de court-circuit  $J_{cc}$  est extrêmement faible.

#### IV.5.4 Tension de circuit ouvert $V_{co}$ :

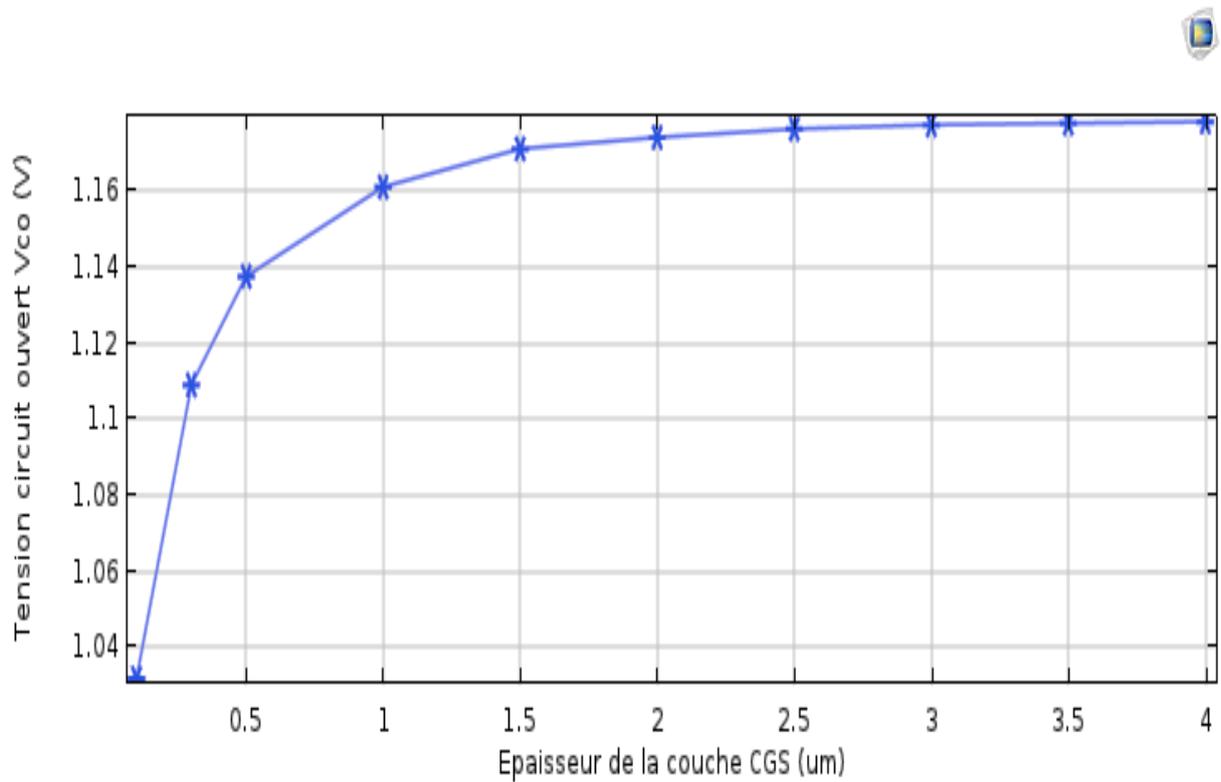


Figure IV.5 La variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  fonction de l'épaisseur de la couche CGS dans la cellule supérieure.

L'influence de la couche absorbante CGS sur la tension de circuit ouvert dans la cellule supérieure est représentée dans la figure (IV.5). On remarque que l'épaisseur de la couche absorbante a une très faible influence sur la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ .

#### IV.5.5 Puissance maximale $P_{\max}$ :

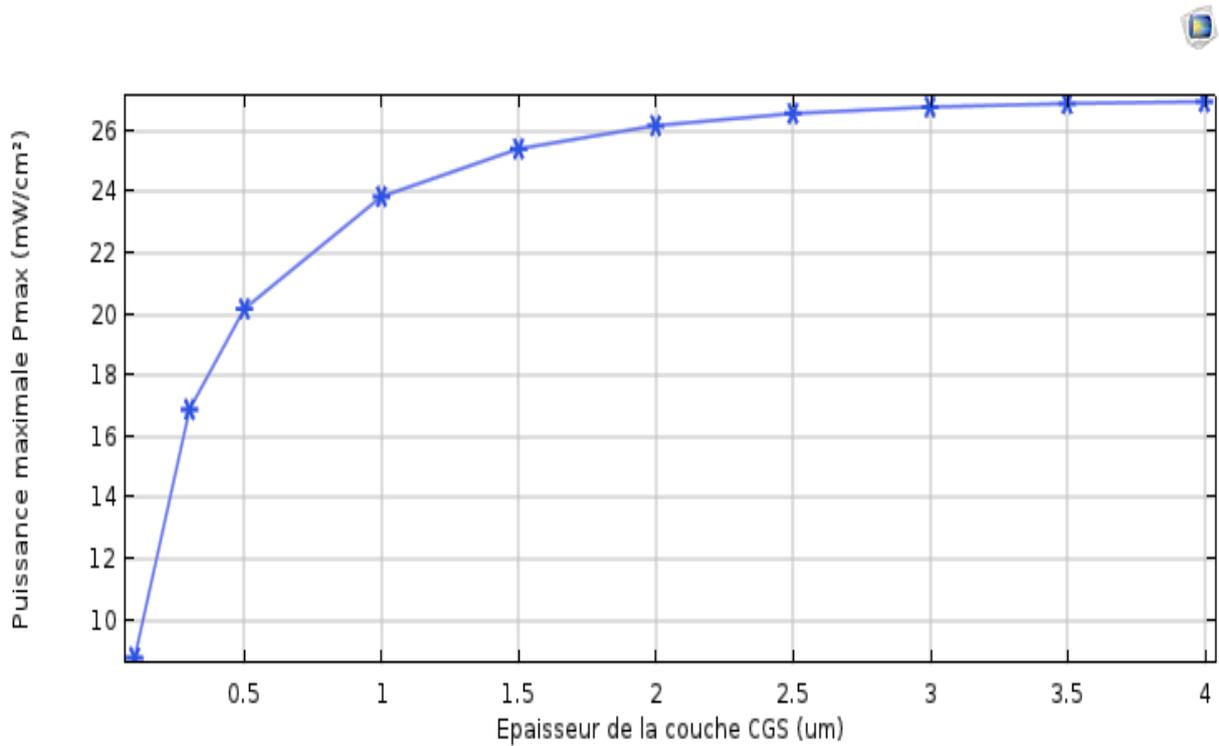


Figure IV.6 La variation de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur de la couche CGS dans la cellule supérieure.

Dans la figure (IV.6), on observe que la puissance maximale augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante CGS et cela est dû à l'augmentation du courant et de la tension. La puissance commence à se stabiliser à partir d'une épaisseur de  $2.5\mu\text{m}$ .

#### IV.5.6 Le rendement de conversion $\eta$ (%) :

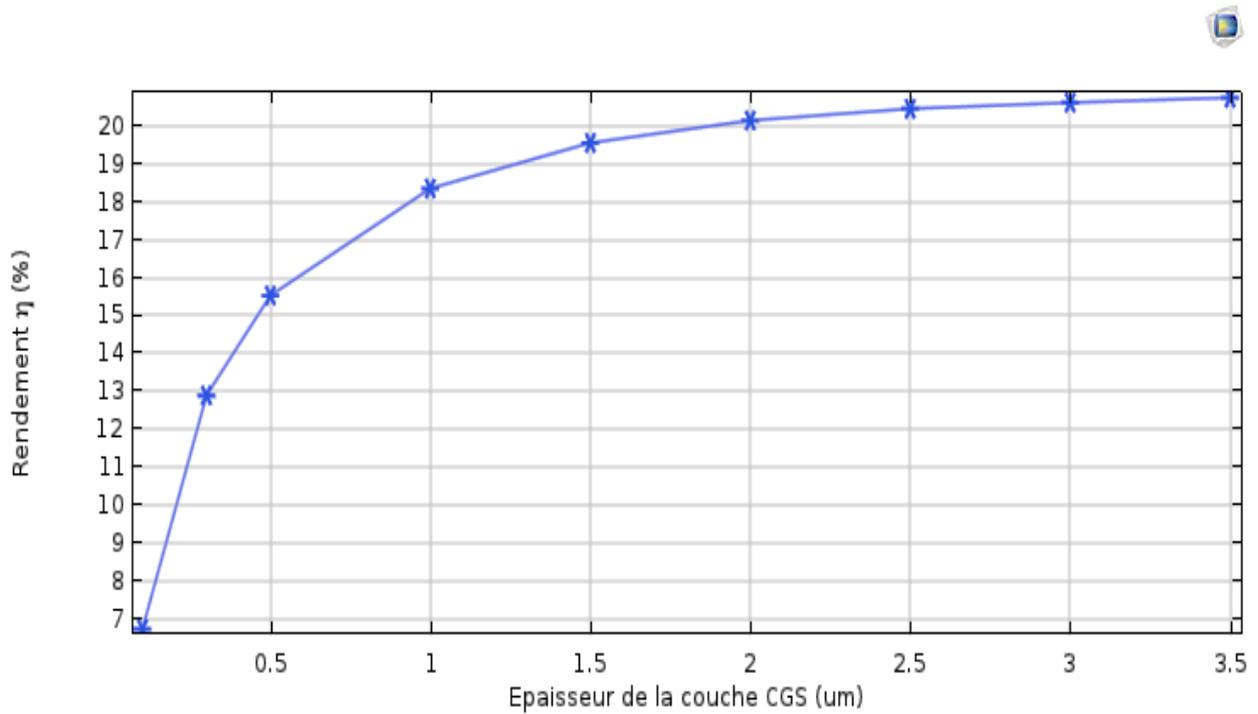


Figure IV.7 La variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche CGS dans la cellule supérieure.

La variation du rendement en fonction des épaisseurs de la couche absorbante CGS dans la cellule supérieure est représentée dans la figure (IV.7). On constate une augmentation du rendement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche, puis à partir d'une épaisseur égale à  $2.5\mu\text{m}$  la variation devient faible.

#### IV.5.7 Facteur de forme FF :

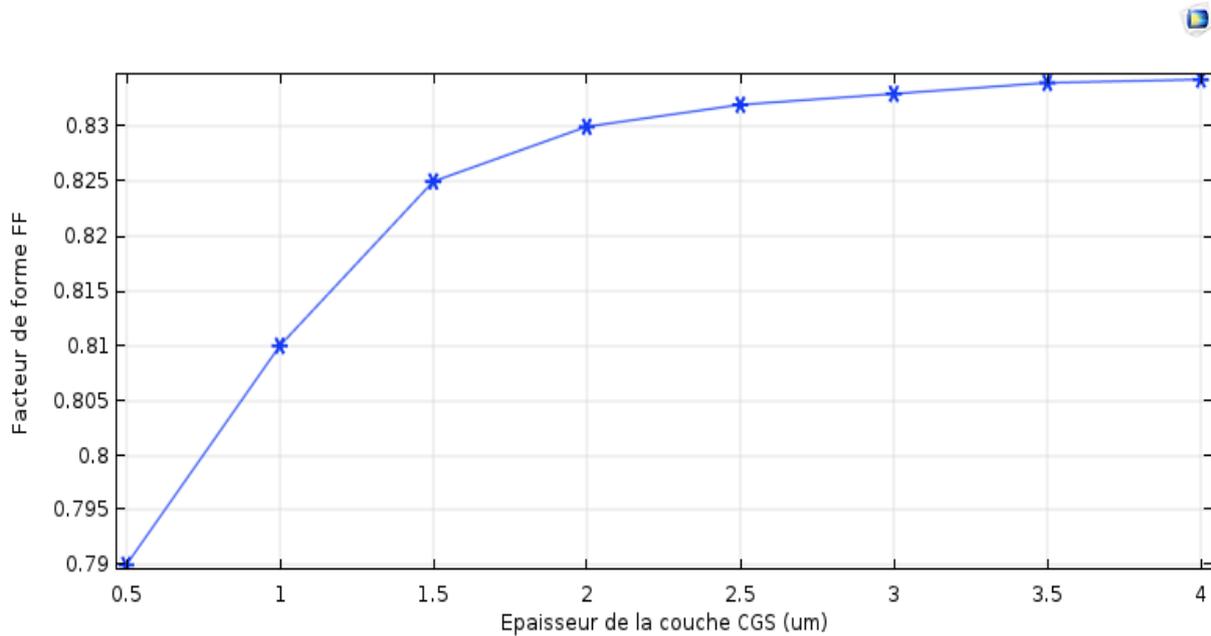


Figure IV.8 La variation du facteur de forme FF en fonction de la couche CGS dans la cellule supérieure.

Dans la figure (IV.8), est représentée 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 varie faiblement et se stabilise à une valeur de 0.83.

- **Remarque :** afin d'étudier la cellule inférieure, on va fixer l'épaisseur de la couche absorbante CGS de la première cellule à sa valeur optimale, c'est-à-dire à  $2.5\mu\text{m}$ .

## IV.6 Effet de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS dans la cellule inférieure :

### IV.6.1 Caractéristique courant tension J(V) :

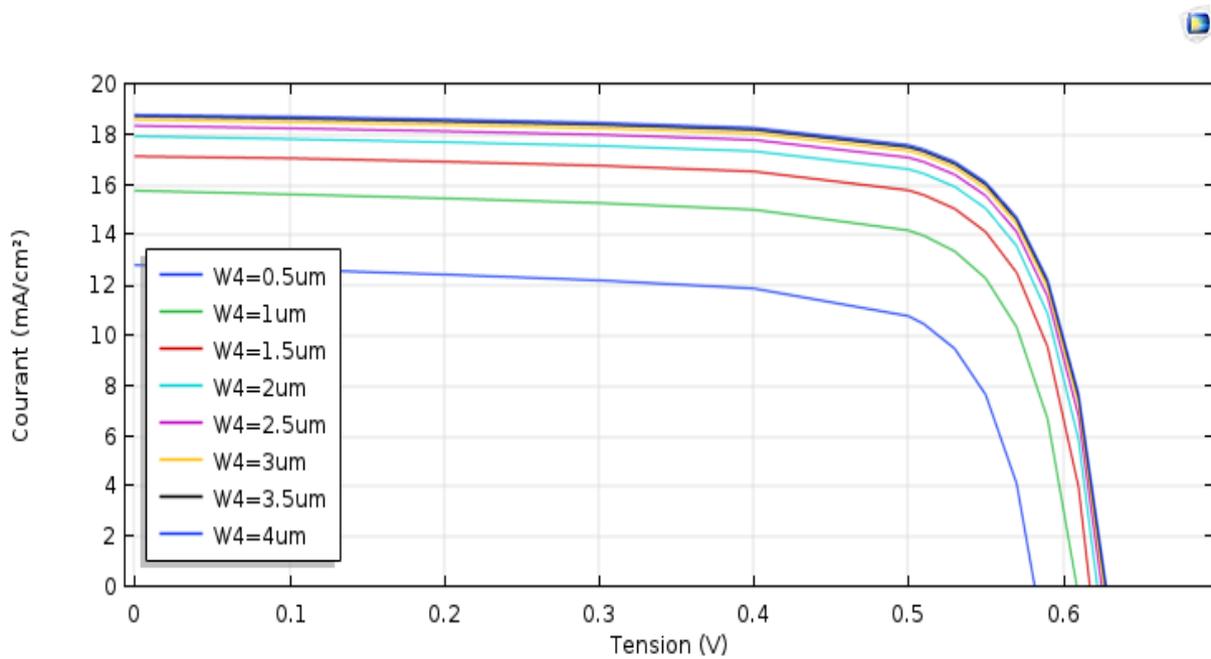


Figure IV.9 La variation des caractéristiques tension courant en fonction des épaisseurs de la couche CIGS dans la cellule inférieure.

La figure (IV.9) représente les caractéristiques J(V) pour différentes épaisseurs de la couche CIGS dans la cellule inférieure. On voit que le courant augmente avec l'augmentation de l'épaisseur jusqu'à une valeur égale à 3.5  $\mu\text{m}$ , ensuite la variation devient de plus en plus faible. Quant à la tension de circuit ouvert, elle varie faiblement.

**Remarque :** W4 représente l'épaisseur de la couche CIGS.

#### IV.6.2 Caractéristique puissance tension P(V) :

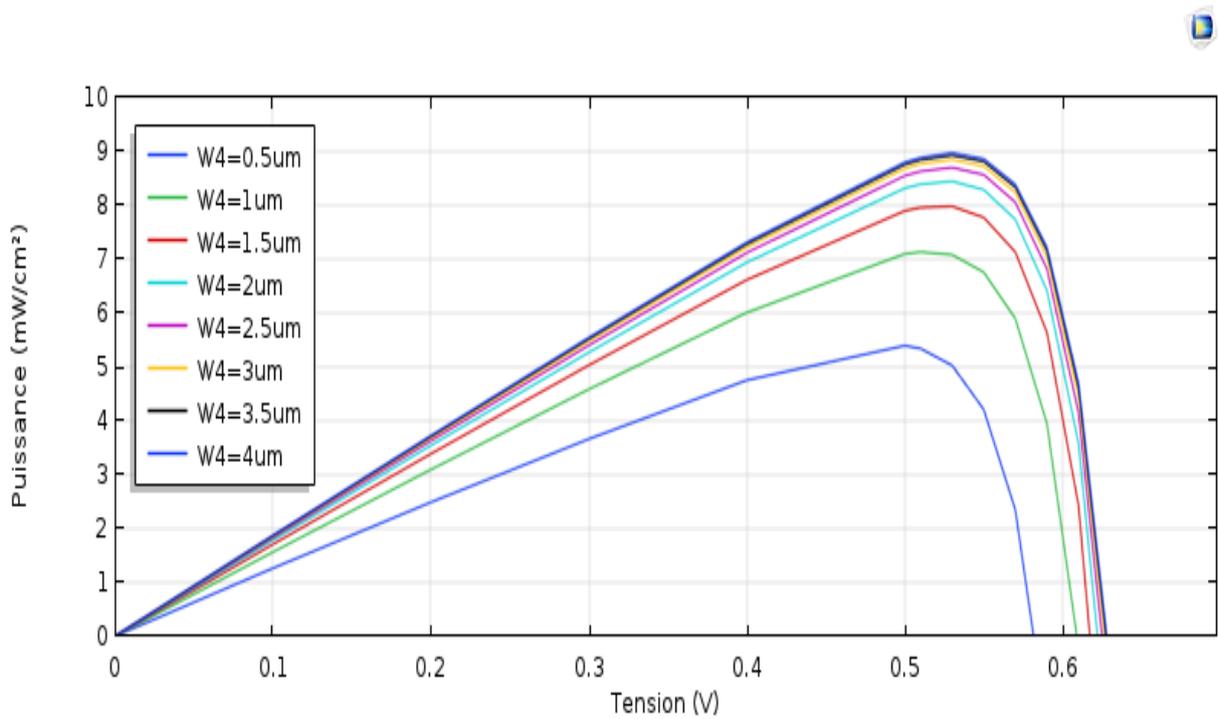


Figure IV.10 La variation des caractéristiques P(V) en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS dans la cellule inférieure.

La figure (IV.10) présente les caractéristiques P(V) en fonction des épaisseurs de la couche absorbante CIGS dans la cellule inférieure. On remarque que la puissance augmente avec l'augmentation de l'épaisseur, la variation devient très faible à partir de 3.5 μm.

Quant à la tension de circuit ouvert elle varie faiblement.

**Remarque :** W4 représente l'épaisseur de la couche CIGS.

### IV.6.3 Courant de court-circuit $J_{cc}$ :

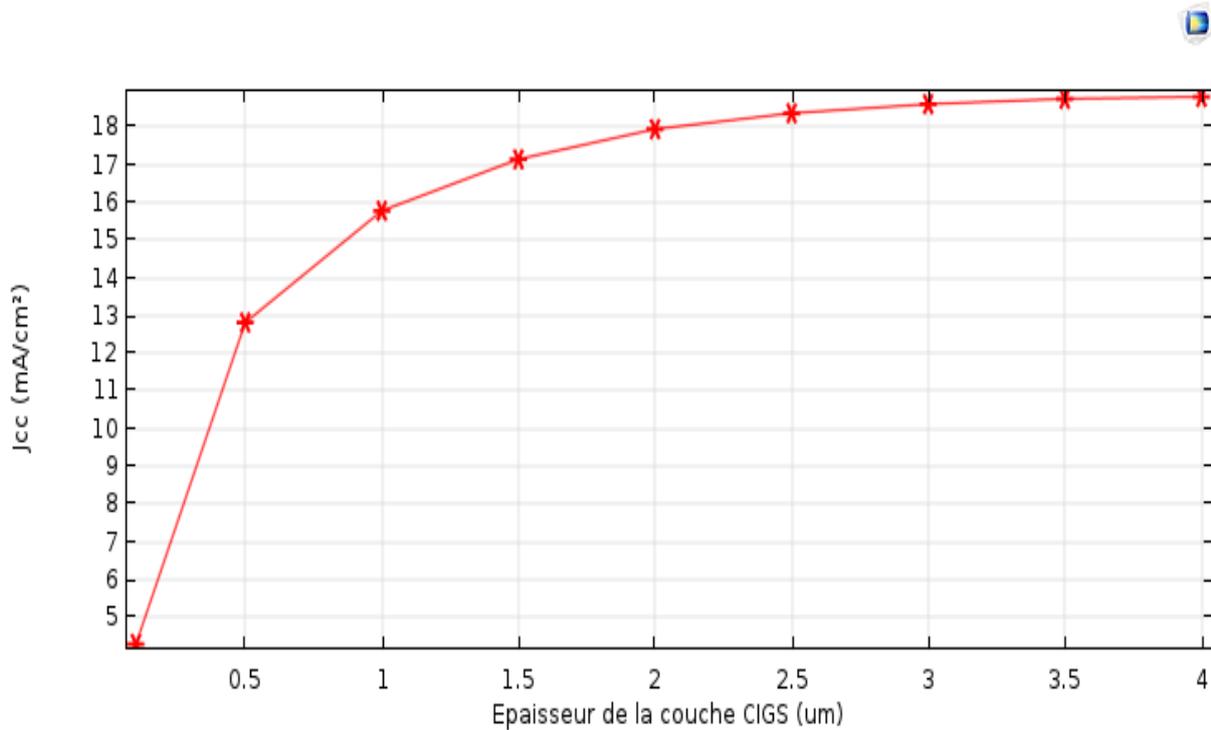


Figure IV.11 La variation de la densité de courant court-circuit  $J_{cc}$  en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS dans la cellule inférieure.

La variation de la densité de courant court-circuit  $J_{cc}$  en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS dans la cellule inférieure est illustrée dans la figure (IV.11). On remarque que le courant de court-circuit  $J_{cc}$  augmente très rapidement entre 0 et 2 μm, ensuite tend à se stabiliser.

On remarque également qu'à partir de l'épaisseur de 3.5 μm, la variation du courant de court-circuit  $J_{cc}$  devient très faible, ainsi le courant se rapproche de la valeur  $J_{cc}=18.8$  mA/cm<sup>2</sup>.

#### IV.6.4 Tension circuit ouvert $V_{co}$ :

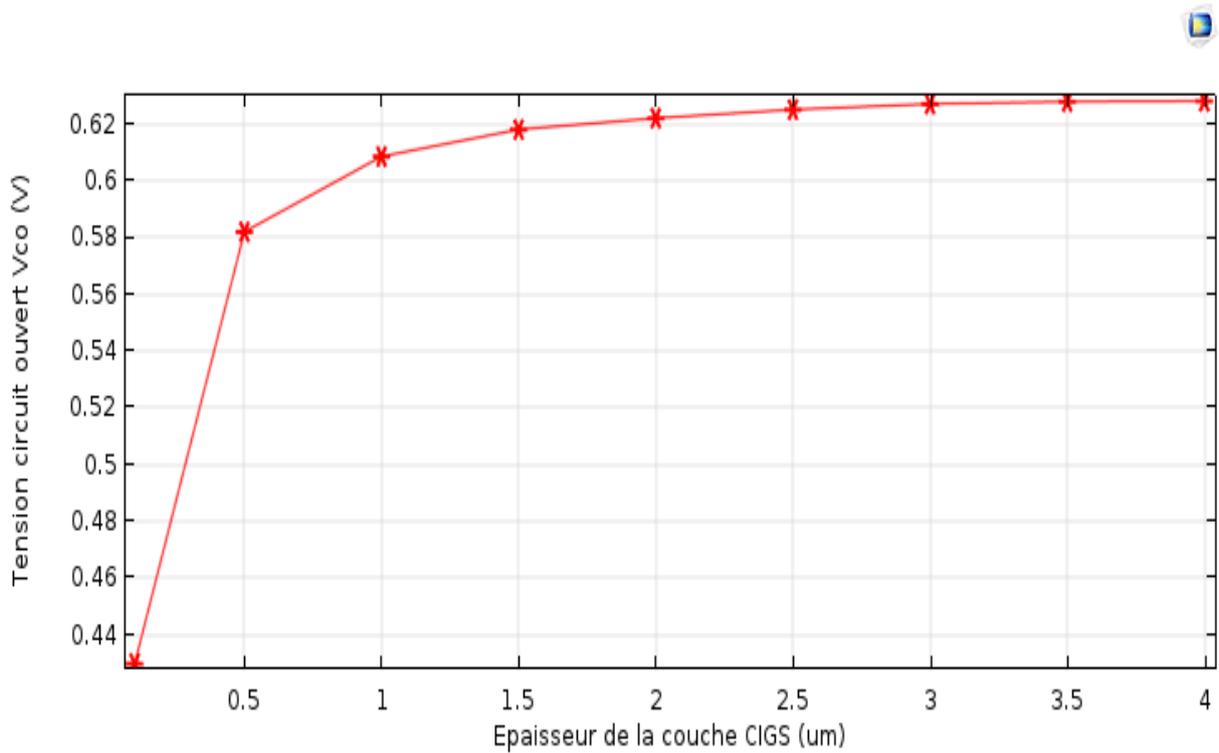


Figure IV.12 La variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  fonction de l'épaisseur de la couche CIGS dans la cellule inférieure.

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

#### IV.6.5 Puissance maximale $P_{\max}$ :

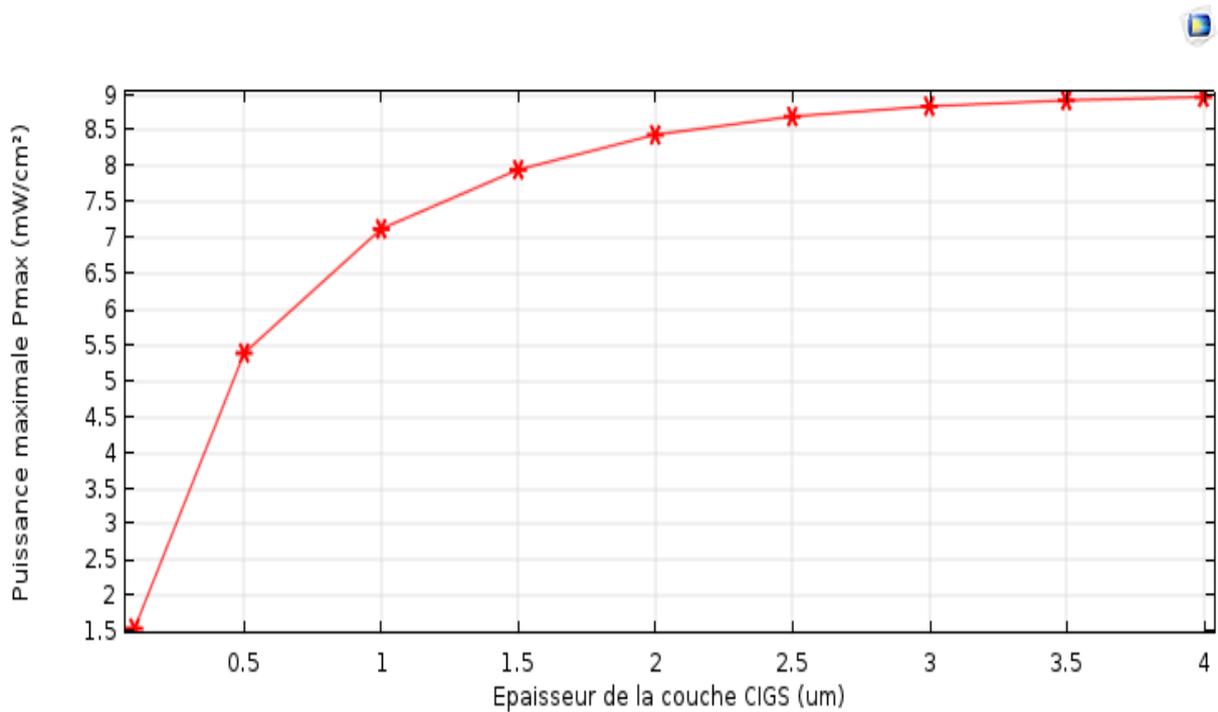


Figure IV.13 La variation de la puissance maximale en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS dans la cellule inférieure.

Dans la figure (IV.13), on observe que la puissance maximale augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS et cela est dû à l'augmentation du courant et de la tension. La puissance commence à se stabiliser à partir d'une épaisseur de  $3.5\mu\text{m}$ .

#### IV.6.6 Le rendement de conversion $\eta$ (%) :

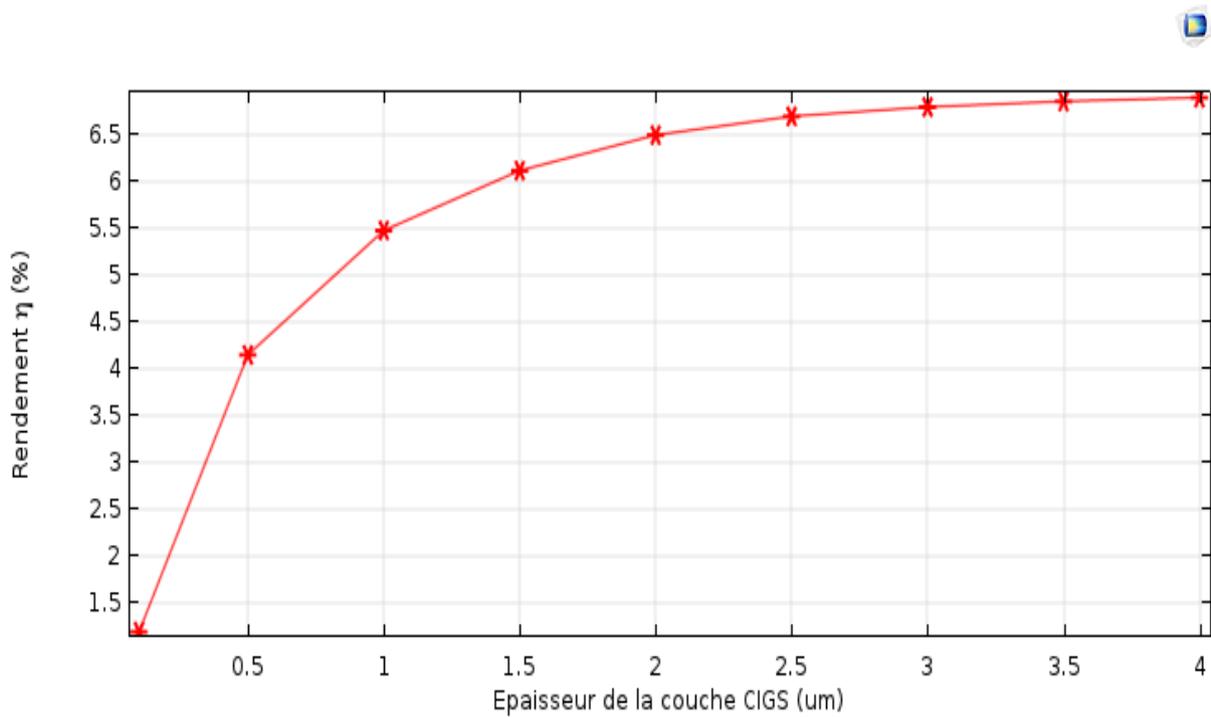


Figure IV. La variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche CIGS dans la cellule inférieure.

La variation du rendement en fonction des épaisseurs de la couche absorbante CIGS dans la cellule inférieure est représentée dans la figure (IV.14). On constate une augmentation du rendement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche, puis à partir d'une épaisseur égale à  $3.5\mu\text{m}$  la variation devient très faible.

#### IV.6.7 Le facteur de forme FF :

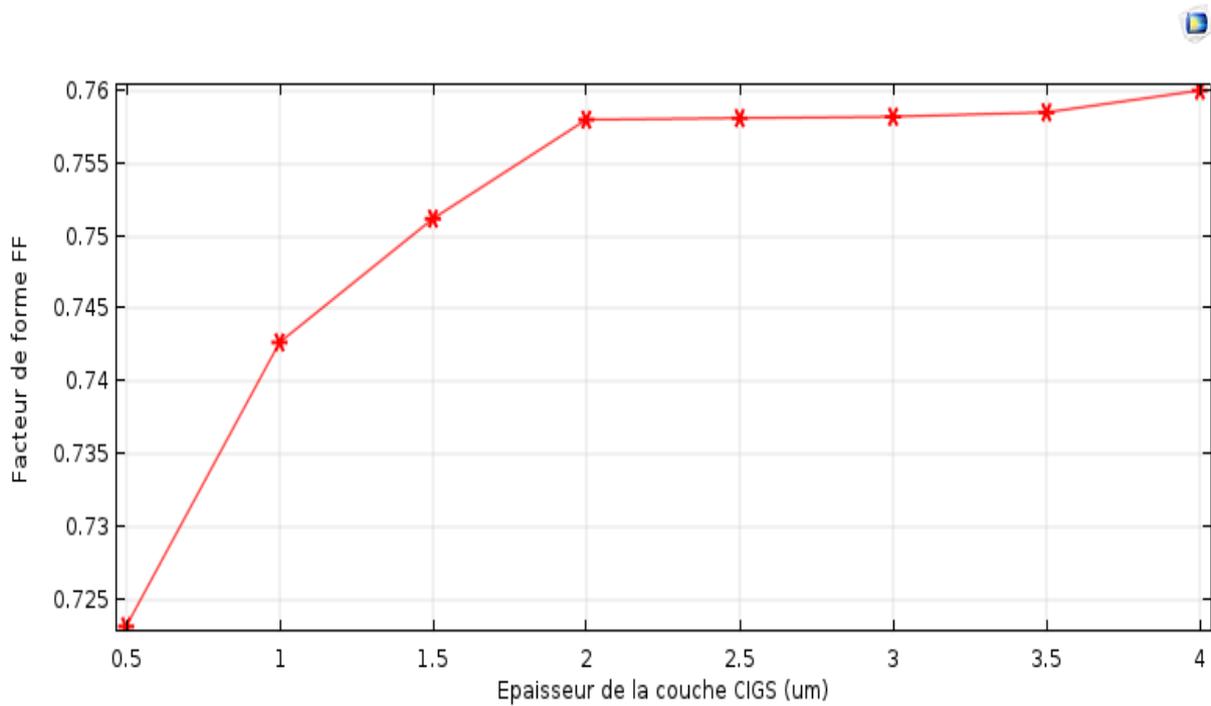


Figure IV.15 La variation du facteur de forme FF en fonction de la couche CIGS dans la cellule inférieure.

La représentation dans la figure (IV.15) est la variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS dans la cellule inférieure, on remarque que le facteur de forme augmente avec l'augmentation de l'épaisseur, mais cette variation est faible, puis il tend pour se stabiliser vers une valeur de 0.76 approximativement.

#### IV.7 Optimisation de la cellule solaire tandem CGS/CIGS :

Dans ce contexte, il y'a eu quelques travaux d'optimisations établis sur ce type de cellule, on en cite :

- Un rendement de 24% de la cellule tandem en CGS/CIGS en optimisant les épaisseurs des couches et du rapport Ga en utilisant le logiciel SILVACO-ATLAS.[18]
- Un rendement de 25% de la cellule tandem en CGS/CIGS avec une cellule inférieure en CIGS à double bande interdite graduelle et pour différentes épaisseurs de CGS en utilisant le logiciel AMPS-1D.[ 17]
- Un rendement de 26.21% en optimisant les épaisseurs des couches en utilisant le logiciel SILVACO-ATLAS.[14 ]

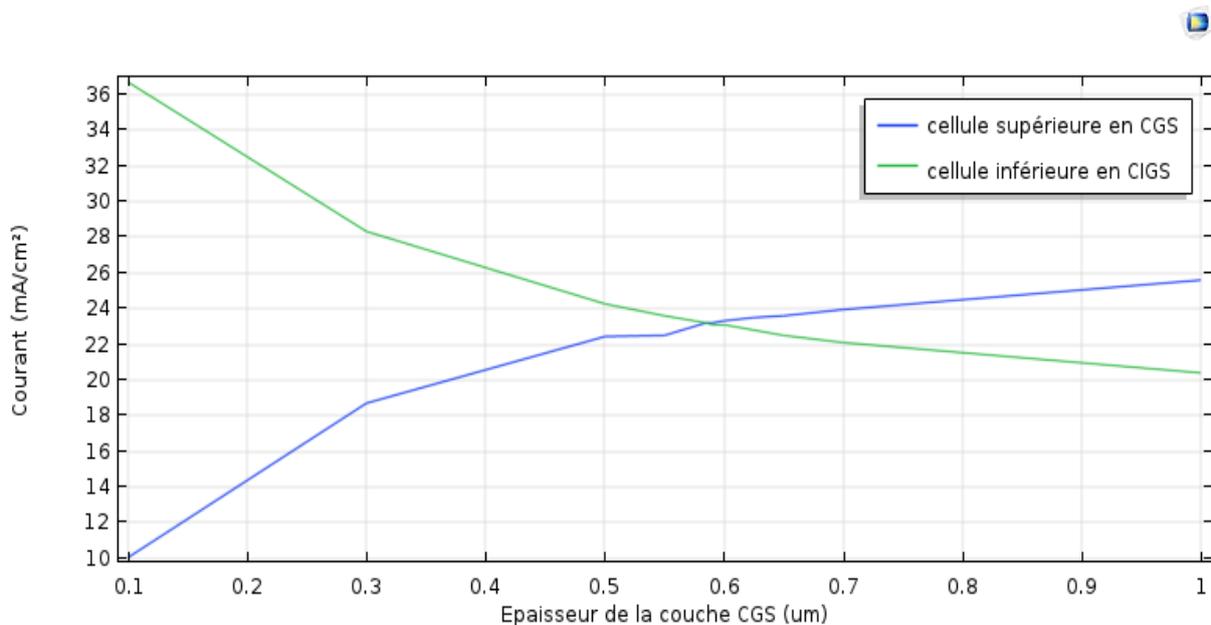
D'après les résultats obtenus précédemment grâce à la simulation, on a pu déduire les épaisseurs optimales pour chaque couche, pour la cellule supérieure en CGS elle est de  $2.5\mu\text{m}$ , et pour la cellule inférieure en CIGS elle est de  $3.5\mu\text{m}$ . Les caractéristiques de chaque cellule à ces épaisseurs sont présentées dans le tableau (IV-2) ci-dessous :

Type de cellule	$J_{cc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{co}$ (V)	$P_{max}$ (mW/cm <sup>2</sup> )	$\eta$ (%)	FF
Cellule supérieure en CGS	27.15	1.176	26.58	20.45	0.83
Cellule inférieure en CIGS	18.74	0.628	8.92	6.86	0.76

Tableau IV-2 Paramètres photovoltaïques des cellules solaires (supérieure en CGS et inférieure en CIGS).

Donc comme on le voit, le courant délivré par la cellule inférieure reste toujours inférieur à celui de la cellule supérieure, c'est pour cela que nous allons fixer l'épaisseur de la couche absorbante CIGS de la cellule inférieure à  $3.5\mu\text{m}$ , quant à l'épaisseur de la couche absorbante CGS de la cellule supérieure va être réglable.

La figure (IV.16), présente la variation du courant court-circuit  $J_{cc}$  dans la cellule CGS et la cellule CIGS, en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CGS dans la cellule tandem CGS/CIGS. La variation s'est faite de 0.1 à 1  $\mu\text{m}$ .



**Figure IV.16** La variation du courant court-circuit  $J_{cc}$  dans la cellule supérieure en CGS et la cellule inférieure en CIGS, en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CGS dans la cellule tandem CGS/CIGS.

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 23.20 mA/cm<sup>2</sup> qui correspond à une épaisseur de la couche CGS égale à 0.58  $\mu\text{m}$ . Les caractéristiques  $J(V)$  et  $P(V)$  des deux cellules après optimisation sont représentées dans les figures (IV.17) et (IV.18) respectivement.

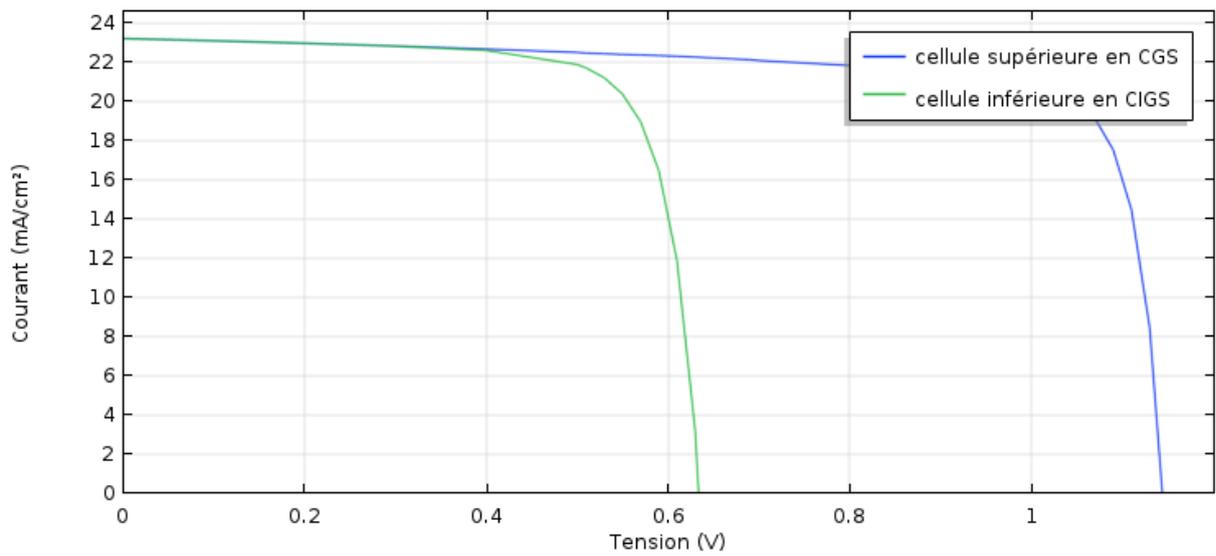


Figure IV.17 La variation des caractéristiques J(V) des deux cellules après l'optimisation.

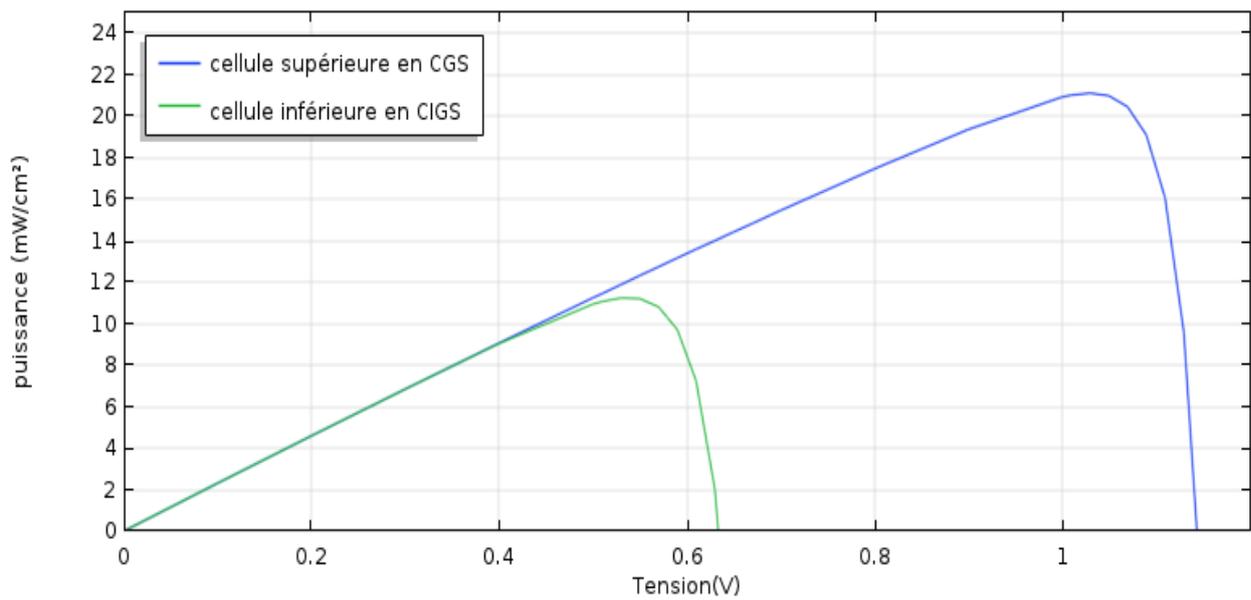


Figure IV.18 La variation des caractéristiques P(V) des deux cellules après l'optimisation.

#### IV.8 Les caractéristiques de la cellule CGS/CIGS tandem :

Le tableau (IV-3) est un résumé des caractéristiques de la cellule supérieure en CGS et la cellule inférieure en CIGS après l'optimisation ainsi que la cellule CGS/CIGS tandem optimisée :

Type de cellule	$J_{cc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{co}$ (V)	$P_{max}$ (mW/cm <sup>2</sup> )	$\eta$ (%)	FF
Cellule supérieure en CGS	23.20	1.14	21.11	16.24	0.79
Cellule inférieure en CIGS	23.20	0.63	11.24	8.64	0.76
Cellule CGS/CIGS tandem	23.20	1.77	32.35	24.88	0.78

Tableau IV-3 Caractéristiques des cellules (supérieure en CGS, inférieure en CGS et la cellule CGS/CIGS tandem)

On voit que le rendement obtenu est assez proche de ceux obtenus dans les travaux publiés comme le montre tableau (IV-4) suivant :

Travaux	$\eta$ (%)
[14]	26.21
[17]	25
[18]	24
Le notre	24.88

Tableau IV-4 Résultats obtenus des différentes simulations de la cellule CGS/CIGS tandem

#### **IV.9 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats obtenus de la simulation de la cellule à double jonction en CGS/CIGS, et cela en étudiant le comportement de la cellule supérieure et inférieure, puis nous avons procédé à l'optimisation, pour fournir le meilleur rendement. Pour cela nous avons fixé l'épaisseur de la couche absorbante CIGS de la cellule inférieure à sa valeur optimale qui est de  $3.5\mu\text{m}$ , quant à la cellule supérieure nous avons fait varier l'épaisseur de sa couche absorbante en CGS jusqu'à obtenir la valeur optimale de  $0.58\mu\text{m}$  qui nous permet d'avoir un rendement de 24.88 % et une puissance délivrée de  $32.35\text{mW}/\text{cm}^2$ .

# **Conclusion générale**

Le but de ce travail était d'étudier et optimiser la cellule à base de couches minces à double jonction CGS/CIGS et définir ses caractéristiques électriques.

Pour cela, nous avons étudié l'effet des épaisseurs des couches absorbantes des deux cellules (supérieure en CGS et inférieure en CIGS) sur les paramètres caractéristiques à savoir le courant de court-circuit  $J_{cc}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , la puissance maximale  $P_{max}$ , le rendement  $\eta(\%)$  et le facteur de forme FF ainsi que sur les caractéristiques  $J(V)$  et  $P(V)$ .

Nous avons remarqué que l'épaisseur optimale de la couche CGS pour la cellule supérieure était de  $2.5\mu m$ , quant à l'épaisseur de la couche CIGS pour la cellule inférieure était de  $3.5\mu m$ , sachant que la densité de courant court-circuit délivré par la cellule inférieure ( $18.74mA/cm^2$ ) était nettement inférieure à celle de la cellule supérieure ( $27.15mA/cm^2$ ). Cette différence joue un rôle important sur la diminution du rendement de la cellule CGS/CIGS tandem, car dans ce cas on va considérer que le courant global délivré de la cellule est égale à celui de la cellule inférieure.

C'est alors qu'on a procédé à l'optimisation de la cellule par rapport aux épaisseurs. L'épaisseur de la couche CIGS de la cellule inférieure était fixée à sa valeur optimale qui est de  $3.5\mu m$ , quant à l'épaisseur de la couche CGS de la cellule supérieure elle était réglable. La valeur qui optimisait la cellule était de  $0.58\mu m$  pour une densité de courant de court-circuit de  $23.20 (mA/cm^2)$  délivré par les deux cellules, ainsi nous avons pu obtenir un rendement de  $24.88\%$  qui est proche des valeurs des travaux antérieurs publiés dans la littérature [14,17,18].

En perspectives pour ce travail, des structures en :

- ▶ Triple jonction en CGS, CIS, et CIGS.
- ▶ Triple jonction en pérovskite, CIS et CIGS.
- ▶ Double jonction en pérovskite, CIGS ou CIS.

Peuvent être envisagées.

# **Références bibliographiques**

- [1] PNUE (2019). Rapport 2019 sur l'écart entre les besoins et les perspectives en matière de réduction des émissions. Programme des Nations Unies pour l'environnement, Nairobi.
- [2] <https://www.photovoltaique.info/fr>
- [3] mémoire de fin d'études en master : Etude et simulation d'une cellule solaire à base couches minces CZTS, présenté par : OUBOUCHOU Amina, 2019.
- [4] A. Laugier, "Les photopiles solaires du matériau du dispositif aux applications", Institut National des sciences appliquées-Lyon 1981.
- [5] A.Chovet, P.Masson, "Physique des semi-conducteurs", école polytechnique de Marseille, 2004/2005.
- [6] thèse de doctorat, "détermination de la longueur de diffusion des porteurs de charge minoritaires dans le silicium cristallin par interaction lumière-matière", par Y.SAYAD, 2009.
- [7] "PHOTOVOLTAICS REPORT", Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE with support of PSE GmbH, juin 2020.
- [8] "Les différentes générations de cellules photovoltaïques", par :A.Bou, A.Brochier, D.Pavat, M.Robin.
- [9] McEvoy's Handbook of Photovoltaics (Third Edition), Fundamentals and Applications, 2018, Pages 439-472.
- [10] 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.
- [11] U. Rau, P. O. Grabitz, and J. H. Werner. Resistive limitations to spatially inhomogeneous electronic losses in solar cells. Applied Physics Letters, 85(24) :6010, 2004.
- [12] Charles Roger, Développement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats métalliques, Université de Grenoble, 2013.
- [13] William N. Shafarman, Susanne Siebentritt, and Lars Stolt.  $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$  Solar Cells. In Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, page 546. 2011.
- [14] thèse de doctorat, "Etude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS à multi-jonction par le logiciel Tcad Silvaco", par : ELBAR Mourad, Université Mohamed Khider – Biskra, 2018.
- [15] J. L. Gray, Chapter 3: The Physics of the Solar Cell, in «Handbook of Photovoltaic Science and Engineering», John Wiley & Sons Inc., 2011, pp. 82–128.

- [16] [https://fr.wikipedia.org/wiki/COMSOL\\_Multiphysics](https://fr.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics)
- [17] J. Song et al., Modeling and simulation of a  $\text{CuGaSe}_2/\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$  tandem solar cell, 3rd World Conf. Photovolt. Energy Convers, vol. 1, pp. 555–558, 2003.
- [18] K. Fotis, Modeling and simulation of a dual-junction cigs solar cell using silvaco atlas, Master's Thesis, Nav. Postgrad. Sch., 2012.
- [19] mémoire de master, "Effet de la couche buffer dans les cellules solaires Tandem à base de CIGS", par : BOUKARABA Mohamed et ZORRIG Heythem, université Mohamed BOUDIAF - M'sila 2017.
- [20] Emmanuel Giudicelli. Evaluation d'une filière technologique de cellules photovoltaïques multi-jonctions à base de matériaux antimoniures (III-V)-Sb pour applications aux très fortes concentrations solaires. Electronique. Université Montpellier, 2016.
- [21] thèse de doctorat, "Contribution à l'amélioration des performances des cellules solaires  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ", par : M. BOUCHAMA Idris, université FERHAT ABBAS – Setif, 2012.
- [22] Mémoire de master, "Simulation par Excel d'une cellule solaire conventionnelle en Silicium", par : BELAIDI Siham, Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2015.
- [23] Mémoire de master, "Etude structurelle des cellules solaires deuxième et troisième génération", par : MEDJDOUB Sarra, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2016.
- [24] Google Images.
- [25] <https://nationalcleanenergyweek.org/solar/>