

Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique

Département de Physique.

Filière : Physique.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master en Physique.

Option : **Physique des matériaux.**

Présenté par :

DERHAMOUNE Safia

THEME :

Optimisation par simulation numérique d'une cellule solaire à couches minces à base de Kësterite $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ (CFTS)

Devant le jury composé de :

ADDA BENATTIA Tekkouk	MCB	Université de Mostaganem	Président
BOUATTOU Bezine	MAA	Université de Mostaganem	Examineur
RAHAL Wassila Leïla	MCA	Université de Mostaganem	Encadreur

Année Universitaire 2020-2021

Dédicaces

A mes parents ; mon père et ma maman

Vous avez toujours été pour moi un exemple ; des parents respectueux, honnêtes. Je vous dédie ce modeste travail pour vos sacrifices, votre amour, votre tendresse, votre soutien et les prières tout au long de ma vie. Que Dieu vous garde et vous protège, en espérant que vous serez toujours fiers de moi.

A mon mari :

J'apprécie votre soutien moral et vos encouragements constants.

A mes frères :

Vous avez toujours été à mes côtés avec vos mots, vos encouragements et vos précieux conseils.

A ma grande famille : Ayez confiance j'y arriverai.

Avec gratitude, les bénédictions perdurent, et avec sincérité, les nations restent.

Aux étudiants de la promotion 2^{ème} année Master physique 2020/2021

Surtout l'étudiante HADDOU ASMAE, qui m'a aidé depuis la première rencontre, merci beaucoup ma chère.

SAFIA

Remerciements

*Je remercie vivement mon encadreur Madame **RAHAL Wassila Leïla** d'avoir dirigé ce travail avec beaucoup de compétences, merci pour votre disponibilité, votre motivation, votre rigueur et la confiance que vous m'avez accordée au cours de l'élaboration de ce mémoire, merci pour vos conseils éclairés. Je vous souhaite du profond de mon cœur une brillante carrière pleine de prospérité, de succès et de réussite dans votre vie professionnelle.*

*Je remercie infiniment notre doyen, Professeur **HASSINI Nouredine** pour sa consécration à l'enrichissement et à la transmission des connaissances au sein des différents départements.*

*Je remercie notre chef de département Monsieur **ABBES Charef** pour sa position digne d'un responsable.*

*Je remercie énormément et à égalité notre Docteur de région le professeur **BENDERDOUCHE Nouredine** et le Docteur **LATRECHE Zinelabidine**, pour l'aide inestimable qu'ils m'ont offert.*

*Je remercie également les membres du jury, Monsieur **ADDA BENATTIA Tekouk** et Monsieur **BOUATTOU Bezine** d'avoir accepté d'évaluer ce travail.*

Sans oublier tous les professeurs qui ont contribué à ma formation durant tout mon parcours universitaire. Que Dieu les garde.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Avec tous mes respects

Liste des figures

Figure 1.1 : Conversion de l'énergie solaire en électricité	4
Figure 1.2 : spectre du rayonnement solaire.....	6
Figure 1.3 : Position du soleil pour différents Air Mass.....	6
Figure 1.4 : Spectres AM0, AM1 et AM1.5	7
Figure 1.5 : Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.	8
Figure 1.6 : Structure en bandes d'énergie des matériaux ; Isolants, Semi-conducteurs et Métaux	8
Figure 1.7 : Principe de la conduction dans un semi-conducteur de type N	10
Figure 1.8 : Principe de la conduction dans un semi-conducteur de type P	11
Figure 1.9 : Jonction métallurgique (PN)	11
Figure 1.10 : Formation de la jonction PN.....	12
Figure 1.11 : Evolution de la densité de charge $\rho(x)$	13
Figure 1.12 : Champ électrique dans les différentes régions de la jonction	15
Figure 1.13 : Structure d'une cellule solaire au CdTe.....	19
Figure 1.14 : Structure d'une cellule solaire au CIGS.....	20
Figure 1.15 : Structure de la cellule solaire à base CZTS	21
Figure 1.16 Cellules organiques photovoltaïques	22
Figure 2.1 : Schéma représentatif d'une cellule solaire typique à base de CFTS.....	24
Figure 2.2 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	26
Figure 2.3 : Caractéristique courant-tension I(V) (en trait rouge) et puissance (en trait bleu) d'une cellule solaire	28
Figure 3.1 : Interface du panneau de démarrage du simulateur SCAPS-1D	33

Figure 3.2 : Interface de définition du dispositif.....	34
Figure 3.3 : Interface des paramètres de la couche.	35
Figure 3.4 : Interface des résultats	35
Figure 3.5 : Structure de la cellule solaire à base CFTS	36
Figure 3.6: Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CFTS	39
Figure 3.7: Influence de l'épaisseur de l'absorbeur CFTS sur le taux de recombinaison ..	40
Figure 3.8: Rendement quantique externe pour plusieurs épaisseurs de l'absorbeur CFTS	41
Figure 3.9: Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de la densité de dopage de la couche absorbante CFTS.....	42
Figure 3.10 : Influence de la densité de dopage de l'absorbeur sur le champ électrique	43
Figure 3.11 : Influence de densité de dopage sur le taux de recombinaison	44
Figure 3.12: Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'énergie de gap de la couche absorbante CFTS.....	45
Figure 3.13: Influence de la variation de l'énergie de gap sur le champ électrique	46
Figure 3.14: Influence de la variation de l'énergie de gap sur les bandes d'énergie	47

Liste tableaux

Tableau N°	Titre du tableau	Page
Tableau 1.1	Caractéristiques des trois types des cellules solaires au silicium	18
Tableau 3.1	Paramètres de la cellule étudiée	37
Tableau 3.2	Paramètres PV pour différentes épaisseurs de la couche absorbante CFTS	38
Tableau 3.3	Paramètres PV pour différents dopages NA de l'absorbeur CFTS	41
Tableau 3.4	Paramètres PV pour différentes énergies du gap de l'absorbeur CFTS	44

Table des matières

Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques.....	4
1.1.Introduction	4
1.2.L'énergie solaire photovoltaïque	4
1.2.1. Le rayonnement solaire	5
1.2.2 .Le spectre solaire	5
1.2.3 .La Masse d'Air	6
1.3. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	7
1.3.1. les semi-conducteurs	8
1.3.2.La jonction PN	11
1.3.3. Phénomènes de transport dans les semi-conducteurs	16
1.4 . Filières photovoltaïques	17
1.4.1. L'omniprésence d'un matériau : le silicium	17
1.4.2. L'émergence de la filière couches minces	19
1.4.3.Le marché de la faible puissance : les cellules hybrides et organiques	22
1.5.Conclusion	22
Chapitre 2 : Les cellules solaires à couches minces (CFTS).....	23
2.1.Introduction	23
2.2.Les cellules solaires CFTS	23
2.3.Le rôle de chaque couche de la cellule CFTS	24
2.3.1.Le substrat	24
2.3.2.Le contact arrière	25
2.3.3.L'absorbeur	25
2.3.4.La couche tampon	25
2.3.5.La couche fenêtre	25
2.4. Modèle électrique équivalent à une cellule photovoltaïque	26
2.5.Caractéristique $I = f(V)$	27
2.6. Les paramètres photovoltaïques	28
2.7. Conclusion	31
Chapitre 3 : Résultats et discussions.....	32
3.1. Introduction	32
3.2. Le logiciel de simulation SCAPS-1D	32

3.2.1. Utilisation du logiciel :	33
3.3. Présentation de la cellule étudiée CFTS/TiO ₂ /FTO.....	36
3.4. Optimisation de la couche absorbante CFTS	37
3.4.1. Effet de l'épaisseur de l'absorbeur sur la performance de la cellule	37
3.4.2.Effet de la densité de dopage NA de l'absorbeur sur la performance de la cellule	41
3.4.3.Effet du gap de l'absorbeur sur la performance de la cellule	44
3.5. Conclusion :.....	47
Conclusion Générale.....	49
Bibliographie.....	52
Résumé	54

Introduction Générale

Le siècle dernier a été une période de grands progrès technologiques grâce aux grandes avancées de la science. De plus, certains événements survenus à cette époque ont également augmenté les besoins en technologie moderne, ce qui a aidé ce monde à atteindre le statut actuel, car la technologie moderne a joué un rôle vital dans la production de masse des produits de première nécessité.

Par conséquent, le besoin en énergie a augmenté dans le monde entier au cours de cette période, poussant les pays à trouver des sources économiques et efficaces de production d'énergie. Les sources comme l'essence, le charbon et le pétrole, qui sont généralement connues sous le nom de sources d'énergie fossiles, ont été utilisées pour la production de l'énergie, mais ces sources d'énergie s'épuisent avec le temps. De même, l'énergie nucléaire a également été utilisée pour produire de l'énergie électrique, mais seuls certains pays peuvent se permettre d'utiliser cette source aux fins susmentionnées.

Une autre raison de l'augmentation de la demande d'énergie est la croissance démographique dans le monde. De même, l'augmentation du niveau de vie des personnes a également augmenté les besoins en énergie électrique car elle fait partie intégrante des équipements quotidiens. Comme il a été mentionné ci-dessus, les sources d'énergie fossiles s'épuisent avec le temps, mais un autre inconvénient de l'utilisation de ces sources d'énergie est qu'elles causent d'énormes dommages à l'environnement en raison des émissions de CO_2 qui contribuent au réchauffement climatique. Par conséquent, l'envie d'explorer des sources d'énergie renouvelables, qui sont efficaces, durables, propres et économiques, s'est renforcée. Ces énergies renouvelables comprennent l'hydrogène, la géothermie, l'hydroélectricité, le solaire, l'éolien et la biomasse. Comme il est prévu que dans les deux prochaines décennies, la demande d'électricité sera doublée par rapport à la demande actuelle, combler l'écart entre la demande et l'offre d'énergie est devenu le principal défi de l'époque. L'énergie solaire est

l'une des meilleures sources d'énergie renouvelable qui fournit une électricité propre sans émettre de déchets et de fumées nocives.

Les cellules photovoltaïques permettent la conversion de l'énergie solaire en électricité. La technologie à couches minces est l'une des technologies les plus rentables pour la fabrication de cellules photovoltaïques à base de semi-conducteurs car ces cellules utilisent relativement moins de matériau (flexibles et plus légers).

Actuellement, les matériaux absorbants à base de kèsterite font l'objet d'études intensives, tels que le sulfure de cuivre zinc-étain Cu_2ZnSnS_4 (CZTS), le sulfure de cuivre fer-étain (Cu_2FeSnS_4) CFTS. Ces matériaux absorbants sont des matériaux semi-conducteurs non toxiques et disponibles dans la croûte terrestre, contrairement aux cellules solaires à couches minces à base de tellure de cadmium ($CdTe$) et de cuivre indium gallium Sélénium (CIGS). [1]

La cellule solaire qui fera objet de notre étude est composée d'un empilement de couches minces. Le CFTS dopé p est utilisé comme une couche absorbante où se produit l'absorption des photons générant des paires électrons trous. Notre but principal dans ce travail est l'étude et l'optimisation de la couche absorbante CFTS, pour l'amélioration du rendement de conversion du dispositif étudié. Pour cela, nous utiliserons le logiciel de simulation numérique unidimensionnel des cellules solaires SCAPS-1D, afin d'étudier l'influence de plusieurs paramètres sur la performance de la cellule.

Notre mémoire comporte trois chapitres. Nous débuterons dans le premier chapitre par présenter succinctement l'énergie photovoltaïque et le principe de la conversion photovoltaïque, ainsi que des rappels sur les semi-conducteurs et la jonction PN. Nous présenterons également les différentes filières photovoltaïques existantes.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les cellules solaires en couche minces CFTS, et expliquerons en détail le rôle de chaque couche. Nous rappellerons aussi le modèle mathématique équivalent à une cellule PV. Enfin nous terminerons ce chapitre par la présentation de la caractéristique courant- tension $I(V)$ d'une cellule PV sous illumination, à partir de laquelle nous dérivons les paramètres photovoltaïques.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons les résultats de l'optimisation par simulation d'une cellule solaire ayant la structure FTO / TiO₂ / CFTS / Mo. Nous déterminerons l'influence des paramètres, tels que la densité de dopage, le gap et l'épaisseur de la couche absorbante les performances du dispositif.

Le mémoire sera clôturé par une conclusion générale et des perspectives dans le cadre de l'amélioration de ce travail.

Chapitre 1 :

Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques

1.1. Introduction :

Compte tenu de la distance qui nous sépare du soleil et de la puissance de son rayonnement, la terre reçoit à chaque instant une puissance moyenne de 1367 W/m^2 . Après son passage dans l'atmosphère la puissance reçue est d'environ 1000 W/m^2 , ce qui correspond, compte tenu des dimensions de notre planète, à une puissance incroyable de $7.7 \times 10^{14} \text{ kW}$. Il n'y a même pas besoin d'aller chercher cette énergie : elle arrive toute seule ! Il existe deux types de cellules solaires qui permettent de récupérer une partie de cette énergie : les cellules thermo solaires qui transforment les rayonnements en chaleur, et les cellules solaires photovoltaïques qui convertissent les rayonnements en électricité et qui seront abordés dans ce premier chapitre. [2]

1.2. L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les modules photovoltaïques composés de cellules photovoltaïques ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable [3]. (Figure 1.1).

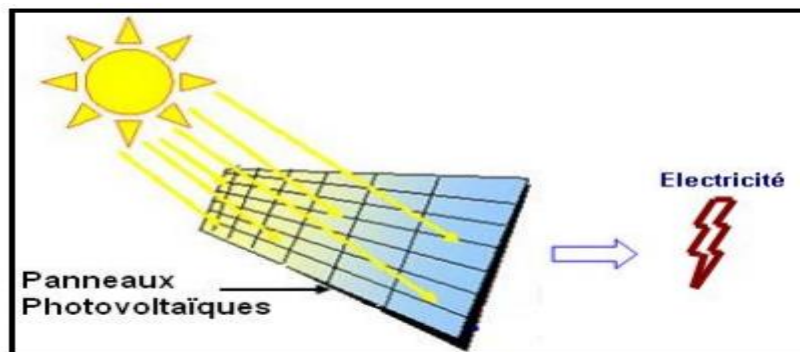


Figure 1.1 : Conversion de l'énergie solaire en électricité [4]

1.2.1. Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire qui arrive au sol se décompose en deux parties : L'une provient directement du soleil (direct), l'autre est diffusée par l'atmosphère (diffus). Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les nuages et les molécules diverses en suspension dans l'atmosphère, et de sa réfraction par le sol. La connaissance de ces divers rayonnements permet d'établir un bilan radiatif du système terre- atmosphère.

- **L'énergie solaire reçue sur Terre :**

Sur Terre, l'atmosphère (via le dioxyde de carbone, l'ozone, la vapeur d'eau...) absorbe en grande partie les infrarouge (IR) et les ultraviolets (UV) et un peu la lumière visible. Ainsi plus l'épaisseur d'atmosphère traversée est importante, plus la quantité d'énergie solaire reçue par le sol est faible. Quand on se rapproche des pôles, les rayons sont plus inclinés : la même quantité d'énergie se répartie sur une plus grande surface. C'est pourquoi le rayonnement solaire par unité de surface reçu diminue de l'équateur vers les pôles (ceci, avec l'inclinaison de l'axe de la Terre, est à l'origine du phénomène des saisons).

L'énergie solaire est également réduite par :

1. L'alternance des jours et des nuits
2. La couverture nuageuse (celle-ci réduit à 50 % l'énergie solaire)
3. La variation saisonnière.

- **La propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère :**

Lorsque le rayonnement solaire se propage dans l'atmosphère, il interagit avec les constituants gazeux de celle-ci et avec toutes les particules présentes en suspension (aérosols, gouttelettes d'eau et cristaux de glace). Les particules dont on parle ici ont des dimensions variant du centième de μm à quelques centaines de μm . Le rayonnement solaire peut être réfléchi, diffusé ou absorbé. [3]

1.2.2. Le spectre solaire :

Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique composé de :

- Lumière visible de longueur d'onde comprise entre 400 nm et 800 nm
- Rayonnement infra rouge (IR) de longueur d'onde supérieure à 800 nm
- Rayonnement ultra violet (UV) de longueur d'onde inférieure à 400 nm [5]



Figure 1.2 : spectre du rayonnement solaire [5]

1.2.3. La Masse d'Air :

La notion de Masse d'Air quantifie la réduction d'intensité de la lumière lorsqu'elle traverse l'atmosphère et est en partie absorbée par l'Ozone, l'Air, l'Eau, la poussière...etc.

..

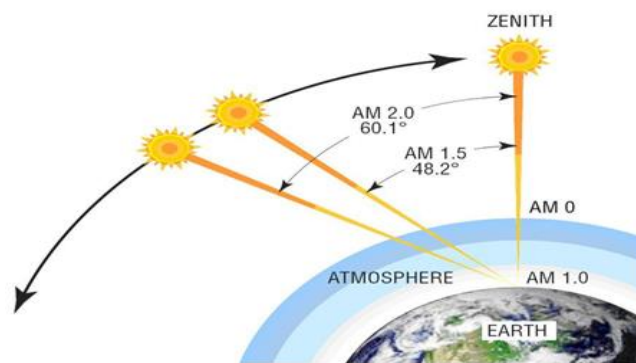


Figure 1.3 : Position du soleil pour différents Air Mass.[6]

Sa valeur dépend principalement de l'angle d'incidence des rayons lumineux avec le zénith (position verticale) et est définie par :

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (1.1)$$

- AM0 est utilisé pour préciser les conditions en dehors de l'atmosphère.
- AM1 correspond au soleil au zénith ($\theta = 0$).
- AM1.5 correspond à $\theta = 48,2^\circ$
- AM2 correspond à l'horizon ($\theta = 60,1^\circ$).

- L'énergie solaire reçue sur Terre (hors atmosphère) est d'environ 1 360 W/m, cette illumination est appelée **AM0** (Air Mass = 0)
- Sur la surface de la Terre, après la traversée de l'atmosphère, cette énergie diminue, comme on peut le constater sur la figure I.4. [7]

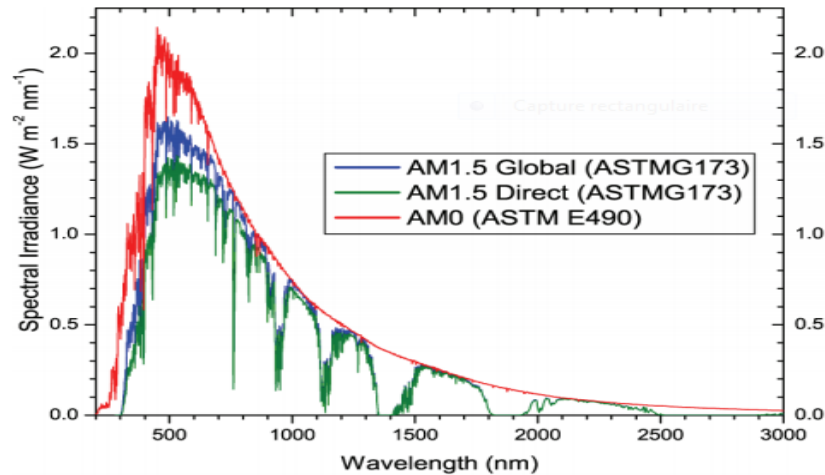


Figure 1.4: Spectres AM0, AM1 et AM1.5 [7]

1.3. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.

La lumière peut être considérée sous forme d'ondes électromagnétiques de longueur d'onde λ ou sous forme de photons corpuscules possédant une énergie E liée à λ par la relation :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.2)$$

Avec :

λ : longueur d'onde (m)

ν : fréquence (s^{-1})

c : vitesse de la lumière dans le vide ($m \cdot s^{-1}$).

h : Constante de Planck. $h = 6.62 \cdot 10^{-34} J \cdot S$

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque peut être résumé en ces trois étapes :

1. Absorption des photons ayant une énergie $h\nu > E_g$
2. Création de paires électron-trou et leur séparation par le champ électrique induit par la jonction PN
3. Collecte des charges dans un circuit extérieur.

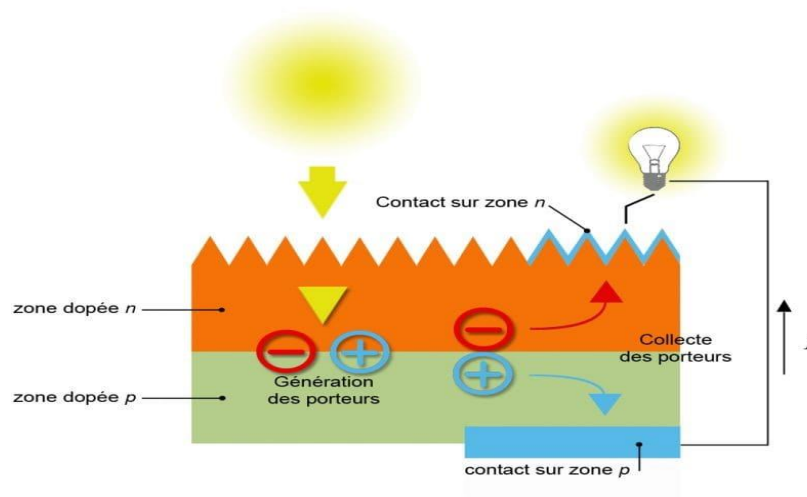


Figure 1.5: Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. [8]

1.3.1. Les semi-conducteurs :

Selon les propriétés électriques, les matériaux sont classés en trois catégories, conducteurs, isolants et semi-conducteurs (voir figure 1.6).

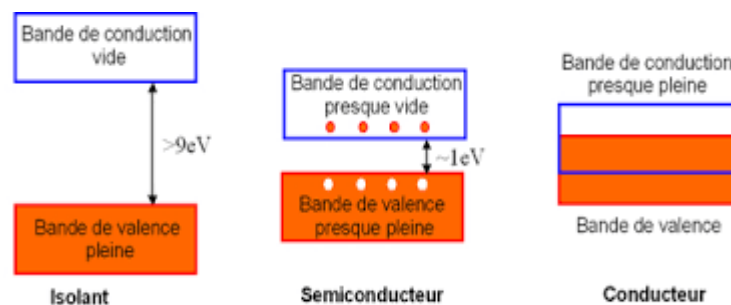


Figure 1.6 : Structure en bandes d'énergie des matériaux : Isolants, Semi-conducteurs et Métaux[8]

a. Conducteurs : Les métaux tels que le fer (Fe), le cuivre (Cu), l'or (Au), l'argent (Ag) et l'aluminium (Al) sont des conducteurs de courant électrique. La présence d'électrons libres dans la couche périphérique (densité $n \approx 10^{22}$ à $10^{23} e^-/cm^3$) est à l'origine de la conductivité électrique. A température ambiante la résistivité ρ des conducteurs est très faible ($\rho \leq 10^{-5} \Omega \cdot cm$).

b. Isolants : Les matériaux qui ont une résistivité ρ supérieure à $10^8 \Omega \cdot cm$ sont des isolants (matériaux non conducteurs de courant électrique). Parmi ces matériaux ; le verre, le mica, la silice (SiO_2) et le carbone. La conductivité des isolants est donc très faible ($\sigma = 1/\rho$).

c. Semi-conducteurs : Cette classe de matériaux se situe entre les métaux (conducteurs) et les isolants (non conducteurs). La résistivité des semi-conducteurs varie de 10^{-3} à $10^{+4} \Omega \cdot cm$. Les électrons libres et les trous mobiles sont les porteurs de charges responsables de la conductivité électrique. Un semi-conducteur peut être soit intrinsèque (pur) ou extrinsèque (dopé) par des impuretés.

- **Semi-conducteur intrinsèque :** la résistivité du silicium pur est de l'ordre de $\rho \approx 10^3 \Omega \cdot cm$.

- **Semi-conducteur extrinsèque :** la résistivité du silicium dopé par le Bore ou le phosphore est de l'ordre de $10^{-2} \Omega \cdot cm$. [8]

1.3.1.1 Le dopage :

Pour améliorer la conductivité électrique des semi-conducteurs on utilise la technique du dopage. Dans un matériau (silicium, germanium ...) d'une très grande pureté initiale, on ajoute une infime quantité d'un élément dopant.

On distingue deux types de dopage : le dopage de type N et le dopage de type P

1.3.1.2. Dopage N :

Pour un dopage de type N, il faut augmenter la densité en électrons dans le semi-conducteur intrinsèque.

Dans le cas du silicium Si, ou du germanium Ge, qui sont tétravalents, on ajoute des atomes d'un élément pentavalent, comme le **phosphore (P)**, l'**arsenic (As)** ou l'**antimoine (Sb)**. Ces atomes, insérés dans le réseau cristallin, formeront quatre liaisons covalentes avec quatre atomes de silicium, le cinquième électron de la couche de valence restant libre. Cet électron qui n'est que très faiblement lié à l'atome va se placer sur un niveau énergétique plus près de la bande de conduction. Il lui suffira d'acquérir une faible énergie supplémentaire ($\Delta E \approx 0,01 \text{ eV}$) pour accéder à cette bande. De ce fait, le matériau possède une meilleure conductivité électrique.

Ces électrons libres ne créent pas de trous dans le réseau, le nombre total d'électrons est donc supérieur au nombre de trous.

Les électrons sont les porteurs majoritaires et les trous les porteurs minoritaires. Les atomes dopants sont appelés atomes donneurs.

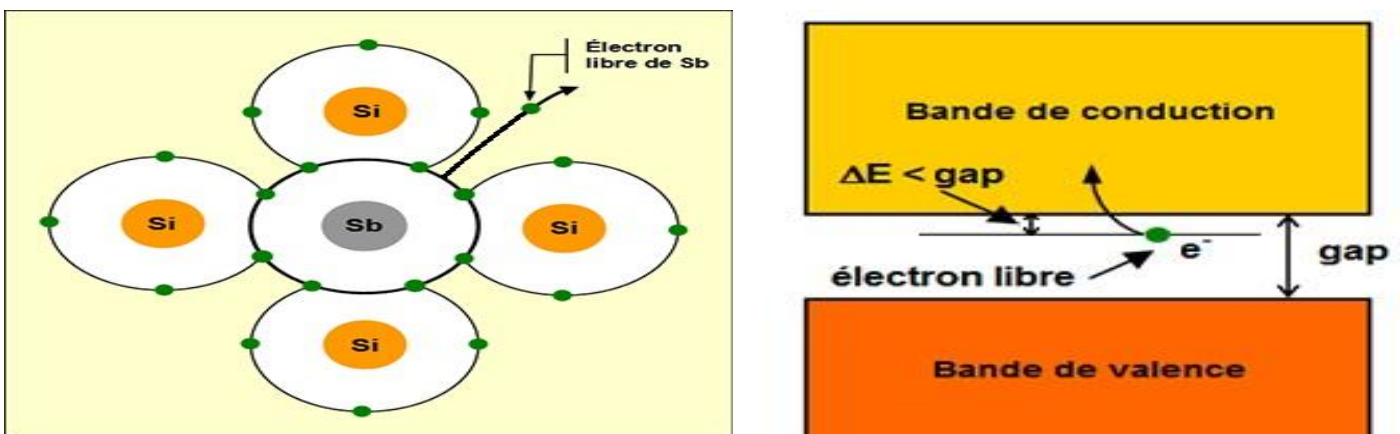


Figure 1.7 : Principe de la conduction dans un semi-conducteur de type N [9]

1.3.1.3. Dopage P :

Pour ce dopage, il faut augmenter la densité en trous dans le semi-conducteur intrinsèque.

Dans le cas du silicium Si, ou du germanium Ge, qui possèdent quatre électrons de valence, on ajoute des éléments trivalents comme le gallium (Ga), le bore (B), l'aluminium (Al) ou l'indium (In). Il leur manque un électron pour compléter les quatre liaisons covalentes avec les atomes de silicium voisins. Un trou est créé dans la structure. Ce trou crée un nouveau niveau d'énergie voisin de la bande de valence ($\Delta E \approx 0,05 \text{ eV}$), accessible plus facilement

aux électrons. Il peut être rempli par un électron d'un autre atome de silicium, qui à son tour libère un trou et ainsi de suite (figure 1.8). Le matériau devient ainsi conducteur de l'électricité.

Comme au final le nombre de trous dépasse le nombre d'électrons, les trous sont donc les porteurs majoritaires et les électrons les porteurs minoritaires. Les atomes dopants sont appelés atomes accepteurs. [9]

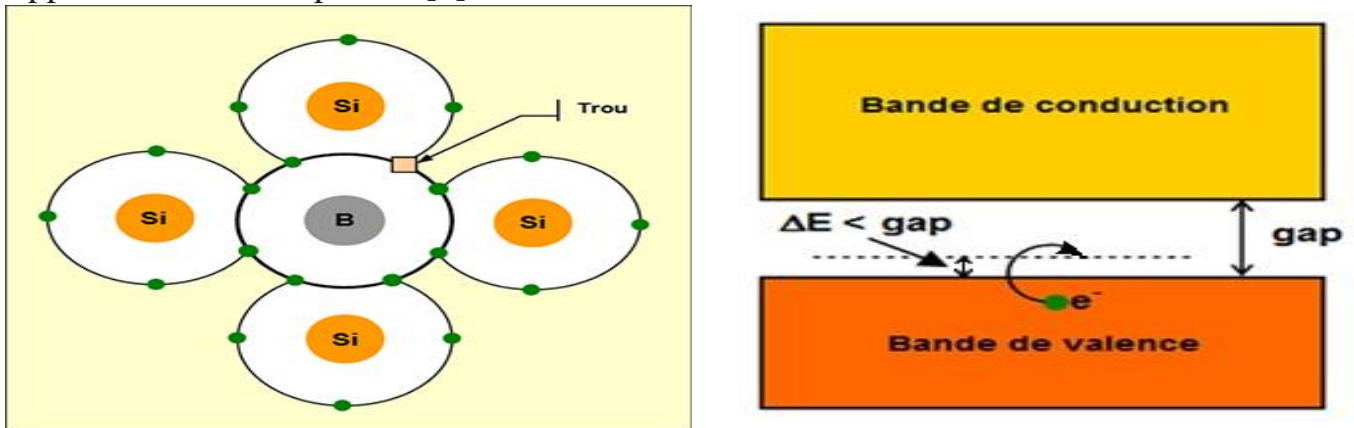


Figure 1.8 : Principe de la conduction dans un semi-conducteur de type P.[9]

1.3.2. La jonction PN :

Une jonction PN est formée par la juxtaposition d'un semi-conducteur dopé type P (appelé anode) et d'un semi-conducteur dopé type N (appelé cathode). Lorsque ces deux types de semi-conducteurs sont mis en contact, un régime électrique transitoire s'établit de part et d'autre de la jonction, suivi d'un régime permanent.

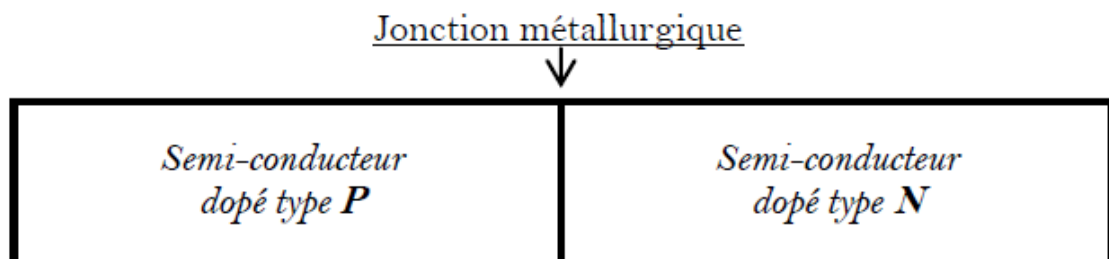


Figure1.9 : Jonction métallurgique (PN) [8]

1.3.2.1. Etude d'une jonction PN abrupte non polarisée à l'équilibre :

a. La charge d'espace $p(x)$: $-x_p < x < x_n$:

Considérons les deux types de semi-conducteurs avant la formation de la jonction,

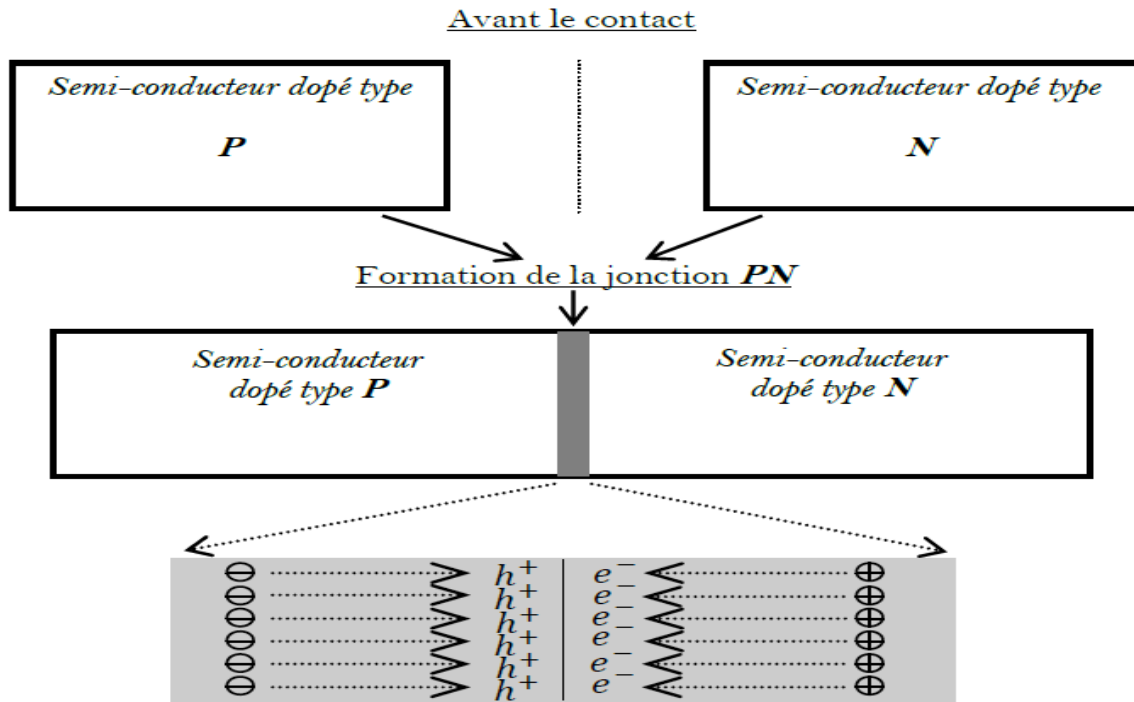


Figure1.10 : Formation de la jonction PN[8]

Après la formation de la jonction entre les deux types de semi-conducteurs, un potentiel interne de la jonction ϕ_0 apparaît entre les deux niveaux de Fermi intrinsèques E_{Fi} . L'origine physique de ce potentiel interne ϕ_0 est la diffusion des porteurs de charges. En effet, la mise en contact des semi-conducteurs favorise la diffusion des électrons (e^-) de la région dopée N vers la région dopée P (pauvre en électrons) et laissent derrière eux des charges positives. De même, les charges positives (trous : h^+) de la région dopée P diffusent vers la région dopée N (pauvre en trous) et laissent derrière eux des charges négatives. A la fin de ce processus de diffusion des porteurs de charges, un équilibre permanent est établi et une zone pauvre en porteurs libres est formée. Cette zone est appelée **zone de charge d'espace** ou aussi « *zone de déplétion* ».

Afin d'étudier le potentiel électrostatique dans la jonction (*zone de charge d'espace*), la résolution de l'équation de Poisson est nécessaire.

L'équation de Poisson s'écrit :

$$\nabla^2 \phi(x, y, z) = \text{div} [\text{grad} \phi(x, y, z)] = -\text{div} \vec{E} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s} = -\frac{q}{\epsilon_s} (p - n + N_d^+ - N_a^-) \quad (1.3)$$

Avec :

$\rho(x)$: la densité de charge

ϵ_s : la permittivité du semi-conducteur

$$p(T) = n_i \exp\left(-\frac{E_{FP} - E_{Fi(P)}}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{q \phi(x)}{k_B T}\right) \quad (1.4)$$

$$n(T) = n_i \exp\left(-\frac{E_{FN} - E_{Fi(N)}}{k_B T}\right) \exp\left(\frac{q \phi(x)}{k_B T}\right) \quad (1.5)$$

$$N_d^+ = N_d$$

$$N_a^- = N_a$$

Cette équation peut être écrite sous la forme unidimensionnelle suivante :

$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s} = -\frac{q}{\epsilon_s} (p - n + N_d^+ - N_a^-) \quad (1.6)$$

Pour résoudre cette équation, nous supposons que la charge présente dans le semi-conducteur est seulement due à une distribution homogène d'impuretés. La concentration en porteurs de charges libres est donc négligeable devant N_d et N_a . En plus, la densité de charge est supposée constante dans les deux régions de la zone de déplétion (cas d'une jonction abrupte).

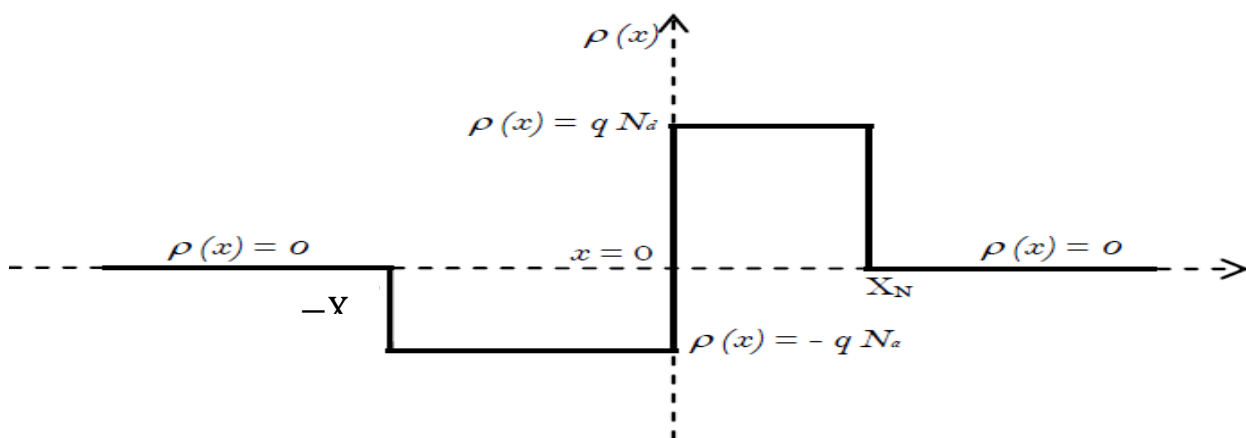


Figure 1.11: Evolution de la densité de charge $\rho(x)$ [8]

Alors, la distribution de $\rho(x)$ est donnée par la relation suivante :

$$\rho(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } -\infty < x \leq -X_P \\ -qN_a & \text{si } -X_P < x \leq 0 \\ +qN_d & \text{si } 0 \leq x < +X_N \\ 0 & \text{si } +X_N \leq x < +\infty \end{cases} \quad (1.7)$$

Avec : $q = e$, la charge de l'électron

b. Calcul des champs électriques : $E_P(x)$ et $E_N(x)$:

Pour déterminer le champ électrique créé dans chaque région (Figure 1.12), il faut intégrer l'équation de Poisson correspondante.

- $(-\infty < x < -X_P)$ avec : $\rho(x) = 0$, le champ électrique E est nul ($E = 0$)
- $(-X_P < x \leq 0)$ avec : $\rho(x) = -qN_a$

L'équation de Poisson s'écrit :

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{dE(x)}{dx} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s} = \frac{qN_a}{\epsilon_s} \quad (1.8)$$

Le champ électrique au point $(x = X_P)$ est nul, alors par intégration de l'équation de Poisson le champ électrique dans la région dopée P de la jonction s'écrit :

$$E_P = -\frac{qN_a}{\epsilon_s} (x - X_P) \quad (1.9)$$

- $(0 \leq x \leq +X_N)$ avec : $\rho(x) = qN_d$

L'équation de Poisson s'écrit :

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{dE(x)}{dx} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s} = -\frac{qN_d}{\epsilon_s} \quad (1.10)$$

Le champ électrique au point $(x = +X_N)$ est nul, alors par intégration de l'équation de Poisson le champ électrique dans la région dopée N de la jonction s'écrit :

$$E_N(x) = -\frac{qN_d}{\epsilon_s} (X_N - x) \quad (1.11)$$

Au point ($x = 0$), la continuité du champ électrique impose que :

$$\frac{qN_a}{\varepsilon_s} X_P = \frac{qN_d}{\varepsilon_s} X_N \Rightarrow N_a X_P = N_d X_N \quad (1.12)$$

- ($+X_N \leq x < +\infty$) avec : $\rho(x) = 0$, le champ électrique E est nul ($E = 0$)

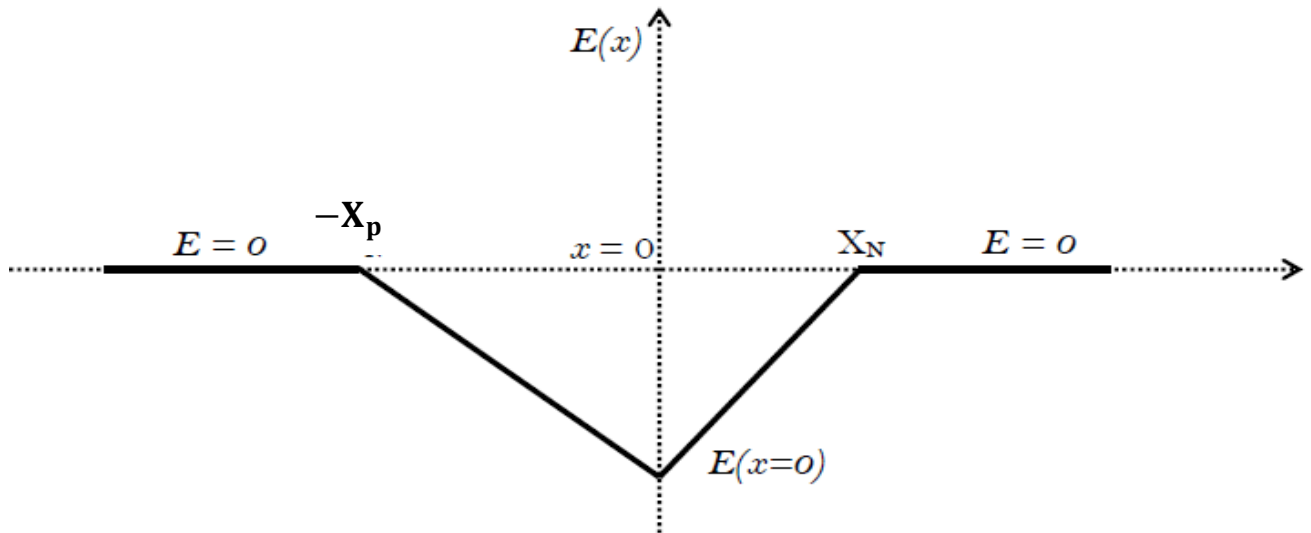


Figure 1.12 : Champ électrique dans les différentes régions de la jonction [8]

c. Calcul de la largeur de la zone de charge d'espace w : (zone de déplétion)

Les relations précédentes du potentiel de diffusion permettent de déduire la largeur de la zone de déplétion :

$$w = X_P + X_N \quad (1.13)$$

- La largeur de la région dopée P est donnée par la relation :

$$X_P = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_s}{e} \frac{V_d N_d}{N_a(N_a + N_d)}} \quad (1.14)$$

- La largeur de la région dopée N est donnée par la relation :

$$X_N = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_s}{e} \frac{V_d N_a}{N_d(N_a + N_d)}} \quad (1.15)$$

- La largeur w est donnée par la relation : [8]

$$w = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_S}{e} \frac{V_d(N_a + N_d)}{N_d N_a}} \quad (1.16)$$

1.3.3. Phénomènes de transport dans les semi-conducteurs :

Dans les semi-conducteurs, le courant résulte du déplacement des porteurs libres (électrons ou trous) sous l'action d'une force extérieure. L'origine de cette force peut être soit une excitation par champ électrique soit par un gradient de concentration dans le semi-conducteur. Dans le premier cas, le courant est dit de conduction ou d'entraînement, et dans le second cas, le courant est dit de diffusion.

a- Le courant de conduction

Le courant de conduction apparaît lorsqu'on applique au semi-conducteur un champ électrique (ou magnétique), les porteurs de charge (électrons et trous) se déplacent.

La densité de courant de conduction totale J_{cond} est donnée par :

$$J_{cond} = e(n\mu_n + p\mu_p)E = \sigma E \quad (1.17)$$

La densité de courant de conduction totale J_{cond} est proportionnelle au champ électrique et à la conductivité du cristal.

μ_n, μ_p : La mobilité des électrons et des trous respectivement.

σ : La conductivité électrique.

b- Le courant de diffusion

Le courant de diffusion apparaît lorsque la densité des porteurs libres est modifiée localement à l'intérieur du semi-conducteur. Ce gradient de concentration va provoquer un déplacement des porteurs de la région la plus peuplée à la région la moins peuplée, ce phénomène est appelé processus de diffusion.

La densité de courant de diffusion J_{diff} est donnée par le flux F multiplié par la valeur de la charge. La densité de courant de diffusion des trous s'écrit sous la forme :

$$J_{difp}(x) = eF_p(x) \quad (1.18)$$

$$\overrightarrow{J_{difp}}(x) = -eD_p \overrightarrow{gradp} \quad (1.19)$$

La densité de courant de diffusion des électrons:

$$J_{difn}(x) = -eF_n(x) \quad (1.20)$$

$$\overrightarrow{J_{difn}}(x) = eD_n \overrightarrow{gradn} \quad (1.21)$$

Dans le cas général, le courant résulte des deux phénomènes (présence d'un champ électrique et d'un gradient de concentration). Le courant total est la somme du courant de conduction et du courant de diffusion $J = J_p + J_n$. (1.22)

A 3 dimensions :

$$\overrightarrow{J_n} = en\mu_n \vec{E} + eD_n \overrightarrow{gradn} \quad (1.23)$$

$$\overrightarrow{J_p} = en\mu_p \vec{E} - eD_p \overrightarrow{gradp} \quad (1.24)$$

Où : J_n, J_p : Le courant total des électrons et des trous respectivement.

D_n et D_p sont les coefficients de diffusion.

1.4. Filières photovoltaïques :

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

1.4.1. L'omniprésence d'un matériau : le silicium :

Les cellules photovoltaïques inorganiques dites aussi au silicium, représentent 99% des ventes mondiales de panneaux solaires. Nous pouvons citer :

a) Cellules au silicium monocristallin :

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie, en utilisant une technique particulière, et forme un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le

cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

b) Cellules au silicium polycristallin :

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

c) Silicium en ruban autosupporté :

Les techniques de production de silicium cristallin en rubans autosupportés ont été très séduisantes sur le plan technologique. La plus connue est basée sur l'effet de capillarité entre deux lèvres de carbone. Ces rubans ont connu de nombreux développements au niveau de la recherche et pour certains d'entre eux, jusqu'à la conception de chaînes de production préindustrielles.

d) Silicium amorphe :

Silicium non cristallisé, c'est-à-dire à l'état amorphe. Ce sont les cellules des calculatrices ou des montres dites « solaires ». Le silicium amorphe présente plusieurs avantages, en particulier son fonctionnement possible en intérieur sous faible éclairage contrairement au silicium cristallin. [10]




Technologie et Aspect physique	Rendement d'un module	Durée de vie	Avantages	Inconvénients	PV nécessaire 1 kWc
Monocristallin (coins arrondis) 	13 – 17 %	20 ans à 90% P _C 30 ans à 80% P _C	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Meilleur rapport puissance /surface (~150 Wc/m²) 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Chère et forte consommation en énergie pour la production ◆ Performance diminue en cas de faible luminosité. 	7 à 8 m ²
Polycristallin (forme carrée) 	9– 15 %	10 ans à 90% P _C 25 ans à 80% P _C	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Bon rapport coût puissance /surface (~100 Wc/m²) ◆ Assez chère, 2 à 3 fois moins d'énergie pour la production que le mono 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Faible rendement sous un faible éclairage. 	9 à 11 m ²
Amorphe (calculatrice) 	4 – 9 %	10 ans	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Meilleur coût par Wc ◆ Moindre perte de rendement : <ul style="list-style-type: none"> - Si la T° augmente - Si le ciel est couvert ◆ Intégration sur supports souples ou rigides 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Faible rendement (~60 Wc/m²) donc grande surface de capteurs, ◆ Performance diminue au cours du temps. ◆ Faible durée de vie. 	16 à 20 m ²

Tableau 1.1 : Caractéristiques des trois types des cellules solaires au silicium [10]

1.4.2. L'émergence de la filière couches minces :

Les cellules solaires photovoltaïques à couches minces appartiennent à la cellule solaire de deuxième et troisième génération. Ces types de cellules solaires sont fabriqués en déposant une ou plusieurs couches de matériaux photovoltaïques sur un substrat métallique, plastique ou verre. [11]

Les technologies les plus courantes aujourd'hui produites industriellement sont :

1.4.2.1 Cellule solaire à base de CdTe : qui présente l'avantage d'une très grande stabilité dans le temps et d'un coût modéré

- **Fabrication :** dépôt d'une couche conductrice transparente (ex : oxyde d'étain dopé à l'indium), dépôt d'une mince couche fenêtre en CdS puis de la couche d'absorption en CdTe et recristallisation par chauffage, dépôt du contact face arrière
- **Epaisseur :** 5 μm
- **Rendement moyen cellule :** 9 – 17 % (module 13% - record à 18,2%) [12]

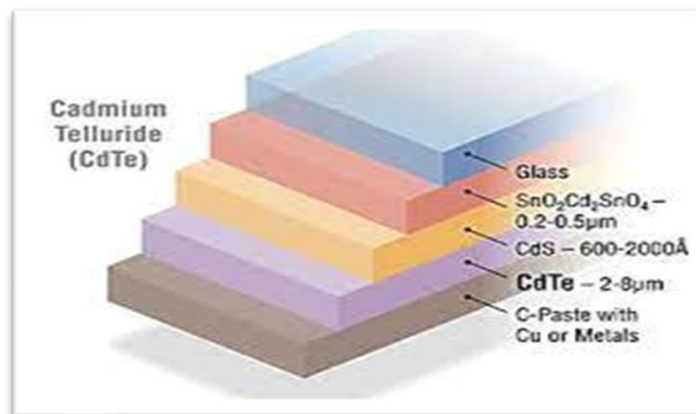


Figure 1.13 : Structure d'une cellule solaire au CdTe[12]

1.4.2.2. Cellule solaire CIGS :

Les cellules solaires à base de cuivre indium gallium (di)selenium (CIGS) présentent les rendements les plus élevés parmi les couches minces mais à un coût plus élevé.

- **Fabrication** : dépôt du contact face arrière molybdène, dépôt par co-évaporation de cuivre, indium, gallium et disélénium, dépôt d'une couche de CdS en bain chimique puis dépôt d'une couche fenêtre ZnO dopé aluminium par pulvérisation cathodique. [12]
- **Epaisseur** : 1,5 - 3,5 μm
- **Rendement moyen cellule** : 11 – 18 % (max 23.4%)

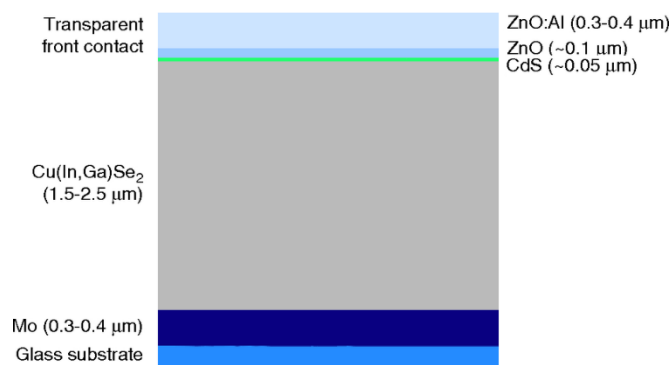


Figure 1.14 : Structure d'une cellule solaire au CIGS [12]

Ces cellules ont certains avantages :

- Elles permettent de fabriquer des modules d'une surface plus importante, qui peuvent même être ensuite découpés,
- Elles ne craignent pas l'échauffement qui peut faire chuter le rendement des modules cristallins autour de 60°C, ce qui les rend plus aptes à l'intégration,
- Elles captent mieux le rayonnement diffus et sont donc mieux adaptées à certains sites. Mais présentent aussi certains inconvénients :
- Industrialisation moins avancée,
- Matières premières limitées et en concurrence avec d'autres usages,
- Toxicité des matériaux,
- Recyclage plus complexe.[12]

1.4.2.3. Cellule solaire à base de CZTS :

Le CZTS est un semi-conducteur quaternaire à gap direct, qui se compose de matériaux abondants et non toxiques. Il constitue un bon absorbeur pour les cellules solaires en couches minces.

- **Fabrication :** Une cellule CZTS est formée d'un empilement de plusieurs matériaux en couches minces déposés successivement sur un substrat. Le substrat employé est du verre, le contact arrière est à base de molybdène (Mo). Comme le $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ est l'absorbeur, pour assurer une transmission optimale de la lumière, on ajoute une couche tampon à base d'un semi-conducteur de type n (CdS) formant ainsi la jonction PN avec le CZTS. Ensuite, une couche de ZnO est déposée. Enfin, il est nécessaire de terminer l'empilement par des contacts métalliques (de l'aluminium par exemple) afin d'assurer la collecte des électrons.
- **Epaisseur :** 1,4 μm
- **Rendement maximal cellule :** 12.6 % [13]

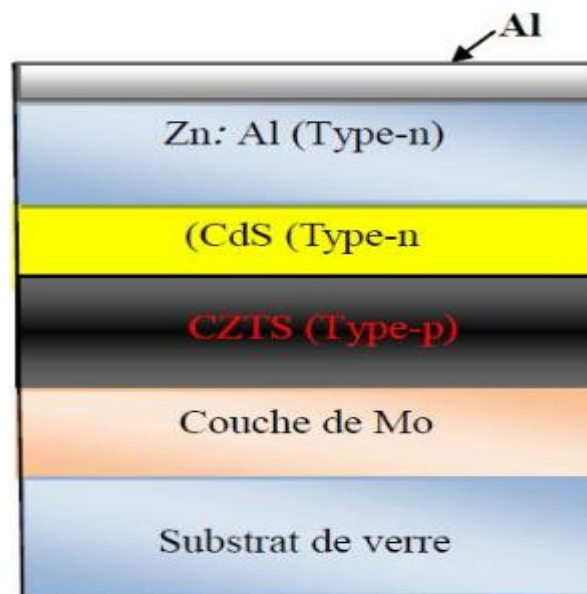


Figure 1.15: Structure de la cellule solaire à base CZTS [14]

1.4.3. Le marché de la faible puissance : les cellules hybrides et organiques :

Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Il en existe principalement deux types:

- Les cellules photovoltaïques organiques moléculaires,
- Les cellules photovoltaïques organiques en polymères.

Apparues dans les années 1990, ces technologies ont pour but de réduire le coût de production de l'électricité. Les cellules photovoltaïques organiques bénéficient du faible coût des semi-conducteurs organiques et des simplifications potentielles dans le processus de fabrication. Elles offrent la perspective d'une production en continu (roll-to-roll) qui pourrait réduire drastiquement le prix de revient des panneaux solaires. [15]

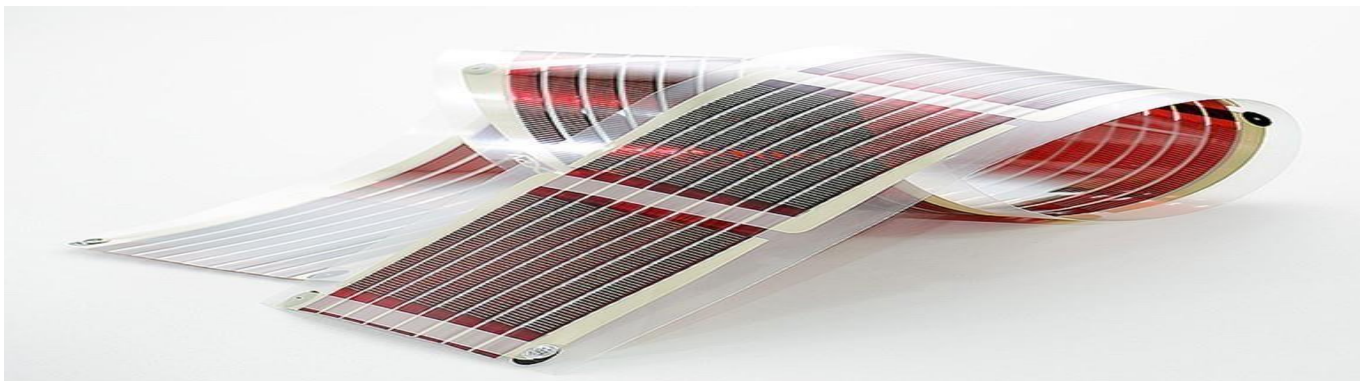


Figure 1.16 Cellules organiques photovoltaïques [16]

1.5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque (rayonnement solaire, spectre solaire, Air Mass...etc.), Puis nous avons expliqué le principe de fonctionnement d'une cellule solaire, en détaillant les caractéristiques des plus importantes de la jonction PN. Nous avons également présenté les équations de base pour les semi-conducteurs. Enfin, nous avons classé les filières photovoltaïques, selon les matériaux utilisés pour leur élaboration

Chapitre 2 :

Les cellules solaires à couches minces (CFTS)

2.1. Introduction :

Actuellement, la force motrice principale dans l'énergie solaire photovoltaïque est la technologie des cellules solaires en silicium, en revanche, la technologie de couche mince gagne du terrain car elle offre un rendement élevé et des cellules solaires à faible coût, avec une épaisseur inférieure.

Parmi les différentes couches minces, entrant dans la fabrication de cellules solaires, le $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ (CFTS) a été identifié comme un matériau à haut potentiel en termes d'énergie photovoltaïque et bénéficiant de ressources naturelles importantes pour répondre à un accroissement de la demande mondiale en énergie. Contrairement à d'autres technologies couches minces en photovoltaïques, la couche active CFTS présente également l'avantage de n'utiliser que des matériaux non toxiques et à faibles coûts permettant de s'inscrire dans une dimension de technologie durable [17]

2.2. Les cellules solaires CFTS :

Le CFTS ($\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$) est un composé semi-conducteur non toxique, dont les éléments sont abondants dans la terre. C'est une classe de matériaux attrayante et appropriée pour fabriquer des panneaux photovoltaïques à couche mince durables à faible coût et à haut rendement

Les couches minces de CFTS sont composées de fer, de zinc, d'étain, de soufre et/ou de sélénium. Elles offrent une alternative pour pallier le problème de rareté du tellure avec le CdTe et de l'indium avec le CIGS. Le CFTS a une bande interdite directe et modulable entre 1 eV et 1,5 eV [1]. Son coefficient d'absorption est élevé et il peut être déposé sur des substrats souples. Grâce à ses caractéristiques et à la relative abondance des éléments le constituant, le CFTS, est un candidat prometteur pour remplacer le CdTe et le CIGS dans la filière du photovoltaïque en couches minces. Pour être compétitif avec les autres technologies

photovoltaïques en couches minces, il faut augmenter significativement le rendement des cellules photovoltaïques à base de CFTS.[18]

2.3. Le rôle de chaque couche de la cellule CFTS :

Généralement, dans une cellule solaire en couches minces, il existe quatre couches principales empilées à savoir : Une couche d'oxyde transparent conducteur (FTO), la couche tampon (dans notre travail on utilise le TiO_2), la couche absorbante (CFTS) qui est la couche la plus importante dans une cellule photovoltaïque car elle est responsable de l'absorption du rayonnement solaire et de la génération de porteurs de charge, en plus du substrat et du Contact Supérieur Ohmique en Al.

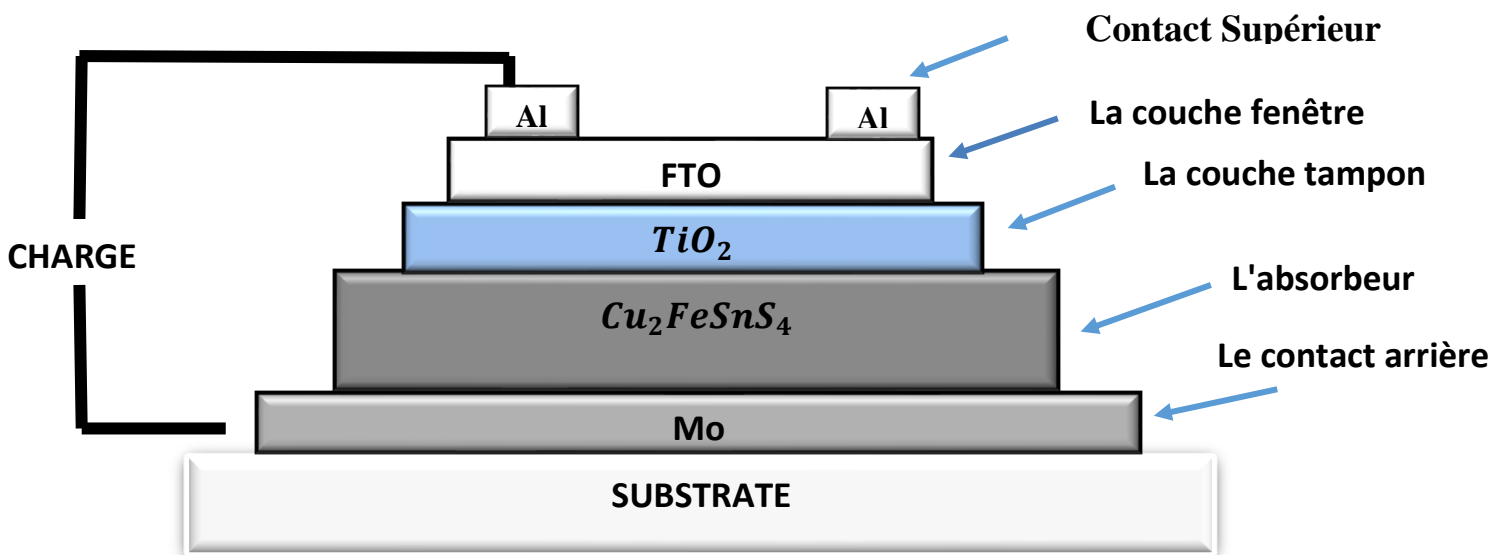


Figure 2.1 : Schéma représentatif d'une cellule solaire typique à base de CFTS

2.3.1. Le substrat :

Le substrat utilisé pour la réalisation des cellules solaires est en verre sodo-calcique choisi pour son coefficient d'expansion thermique proche de celui de l'absorbeur afin d'éviter la fissuration et le décollement de ce dernier lors de la variation de la température, ainsi que son faible coût. Ce substrat de verre a une épaisseur d'environ 1mm.

2.3.2. Le contact arrière :

Cette couche est composée de molybdène (Mo) et son épaisseur varie de 300 nm à 1000 nm. Elle a pour rôle principal de collecter les charges générées dans la cellule car c'est un bon conducteur électrique.

2.3.3. L'absorbeur :

C'est un semi-conducteur de type p, placé directement au-dessus de la couche de contact arrière, et se caractérise par un coefficient d'absorption élevé. Son rôle est d'absorber les photons pour les convertir en paires électrons-trous. Dans notre étude l'absorbeur est à base de CFTS.

2.3.4. La couche tampon :

La couche tampon est un semi-conducteur de type n présent généralement entre la couche absorbante et la couche fenêtre.

L'hétérojonction p-n à base de CFTS est formée en ajoutant une couche (CdS, ZnS, Zn(O,S) ou TiO₂). Cette dénomination provient du fait qu'elle joue aussi un rôle de protection physique du CFTS lors du dépôt.

Actuellement, les meilleurs rendements sont obtenus en utilisant des couches tampon à base de sulfure de cadmium (CdS). Cependant, en raison de la toxicité du cadmium, d'importants efforts sont tournés vers le développement de couches tampon alternatives (Zn(O,S), (Zn,Mg)O, In₂(S,Se)₃...etc.). La méthode la plus courante de dépôt du CdS est le bain chimique (Chemical Bath Deposition dite CBD).

2.3.5. La couche fenêtre :

Le dépôt d'une couche d'oxyde transparent conducteur (TCO: transparent conductive oxyde) est nécessaire. Une électrode conductrice transparente adaptée pour une utilisation photovoltaïque doit à la fois posséder une conductivité électrique élevée et présenter une transparence maximale dans le domaine du visible. Les films minces d'oxyde d'étain dopé

au fluor (FTO) ont les meilleures propriétés optiques et électriques parmi tous les films de SnO₂ dopés. Le FTO est déjà commercialisé et utilisé comme électrode transparente et conductrice dans de nombreux domaines, y compris le domaine des cellules solaires.

Ainsi, il joue un double rôle : la connexion métallique avant et la fenêtre de rayonnement solaire incident. [1]

2.4. Modèle électrique équivalent à une cellule photovoltaïque :

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN. Mais le schéma équivalent réel tient compte des effets résistifs parasites dus à la fabrication, il est représenté sur le schéma équivalent par deux résistances.

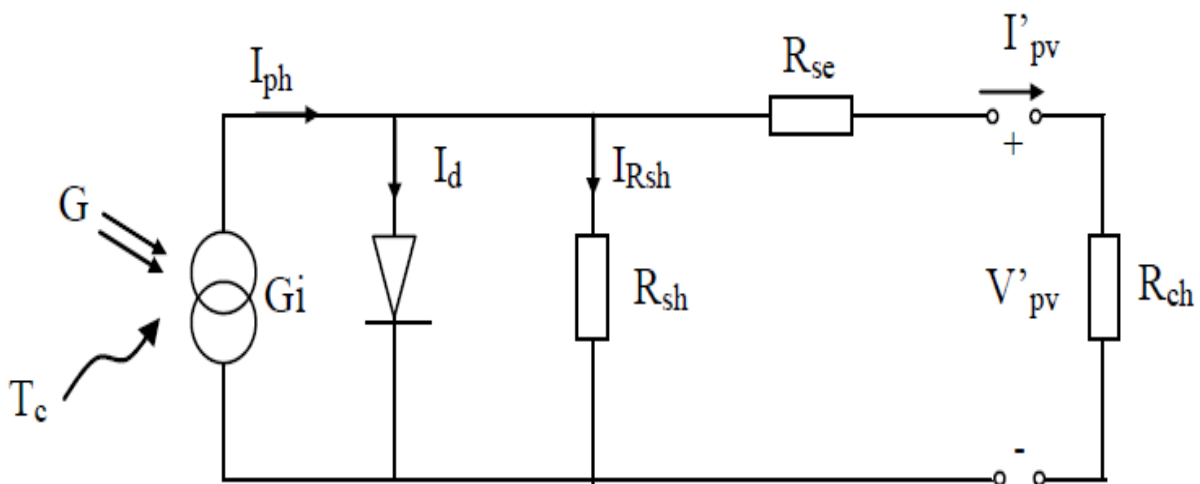


Figure 2.2: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque[19]

Avec :

Gi : Source de courant parfaite.

Rsh(R_s): Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

Rse : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contact)

D : Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens.

Rch : Résistance (charge) qui impose le point de fonctionnement sur la cellule en fonction de sa caractéristique courant-tension à l'éclairement considéré. [19]

L'équation de la courbe I-V prenant en compte ces deux résistances s'écrit sous la forme suivante :

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{nkT} - 1 \right) \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

Avec :

I_{ph} : courant généré par l'éclairement.

n : coefficient d'idéalité de la diode

I_s : courant de saturation de la diode.

K : constante de Boltzmann ($k=5,625 \cdot 10^{-5}$ eV/K)

q : charge de l'électron

T : température de la cellule (K) [13]

2.5. Caractéristique $I = f(V)$:

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique $I(V)$. La figure 2.3 représente une caractéristique courant-tension $I(V)$ ainsi que la caractéristique puissance-tension $P(V)$ typique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN sous illumination. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètres physiques caractéristiques du composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{oc}) et le facteur de forme (FF) de la cellule solaire. [19]

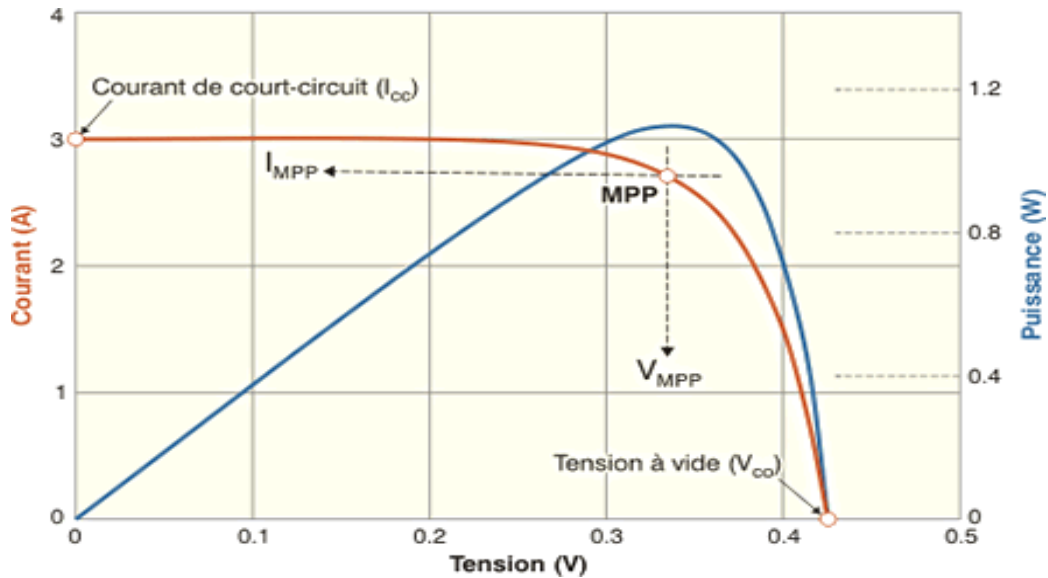


Figure 2.3: Caractéristique courant-tension I(V) (en trait rouge) et puissance (en trait bleu) d'une cellule solaire [20].

2.6. Les paramètres photovoltaïques :

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

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule, de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue. [19]

- Tension de circuit ouvert (V_{oc}) :

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

$$V_{oc} = \frac{kT_c}{q} \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (2.2)$$

Avec :

$\frac{kT_c}{q}$: le potentiel thermodynamique

T_c : la température absolue

q : la charge d'électron $1,602 \times 10^{-23} C$

k : la constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23} J/K$

I_{ph} : le courant photogénéré

I_s : le courant de saturation

- Le facteur de forme (FF) :

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour évaluer la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou Fill Factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} I_{cc}} = \frac{V_{max} I_{max}}{V_{oc} I_{cc}} \quad (2.3)$$

- Le rendement η :

Le rendement η des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente $P_{incident}$.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad (2.4)$$

Le rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

- **Le rendement quantique externe EQE :**

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Lorsque les photons perdus par réflexion (à la fenêtre de la cellule) et les photons perdus par transmission à travers toute l'épaisseur de la cellule (à cause de l'absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette grandeur s'appelle alors le rendement quantique interne, IQE (internal quantum efficiency). Dans le cas contraire, ce paramètre s'appelle le rendement quantique externe, EQE (external quantum efficiency).

Le rendement quantique externe est défini comme suit:

$$EQE(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \cdot \frac{E(\lambda)}{e} = \frac{I_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \cdot \frac{h \cdot c}{e \cdot \lambda} \quad (2.5)$$

Avec :

$\varphi(\lambda)$: est le flux lumineux incident

, e : la charge de l'électron

E : l'énergie du photon

h : la constante de Planck,

c : la vitesse de la lumière

λ : la longueur d'onde

- **La réponse spectrale $S(\lambda)$:**

Elle représente la sensibilité de la cellule pour chaque longueur d'onde. Elle est définie comme suit :

$$S(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \quad (\text{Ampère/Watt}) \quad (2.6)$$

On peut donc redéfinir le rendement quantique externe comme suit :

$$EQE(\lambda) = S(\lambda) \cdot \frac{h \cdot c}{e \cdot \lambda} \quad (2.7)$$

L'EQE est aussi désigné sous le terme d'IPCE (de l'expression anglaise Incident Photon to Current Efficiency). En remplaçant les trois constantes par leurs valeurs numériques, on obtient [19]

$$IPCE(\lambda) = 1,24 \frac{I_{CC}(\lambda)}{\varphi(\lambda) \cdot \lambda} \quad (2.8)$$

2.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons montré l'importance de la technologie des couches minces dans l'énergie solaire PV, compris la cellule CFTS, que nous avons présenté, décrit la structure et expliqué le rôle de chaque couche.

Nous avons également défini les paramètres PV d'une cellule solaire (le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, le facteur de forme, le rendement et la réponse spectrale.) à partir de la présentation de la caractéristique I (V).

Toutes ces informations seront nécessaires pour aborder le prochain chapitre, qui traitera de l'étude des paramètres photovoltaïques de la cellule CFTS en fonction de plusieurs paramètres (épaisseur, énergie de gap, dopage).

Chapitre 3

Résultats et discussions

3.1. Introduction :

La modélisation ou l'analyse numérique est l'utilisation d'un programme de simulation informatique qui utilise le modèle mathématique pour la mise en œuvre d'un système physique. C'est un outil essentiel pour une meilleure compréhension des paramètres de fonctionnement de tout dispositif. En peu de temps, sans mise en œuvre physique ou pratique, l'analyse numérique peut jouer un rôle important dans l'optimisation des dispositifs photovoltaïques fonctionnant à base de semi-conducteurs, pour les ingénieurs et les chercheurs.[1]

Nous avons choisi d'utiliser le logiciel SCAPS-1D pour réaliser les simulations de la cellule solaire CFTS. A l'aide de ce logiciel, nous pouvons obtenir les paramètres de sortie d'une cellule solaire tels que la tension en circuit-ouvert, la densité de courant de court-circuit, le facteur de forme et le rendement de conversion. Nous allons étudier dans ce chapitre l'influence des différents paramètres tels que la densité de dopage, l'énergie de gap et l'épaisseur de la couche absorbante sur la performance de la cellule étudiée afin d'améliorer son rendement de conversion et d'obtenir les meilleurs résultats.

3.2. Le logiciel de simulation SCAPS-1D :

SCAPS est un logiciel de simulation unidimensionnel pour les cellules solaires développées par le département des systèmes électronique et informatique (ELIS) de l'Université de Gent, Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué à son développement : Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Alex Niemegeers, Stefaan Degrave [21].

Le logiciel est disponible gratuitement pour la communauté de recherches photovoltaïques (établissements et Instituts de recherche). Il fonctionne sur PC sous Windows 95, 98 , NT, 2000 , XP , Vista , Windows 7, Windows 10, et occupe environ 50 Mo d'espace disque. Le

logiciel peut être téléchargé gratuitement. Il faut faire une demande auprès de Marc Burgelman afin de télécharger une version de SCAPS (Le nom du demandeur, le nom et l'adresse de l'institution, et le nom du promoteur pour les doctorants). [21]

3.2.1. Utilisation du logiciel :

Après avoir cliqué sur l'icône qui représente le logiciel, la fenêtre (Figure 3.1) que l'on appelle le panneau d'actions apparaît. Il y a des panneaux dédiés pour les actions de base :

- 1 → Les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifie le point de fonctionnement).
- 2 → La mesure (la caractéristique) à simuler.
- 3 → Le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.
- 4 → Commencer le calcul
- 5 → Afficher les résultats de simulation

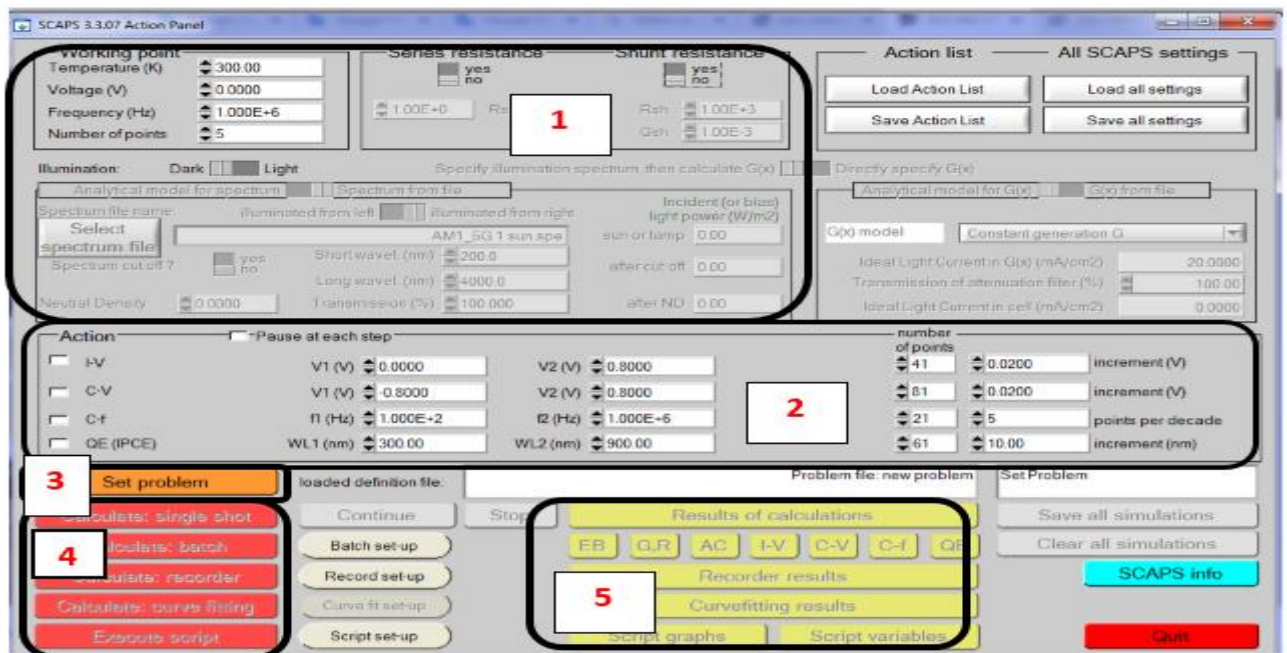


Figure 3.1 : Interface du panneau de démarrage du simulateur SCAPS-1D

Étape 1 : Ajuster les réglages (température, éclairage, ...), et choisir la mesure à simuler (I-V , QE (PCE) ,C-V ,.....) , Puis cliquer sur le bouton **SET PROBLEM**. Une nouvelle fenêtre apparaît (Figure 3.2).

Étape 2 : Choisir **LOAD** dans le coin droit en bas du panneau (Figure 3.2). Sélectionner et ouvrir un fichier (par exemple CFTS.def. Ceci est un fichier exemple d'une cellule solaire.

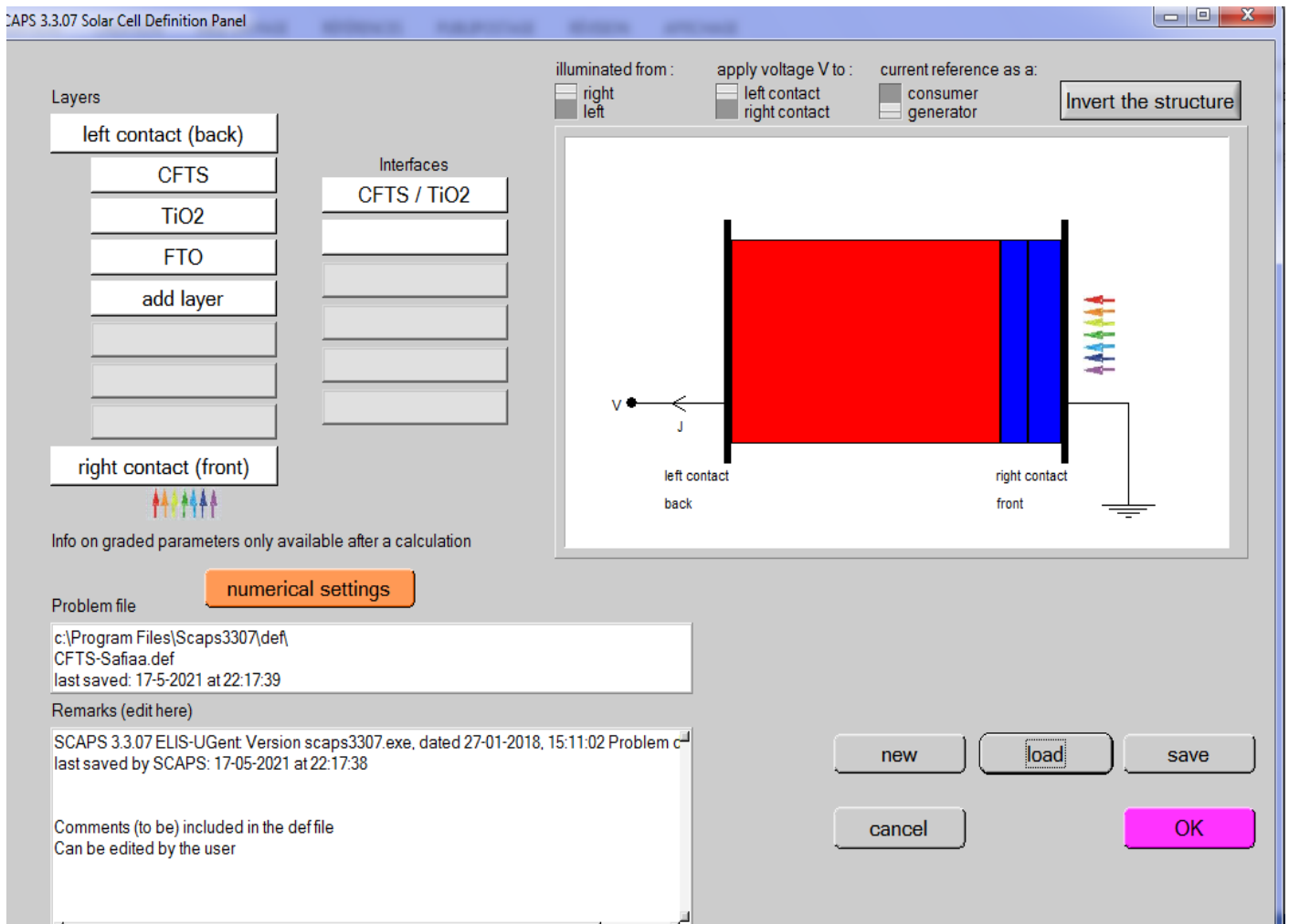


Figure 3.2 : Interface de définition du dispositif

Étape 3 : Les paramètres de chaque couche peuvent être saisis et modifiés comme indiqué sur la Figure 3.3

Étape 4 : Retour à la première interface (Figure 3.1) et exécuter la simulation en cliquant sur le bouton « Calculate ».

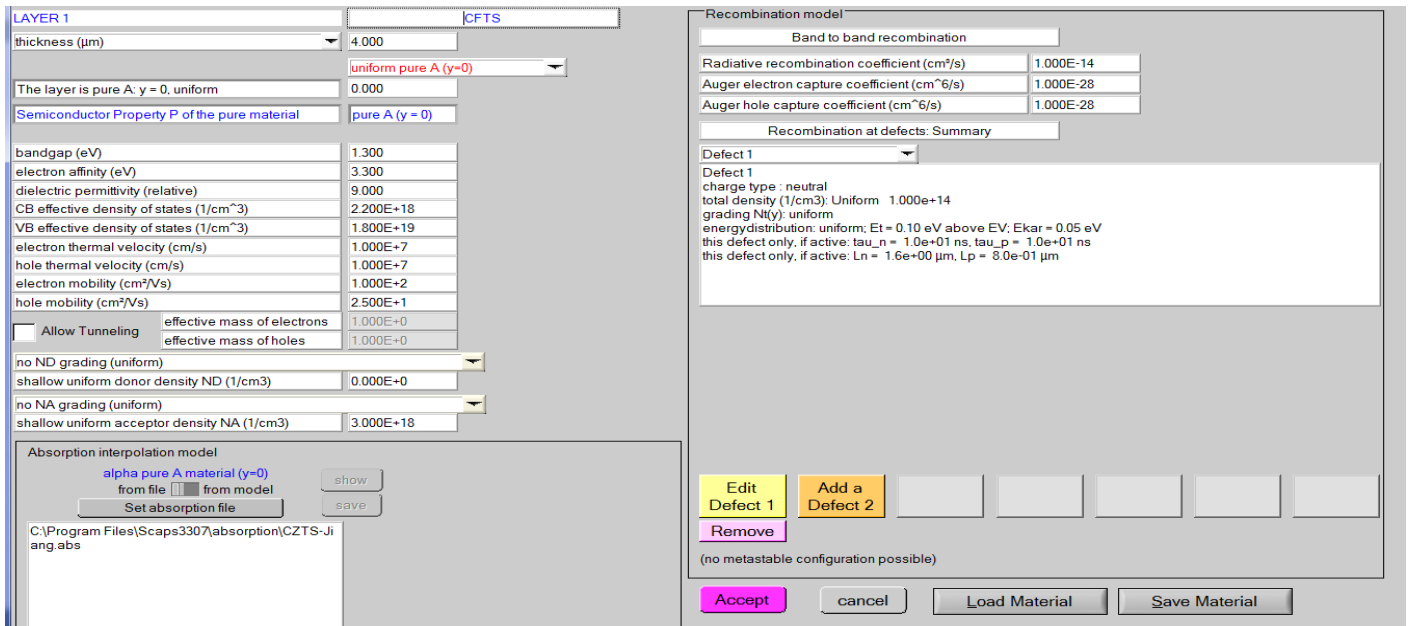


Figure 3.3 : Interface des paramètres de la couche.

Étape 5 : appuyer sur le bouton I -V, et les résultats de la performance de la cellule solaire sont affichés. A travers la courbe J-V, les valeurs peuvent être enregistrées comme les valeurs de J_{sc} , V_{oc} et FF, et le rendement. (Figure 3.4)

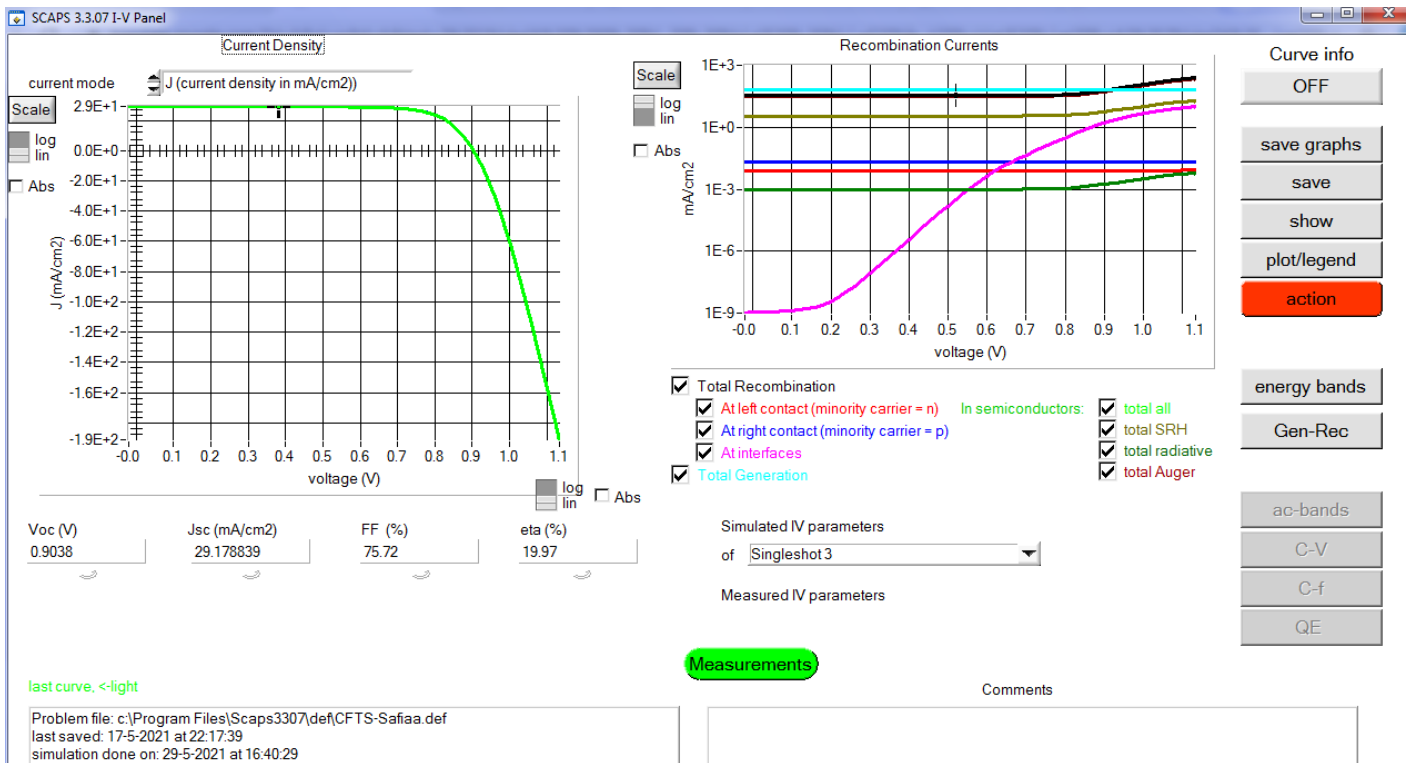


Figure 3.4 : Interface des résultats du logiciel SCAPS-1D

3.3. Présentation de la cellule étudiée CFTS/TiO₂/FTO :

La figure 3.5 montre la structure de la cellule photovoltaïque FTO / TiO₂ / CFTS / Mo, qui est composée de la couche de contact arrière Mo avec un travail de sortie de 4.9 eV, de la couche d'absorption CFTS (Cu₂FeSnS₄), de la couche de transport d'électrons TiO₂ (Dioxyde de Titane) et de la couche fenêtre FTO (Oxyde d'étain SnO₂ dopé au Fluor). Nous avons introduit les paramètres de chaque couche dans le programme SCAPS, puis nous avons étudié l'effet de la densité de dopage, de l'énergie de gap et de l'épaisseur de la couche absorbante CFTS sur les performances de la cellule photovoltaïque, c'est-à-dire que nous avons optimisé la couche d'absorption pour obtenir le meilleur rendement en puissance η (%)

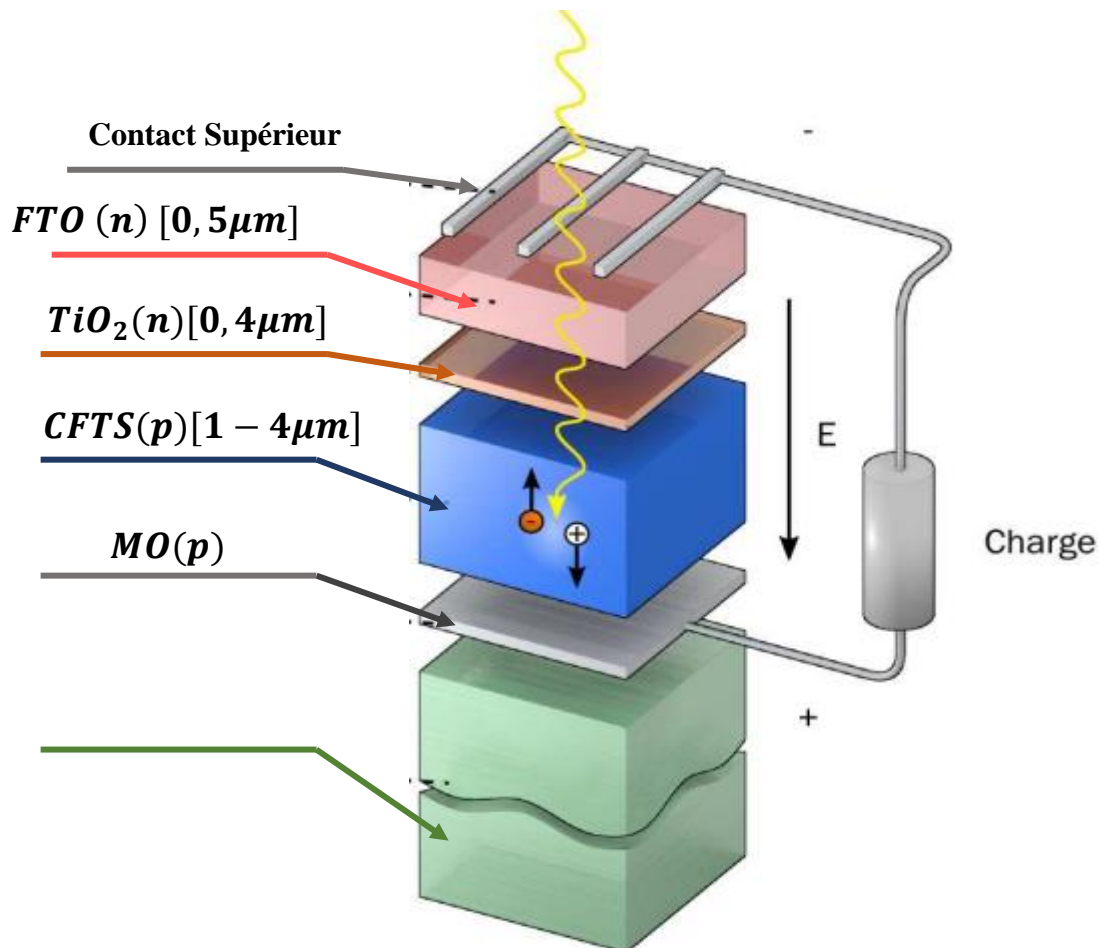


Figure 3.5 : Structure de la cellule solaire à base CFTS

Les paramètres nécessaires à la simulation de la cellule solaire standard CFTS sont résumés dans le tableau 3.1

Paramètres	p-CFTS	n-TiO2	n-FTO
Epaisseur (μm)	4	0.4	0.5
Energie de gap (eV)	1.3	3.2	3.5
Affinité électronique (eV)	3.3	3.86	4
Permittivité diélectrique	9	9	9
Densité des états effective dans la BC (cm^{-3})	2.2×10^{18}	1.8×10^{19}	1×10^{19}
Densité des états effective dans la BV (cm^{-3})	1.8×10^{19}	2.4×10^{18}	1×10^{18}
Mobilité des électrons (cm^2/Vs)	100	100	20
Mobilité des trous (cm^2/Vs)	25	25	10
Densité du donneur ND (cm^{-3})	00	1×10^{15}	1×10^{18}
Densité de l'accepteur NA (cm^{-3})	3×10^{18}	00	00

Tableau 3.1 : Paramètres de la cellule étudiée. [1]

3.4. Optimisation de la couche absorbante CFTS :

3.4.1. Effet de l'épaisseur de l'absorbeur sur la performance de la cellule :

Nous avons fait varier l'épaisseur de $0,1 \mu\text{m}$ à $10 \mu\text{m}$, tandis que les autres paramètres ont été maintenus constants. Le tableau 3.2 montre les différents effets de cette variation de l'épaisseur sur les paramètres de performance de la cellule qui sont : la densité de courant de

court-circuit (J_{SC}), la tension de circuit-ouvert (V_{OC}), le facteur de forme (FF) et le rendement (η).

Epaisseur (μm)	VOC (V)	JSC (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
0,1	0,8831	13,17	77,17	8,98
0,2	0,8935	19,57	76,70	13,42
0,3	0,8977	22,97	76,36	15,75
0,4	0,8998	24,93	76,16	17,09
0,5	0,9010	26,15	76,03	17,92
1	0,9031	28,41	75,80	19,45
2	0,9037	29,08	75,73	19,90
3	0,9037	29,15	75,72	19,95
4	0,9038	29,17	75,72	19,97
5	0,9038	29,19	75,72	19,98
10	0,9038	29,24	75,71	20,01

Tableau 3.2 : Paramètres PV pour différentes épaisseurs de la couche absorbante CFTS.

En utilisant le logiciel OriginPro 8.5, nous avons tracé la variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur. Les graphes obtenus sont représentés sur la figure 3.6.

Interprétation des résultats :

L'effet de l'épaisseur de la couche absorbante CFTS a été analysé en la faisant varier de 1 μm à 10 μm , tandis que tous les autres paramètres des matériaux de différentes couches étaient maintenus constants. Avec l'augmentation de l'épaisseur de l'absorbeur, le courant de court-circuit (J_{SC}), la tension en circuit ouvert (V_{oc}) et l'efficacité (η) augmentent considérablement puis se stabilisent à partir d'une épaisseur de 4 μm . Le facteur de forme

commence à diminuer puis se stabilise également autour de 75.72% à partir de 3 μm d'épaisseur. L'augmentation des trois paramètres photovoltaïques est principalement due à une plus grande absorption des photons qui induit une forte génération des porteurs photogénérés. La valeur optimale pour l'épaisseur de l'absorbeur est fixée à 4 μm avec un rendement de **19,97%**.

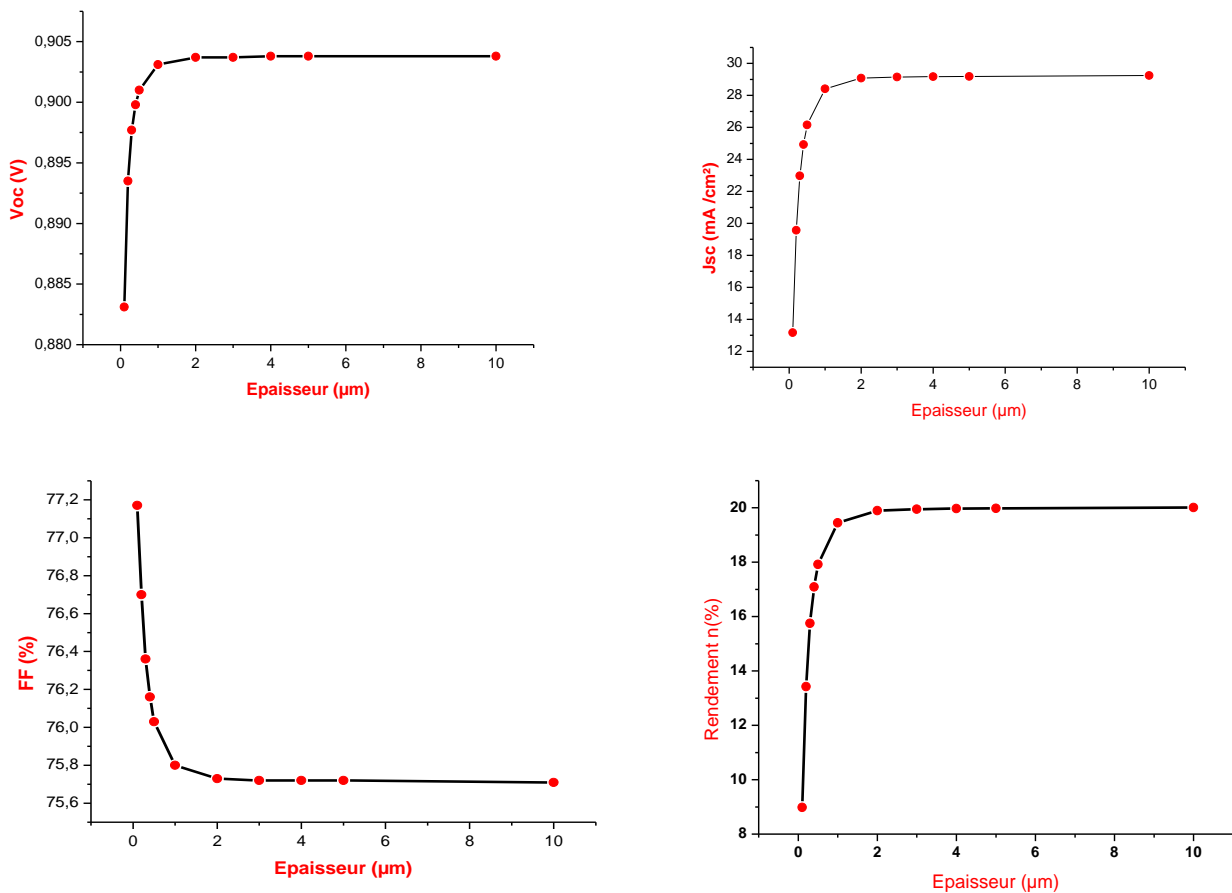


Figure 3.6: Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de la couche absorbante CFTS .

Nous avons tracé sur la figure 3.7 le taux de recombinaison dans la cellule pour deux valeurs de l'épaisseur (0.1 μm et 4 μm). Nous remarquons qu'avec l'accroissement de l'épaisseur de l'absorbeur, le taux de recombinaisons au niveau de l'interface Mo/CFTS est très fortement réduit, ce qui engendre l'amélioration des paramètres PV.

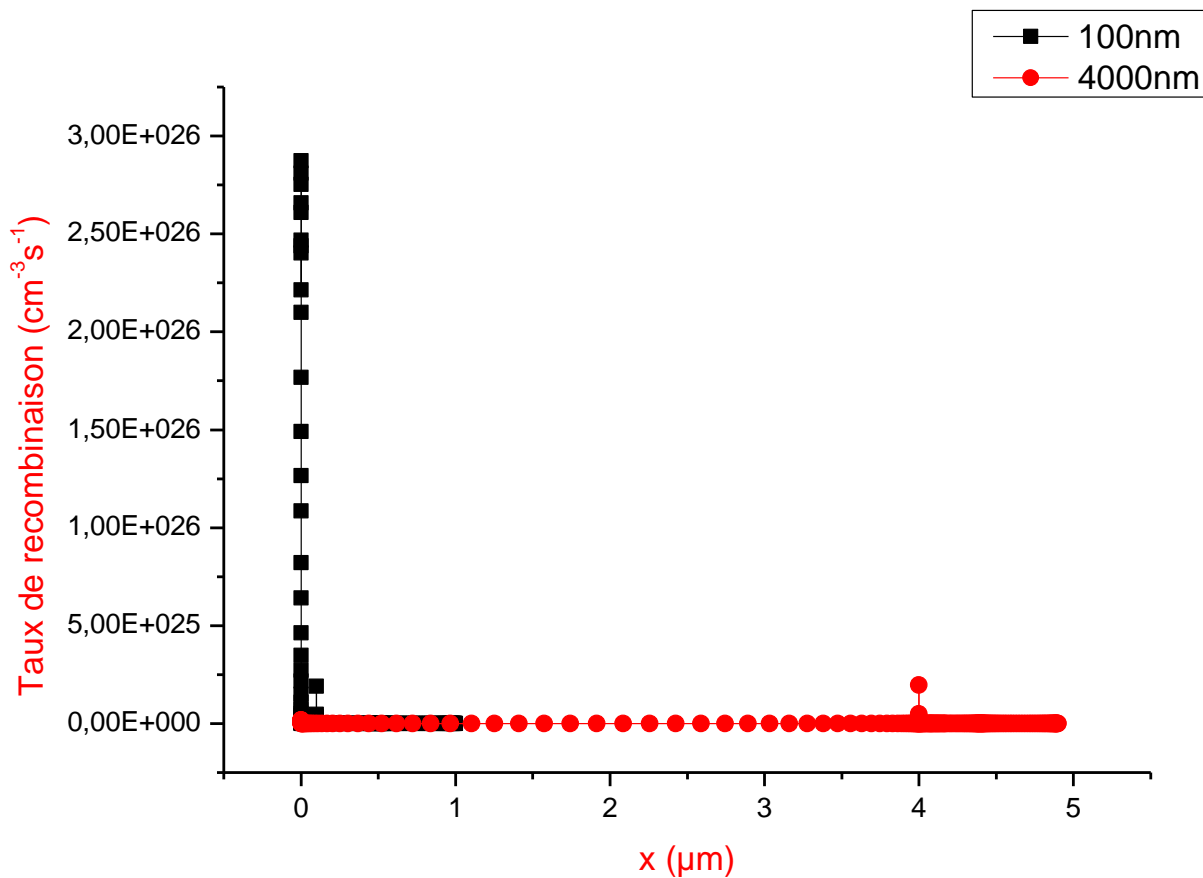


Figure 3.7: Influence de l'épaisseur de l'absorbeur CFTS sur le taux de recombinaison.

Nous avons tracé sur la figure 3.8 le rendement quantique externe pour deux épaisseurs de l'absorbeur CFTS ($0,1 \mu\text{m}$ et $4 \mu\text{m}$) et nous pouvons constater clairement que lorsque l'épaisseur augmente, le rendement quantique est amélioré et atteint 80% entre les longueurs d'onde 390 nm et 600 nm pour $4 \mu\text{m}$ d'épaisseur.

A noter également qu'au-delà de $4 \mu\text{m}$ d'épaisseur, le rendement quantique ne s'améliore pas, c'est pour cette raison que les paramètres PV tracés sur la figure 3.6, se stabilisent pour des valeurs de l'épaisseur supérieures à $4 \mu\text{m}$. Il n'est donc pas nécessaire de produire des cellules solaires CFTS avec une épaisseur de l'absorbeur supérieure à $4 \mu\text{m}$ pour améliorer l'absorption.

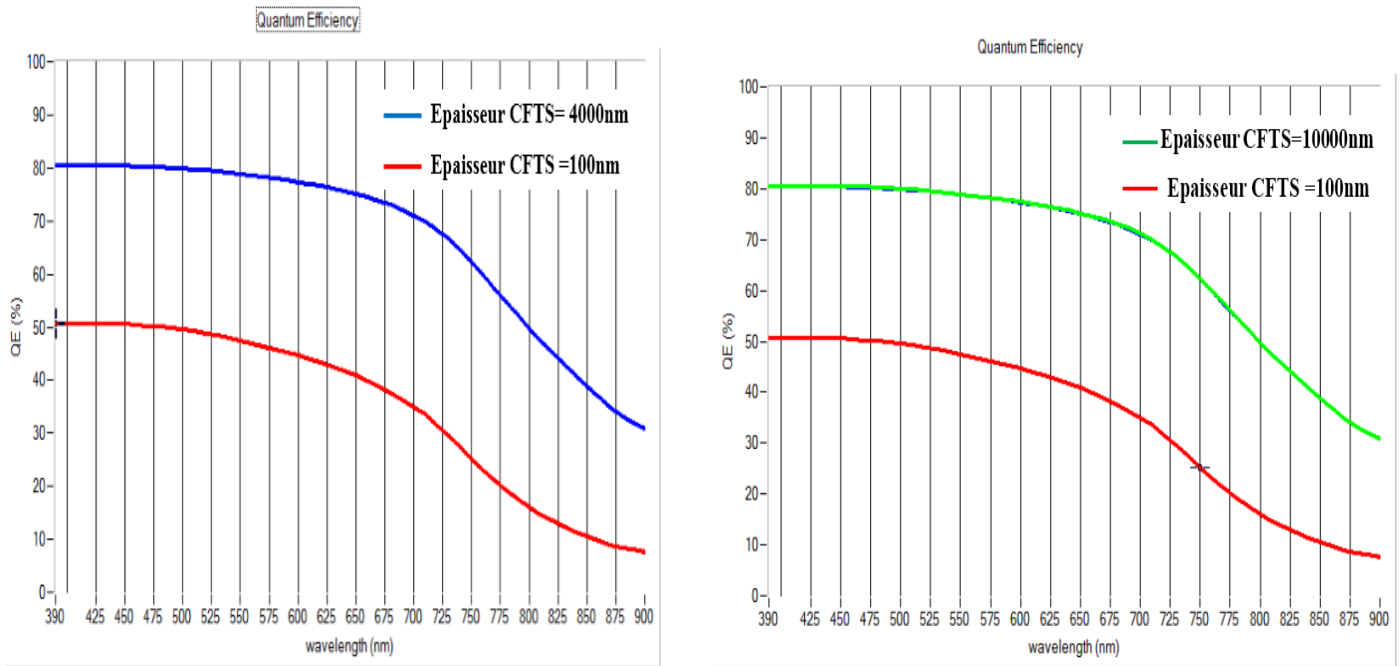


Figure 3.8: Rendement quantique externe pour plusieurs épaisseurs de l'absorbeur CFTS

3.4.2. Effet de la densité de dopage NA de l'absorbeur sur la performance de la cellule :

Pour étudier l'effet de la densité de dopage de la couche absorbante CFTS sur les performances de la cellule, nous fixons l'épaisseur de la même couche à la valeur optimale trouvée précédemment (4 μm), et nous modifions la densité de dopage N_A de 3×10^{18} à 10^{19} cm^{-3} . Nous résumons les résultats obtenus dans le tableau 3.3, puis traçons la variation des paramètres PV en fonction de la densité de dopage (Figure 3.9)

NA (cm ⁻³)	VOC (V)	JSC (mA /cm ²)	FF (%)	η (%)
3,00E+18	0,903	29,17	75,72	19,97
5,00E+18	0,898	23,52	76,28	16,13
7,00E+18	0,894	19,92	76,60	13 ,65
9,00E+18	0 ,890	17,35	76,80	11,88
1,00E+19	0 ,889	16,32	76,87	11,16

Tableau 3. 3: Paramètres PV pour différents dopages NA de l'absorbeur CFTS

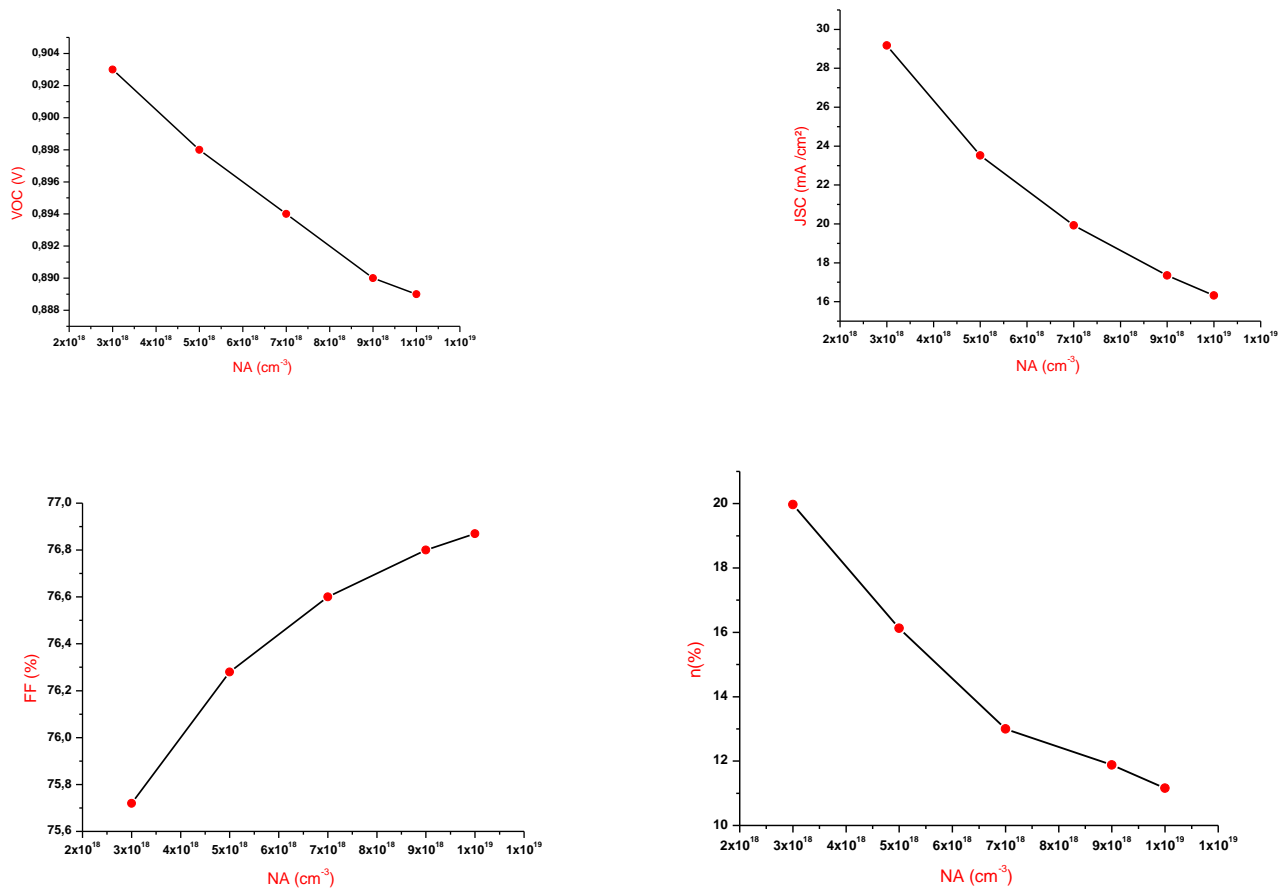


Figure 3.9: Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de la densité de dopage de la couche absorbante CFTS.

Interprétation des résultats :

Nous pouvons observer à partir de la figure 3.9 qu’il y a une diminution de la tension V_{OC} , de la densité de courant J_{SC} . Pour expliquer cela, nous avons tracé sur la figure 3.10 la variation du champ électrique dans le dispositif pour deux valeurs de densité de dopage (10^{18} cm^{-3} et 10^{19} cm^{-3}) et nous remarquons que le champ électrique est plus important lorsque la densité de dopage augmente, ce qui est en accord avec l’équation (1.9) démontrée dans le chapitre 1. Malgré l’augmentation du champ électrique cela n’est pas suffisant pour améliorer la performance de la cellule. En effet, comme nous pouvons le voir sur la figure 3.11, l’augmentation du dopage induit un fort taux de recombinaison. Donc, puisque les porteurs photogénérés se recombinent massivement, la probabilité de les collecter diminue, c’est pour

cette raison que le J_{SC} décroît de $29,17 \text{ mA/cm}^2$ à $16,32 \text{ mA/cm}^2$ lorsque la densité de dopage passe de 3×10^{18} à 10^{19} cm^{-3} , engendrant ainsi une forte diminution du rendement, qui passe de 19,97% à 11,16%

Donc la valeur optimale de la densité de dopage est $N_A = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ afin d'obtenir un bon rendement de 19,97%.

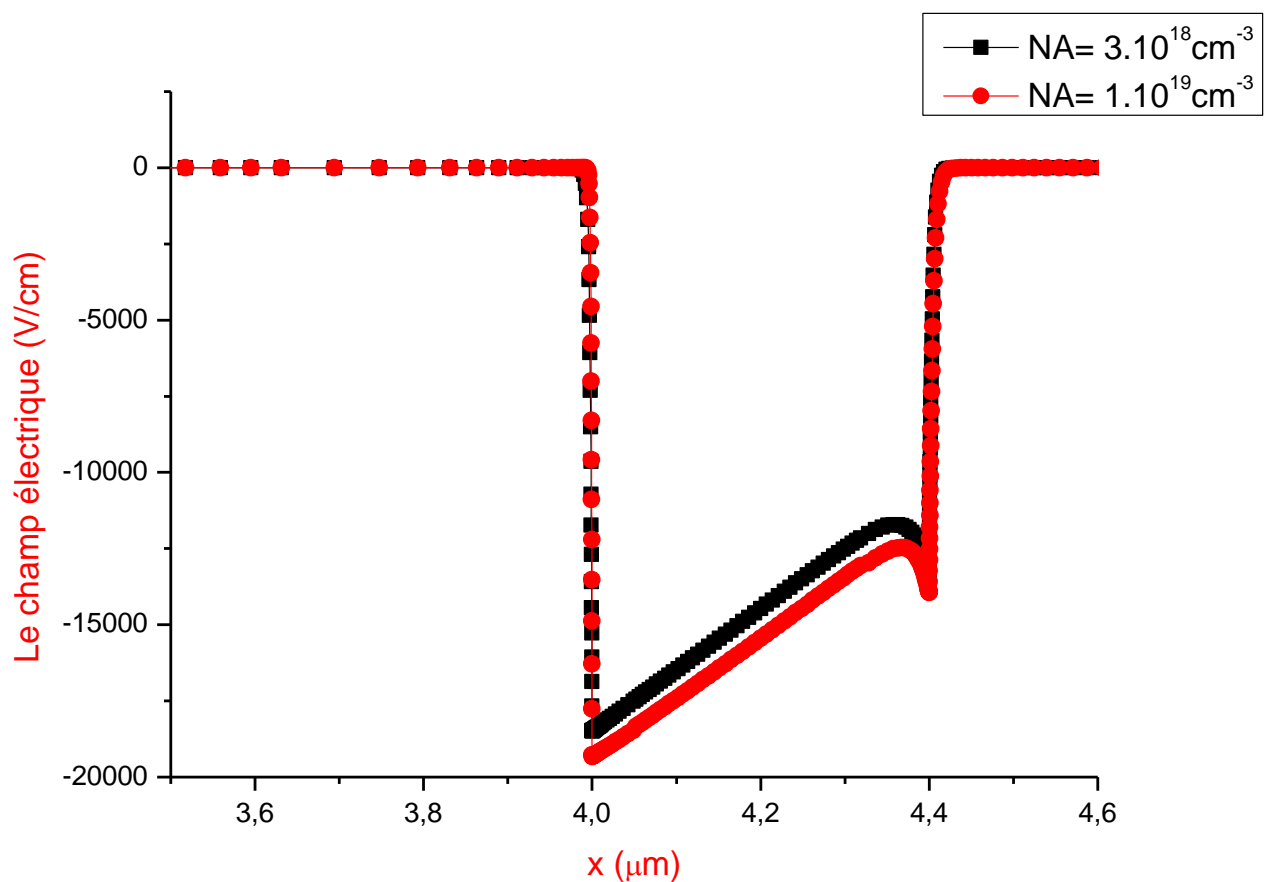


Figure 3.10 : Influence de la densité de dopage de l'absorbeur sur le champ électrique

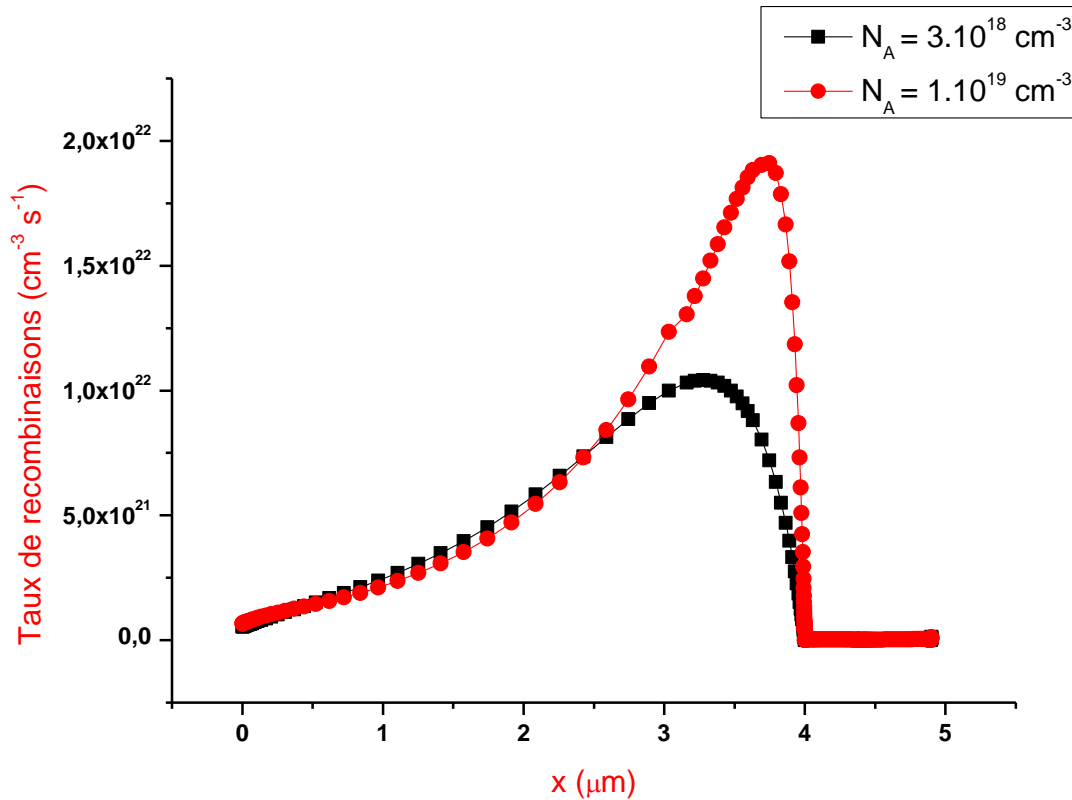


Figure 3.11 : Influence de densité de dopage sur le taux de recombinaison

3.4.3.Effet du gap de l’absorbeur sur la performance de la cellule :

Afin d'étudier l'effet de l'énergie de gap de la couche absorbante CFTS sur la performance de la cellule, nous avons fixé l'épaisseur à 4 μm et densité de dopage à 3 × 10¹⁸ cm⁻³ (valeurs optimales) et nous modifions l'énergie de gap de 1,3 à 1,5 eV [1]. Nous avons obtenu les résultats enregistrés dans le tableau ci-dessous (tableau 3. 4) et tracé la variation des paramètres photovoltaïques en fonction du gap. (Figure 3.12).

Eg (eV)	VOC (V)	JSC (mA /cm²)	FF (%)	η (%)
1,3	0,9038	29 ,17	75,72	19,97
1,34	0,94	29,19	76,37	21,04
1,38	0,98	29,20	76,97	22,11
1,42	1,02	.,21	77,54	23,19
1,46	1,06	29,22	78,07	24 ,27
1,5	1,17	29,23	78,57	25,35

Tableau 3.4 : Paramètres PV pour différentes énergie de gap de l’absorbeur CFTS

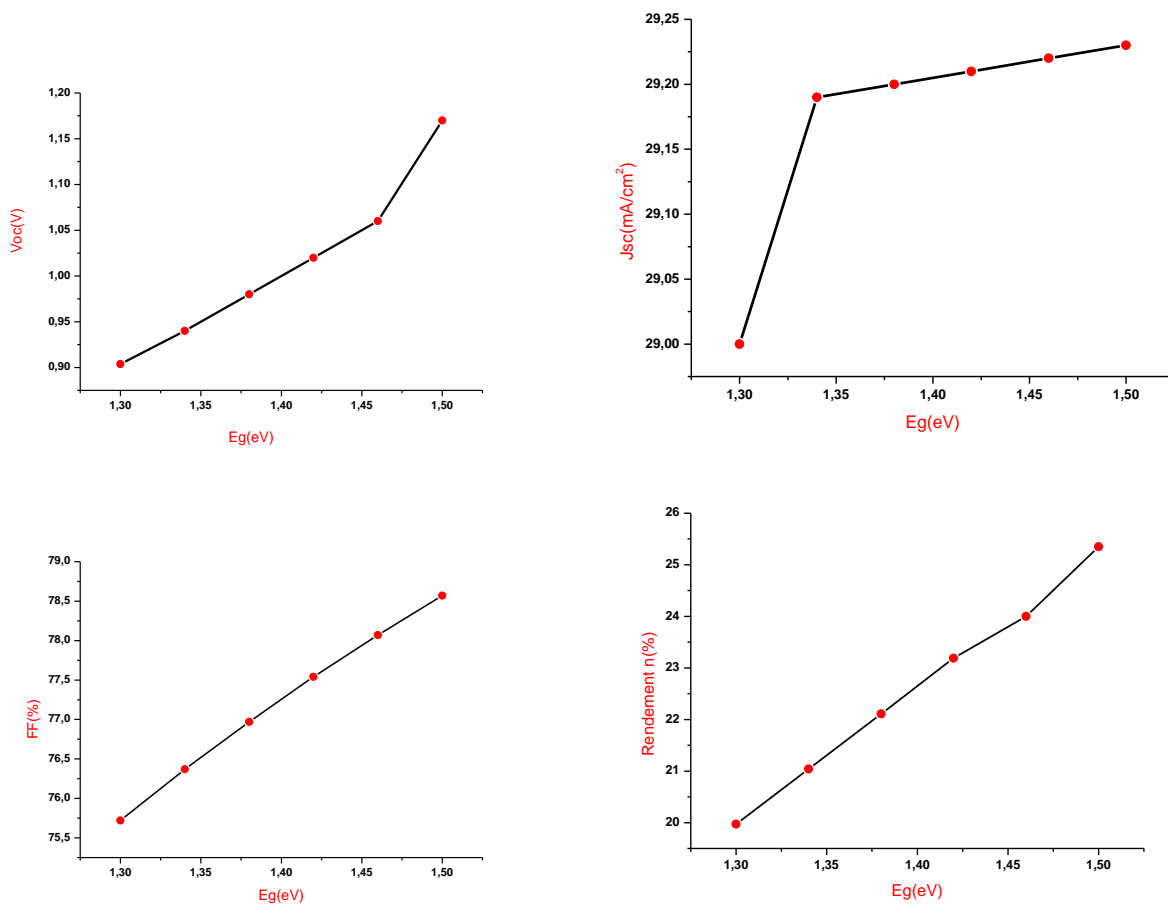


Figure 3.12: Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'énergie de gap de la couche absorbante CFTS.

Interprétation des résultats :

Nous pouvons constater à partir des graphes que lorsque nous augmentons l'énergie du gap de l'émetteur de 1.3 eV à 1.5 eV, la tension en circuit ouvert V_{OC} , la densité de courant de court-circuit ainsi sur le Facteur de Forme augmentent induisant une augmentation du rendement de puissance qui passe de 19,97% pour un gap de 1.3 eV à 25,35% pour un gap de 1.5 eV.

Pour expliquer cela, nous avons tracer la variation du champ électrique au niveau du dispositif pour deux valeurs de gap différentes sur la figure 3.13. Nous remarquons clairement que lorsque la valeur du gap augmente, le champ électrique augmente également, ce qui est

bénéfique pour la cellule puisque les porteurs de charge photogénérés seront plus fortement séparés et ainsi collectés par les contacts avant et arrière de la cellule

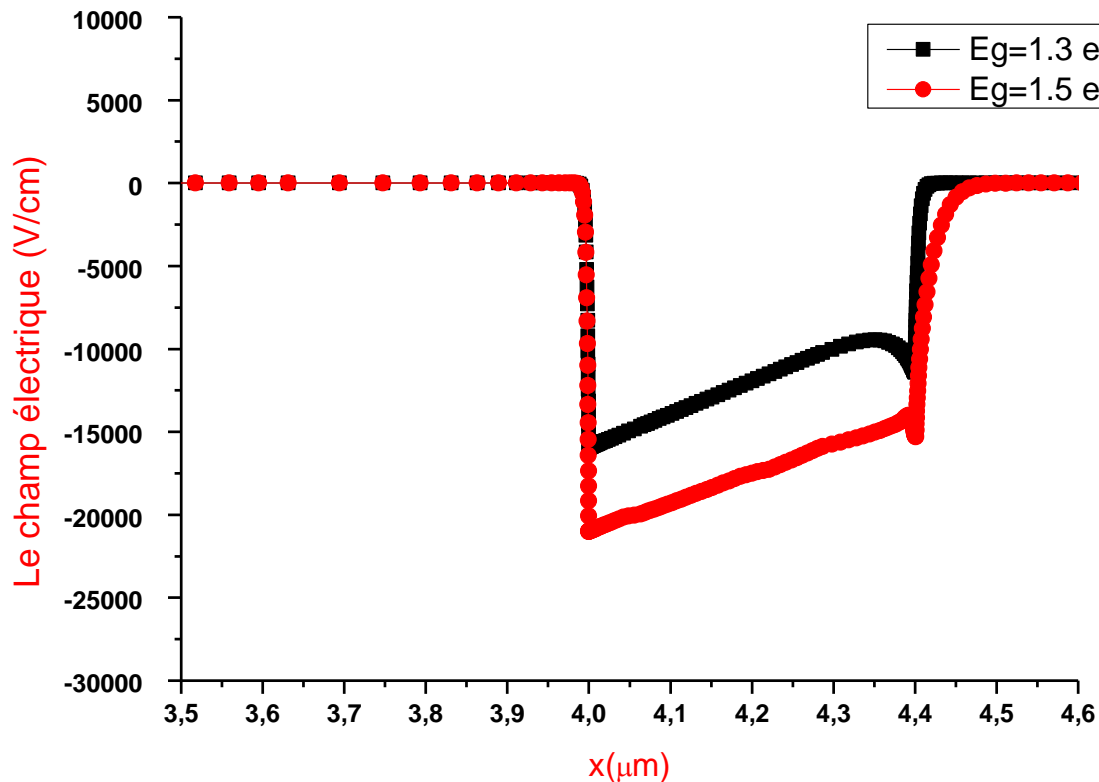


Figure 3.13: Influence de la variation de l'énergie de gap sur le champ électrique

Nous avons également tracé, sur la figure 3.14, le diagramme de bande d'énergie du dispositif étudié pour deux valeurs de l'énergie du gap (1.3 eV et 1.5 eV)

Nous remarquons que lorsque le gap est élevé (1.5 eV) le diagramme de bande est décalé vers le haut, et la barrière de potentiel au niveau du contact avant au niveau de la bande de conduction est moins importante. Nous avons zoomé cette partie du graphe pour mieux visualiser la diminution de la barrière de potentiel lorsque le gap passe de 1.3 eV à 1.5 eV. Figure 3.14

Donc la valeur optimale de l'énergie de gap est $E_g = 1.5 \text{ eV}$ afin d'obtenir un bon rendement de 25,35%.

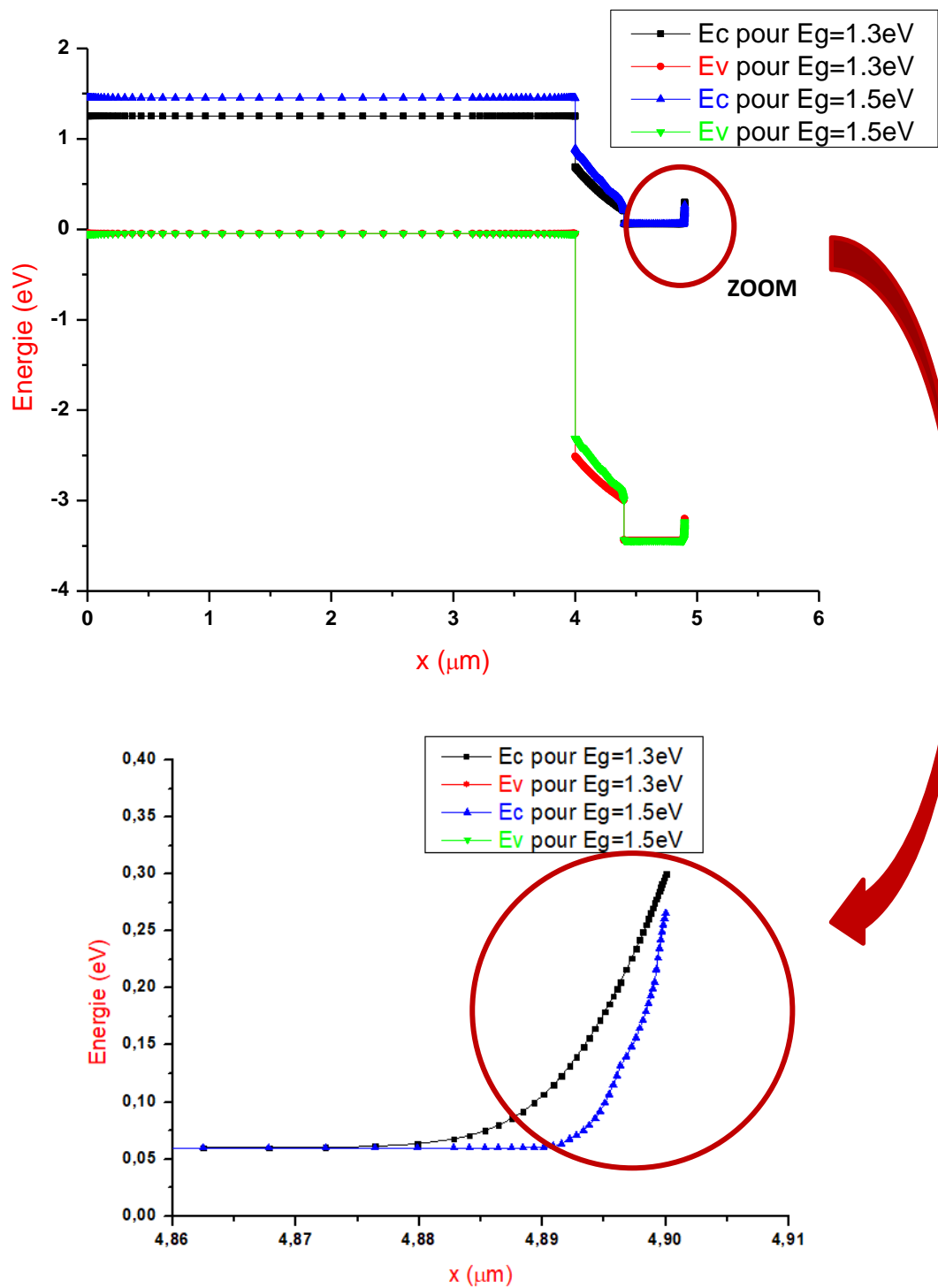


Figure 3.14: Influence de la variation de l'énergie de gap sur les bandes d'énergie

3.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'impact de la couche absorbante CFTS, afin de trouver les paramètres optimaux. Nous avons simulé les paramètres de sortie d'une cellule

solaire ayant la structure FTO / TiO₂ / CFTS / Mo. Nous avons étudié l'effet de l'épaisseur, de l'énergie de gap et de la densité de dopage de la couche CFTS sur la tension en circuit ouvert V_{OC} , le Facteur de Forme FF, la densité de courant de court-circuit J_{SC} et le rendement de conversion.

Nous avons constaté que l'augmentation des deux paramètres, épaisseur et énergie de gap, est bénéfique pour l'amélioration du rendement de conversion électrique, cependant l'augmentation de la densité de dopage a affecté négativement l'efficacité de la conversion électrique (baisse du rendement), et cela est dû à l'augmentation du taux de recombinaison.

Nous pouvons conclure que les caractéristiques optimales de la couche active (absorbeur) de la cellule solaire CFTS sont les suivantes :

$$\text{Epaisseur} = 4\mu\text{m} \quad , \quad N_A = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} \quad , \quad E_g = 1.5 \text{ eV}$$

Ce qui nous donne un rendement maximal pour la cellule solaire $\eta = 25,35\%$.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, une modélisation numérique a été réalisée pour estimer et analyser les paramètres optimaux d'une cellule photovoltaïque à couche mince CFTS, caractérisé par la structure FTO / TiO₂ / CFTS / Mo, ceci par l'optimisation de la couche absorbante qui se compose du matériau quaternaire CFTS à base de Cuivre-fer-Etain-Soufre (Cu₂FeSnS₄) et ainsi l'amélioration des performances de la cellule. Nous avons utilisé le logiciel SCAPS-1D pour réaliser nos simulations.

Nous avons divisé notre travail en trois chapitres complémentaires qui nous ont permis d'aller à l'essentiel pour comprendre et expliquer notre thème : Les deux premiers chapitres sont théoriques : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques et les cellules solaires à couches minces (CFTS), et le dernier chapitre concerne la simulation de la cellule solaire CFTS et l'interprétation des résultats obtenus.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque à savoir : le rayonnement et le spectre solaire, puis la notion d'air masse AM qui tient compte de la position relative du soleil. Nous avons ensuite décrit le principe de fonctionnement d'une cellule solaire à travers l'explication de la formation d'une jonction PN, et les équations de base des semi-conducteurs. Nous avons clôturé ce chapitre en répertoriant les différentes filières photovoltaïques qui sont réparties en quatre grandes familles : le silicium cristallin, les couches minces, les matériaux organiques et hybrides.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les cellules CFTS en expliquant en détail le rôle de chaque couche les constituant. Nous avons ensuite abordé le modèle équivalent à une cellule photovoltaïque, nous avons expliqué la caractéristique courant-tension I(V) d'une cellule solaire sous illumination et comment nous pouvons en déduire les paramètres PV.

Dans le dernier chapitre, nous avons décrit brièvement l'utilisation du logiciel SCAPS-1D. Nous avons par la suite présenté tous les paramètres de la cellule étudiée FTO/TiO₂/CFTS/Mo. Nous avons fait varier quelques paramètres essentiels de la couche absorbante (l'épaisseur, la densité de dopage, l'énergie de gap) pour voir leur influence sur la caractéristique J(V) de la cellule et par conséquent sur les paramètres PV qui sont la densité de courant de court-circuit J_{SC}, la tension en circuit-ouvert V_{OC}, le facteur de forme FF et le rendement énergétique η .

Pour réaliser nos simulations, nous avons travaillé sous les conditions de test standards STC, sous un éclairage AM1.5G avec une puissance de 1000 W/m² et à une température de 300 K.

Afin d'expliquer l'impact de chaque paramètre étudié ainsi que phénomènes électrique et optiques qui rentrent en jeu, nous avons tracé à chaque étape d'optimisation la variation du champ électrique, du taux de recombinaisons, et du rendement quantique externe.

Enfin, nous avons atteint un certain nombre de points importants sur l'optimisation de cette cellule :

- L'augmentation de l'épaisseur de la couche active CFTS améliore considérablement l'efficacité de la cellule jusqu'à une valeur d'épaisseur de 4 μm . Avec cette valeur d'épaisseur, la cellule est peu sensible à l'augmentation d'épaisseur car le rendement quantique est maximal.
- Lorsque la valeur du gap de l'absorbeur augmente, le champ électrique augmente également, ce qui influe positivement sur le rendement de conversion de la cellule.
- Lors de l'accroissement de densité de dopage de la couche absorbante, le rendement de conversion diminue malgré l'augmentation du champ électrique, cela est dû à l'augmentation du taux de recombinaison, ce qui affecte négativement les performances de la cellule.

Grâce à ce travail, des résultats optimisés prometteurs ont été obtenus, avec un rendement en puissance de 25.35% pour une épaisseur de l'absorbeur de 4 μm , une densité de dopage $N_A = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et une énergie de gap $E_g = 1.5 \text{ eV}$. Ces valeurs proposées

fourniront une ligne directrice précieuse pour la conception de cellules solaires à haut rendement.

Comme perspective, il serait nécessaire d'optimiser la couche d'Oxyde Transparent Conducteur (TCO) à base de FTO afin d'améliorer encore plus le rendement de la cellule étudiée. Cette couche établie une jonction NN^+ avec la couche TiO_2 qu'il faudrait améliorer pour avoir une meilleure collecte des porteurs photogénérés.

Il serait également intéressant de trouver une autre alternative à l'élaboration de la couche tampon TiO_2 et de choisir un autre matériau à haute efficacité comme $[ZnS/Zn(O,S)]$. Les résultats aideront grandement les ingénieurs et les chercheurs à trouver un moyen d'optimiser les performances des cellules solaires dans le futur.

Bibliographie

- [1] Y.H. Khattak, « Modeling of High Power Conversion Efficiency Thin Film Solar Cells », Thèse de doctorat , Universitat Politècnica de València, **2019**.
- [2] http://www.infoenergie.eu/riv+ener/LCU_fichiers/ESR-energie-solaire.pdf consulté le 03/04/2021
- [3] S. Belaid Lalouni, « Energie Solaire Photovoltaïque », polycopié de cours, Université A. Mira de Bejaia, Faculté de Technologie, 2014/2015.
- [4]<http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/468/3/LegisementsolairechapitreII.pdf> consulté le 03/04/2021.
- [5] <https://www.optique-sergent.com/conseils/dangers-du-soleil.html>, consulté le 5/04/2021
- [6]https://www.researchgate.net/figure/Definition-du-nombre-dair-masse-AM-et-spectre-demission-du-rayonnement-solaire_fig5_278768476 consulté le 03/04/2021.
- [7] C. Olivier, « Les Cellules Photovoltaïques Hybrides à Colorant », 9èmes Rencontres Régionales des Électroniciens et Instrumentalistes, Institut des Sciences Moléculaires, Université de Bordeaux, 2012.
- [8] A.H. SOUICI, « Physique des Semi-conducteurs », polycopié de cours, Faculté des Sciences Exactes, Université de Béjaia, 2013/2014.
- [9] http://public.iutenligne.net/chimie/valls/chimie-du-solide/propri_semiconducteurs_2.htm consulté le 05.04.2021.
- [10] Z. El Jouad, « Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques ». Thèse de doctorat en Physique, Université d'Angers, 2016.
- [11] Z. CHIBI, « Effet du refroidissement sur les performances des panneaux PV », Mémoire de Master, Université de Tlemcen, Faculté de technologie, département de génie mécanique.
- [12] https://www.photovoltaique.info/fr/Réaliser_une_installation/Choix_du_matériel/Les_panneaux_photovoltaiques/Current:Technologies_de_cellules_solaires_photovoltaiques Consulté le 10/04/2021
- [13] W. Henni, « Etude et optimisation par simulation des cellules solaires CZTS », Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique, Département de Physique, juin 2020.
- [14] S.Bakhti, M.Melouah, « Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah de Ouargla, 2016.

- [15] A. Laghouag, H. Bencheikh, « Etude et simulation d'une cellule solaire à base des éléments chalcogènes », Université de M'Sila (Algérie), Mémoire de Master, 2019.
- [16] https://i0.wp.com/mrmondialisation.org/wpcontent/uploads/2016/03/infinityPVfoil_DS_C05074.jpg consulté le 08/04/2021.
- [17] S. Guitouni, « Elaboration et étude de structures à base de couches minces de ZnO et de chalcogénures (CIS, CZTS) pour des applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université des frères Mentouri–constantine1, faculté des sciences exactes, département de physique, 2017.
- [18] R. Fillon, « Etude des propriétés électroniques de couches minces de CZTSSe », Thèse de Doctorat, Université de Savoie, 2016
- [19] K. Helali, « Modélisation d'une Cellule Photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, faculté de génie électrique et d'informatique, département d'électrotechnique, 2012.
- [20] <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaiques/> Consulté le 22/05/2021/23 :52
- [21] A. Niemegeers, M. Burgelman, « Numerical modelling of ac-characteristics of CdTe and CIS solar cells », Proceedings of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, 1996, pp.901.

الملخص :

Cu₂FeSnS₄ (CFTS) هو مركب أشباه الموصلات يحتوي على عناصر وفيرة وغير سامة ومناسبة لتطوير طبقات نشطة من الخلايا الكهروضوئية.

هذا الموضوع ، يعتمد على تنفيذ لنمذجة الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة وتحسينها على أساس CFTS. ودراسة تأثير معلمات الجهاز مثل السماكة وكثافة تركيز المنشطات للممتص وتأثير طاقة الفجوة على أداء الخلية الشمسية التي هيكلها يتمثل في : FTO / TiO₂ / CFTS / Mo ، وتحليلها باستخدام برنامج محاكاة أحادي البعد (SCAPS-1D).

الكلمات المفتاحية: الخلايا الشمسية ، المعلمات الكهروضوئية ، CFTS ، التحسين ، SCAPS -1D.

Résumé :

Le Cu₂FeSnS₄ (CFTS) est un composé semi-conducteur abondant et non toxique adapté au développement de couches actives des cellules photovoltaïques.

Ce sujet est basé sur la modélisation et de l'optimisation de cellules solaires à couches minces basées sur le CFTS et l'étude de l'effet des paramètres du dispositif tels que l'épaisseur, la densité de dopage et l'énergie du gap de l'absorbant sur les performances de la cellule solaire dont la structure est : FTO / TiO₂ / CFTS / Mo. Les simulations ont été réalisées à l'aide du programme unidimensionnel SCAPS-1D.

Mots-clés : cellule solaire, paramètres photovoltaïques, CFTS, optimisation, SCAPS -1D.

Summary :

Cu₂FeSnS₄ (CFTS) is an abundant, non-toxic semiconductor compound suitable for developing active layers of photovoltaic cells.

This topic is based on the implementation and optimization of thin-film solar cell modeling based on CFTS. And study the effect of the device parameters such as the thickness, the doping density and the gap energy of the absorbent layer on the performance of the solar cell with the structure : FTO/TiO₂/CFTS/Mo. The simulations have been done by SCAPS-1D program.

Key-words: solar cell, photovoltaic parameters, CFTS, optimization, SCAPS -1D.