REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Sciences **T**echnologie

MEMOIRE Master

Présentée par :

Mr ASSAL Abdelhak

Mr ALLAL Mohamed

Filière : génie mécanique

Spécialité : Energie renouvelable

TITRE

La conception des panneaux photovoltaïques à base de nouveaux matériaux

---

Soutenue le : 26/06/2024

Proposé et dirigé par :

Prof. Chiba Younes

Dr. Terfai Abdelkrim

Année universitaire : 2023/2024

DEDICACE

Je dédie ce travail

A

Mes chers parents

Mes grands-parents

Mes sœurs et mes frères

Mes amis

Tous ceux qui me sont chers.



REMERCIEMENTS



Nous remercions en premier lieu ***Allah*** *de nous avoir donné le courage et la patience pour réaliser et finir notre mémoire de fin d'étude.*

*Nous tenons tout d'abord à exprimer mes profonds remerciements à Monsieur le professeur CHIBA Younes***,** *qui nous a permis, par ses perpétuels encouragements, de mener à terme un tel sujet de mémoire de fin d'étude. Il a su nous orienter et nous faire profiter de son expérience et son soutien dans de nombreux moments de découragements et d'avoir toujours trouvé de quoi nous remonter la morale.*

Nous sommes très reconnaissante pour son esprit critique, pour ses conseils précieux, pour son aide et pour nous avoir permis de travailler dans un esprit de confiance et d'amitié. Ses qualités humaines, ses compétences scientifiques et ses principes font un promoteur au sens propre du terme.

Nous remercions chaleureusement nos, Professeurs de département de génie mécanique. Enfin, je remercie, toutes les personnes qui m'ont encouragé et soutenu de près ou de loin durant la réalisation de ce travail.

ملخص

يهدف مشروع الماستر هذا إلى محاكاة المعلمات التشغيلية المختلفة للخلايا الشمسية. ولهذا الغرض، تم اقتراح سلسلة من المواد المعتمدة على CdTe وZnO وCdS وCISS لتحليل فعاليتها باستخدام برنامج SCAPS. تم إجراء مقارنة لتحديد المادة الأكثر ملائمة للألواح الشمسية الكهروضوئية. وتم تحليل ومناقشة نتائج المحاكاة الرئيسية، بما في ذلك الكفاءة الكمومية والكثافة الحالية والإمكانات.

الكلمات المفتاحية: الخلية الشمسية، SCAPS، CdTe، ZnO، CISS، المحاكاة العددية، الكفاءة

Résumé

Ce projet de master vise à simuler les différents paramètres opérationnels des cellules solaires. Pour ce faire, une série de matériaux à base de CdTe, ZnO, CdS, et CISS a été proposée pour analyser leur efficacité à l'aide du logiciel SCAPS. Une comparaison a été effectuée pour déterminer le matériau le plus adapté aux panneaux solaires photovoltaïques. Les principaux résultats de simulation, incluant l'efficacité quantique, la densité de courant et le potentiel, sont analysés et discutés.

Mots clés : Cellule solaire, SCAPS, CdTe, ZnO, CISS, Simulation numérique, efficacité

Abstract

This master's project aims to simulate the different operational parameters of solar cells. For this purpose, a series of materials based on CdTe, ZnO, CdS, and CISS was proposed to analyze their effectiveness using the SCAPS software. A comparison was carried out to determine the most suitable material for photovoltaic solar panels. The main simulation results, including quantum efficiency, current density and potential, are analyzed and discussed.

Keywords: Solar cell, SCAPS, CdTe, ZnO, CISS, Numerical simulation, efficiency

La connaissance s'acquiert par l'expérience, tout le reste n'est que de l'information.

Albert Einstein.

Liste Des Abréviations

Symbol	**Désignation**
Q_E	Efficacité quantique
Te	Tellure
λ	Longueur d'onde
J	Densité de courant
Pm	Puissance maximale (W)
Ns	Cellule solaire
Np	Cellule solaire identique
Nt	Concentration
θ	Température
Voc	Tension (V)

Abréviation	
SCAPS	Solar cell capacitance simulator
IPV	l'impureté photovoltaïque
PV	Panneaux photovoltaïques
ϒ	Photon
GPV	générateur photovoltaïque
GES	gaz à effet de serre
BV	Bande de valence
BC	Bande de conduction
Cd	Cadmium

Sommaire

Table des matières

Introduction Générale 1

Chapitre I Généralité sur les panneaux photovoltaiques

Introduction 3
I.1 Historique 3
I.2. Notions sur la Nature du rayonnement solaire 4
I.3 L'énergie solaire photovoltaïque 5
I.3.1 Effet photovoltaïque 5
I.3.2Généralité sur les ondes électromagnétiques 6
I.4Principe de fonctionnement d'une cellule solaire 7
I.5La conversion photovoltaïque 9
I.5.1L'effet photovoltaïque 9
I.5.2Le principe de la conversion 10
I.6Types des panneaux photovoltaiques 10
I.7Dopage du silicium 11
I.7.1Dopage de type N 11
I.7.2Dopage de type P 11
I.8Classification des systèmes photovoltaïques 11
I.8.1Système isolé ou autonome 11
I.8.2Système raccordé au réseau 12
I.9Avantage des panneaux photovoltaïques 12
I.10Inconvénients des panneaux photovoltaiques 13
I.11Avenir des panneaux photovoltaiques 13

Chapitre II Nouveaux Materiaux Pour Les Panneaux Photovoltaique

Introduction 15

Chapitre III Simulation Numérique Avec SCAPS

Introduction 18
II.2 Notions de base 19

Chapitre IV Résultats et Discussion

IV.1. Panneaux photovoltaïque couche mince à base de CdTe hétérojonction.....…..22

IV.2 Panneaux photovoltaïque de type charge symétrique dégradée 29

IV.3 Panneaux photovoltaïque de type CIGS 34

Conclusion génerale 46

References bibliographique..... 47

Figure. IV. 18 représentation de panneaux photovoltaïque de type CIGS avec SCAPS.
Figure. IV. 19 Densité de courant mA/cm^2 en fonction de voltage (V).
Figure. IV. 20 densité de courant mA/cm^2 en fonction de la distance (µm).
Figure. IV. 21 Diagramme de bande (eV) en fonction de la distance (µm).
Figure. IV. 22 densités de charge /cm^3 en fonction de la distance (µm).
Figure. IV. 23 densités de courant mA /cm^2 en fonction de la distance (µm).
Figure. IV. 24 L'efficacité % en fonction de la distance (µm).
Figure. IV. 25 représentation de panneaux photovoltaïque de type InCu métastable.
Figure. IV. 26 Diagramme de bande (eV) en fonction de la distance (µm).
Figure. IV. 27 densités de charge /cm^3 en fonction de la distance (µm).
Figure. IV. 28 densité de courant mA/cm^2 en fonction de voltage (V).
Figure. IV. 29 densité de courant mA/cm^2 en fonction de voltage (V).
Figure. IV. 30 L'efficacité % en fonction de la distance (µm).
Figure. IV. 31 Etat % en fonction de l'épaisseur (nm)

Liste des figures

I.1 Spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil

I.2 Illustration de l'effet photovoltaïque.

I.3 Rayon incident, réfléchi et transmis

I.4 Transitions électronique (a) pour un gap direct, (b) pour un gap indirect.

I.5 Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire

I.6 Exemples d'applications de cellules photovoltaïques : (a) Avion 100%.

I-7 Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

I.8 Dopage de type N

I.9 Dopage de type P.

III.1 Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.

IV.1 Représentation de panneau photovoltaïque avec SCAPS.

IV. 2 Etat % en fonction de l'épaisseur nm

IV. 3 Diagramme de bande (eV) en fonction de la distance (µm).

IV. 4 Densités de charge /cm^3 en fonction de la distance (µm).

IV. 5 Densité de courant mA/cm^2 en fonction de la distance (µm).

IV. 6 Probabilités d'occupation des défauts pour les électrons en fonction de la distance en µm.

IV. 7 Panneaux d'efficacité quantique en fonction de la longueur d'onde.

IV. 8 Amplitude en fonction de la distance (µm).

IV. 9 Degré (θ) en fonction de la distance (µm).

IV. 10 Densités de courant en fonction de la distance (µm).

IV. 11 Représentation de panneaux photovoltaïque de type charge symétrique dégradée avec SCAPS.

IV.12 Diagrammes De Bande (Ev) En Fonction De La Distance (µm).

IV.13 Densité De Charge /Cm^3 En Fonction De La Distance (µm).

IV.14 Probabilités d'occupation des défauts pour les electrons en fonction de la Distance En µm.

IV.15 Densités De Courant mA/Cm^2 en fonction de la distance (µm).

IV.16 Panneaux d'efficacité quantique % en fonction d'énergie des photons en eV.

IV.17 La densité de courant en fonction de potentiel (v).

Liste des tableaux

I.1 Résultats de recherche réalisée pour les nouveaux matériaux pour les nouveaux matériaux.

IV.1 Résultats obtenus par simulation pour la première couche matériau (CdTe).

IV.2 Résultats obtenus par simulation pour la deuxième couche matériau (CdTe).

IV.3 Résultats obtenus par simulation pour la troisième couche matériau (CdTe).

IV.4 Résultats obtenus par simulation pour la première couche matériau de chargé symétrique de type p.

IV.5 Résultats obtenus par simulation pour la deuxième couche matériau de chargé symétrique de type n.

Introduction Générale

Dans les dernières années, la demande énergétique mondiale a augmenté sans cesse à cause de l'accroissement de la population et aussi de la croissance économique des pays émergents. La consommation énergétique mondiale est couverte principalement par les énergies d'origines fossiles (pétrole, gaz, charbon). Cette dépendance est responsable des émissions des gaz à effet de serre (GES) qui causent le réchauffement climatique.

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière. « Volt » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse [1].

L'énergie solaire est une source d'énergie illimitée, sans aucune émission des GES. Elle constitue la ressource énergétique la plus abondante et de plus, elle est relativement bien répartie sur terre, chaque mètre carré reçoit en moyenne une puissance de 342 W. L'énergie solaire représente une meilleure alternative d'utilisation d'énergie propre. Elle pourrait être exploitée selon deux techniques principales : thermique ou voltaïque. L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique issue d'une conversion directe du rayonnement solaire. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) [2] basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. C'est une énergie inépuisable et non polluante, elle pourrait être installée dans n'importe quelle région et son utilisation ne nécessite que peu d'entretien régulier. C'est une technique applicable dans plusieurs secteurs, elle a comme avantages [1] :

- le coût : l'énergie deviendra presque gratuite une fois le prix des équipements est amorti ;
- l'autonomie : avec la technologie de stockage d'énergie, le système photovoltaïque constitue un réseau autonome ;
- la quantité : l'énergie photovoltaïque est illimitée ;
- l'écologie : l'énergie permet de diminuer les émissions des GES.

Cette technique d'énergie qui réponde efficacement aux enjeux énergétiques, environnementaux et représente une approche réaliste qui favorise le développement

durable. La technologie photovoltaïque est basée sur certain nouveaux matériaux semi-conducteurs.

Actuellement, ce sont les technologies photovoltaïques à base de silicium cristallin qui dominent le marché du photovoltaïque.

Ce nouveau matériau à profiter de plusieurs décennies de développement ce qui a rendu sa technologie plus mature et la durée de vie moyenne de ses panneaux dépassent au moins 20 ans. Cependant, l'efficacité de rendement est de 15 à 20 % en général. Celles-ci sont dues à l'absorption de photons dont l'énergie est plus grande que celle de la bande interdite (BG) du silicium. Pour réduire ces pertes par thermalisation, une des stratégies utilisées est de fabriquer des cellules multi jonctions (constituées de cellules de bandes interdites différentes). Ces cellules sont juxtaposées de manière à ce que les jonctions ayant des BG plus grands soient situées à l'avant, ce qui permet d'augmenter l'efficacité de la cellule sur une plage plus large du spectre solaire. Cependant, les techniques conventionnelles utilisées pour fabriquer les cellules multi jonctions sont coûteuses, ce qui limite grandement leurs utilisations à grande échelle. Une des solutions pour diminuer ces coûts de fabrication est la technique d'impression à partir de solution. Celle-ci consiste à fabriquer par impression une cellule polymère ou autre à grande bande d'énergie au-dessous d'une cellule de silicium. Cette technique permet d'augmenter l'efficacité de conversion de la cellule tandem silicium /cellule imprimée et de diminuer les coûts de fabrication de la cellule multi jonction.

La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale. Le plan de notre manuscrit de master est structuré comme suit ; dans le premier chapitre nous avons présentés les panneaux photovoltaïques. Le deuxième chapitre nous avons décrit les nouveaux matériaux pour la fabrication des panneaux photovoltaïques dans le but d'avoir un bon rendement. Le troisième chapitre est consacré à simulation numérique avec SCAPS. Les résultats et discussion sont présentés dans le quatrième chapitre. Notre manuscrit a été clôturé par une conclusion générale ainsi quelques perspectives.

CHAPITRE I Généralité sur les panneaux photovoltaïques

Introduction

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 15000 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KW/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge.

Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que ne consomme l'humanité en une année.

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, l'étoile la plus proche de la terre. La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, à travers la photosynthèse ou dans diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle.

Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et, malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, une quantité encore importante arrive à la surface du sol.

On peut ainsi compte sur 1000 W/m^2 dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m^2 lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière on en eau.

I.1 Historique

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800.

L'effet photovoltaïque, c'est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette Quelques dates de l'histoire du photovoltaïque :

- 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point

une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites. Conversion, appelée effet photovoltaïque [1].

- 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie [2].

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photo sensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des impuretés. C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs.

Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé [2].

I.2 Notions sur la Nature du rayonnement solaire

Le soleil est constitué principalement de gaz (figure I.1), dont la fusion continue produit une quantité d'énergie phénoménale.

La fusion des atomes d'hydrogène en atomes d'hélium permet en effet d'atteindre des températures de l'ordre de 20 millions de degrés Kelvin. Cette énergie se traduit par l'émission d'un rayonnement composé de longueurs d'ondes [3].

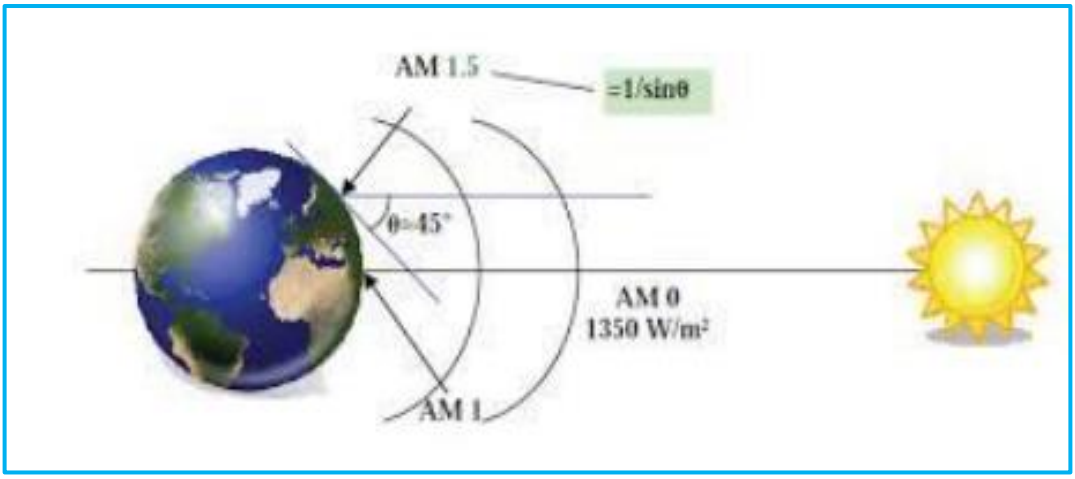


Figure I.1 : Spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil

I.3 L'énergie solaire photovoltaïque

I.3.1 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène qui permet la conversion de l'énergie lumineuse en électricité, à travers un matériau semi-conducteur responsable du transport des charges électriques comme illustré à la figure (I.2) [4].

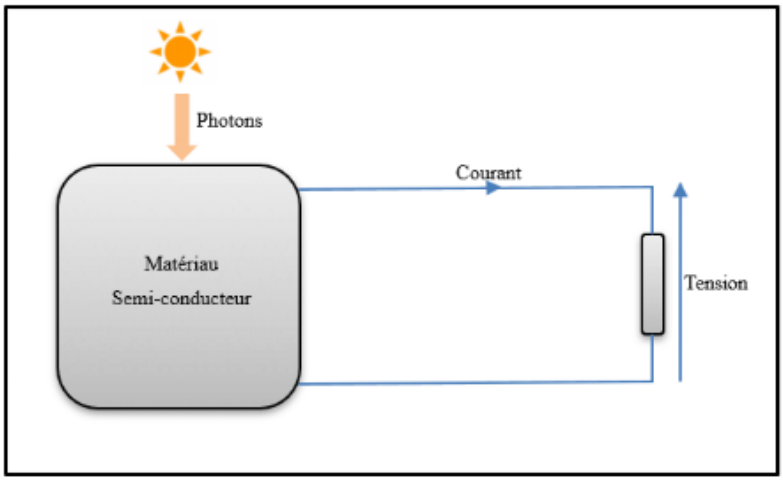


Figure I.2 : Illustration de l'effet photovoltaïque.

Découvert par Becquerel en 1839, l'effet photoélectrique provoque sur certains matériaux, l'émission d'une petite quantité d'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Pour cela, il faut que l'énergie des photons incidents soit transmise à des porteurs de charge (électrons ou trous) dans le matériau. A l'équilibre les électrons possèdent une énergie correspondant à des états situés dans la bande de valence BV et sont dits « liés ». Lorsqu'un photon interagit avec un électron, il transfère intégralement son énergie à ce dernier, à la condition que le niveau énergétique final de l'électron soit autorisé et libre. Ainsi, un photon incident dont l'énergie est supérieure à Eg du matériau permettra le passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction BC. Il y'a alors création d'une paire électron/trou (e/h) constituée de l'électron « excité » de la BC et du trou crée dans la BV par la transition électronique. Leur déplacement dans le matériau est alors possible. La transition électronique respecte les lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. La quantité de mouvement peut s'exprimer par la relation (1.1).

$$p = \frac{h}{2\pi} * \vec{k} \qquad (1.1)$$

Il existe deux types de transitions : à gap direct et à gap indirect (Figure 1.8). Quand on est dans le cas où le maximum de la bande de valence correspond au minimum de la bande de conduction, la transition est directe. En revanche, dans le cas où la transition est à gap indirect, pour satisfaire la relation de conservation du moment, il faut qu'une troisième particule appelée phonon intervienne. Les phonons sont des vibrations du réseau apportant ou absorbant la quantité de mouvement nécessaire. Puisqu'il s'agit d'un problème à trois corps, on comprend que la probabilité d'absorption soit plus faible que pour une transition à gap direct. L'effet photoélectrique est donc plus ou moins important en fonction du matériau semi-conducteur suivant qu'il permettra une transition électronique directe ou indirecte [5].

I.3.2 Généralité sur les ondes électromagnétiques

Une des formes pour propager l'énergie dans l'espace est le rayonnement électromagnétique,
qui peut être décrit sous la forme ondulatoire ou corpusculaire. Une onde électromagnétique
(OE) est en effet un phénomène résultant d'une propagation couplée du champ électrique $\vec{E}$ et du champ magnétique $\vec{H}$. La lumière est donc une onde électromagnétique et sa longueur d'onde représente le domaine visible [4].

- **Optique des surfaces planes**

Tout rayon incident qui frappe une surface plane peut donner naissance à un rayon réfléchi ayant le même angle d'incidence et aussi à un rayon transmis (Figure I.3) ce qui peut être décrit par l'équation de réfraction de Snell-Descartes (1.2).

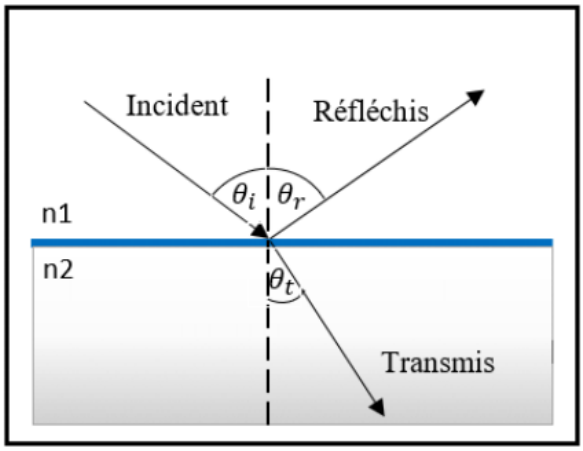


Figure 1.3 : Rayon incident, réfléchi et transmis

La loi de Snell-Descartes peut s'écrire :

$$n_1 \sin \Theta i = n_2 \sin \Theta t \qquad (1.2)$$

Le silicium cristallin (c-Si) possède un gap direct de 3,4 eV, ce qui limite les transitions radiatives aux photons très énergétiques (λ<365 nm). Au-delà de 365 nm, les seules transitions possibles sont celles impliquant le gap indirect de 1,12 eV.

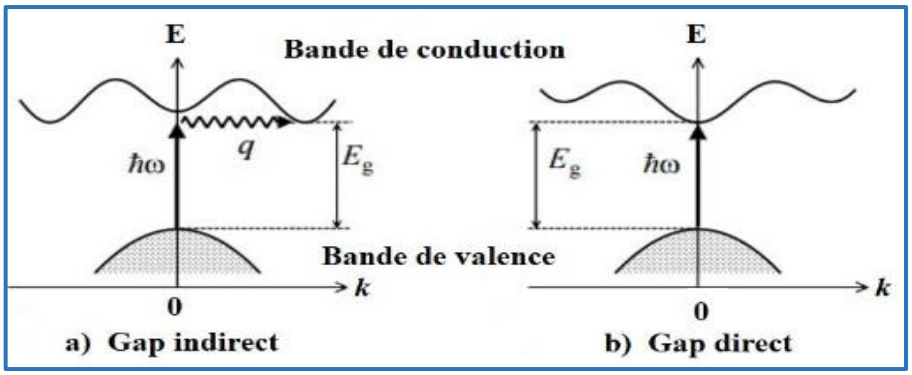


Figure I.4 : Transitions électronique (a) pour un gap direct, (b) pour un gap indirect.

I.4 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Le fonctionnement d'une cellule solaire repose sur la conversion photovoltaïque et peut être résumé en trois étapes : L'absorption de la lumière, la séparation des charges électriques photogénérées et enfin la collecte de ces charges voir figure I.5, 6 et 7 ci-dessous.

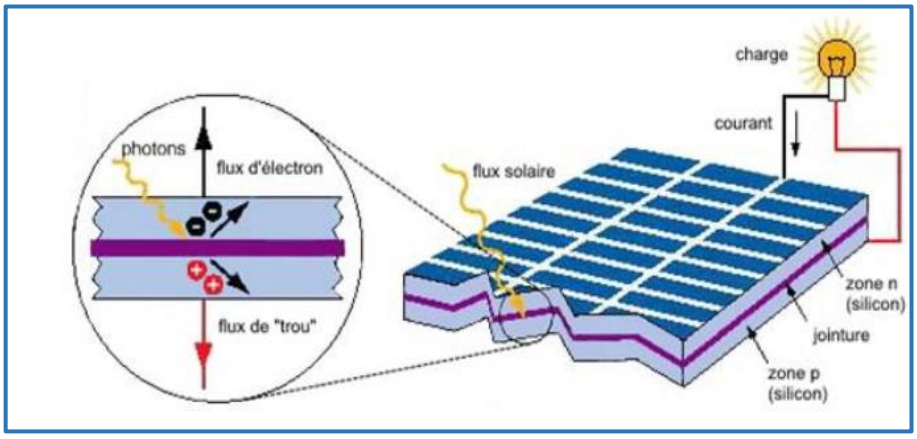


Figure I.5 : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire [6].



Figure I.6 : Exemples d'applications de cellules photovoltaïques : (a) Avion 100% solaire, qui a fait un tour du monde en 2016 [7]. (b) Panneaux solaires flottants au japon [8]. (c) Tronçon routier de 1 km recouvert de panneaux photovoltaïques en Normandie (France) [9]. (d) Batterie solaire pour smartphone, utilisant des cellules solaires organiques imprimées [10].

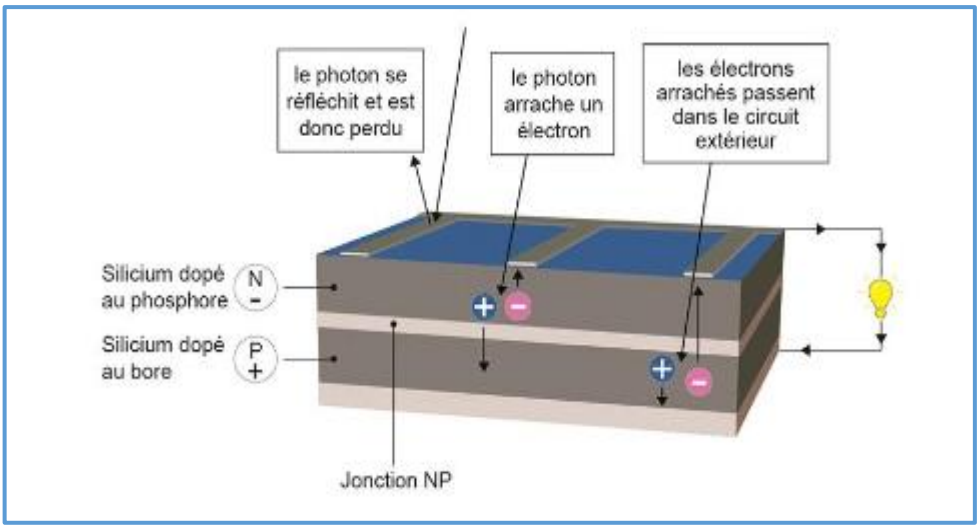


Figure I-7 : Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque [11].

I.5 La conversion photovoltaïque

I.5.1 L'effet photovoltaïque

Il s'agit de transformer l'énergie contenu dans la lumière du soleil en énergie électrique à travers d'un capteur constitué de matériaux sensible à l'énergie contenue dans les photons. Ce capteur présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule PV .L'effet photovoltaïque fut observé la première fois en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel [1].Toutefois ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell, aux Etats-Unis parvinrent à fabriquer la première photopile ; l'élément primaire ou de base de la conversion photovoltaïque [1].

I.5.2 Le principe de la conversion

Leffe 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 Leffe de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p [2].

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p.

Une jonction (dite p-n) a été formée [12,13]. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue.

Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un pair électron - trou.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel [12-14].

I.6 Type des panneaux photovoltaïques

Il existe différentes filières technologies. On distingue la filière à base de silicium cristallin comprenant le mono et le multi cristallin, elle couvre de l'ordre de 88% de la production mondiale.

La filière des couches minces comprenant les cellules au silicium amorphe, multi cristallin ou monocristallin ; au tellure de cadmium, au cuivre indium sélénium, et à l'arséniure de gallium. Il y a aussi la filière des cellules organiques.

Et, en ces dernières années, à partir de 2009, il y a eu naissance d'une nouvelle filière appelé filière pérovskite qui est en développement [15].

- *Le silicium monocristallin*

Il est obtenu par croissance ou tirage d'un lingot cylindrique à partir d'un monocristal « souche » selon le procédé Czochralski (CZ). Les cellules à base de Si monocristallin ont un bon rendement mais la méthode de production est laborieuse et coûteuse

- *Le silicium multicristallin*

Il est obtenu par coulage en lingotière dans laquelle s'opère un refroidissement lent, de l'ordre de quelques dizaines d'heures. Sa mise au point est moins énergivore. C'est un matériau moins pur.

Par comparaison entre les deux, on trouve que la cellule de silicium monocristallin a un rendement de conversion des cellules légèrement supérieur à celui du multicristallin, mais le coût est élevé pour le premier par rapport au deuxième et le plus utilisé est le Si multicristallin [16].

Les principales filières couches minces sont le Silicium amorphe utilisé depuis de longues années, dans les montres et calculatrices notamment, le CdTe (hétéro jonction Cadmium Telluride, Sulfure de Cadmium), le CIS (hétéro jonction de diséléniure cuivre indium/ sulfure de cadmium).

I.7 Dopage du silicium

Les wafers de silicium obtenus à l'issue de l'étape de sciage sont alors introduits dans un réacteur de croissance dans lequel va se dérouler l'étape de dopage. Le dopage est une méthode permettant de réaliser la jonction P-N. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ces propriétés électriques. Le semi-conducteur dopé est alors appelé « semi-conducteur extrinsèque ». Il existe deux types de dopage : le type N (Négatif) et le type P (Positif) [17].

I.7.1 Dopage de type N

Le dopage de type N (figure I.8) consiste à ajouter un atome de phosphore au sein de la structure cristalline du silicium. Le phosphore disposant de 5 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un électron : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative [17].

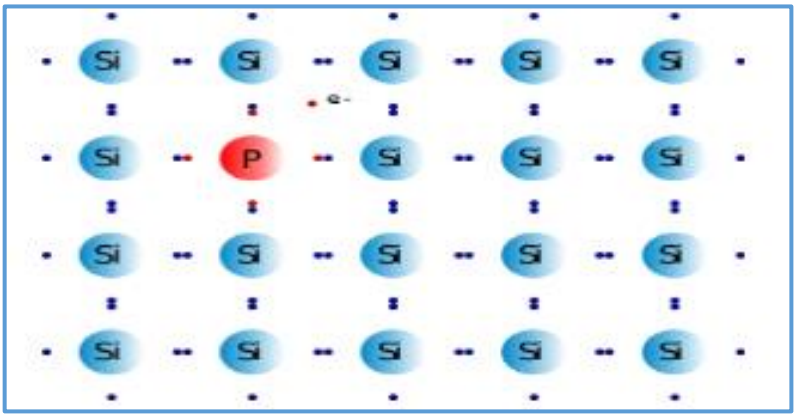


Figure I.8 : Dopage de type N

I.7.2 Dopage de type P

Le dopage de type P (figure I.9) consiste à ajouter un atome de bore au sein de la structure cristalline du silicium. Le bore disposant de 3 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un trou : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale positive [17].

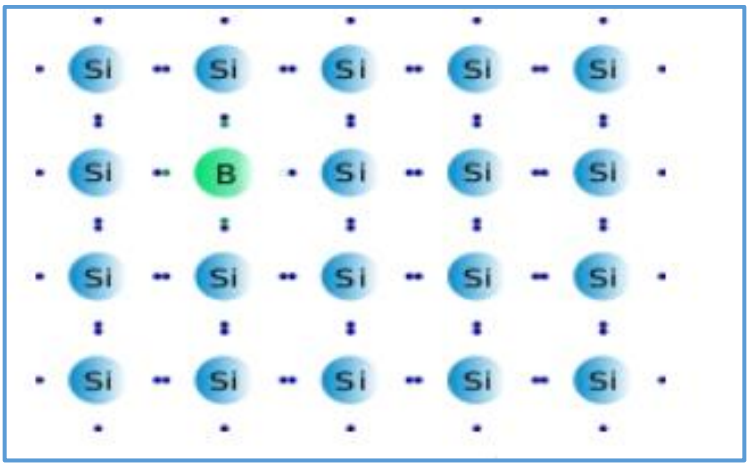


Figure I.9 : Dopage de type P.

I.8 Classification des systèmes photovoltaïques

Le système solaire photovoltaïque peut être classifié selon l'autonomie en deux classes :

I.8.1 Système isolé ou autonome :

Ce sont des systèmes qui travaillent 24 h/24 h avec l'énergie solaire convertie en énergie électrique sans l'aide d'aucune autre source électrique, et cela à l'aide de plusieurs composants mais le plus importants ce sont les batteries qui aident à emmagasiner de l'énergie électrique. Il faut mentionner que les batteries les plus utilisées dans le marché actuellement sont : Accumulateurs au plomb-acide et accumulateurs au nickel-cadmium [12].

I.8.2 Système raccordé au réseau

Un système photovoltaïque connecté au réseau, c'est un système couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un onduleur. Ce type de système offre beaucoup de facilité pour le producteur/consommateur puisque c'est le réseau qui est chargé de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité [12].

I.9 Avantage des panneaux photovoltaïques

Les panneaux photovoltaïque est une bonne alternative dans le premier secteur. Il constitue une réponse bien adaptée pour la production d'électricité décentralisée et, combiné au solaire thermique, pour l'autonomie énergétique du résidentiel tertiaire.

En effet, l'énergie solaire est une ressource relativement bien repartie géographiquement. La puissance moyenne reçue annuellement à la surface du globe varie entre 85 et 290 Watts par mètre carré avec des écarts de 1 à 3 selon les régions.

De plus, on peut ajuster la taille des systèmes photovoltaiques et les adapter ainsi à de nombreuses applications [18].

- le coût : l'énergie deviendra presque gratuite une fois le prix des équipements est amorti
- l'autonomie : avec la technologie de stockage d'énergie, le système photovoltaïque constitue un réseau autonome ;
- la quantité : l'énergie photovoltaïque est illimitée ;
- l'écologie : l'énergie permet de diminuer les émissions des GES [4].

I.10 Inconvénients des panneaux photovoltaiques

Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 23.4 %

- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an [19].

I.11 Avenir des panneaux photovoltaïques

Source d'énergie 100% propre et faible pour des usages très variés, elle figurera à l'avenir parmi les principales sources mondiales.

Son handicap majeur reste un coût encore élevé comparée aux sources conventionnelles et aux filières renouvelables.

Ce coût diminue de 10% par an, et pour accélérer cette baisse, les autorités nationales et internationales doivent engagés une politique de soutien à long terme de la filière photovoltaïque.

C'est précisément l'objectif des programmes lancés depuis quelques années dans plusieurs pays industrialisés. Dans notre pays, l'application du PV reste encore modeste. La première utilisation été dans le domaine des télécommunications.

Après, certain puits dans les hauts plateaux ont Chapitre I Etat de l'art du générateur photovoltaïque été équipés par des systèmes de pompages PV.

A nos jours, quelques dizaines de village saharien des régions de Tamanrasset et Adrar jouissent des avantages de cette source d'énergie.

Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs processus de fabrication, ainsi que leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant.

Finalement, nous avons décrit les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque et son avenir [19].

.

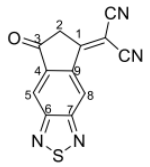
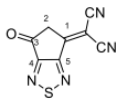
CHAPITRE II Nouveaux matériaux pour les panneaux photovoltaïques

Introduction

Il y a assez de recherche fondamentale et appliquée pour les nouveaux matériaux photovoltaiques. Ce tableau représente la structure, le type et l'efficacité des travaux de recherches effectuées :

Tableau II.1 Résultats de recherche réalisé pour les nouveaux matériaux pour les nouveaux matériaux.

N°	Structure	Type	Efficacité	Références, année
1	Epaisseur de la surface active 300 nm, bande interdite 1.57 eV Tandem monolithique silicium pérovskite	silicium pérovskite	13.7 %	[1] 2015
2	Structure d'une cellule photovoltaïque au CdTe tellurure de cadmium Epaisseur 1 à 8 µm.	Le tellurure de cadmium est employé en tant que semi-conducteur dopé p. Panneaux de 2éme génération	12.5 %	[2] 2014
3	Les panneaux réalisés à partir de silicium monocristallin	Les cellules au silicium monocristallin est longue et fortement consommatrice d'énergie, ce qui conduit à un coût du panneau relativement élevé.	17%	[3] 2014
4	cellules solaires à base de CIGS	Séléniure de cuivre, d'indium et de gallium 2éme génération.	13 %	[4] 2008
5	leur coût à priori moindre, elles sont plus légères et possèdent une plus grande résistance mécanique du fait de leur flexibilité leur durée de vie est courte	les systèmes à base de petites molécules, de polymères et d'hybrides organique-inorganique (GaAs, GaInAs, Ge, $GaInP_2$)	40 %	[5] 2011
6	Les couches de DIPO- φ4 réduisent considérablement les pertes électriques inhérentes à l'interface d'une couche active de (P3HT:PCBM) et de l'électrode d'ITO. Ce résultat provient essentiellement des caractéristiques électroniques (niveaux de valence, gap optique) et de transport (mobilité en trous et sites de conduction) et se manifeste par une réduction de	composé DIPO-φ4 en couche mince. Insérées à l'interface anodique des dispositifs photovoltaïques	Plus de 30%	[6] 2014

	la densité de trous au sein de la couche active. Les JSC des cellules étudiées sont ainsi excellents, proches du maximum théorique atteignable sur des couches actives de P3HT/PCBM.			
7	Type n, forme anhydride. faible largeur de bande interdite	l'IC-BT  IC-BT *Schéma 41 : Structure de l'IC-BT*	-	[7] 2023
8	Type n, forme anhydride. faible largeur de bande interdite	Tdz-CN.  Tdz-CN *Schéma 43 : Structure du Tdz-CN*	-	[7] 2023
9	cellules photovoltaiques a base de MEH-PPV	Cellule photovoltaïque polymère	27 %	[8] 2006
10	chantillons de structures HIT à jonction unique	Cellule photovoltaique couches minces à hétérojonction	>25 %	[9] 2023
11	Les cellules solaires HJT hétérojonction	couches minces supplémentaires de silicium amorphe de part et d'autre de la cellule	26.5 %	[10] 2023
12	Cellules solaires à concentrateur multi jonction.		46 %	[11] 2023
13	Substrats en plastique PET et PEN nanostructurés	cellules solaires à couche mince	8.2 %	[12] 2006
14	silicium multicristallin couche mince	Température élevée Des régions à fort ensoleillement et aux températures élevées.	13 et 17 %	[13] 2010
15	Silicium monocristallin couche mince	300 µm d'épaisseur en le dopant (c-Si-SC)	16-19 %	[14] [15] 2003,1997
16	Cellule amorphe	3éme generation conversion photoélectrique de Shockley-Kweiser	-	[16] 1961
17	CZTS - sulfure de cuivre, de zinc et d'étain, et dérivés de CZTSe et CZTSSe	couche conductrice transparente, souvent constituée de matériaux	%	[17] 2023

		tels que l'oxyde de zinc (ZnO) ou l'oxyde d'indium et d'étain (ITO), est déposée sur la couche absorbante du CZTS.		
18	Alliages de type Cu, Ga, Ag, Se, Te, Au-Al et In-S.	cellules photovoltaïques à film sans silicium	30 %	[17] 2023
19	Les films de CdTe	BP Solaire	10-16%	[18]
20	film CIS de séléniure de cuivre et d'indium se caractérise par un rendement élevé et la capacité de convertir jusqu'à 20 % de l'énergie solaire.	mélange composite de séléniure d'indium-cuivre-gallium Cu(InGa)Se2 L'épaisseur du film, qui ne dépasse pas quelques centaines de nanomètres	20 %	[19, 20]
21	Les cellules solaires flexibles au diséléniure de cuivre-indium-gallium (CIGS) formées sur des feuilles d'acier inoxydable	Panneaux photovoltaïque inoxydable	17.4 %	[19, 20] 1999, 2005
22	éléments à base de CIGS	formés sur des substrats PI qui supportent des températures de dépôt relativement basses	11 %	[20-22] 2005, 2000
23	les PEM basés sur des hétéro-structures du type A3 B 5.	PEM multicristallin	24- 27 %	[23] 2023
24	nanotubes de carbone monoparois (NTC) et de polyamide (PI)	es cellules solaires à pérovskite (PSC), 7 µm d'épaisseur	15.2 %	[24] 2021
25	poudres nanométriques d'oxydes (TiO2 ou ZnO) sur un substrat de verre/oxyde d'étain.	oxydes poreux film de 10 µm d'épaisseur particules de 15 nm conduit à une surface 2 m^2 par cm^2	11 %	[25] 2002
26	polymères de type donneur d'électrons sont mélangés avec des accepteurs d'électrons, de façon à séparer les paires électron-trou	Polymère conjugués (polythiophène, polyacétylène, polyaniline…)	2.5 %	[25] 2002
27	($CdCl_2$ pour CdTe, Se pour CIGS, H_2, Al ou P pour Si) dans la fonctionnalisation de couches précurseurs	Panneaux photovoltaïque silicone	20 %	[25] 2002
28	Cellule photovoltaïque pérovskite Cs3Sb2I9	VOC = 1.48 V, FF = 90.59%, JSC = 13.61 mA/ cm^2	18.29 %	[26]
29	Cellule photovoltaïque à base de CsGeI3	(FTO/n-CsGeI3/i-CsGeI3/p-CsGeI3/Ni)	34.57 %	[27]

CHAPITRE III Simulation numérique avec logiciel SCAPS

Introduction

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

II.1 Description du simulateur

SCAPS (solar cell capacitance simulator) est un logiciel de simulation des cellules solaires unidimensionnelles développé 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

SCAPS est développé à l'origine pour des structures des cellules de CuInSe2 et de CdTe. Cependant, Plusieurs version ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour des cellules solaires cristallines (Si et GaAs) et des cellules amorphes (a-Si et de Si micro-morphe) [1-6].

Un aperçu de ses caractéristiques principales est donné ci-dessous :

- Jusqu'à 7 couches semi-conductrices.
- Presque tous les paramètres peuvent être introduits avec variations graduées (en

dépendance de la composition et de la profondeur de la cellule) : Par exemple , χ , ε , NC , NV , Vthn , Vthp , μn , μp NA, ND ,tous les pièges (défauts) Nt.

- Mécanismes de recombinaison : bande à bande (direct), la SRH Auger.
- les niveaux de défauts : en volume ou à l'interface, en considérant leurs états de charge et la recombinaison à leurs niveaux.
- Les niveaux des défauts, type de charge : pas de charge (neutre), monovalent (un seul donneur, accepteur), divalent (double donneur, double accepteur, amphotère), multivalent (défini par l'utilisateur).
- Les niveaux des défauts, distribution énergétique : niveau discret, uniforme, Gauss, sous forme de queue ou bien une combinaison.
- Les niveaux des défauts, propriété optique : Excitation directe par la lumière est possible (connu par effet de l'impureté photovoltaïque, IPV).
- Les niveaux des défauts, transitions métastables entre les niveaux.

- Contacts : Travail de sortie du métal ou régime de bande plate ; Propriété optique (Réflexion ou transmission) du filtre.
- Tunneling, inter-bandes (dans la bande de conduction ou dans la bande de valence), tunneling à/ou à partir des états de l'interface.

Génération : à partir d'un calcul interne ou bien d'un fichier g(x) fourni par l'utilisateur.

- Illumination : du côté p ou n.
- points pour les calculs de travail : la tension, la fréquence, la température.
- le logiciel calcule les bandes d'énergie, les concentrations et les courants à un point de fonctionnement donné les caractéristiques (JV), les caractéristiques du courant alternatif (C et G en fonction de V et / ou f), la réponse spectrale (également avec polarisation lumière ou tension).
- calculs de lots possible ; présentation des résultats et les paramètres en fonction.
- chargement et la sauvegarde de tous les paramètres ; démarrage de SCAPS dans une configuration personnalisée, un langage de script compris une fonction utilisateur libre.
- interface utilisateur très intuitive.
- un centre de langage de script à exécuter SCAPS d'un « fichier de script toutes les variables internes peuvent être consultés et tracée par le script.
- un établissement ajustement de courbe intégré.
- un panneau pour l'interprétation des mesures d'admission.

II.2 Notions de base

SCAPS est un programme conçu pour fonctionner sous le système Windows, développé par Lab Windows/CVI de la national Instruments. SCAPS s'ouvre avec l'icône 'Action Panel'. La fenêtre qui s'ouvre est présentée dans la figure. III.1 [7].

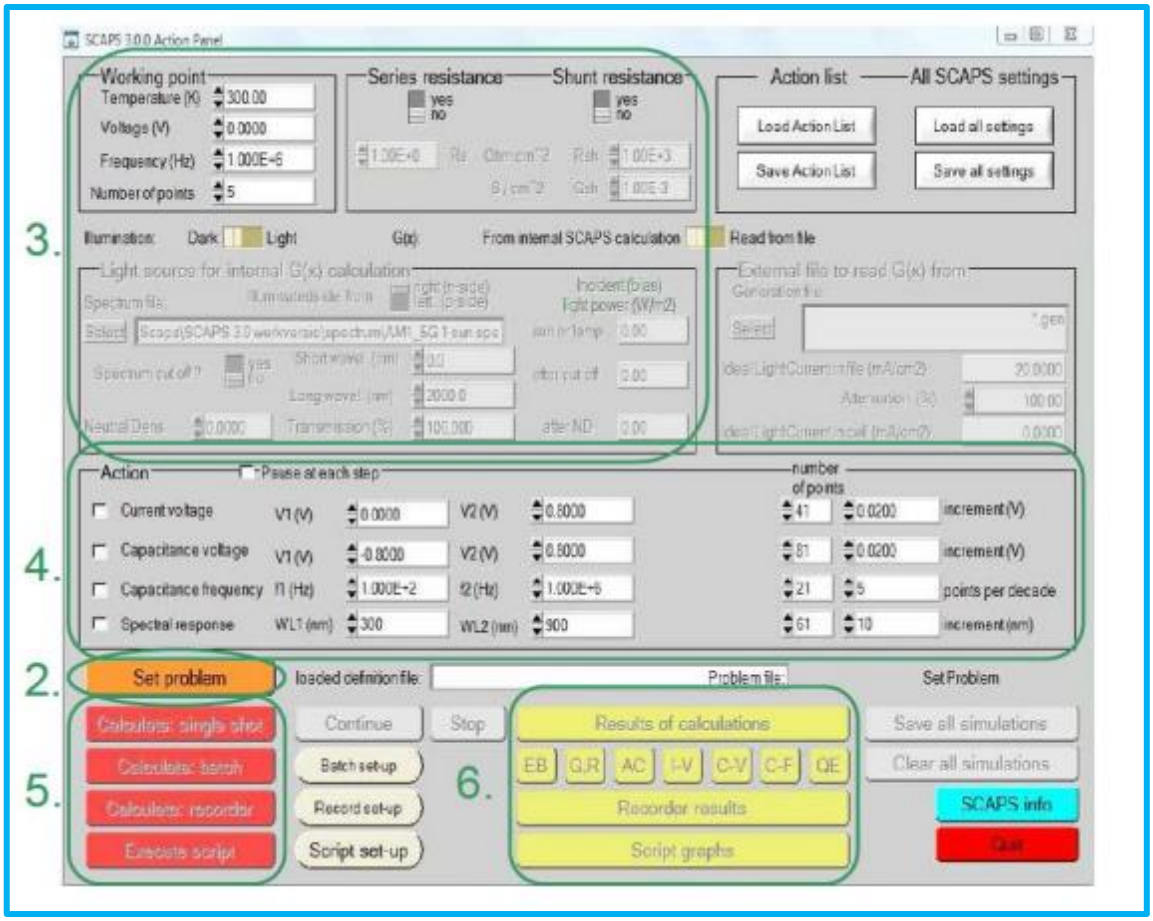


Fig. III.1. Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.

La signification des blocs numérotés de 1 à 6 est expliquée dans le texte. Il ya des panneaux dédiés pour les actions de base :

1. Lancer SCAPS.

2. Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.

3. Indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifier le point de fonctionnement).

4. Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.

5. Commencer le(s) calcul(s).

6. Afficher les courbes de simulation.

- Ces étapes sont plus détaillées dans ce qui suit.

Les applications de la simulation en utilisant SCAPS peuvent être consultées dans les références [8, 9].

L'étude de la plus part des dispositifs à semi-conducteurs est basée sur la résolution simultanée de l'équation de Poisson (III.1) et de l'équation de continuité pour les électrons (III.2) et les trous (III.3) avec des conditions aux limites appropriées.

$$\frac{d^2}{dx^2}\psi(x) = \frac{e}{\varepsilon^\circ \varepsilon_r}\left(\rho(x) - n(x) + N_D - N_A + \rho_p + \rho_n\right) \qquad \text{(IV.1)}$$

$$\frac{d}{dx} J_n(x) - e\frac{\delta n}{\delta t} - e\frac{\delta \rho n}{\delta t} = G(x) - R(x) \qquad (IV.2)$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dx}} \mathrm{J_p(x)} + e\frac{\delta \rho(x)}{\delta t} + e\frac{\delta \rho(x)}{\delta t} + e\frac{\delta \rho_p}{\delta t} = G(x) - R(x) \qquad (IV.3)$$

Tel que :

ψ; est le potentiel électrique

e la charge électrique

εr permittivité relative

ε0 permittivité du vide

p et n concentrations de trous et électrons

ND et NA la charge des impuretés donneurs et accepteurs

ρn et ρp la distribution de trou et d'électron

Jp et Jn densité de courant de trou et électron

G(x) et R(x) la génération et recombinaison des charges [10, 11].

L'utilisation de SCAPS est très pratique, il permet de simuler n'importe qu'elle structure photovoltaïque, selon les matériaux disponibles en fichiers data, en jouant sur les paramètres variables (largeur, surface, dopage, etc…), la fenêtre du logiciel pour écrire ces paramètre est représenter sur la figure III.1.

Les résultats de la simulation, sont très proches des résultats expérimentaux, donc c'est un gain de temps et d'argent.

CHAPITRE IV Résultats et Discussion

Introduction

Dans ce chapitre on va étudier deux nouveaux matériaux pour les cellules photovoltaiques, les couche mince à base de CdTe, CdS, SnOx et l'autre c'est un matériau de charge symétrique dégradée de type p et n.

IV.1. Panneaux photovoltaïque couche mince à base de CdTe hétérojonction [1].

- **Les paramètres de la surface initiale**

Température est 300 K

V_1 = 0 V

V_2= 1.5 V

WL_1 = 1100 nm

WL_2 = 900 nm

f_1= 10^{-2} Hz

f_1= 10^{-6} Hz

Vitesse de recombinaison de surface est 10^7 cm/s.

La figure IV.1 illustre la représentation de la cellule photovoltaïque avec SCAPS.

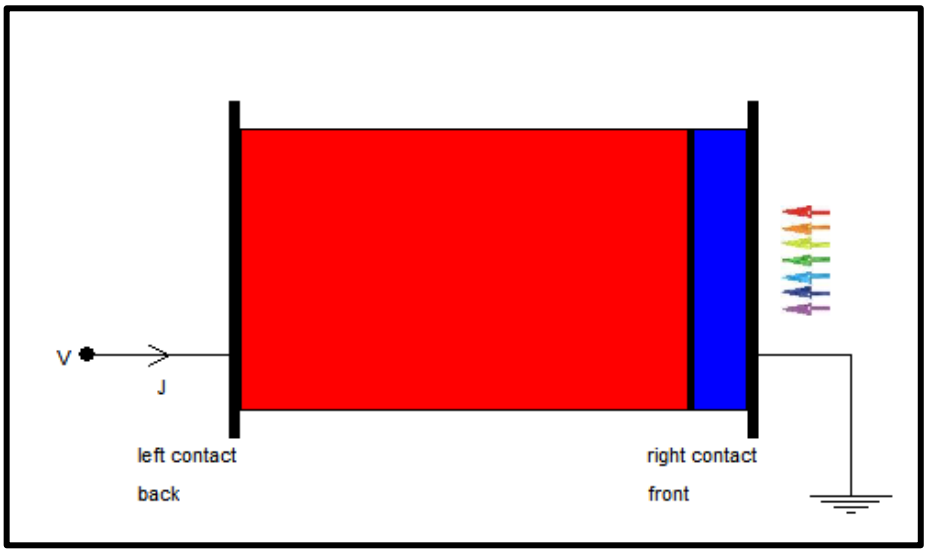


Figure.IV.1 Représentation de panneau photovoltaïque avec SCAPS.

- **Les paramètres de la couche minces (matériau à base de CdTe)**

1 ére Couche CdTe les paramètres

Le tableau 1 présente les paramètres que nous avons configurés dans le système SCAPS 3309.

Tableau IV.1 Résultats obtenus par simulation pour la première couche matériau (CdTe).

Paramètre	valeur	Unité
Bande de gap	1.5	eV
Affinité d'électron	3.9	eV
Permittivité diélectrique	9.4	F/m
CB densité effective d'états	$8*10^{17}$	cm^{-3}
VB densité effective d'états	$1.7*10^{19}$	cm^{-3}
Vitesse thermique des électrons	10^7	cm/s
Vitesse thermique des trous	10^7	cm/s
Mobilité des electrons	$3.2*10^2$	Cm^2/Vs
Mobilité des trous	4	Cm^2/Vs

2 éme Couche CdS

Le tableau 2 présente les paramètres que nous avons configurés dans le système SCAPS 3309.

Tableau IV.2 Résultats obtenus par simulation pour la deuxième couche matériau (CdTe).

Paramètre	valeur	Unité
Bande de gap	2.4	eV
Affinité d'électron	4	eV
Permittivité diélectrique	10	F/m
CB densité effective d'états	2.210^{18}	cm^{-3}
VB densité effective d'états	$1.8*10^{19}$	cm^{-3}
Vitesse thermique des électrons	10^7	cm/s
Vitesse thermique des trous	10^7	cm/s
Mobilité des electrons	$1*10^2$	Cm^2/Vs
Mobilité des trous	2.5	Cm^2/Vs

3 éme Couche SnOx

Le tableau 3 présente les paramètres que nous avons configurés dans le système SCAPS 3309.

Tableau IV.3 Résultats obtenus par simulation pour la troisième couche matériau (CdTe).

Paramètre	valeur	Unité
Bande de gap	3.6	eV
Affinité d'électron	4	eV
Permittivité diélectrique	9	F/m
CB densité effective d'états	$2.2*10^{18}$	cm^{-3}
VB densité effective d'états	$1.8*10^{19}$	cm^{-3}
Vitesse thermique des électrons	10^7	cm/s
Vitesse thermique des trous	10^7	cm/s
Mobilité des electrons	1	Cm^2/Vs
Mobilité des trous	2.5	Cm^2/Vs

La figure si dessous illustre l'efficacité en fonction de l'épaisseur, d'après cette figure on note la valeur maximum d'efficacité est de 13.95 % correspond à l'épaisseur 5 nm.

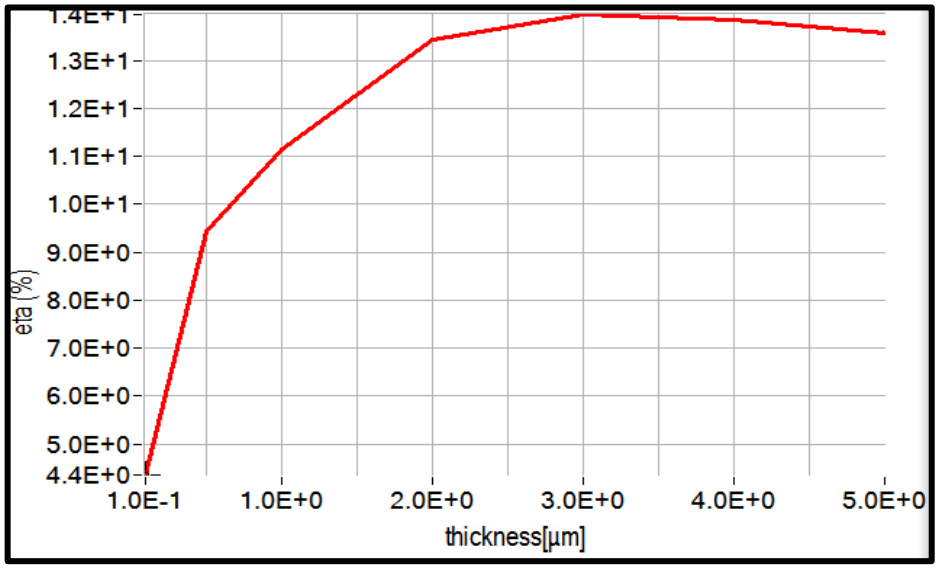


Figure. IV. 2 Etat % en fonction de l'épaisseur nm

La figure IV. 3 représente le diagramme de bande en fonction de la distance, pour les trous, électrons et la charge totale comme est indiquer sur la figure. On constate que valeur maximum de la bande de gap est de 1.005 eV.

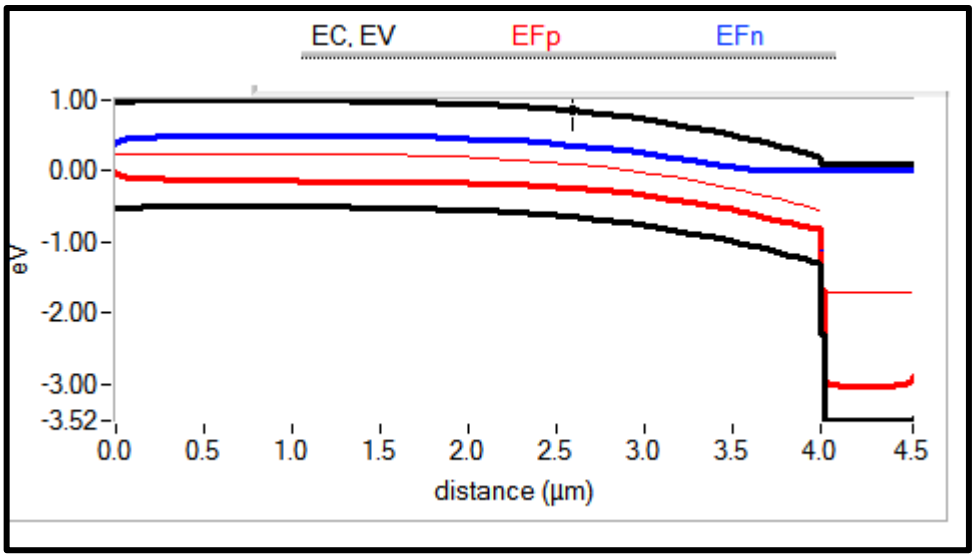


Figure. IV. 3 Diagramme de bande (eV) en fonction de la distance (µm).

La figure IV. 4 nous donne des résultats sur densité de charge des trous, électrons et la charge totale en fonction de la distance, on note que la valeur maximum de la densité de charge est de $1*10^{18}$ /cm ^{3}.

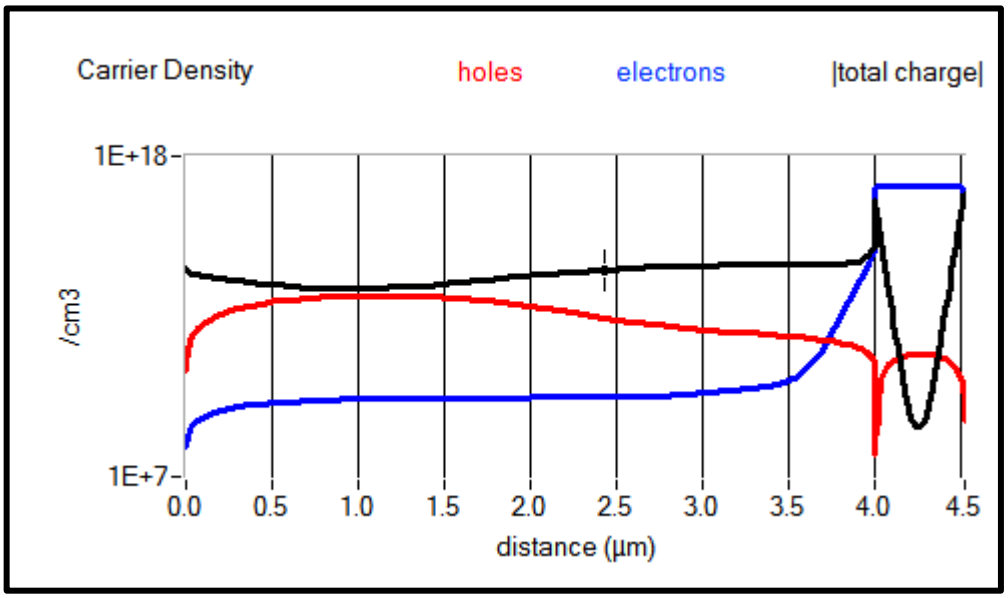


Figure. IV. 4 densités de charge /cm^3 en fonction de la distance (µm).

La figure IV. 5 représente la densité de courant des trous, electrons et la charge totale en fonction de la distance. On constate que la densité de courant de trou est inversement proportionnelle a la densité de courant de electrons et la densité de courant optimales est de 1.439 mA/cm ^{2}.

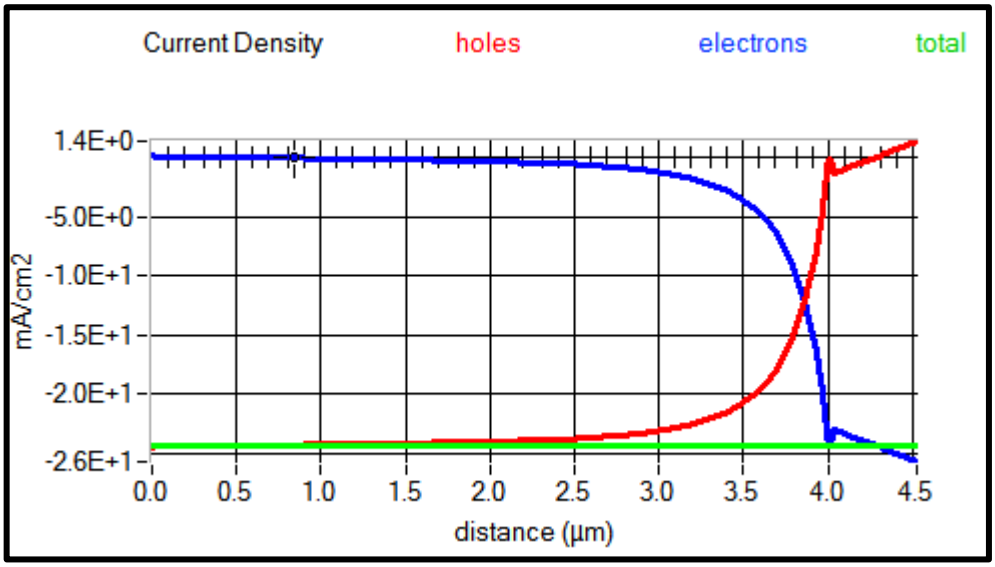


Figure. IV. 5 densité de courant mA/cm^{2} en fonction de la distance (µm).

La figure ci-dessous montre la probabilité d'occupation des défauts pour les électrons en fonction de la distance, d'après cette courbe on note la stabilisation des défauts après 4.65 µm de distance.

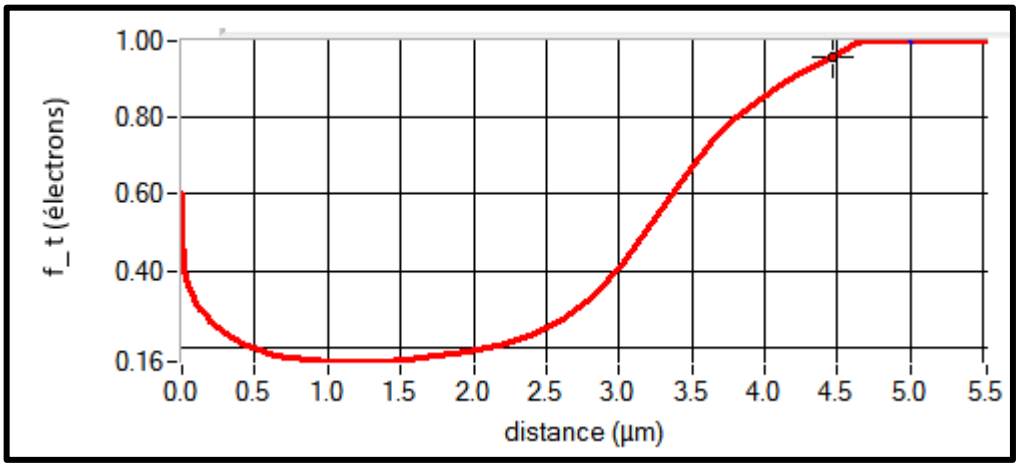


Figure. IV. 6 Probabilités d'occupation des défauts pour les électrons en fonction de la distance en µm.

La figure IV.7 montre un balayage des panneaux d'efficacité quantique en fonction de la longueur d'onde, d'après cette figure on note que l'efficacité maximale est 95 % à λ= 66 nm.

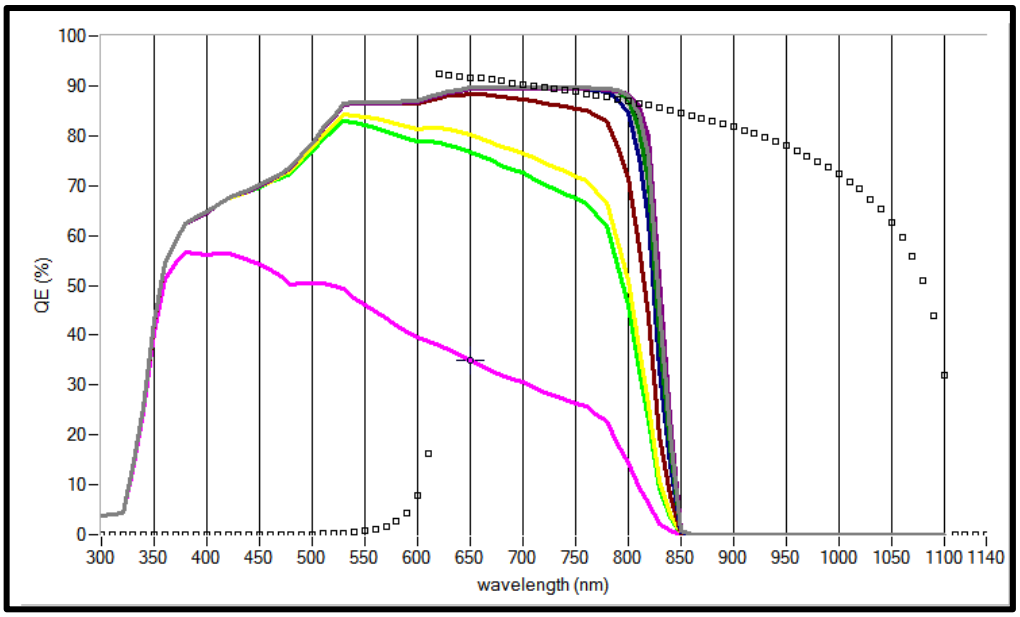


Figure. IV. 7 panneaux d'efficacité quantique en fonction de la longueur d'onde.

La figure IV. 8 montres l'amplitude des trous, électrons et la charge total en fonction de la distance, on note un pique similaire à la distance de 4 µm.

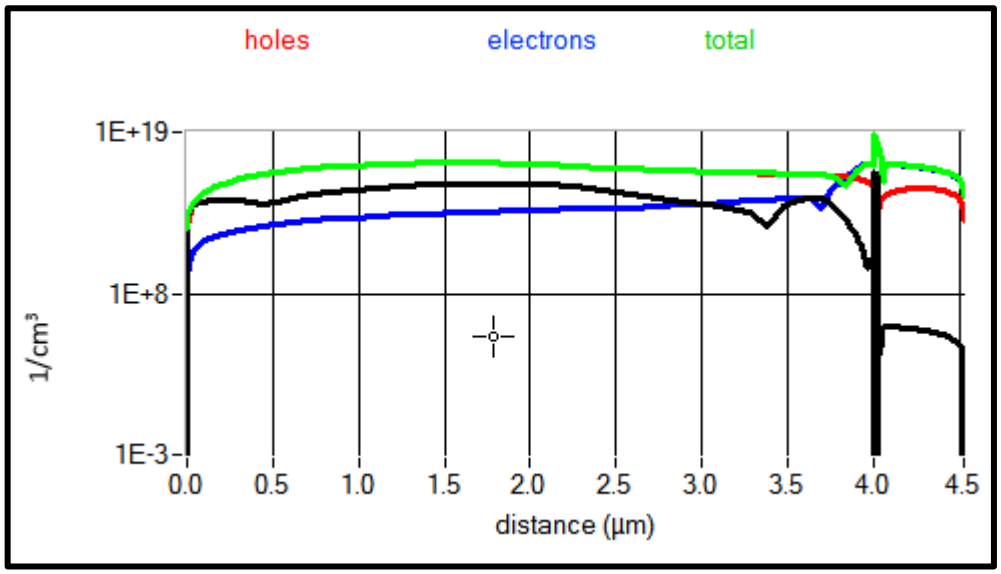


Figure. IV. 8 Amplitude en fonction de la distance (µm).

Valeur min =$1*10^{-3}/cm^3$

Valeur max= $1*10^9$ $/cm^3$

La figure IV. 9 montres le degré pour les trous, électrons et la charge total en fonction de la distance.

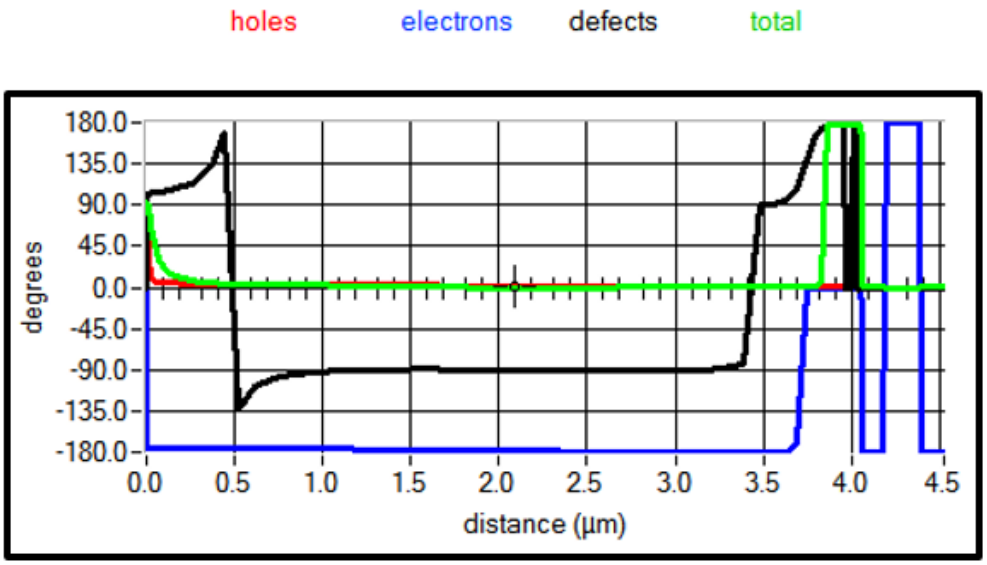


Figure. IV. 9 degré (θ) en fonction de la distance (µm).

(Valeur min= $-1.8*10^2$ degré, Valeur max = $1.8*10^2$ degré, f= $1*10^6$ Hz.)

La figure IV. 10 montres la densité de courant pour les trous, électrons et la charge total en fonction de la distance. On constate la densité maximale est de $4.177 *10^{-1}$ mA/cm^2.

Et la densité minimale est de $1.306*10^{-6}$ mA/cm^2.

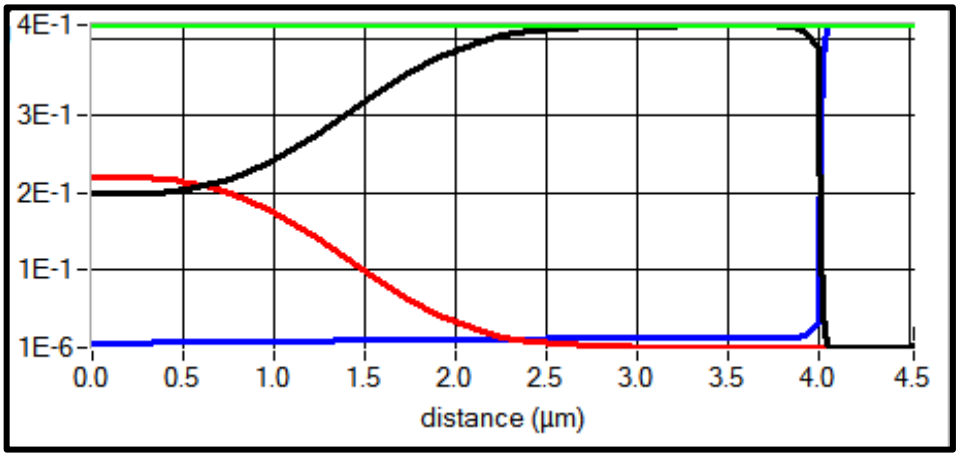


Figure. IV. 10 densités de courant en fonction de la distance (µm).

IV.2 Panneaux photovoltaïque de type charge symétrique dégradée [2].

❖ Les paramètres de la surface initiale

Température est 450 K

V_1 = 0 V

V_2= 1.4 V

WL_1 = 2000 nm

WL_2 = 200 nm

f_1= 10^{-2} Hz

f_1= 10^{-6} Hz

Vitesse de recombinaison de surface est 10^7 cm/s.

Comparant avec la figure IV.1 et IV.2 on voit bien que les cellules sont totalement différentes à case de la composition de panneau photovoltaïque. Alors on confirme que les matériaux que nous avons utilisés sont différents

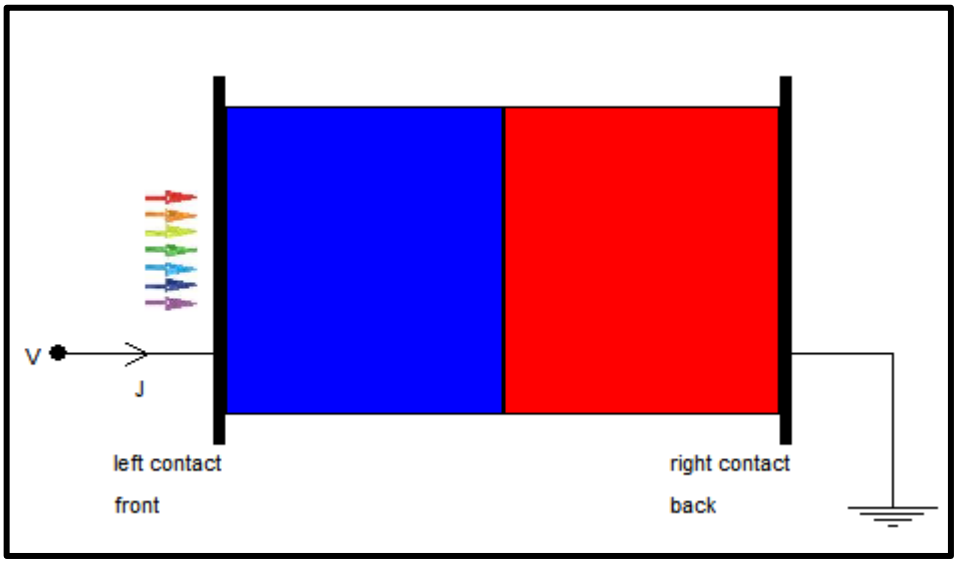


Figure.IV. 11 représentation de panneaux photovoltaïque de type charge symétrique dégradée avec SCAPS.

1ére couche les propriétés de semi-conducteur de type p

Les tableaux IV.4 et IV.5 représentent respectivement les résultats obtenues par simulation avec SCPAS 3309 pour la première et la deuxième couche de matériau de type p et n.

Tableau IV.4 Résultats obtenus par simulation pour la première couche matériau de chargé symétrique de type p.

Paramètre	valeur	Unité
Bande de gap	1.2	eV
Affinité d'électron	4.4	eV
Permittivité diélectrique	10	F/m
CB densité effective d'états	10^{19}	cm^{-3}
VB densité effective d'états	10^{19}	cm^{-3}
Vitesse thermique des électrons	10^{7}	cm/s
Vitesse thermique des trous	10^{7}	cm/s
Mobilité des electrons	5	Cm^2/Vs
Mobilité des trous	5	Cm^2/Vs

2^{éme} couche les propriétés de semi-conducteur de type n

Tableau IV.5 Résultats obtenus par simulation pour la deuxième couche matériau de chargé symétrique de type n.

Paramètre	valeur	Unité
Bande de gap	1.4	eV
Affinité d'électron	4	eV
Permittivité diélectrique	10	F/m
CB densité effective d'états	10^{19}	cm^{-3}
VB densité effective d'états	10^{19}	cm^{-3}
Vitesse thermique des électrons	10^{-7}	cm/s
Vitesse thermique des trous	10^{-7}	cm/s
Mobilité des electrons	5	Cm^2/Vs
Mobilité des trous	5	Cm^2/Vs

La figure IV. 12 représente le diagramme de bande de gap pour les trous, électrons et la charge totale en fonction de la distance, pour la couche mince de type n et p comme est indiquer sur la figure. On constate que valeur maximum de la bande de gap est de 2.039 eV, cette valeur est très élevée par rapport à celle trouvé dans la figure IV.3.

On remarque aussi que la valeur minimum de la bande est -6.709 $*10^{-1}$ eV.

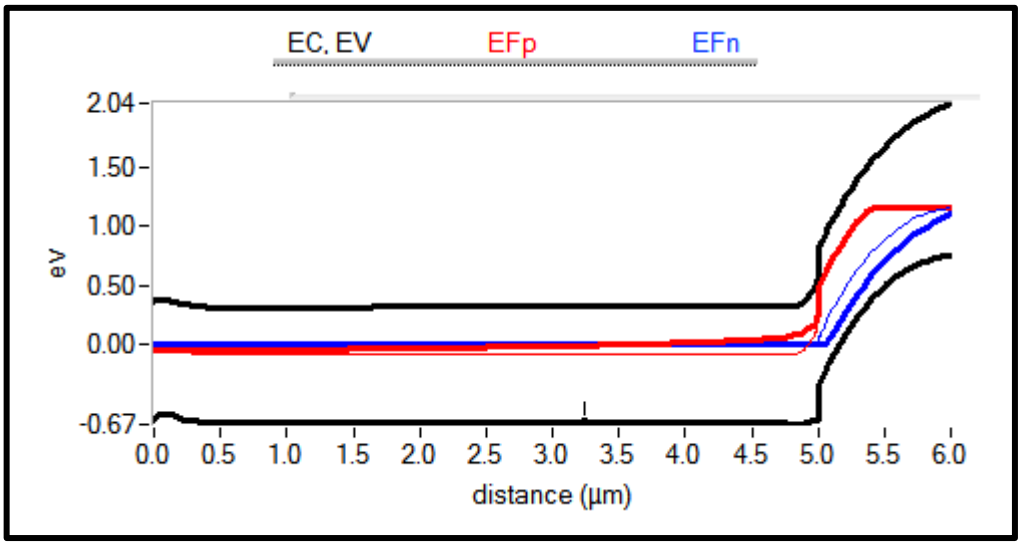


Figure.IV.12 : diagrammes de bande (eV) en fonction de la distance (µm).

La figure IV. 13 nous donne des résultats sur densité de charge des trous, électrons et la charge totale en fonction de la distance, on note que la valeur maximum de la densité de charge est de $1*10^{17}$ /cm^3, cette valeur est inferieur avec la densité de charge que nous avons trouvé dans la figure I.V.4. On note aussi Valeur minimum de la densité de courant est de $1*10^{8}$ /cm^3.

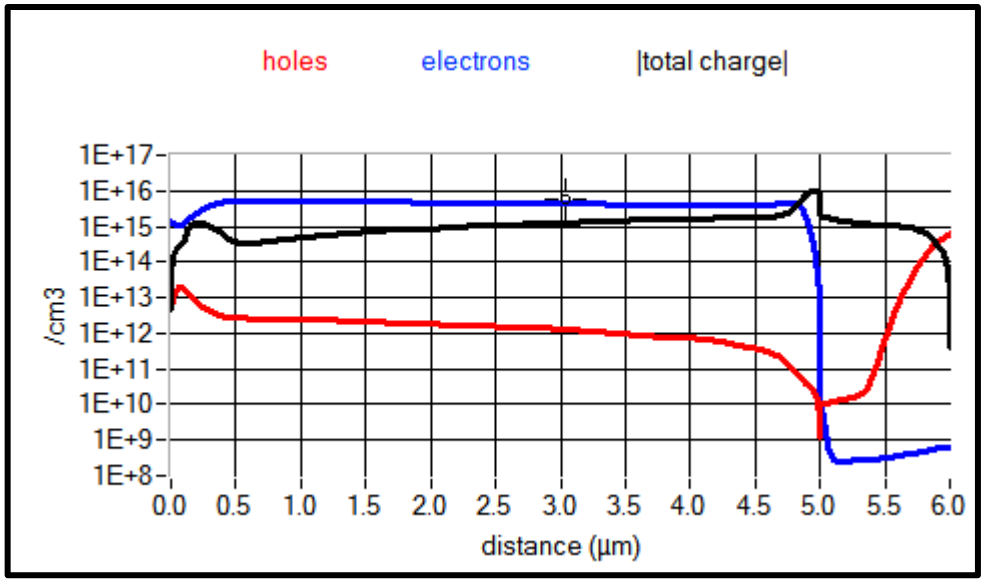


Figure.IV.13 densité de charge /cm^3 en fonction de la distance (µm).

La figure IV. 14 représente la probabilité d'occupation des trous et des électrons en fonction de la distance.

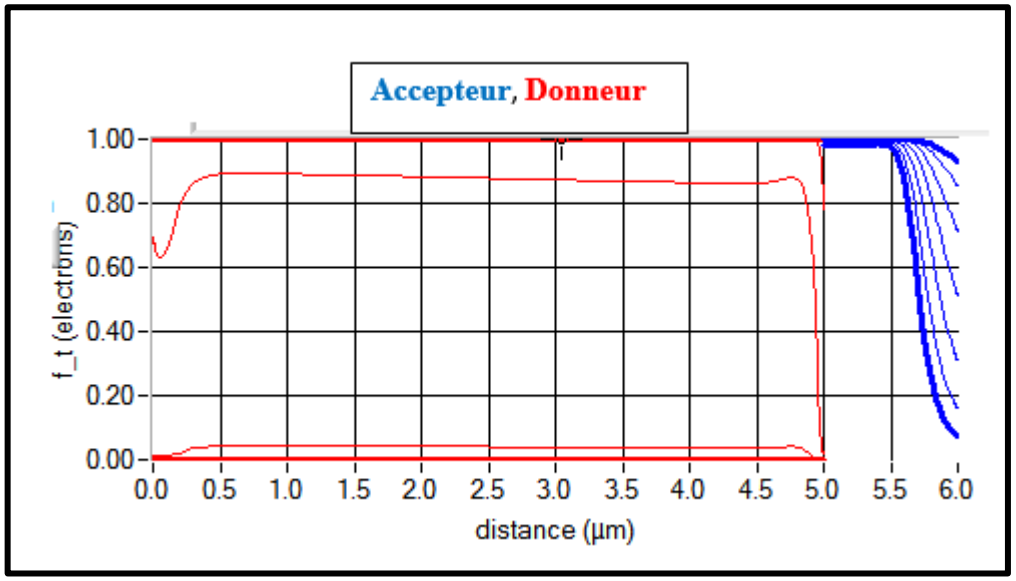


Figure.IV.14 probabilités d'occupation des défauts pour les électrons en fonction de la distance en µm.

La figure IV. 15 représente la densité de courant des trous, electrons et la charge totale en fonction de la distance. On constate que la densité de courant de trou est inversement proportionnelle à la densité de courant de electrons pour une distance 0.4 µm après il se stabilise.

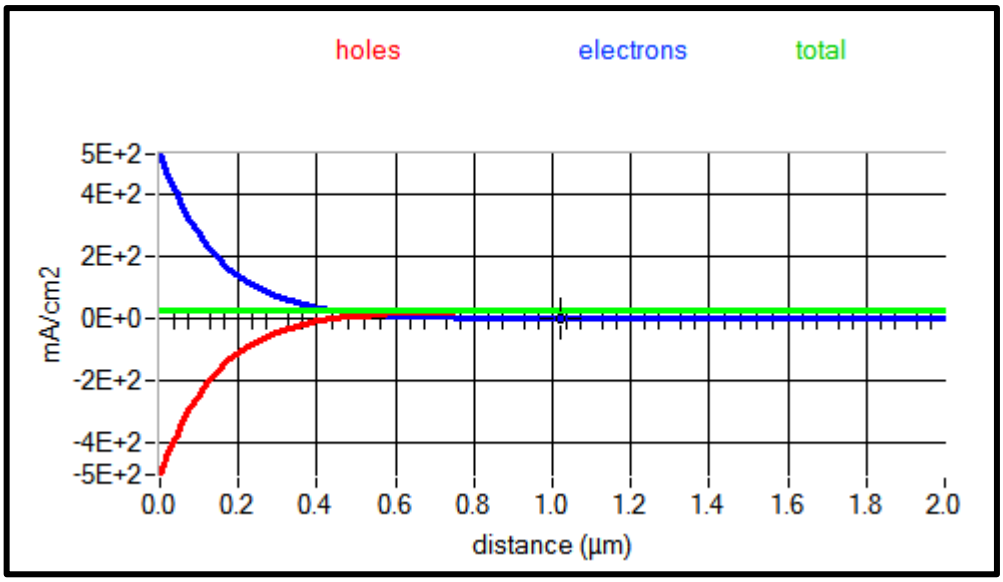


Figure.IV.15 densités de courant mA/cm^2 en fonction de la distance (µm).

La figure IV.16 montre un balayage des panneaux d'efficacité quantique en fonction de l'énergie des photons, d'après cette figure on note que l'efficacité maximale est 90 % à ϒ= 1.4 eV.

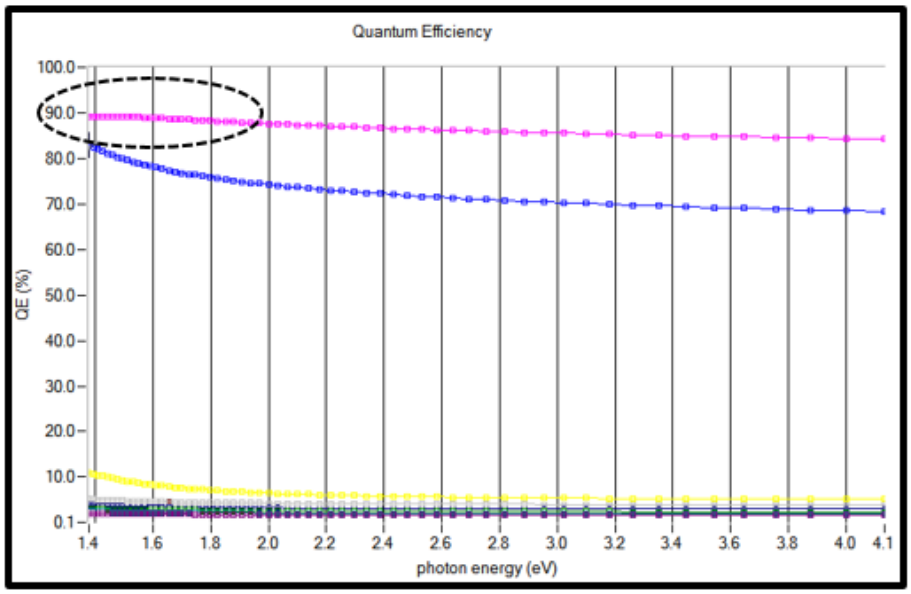


Figure.IV.16 panneaux d'efficacité quantique % en fonction d'énergie des photons en eV.

La figure IV. 17 représente la densité de courant de matériau de charge symétrique de type p et n en fonction de potentiel. On constate que la densité de courant est proportionnelle avec le potentiel et la valeur de Voc = 0.0854 V.

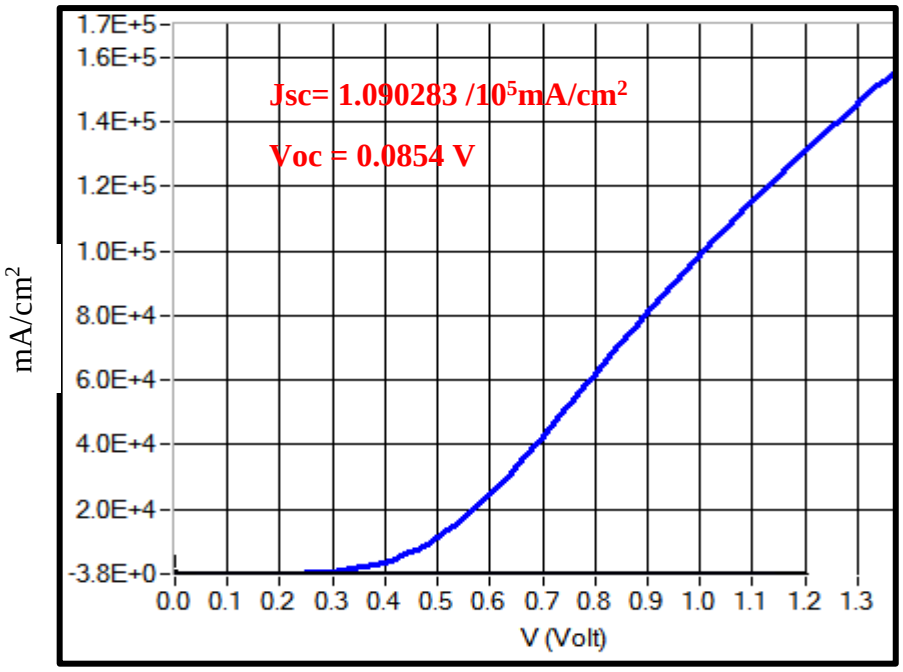


Figure.IV.17 la densité de courant en fonction de potentiel (V).

Par simulation avec SCAPS 3309, on note que les propriétés des couches minces de matériau (CdTe) sont pertinents par rapport au matériau de charge symétrique de type p et n. En comparant par exemple la mobilité des electrons, l'affinité, permittivité et la bande de gap etc.

Si on change un seul paramètre tous les résultats de simulation change on cite quelque paramètre de changement :

La fréquence, le potentiel, la température l'épaisseur le type de matériau.

IV.3 Panneaux photovoltaïque de type CIGS [3]

- **Les paramètres de la surface initiale**

Température est 300 K

V_1 = 0 V

V_2= 1.5 V

WL_1 = 900 nm

WL_2 = 200 nm

$f_1 = 10^{-2}$ Hz

$f_1 = 10^{6}$ Hz

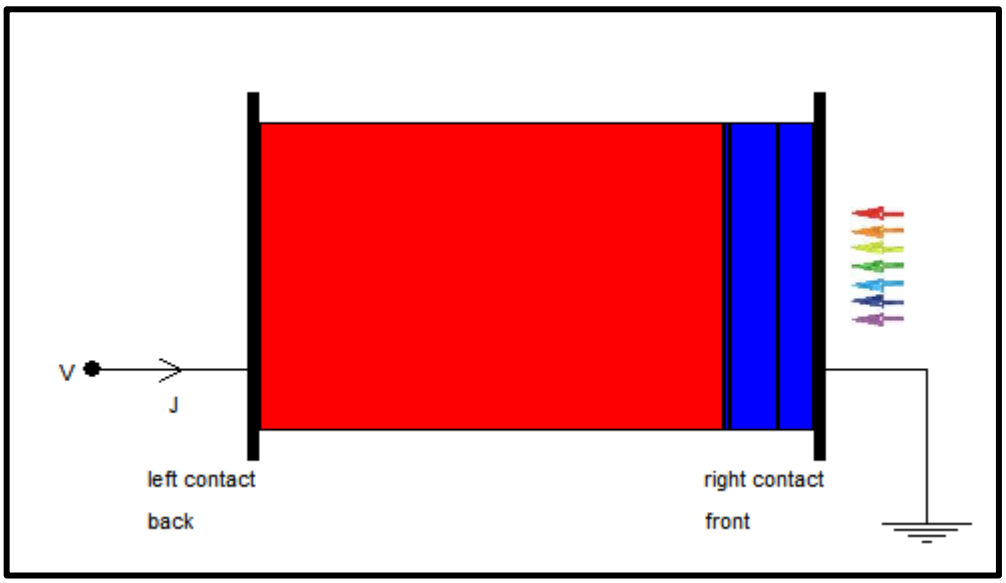


Figure. IV. 18 représentation de panneaux photovoltaïque de type CIGS avec SCAPS.

1ére couche les propriétés de semi-conducteur de type CIGS

Tableau IV.6 Résultats obtenus par simulation pour la première couche matériau (CIGS).

Paramètre	valeur	Unité
Bande de gap	1.2	eV
Affinité d'électron	4.5	eV
Permittivité diélectrique	10	F/m
CB densité effective d'états	10^{18}	cm^{-3}
VB densité effective d'états	10^{18}	cm^{-3}
Vitesse thermique des électrons	10^{7}	cm/s
Vitesse thermique des trous	10^{7}	cm/s
Mobilité des electrons	50	Cm^2/Vs
Mobilité des trous	20	Cm^2/Vs

2éme couche les propriétés de semi-conducteur de type OVC

Tableau IV.7 Résultats obtenus par simulation pour la deuxiéme couche matériau (OVC).

Paramètre	valeur	Unité
Bande de gap	1.4	eV
Affinité d'électron	4.5	eV
Permittivité diélectrique	10	F/m
CB densité effective d'états	10^{18}	cm^{-3}
VB densité effective d'états	10^{18}	cm^{-3}
Vitesse thermique des électrons	10^{7}	cm/s
Vitesse thermique des trous	10^{7}	cm/s
Mobilité des electrons	1	Cm^2/Vs
Mobilité des trous	1	Cm^2/Vs

3éme couche les propriétés de semi-conducteur de type CdS

Tableau IV.8 Résultats obtenus par simulation pour la troisième couche matériau (CdS).

Paramètre	valeur	Unité
Bande de gap	2.45	eV
Affinité d'électron	4.45	eV
Permittivité diélectrique	10	F/m
CB densité effective d'états	$2*10^{18}$	cm^{-3}
VB densité effective d'états	$1.5*10^{19}$	cm^{-3}
Vitesse thermique des électrons	10^{7}	cm/s
Vitesse thermique des trous	10^{7}	cm/s
Mobilité des electrons	5	Cm^2/Vs
Mobilité des trous	2	Cm^2/Vs

4éme couche les propriétés de semi-conducteur de type i-ZnO

Tableau IV.9 Résultats obtenus par simulation pour la quatriéme couche matériau (**i-ZnO**).

Paramètre	valeur	Unité
Bande de gap	3.4	eV
Affinité d'électron	4.55	eV
Permittivité diélectrique	10	F/m

CB densité effective d'états	$4*10^{18}$	cm^{-3}
VB densité effective d'états	$9*10^{18}$	cm^{-3}
Vitesse thermique des électrons	10^{7}	cm/s
Vitesse thermique des trous	$5*10^{7}$	cm/s
Mobilité des electrons	5	Cm^2/Vs
Mobilité des trous	2	Cm^2/Vs

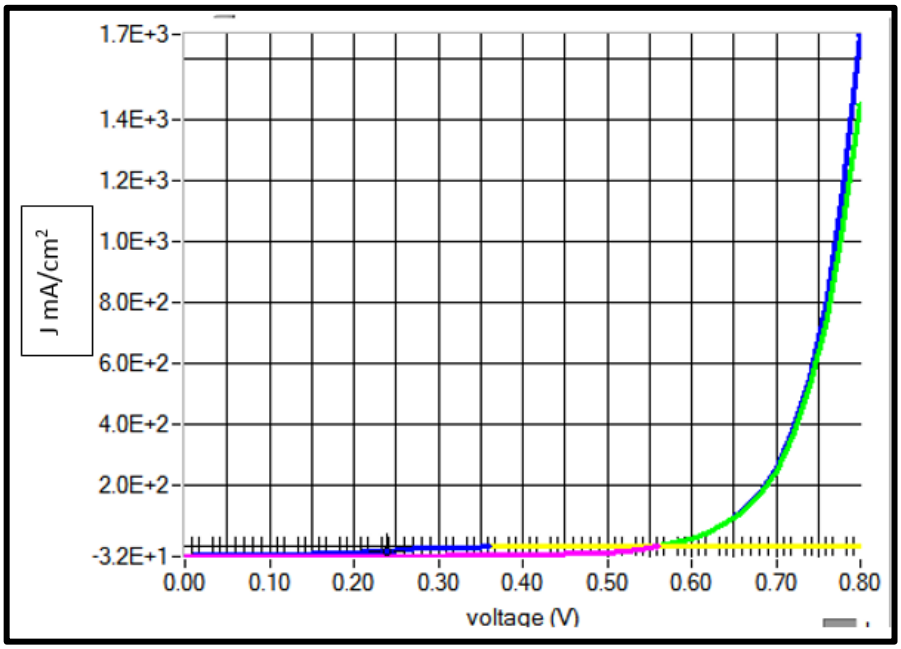


Figure. IV. 19 Densité de courant mA/cm^2 en fonction de voltage (V).

Valeur de la densité de courant maximal est $1.682*10^3$ mA/cm^2

Valeur de potentiel maximale est 0.8 V

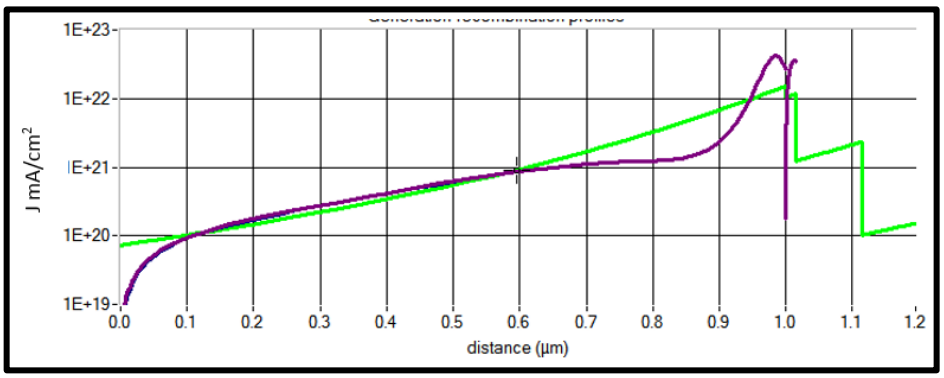


Figure. IV. 20 densité de courant mA/cm^2 en fonction de la distance (µm).

Valeur de la distance maximale est 1.015 µm.

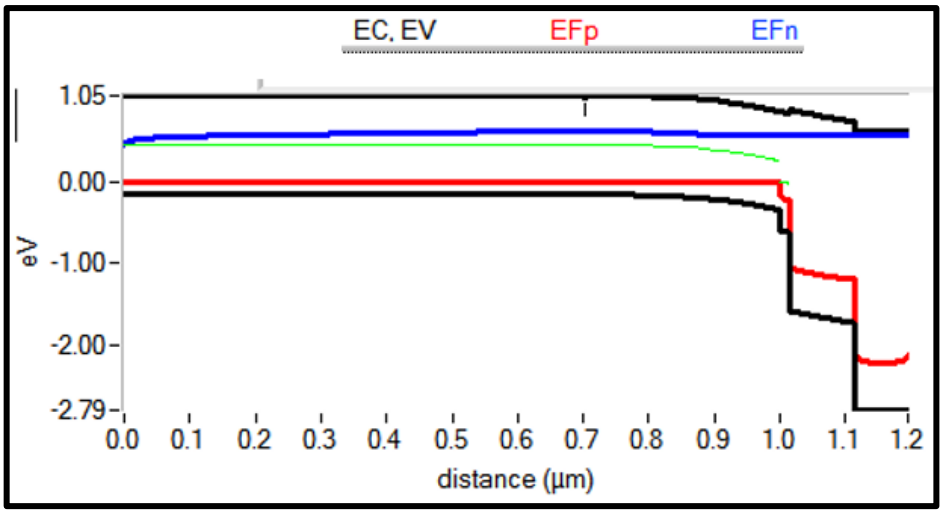


Figure. IV. 21 Diagramme de bande (eV) en fonction de la distance (µm).

Valeur maximale d'energie est de 1.047 eV.

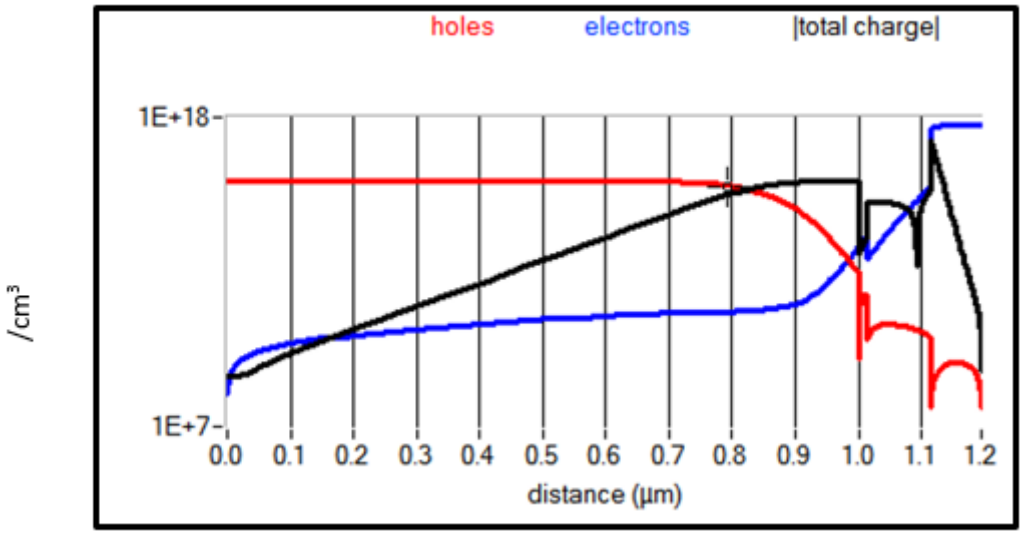


Figure. IV. 22 densités de charge /cm^3 en fonction de la distance (µm).

Valeur de la densité de charge est de 1.0*10^{18}/cm^3.

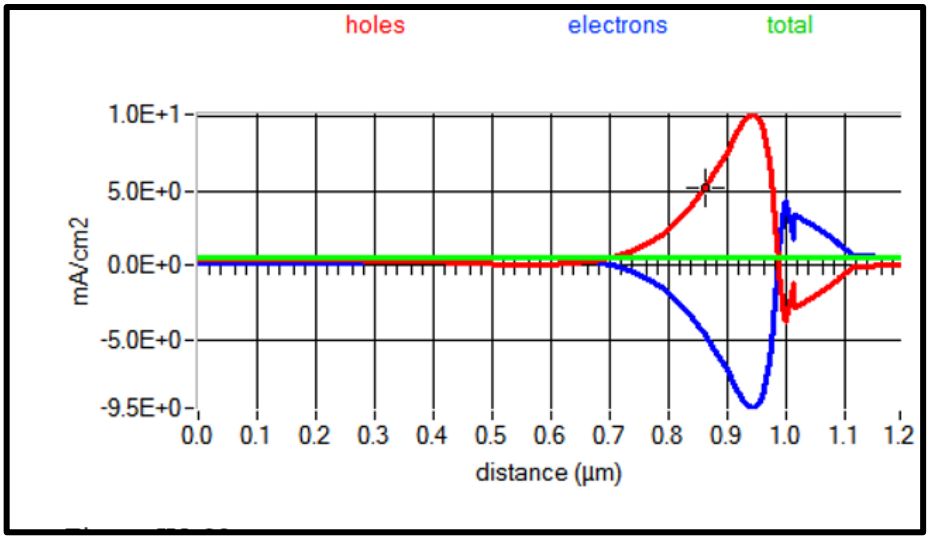


Figure. IV. 23 densités de courant mA /cm^2 en fonction de la distance (µm).

Valeur de la densité de courant est de 1.012*10^1 mA/cm^2.

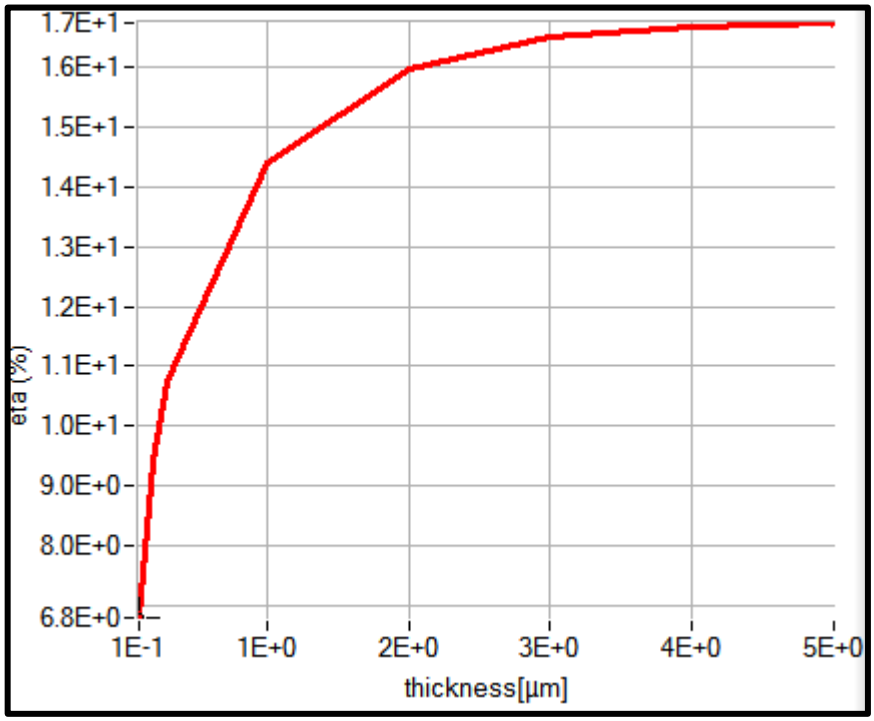


Figure. IV. 24 L'efficacité % en fonction de la distance (µm).

Valeur d'efficacité maximale est de 16.75 %.

IV.4 Panneaux photovoltaïque de type InCu métastable

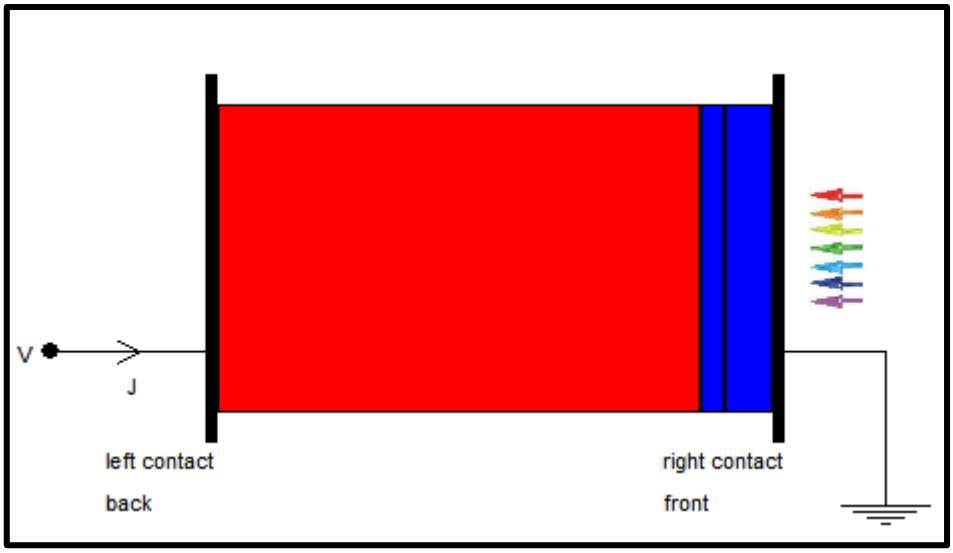


Figure. IV. 25 représentation de panneaux photovoltaïque de type InCu métastable.

1ére couche les propriétés de semi-conducteur de type CISS

Tableau IV.10 Résultats obtenus par simulation pour la première couche matériau (CISS).

Paramètre	valeur	Unité
Bande de gap	1.4	eV
Affinité d'électron	4.3	eV
Permittivité diélectrique	12	F/m
CB densité effective d'états	$1*10^{19}$	cm^{-3}
VB densité effective d'états	$1*10^{19}$	cm^{-3}
Vitesse thermique des électrons	10^{7}	cm/s
Vitesse thermique des trous	10^{7}	cm/s
Mobilité des electrons	100	Cm^2/Vs
Mobilité des trous	2.5	Cm^2/Vs

2éme couche les propriétés de semi-conducteur de type CdS

Tableau IV.11 Résultats obtenus par simulation pour la deuxième couche matériau (CdS).

Paramètre	valeur	Unité
Bande de gap	2.42	eV
Affinité d'électron	4.1	eV

Permittivité diélectrique	9	F/m
CB densité effective d'états	$3*10^{18}$	cm^{-3}
VB densité effective d'états	$1.8*10^{19}$	cm^{-3}
Vitesse thermique des électrons	10^{7}	cm/s
Vitesse thermique des trous	$5*10^{7}$	cm/s
Mobilité des electrons	100	Cm^2/Vs
Mobilité des trous	$2.5*10^{1}$	Cm^2/Vs

3éme couche les propriétés de semi-conducteur de type ZnO

Tableau IV.12 Résultats obtenus par simulation pour la troisième couche matériau (ZnO).

Paramètre	valeur	Unité
Bande de gap	3.3	eV
Affinité d'électron	4.1	eV
Permittivité diélectrique	9	F/m
CB densité effective d'états	$4*10^{18}$	cm^{-3}
VB densité effective d'états	$1*10^{19}$	cm^{-3}
Vitesse thermique des électrons	10^{8}	cm/s
Vitesse thermique des trous	$5*10^{8}$	cm/s
Mobilité des electrons	100	Cm^2/Vs
Mobilité des trous	$2.5*10^{1}$	Cm^2/Vs

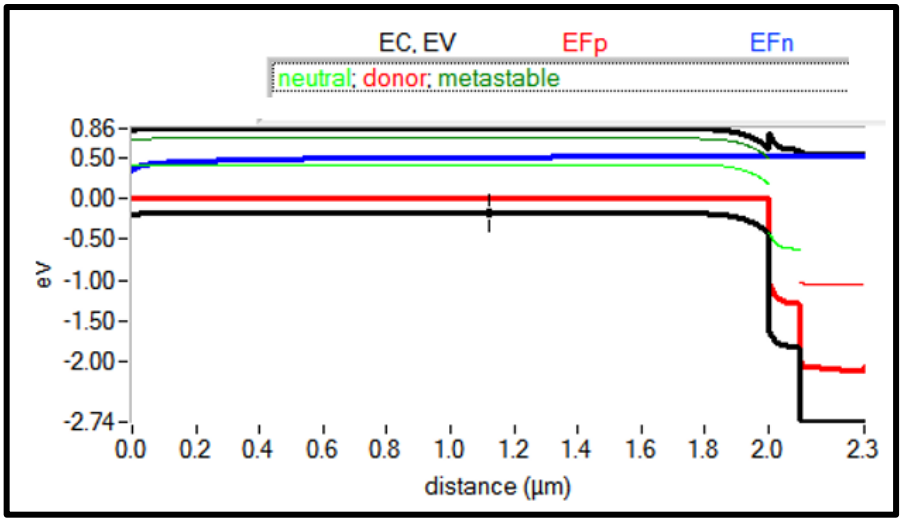


Figure. IV. 26 Diagramme de bande (eV) en fonction de la distance (µm).

Valeur d'énergie maximale est de 0.8611 eV

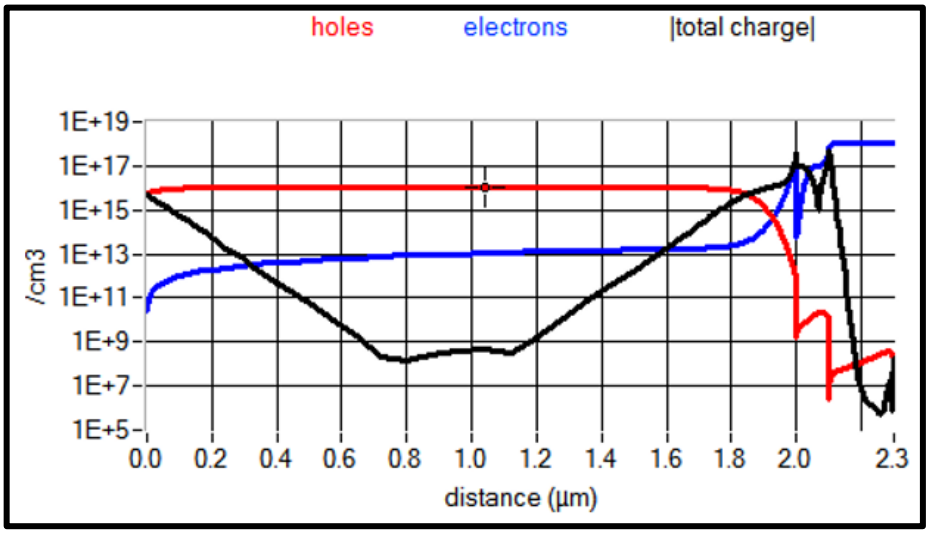


Figure. IV. 27 densités de charge /cm^3 en fonction de la distance (µm).

La valeur de la densité de charge est de 1*10^{19} V.

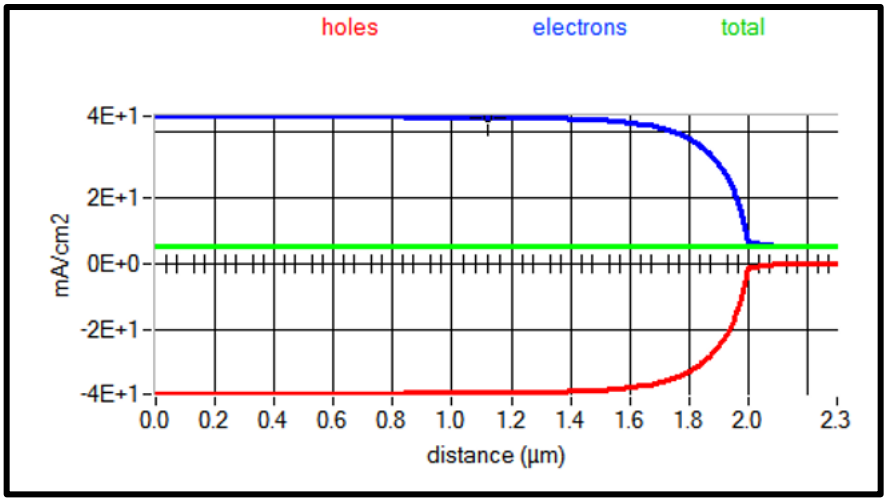


Figure. IV. 28 densité de courant mA/cm^2 en fonction de voltage (V).

La valeur de la densité de courant est de 4.45*10^1 mA/cm^2.

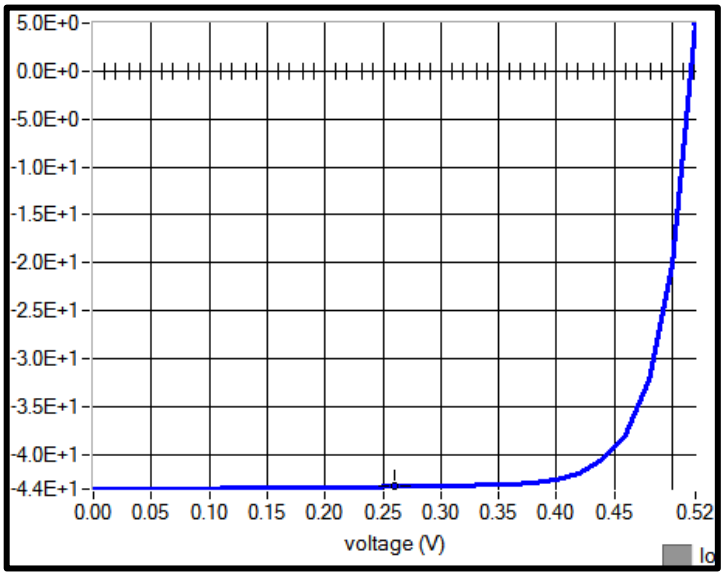


Figure. IV. 29 densité de courant mA/cm^2 en fonction de voltage (V).

La valeur de densité de courant est de 4.972 mA/cm^2.

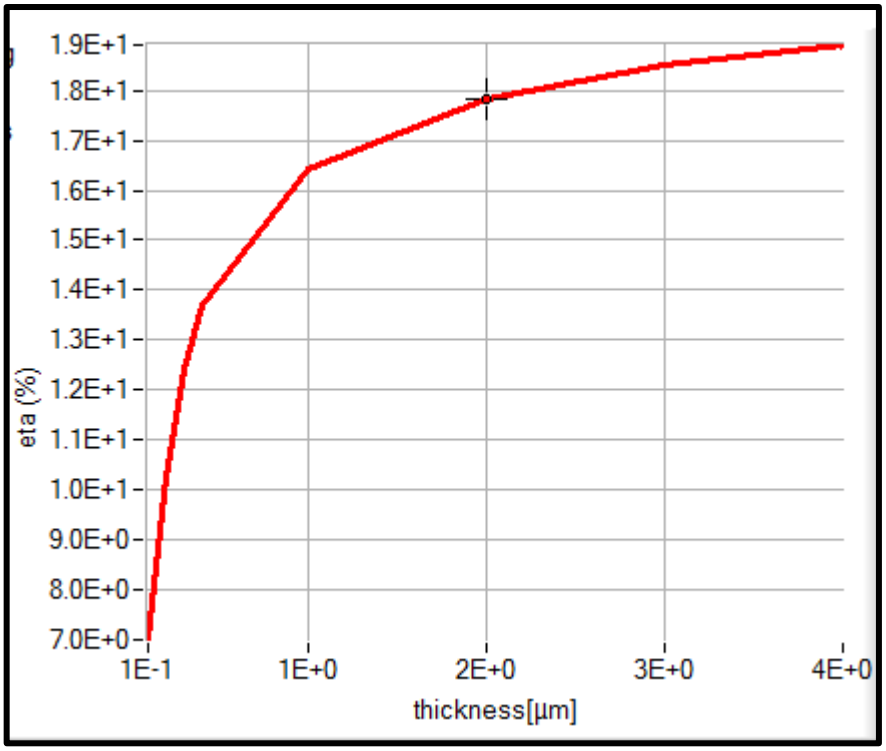


Figure. IV. 30 L'efficacité % en fonction de la distance (µm).

Valeur d'efficacité maximale est de 18.9 %.

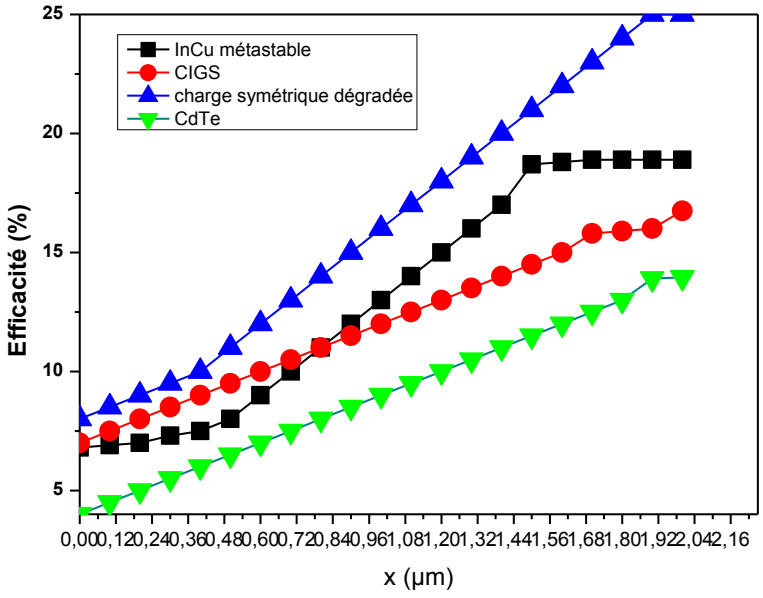


Figure. IV. 31 Etat % en fonction de l'épaisseur nm

La figure IV.31 montre l'efficacité des quatres matériaux en fonction du l'épaisseur, d'après cette figure on note que le matériau de charge symétrique dégradée de type p et n à le meilleur rendement par rapport aux autres matériaux.

Le matériau CdTe possède un faible rendement qui égale à 13.95 %. On constate que le rendement du matériau dépond de ces paramètres et ces propriétés.

Conclusion Générale

Conclusion Générale et recommandations

Dans ce mémoire, nous avons présenté une simulation des cellules solaires à base du CdTe, un matériau de charge symétrique de type p et n, matériau photovoltaïque de type CIGS et en dernier matériau de type In Cu métastable.

Deux structures de cellules photovoltaiques ont été simulées à l'aide du logiciel SCAPs-3309, afin de déterminer l'influence de certains paramètres de ces cellules (épaisseur et concentration du dopage) sur les performances photovoltaïques : Tension de circuit ouvert, Courant de court-circuit, Facteur de forme et le rendement de conversion.

Les résultats obtenus après simulation de deux cellules permettent de nous informer beaucoup de donnés sur la densité de courant, l'efficacité quantique et les paramètres des couches minces.

A l'aide de logiciel SCAPS, nous avons tracé des courbes de densité de courant, densité de charge les bandes de gaps la probabilité d'occupation des défauts et l'efficacité quantique. Nous avons obtenues des résultats différents pour les deux matériaux.

L'étude comparative de quatre matériaux montre que l'efficacité quantique est de 95 % pour le matériau de type hétéro jonction CdTe par rapport au matériau de charge symétrique de type p et n son efficacité est de 90 %.

Selon nos résultats expérimentaux on peut noter que, il est claire d'utiliser le logiciel SCAPS pour une simulation des panneaux photovoltaiques.

Comme suite et perspectives, plusieurs travaux futurs pourraient être poursuivis à partir de nos résultats et de nos recherches. Nous proposons particulièrement :

- Faire le dopage et avoir un nouveau matériau avant de le construire
- Changer la température et la fréquence
- Faire la variation de l'épaisseur de la surface
- Utiliser le logiciel SCAPS 3 D pour enrichir les résultats expérimentaux.

Conclusion Générale

C Références bibliographique (introduction générale)

[1]Z. El Jouad, Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques (Thèse de doctorat, Université d'Angers, Angers, France), 2016.

[2] F. Lasnier, T.G. Ang, “Photovoltaic Engineering Handbook”, IOP Publishing Ltd. 1980. ISBN 0-85274-311-4.

Références bibliographiques(chapitre I)

[1] K.Touafek, "Etude d’un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique", mémoire de magister, école nationale polytechnique, Alger, 2005.

[2] M. mohammedi « Etudes » Mémoire.

[3] T. Desrus, "Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière", thèse de doctorat, l’institut national des sciences appliquées de Lyon, 2009.

[4] Moulay Ahmed SLIMANI, Thèse de doctorat, École De Technologie Supérieure Université Du Québec, Cellules solaires pérovskites imprimées et optimisation des couches pérovskites pour les cellules tandems, p, 137, 2019.

[5] AZZEMOU, Fatiha, Optimisation des performances des cellules solaires à base d’hétérojonctions de silicium. Thèse de doctorat en physique appliquée, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, p, 136, 2020.

[6] H. Horsin Molinaro, B. Multon, « Energie électrique : génération photovoltaïque », Ressource pédagogique, Culture Sciences de l’Ingénieur, Ecole normale Paris -Saclay, 2020.

[7] M. R. Jani et al., « Exploring solar cell performance of inorganic Cs2TiBr6 halide double

perovskite: A numerical study», Superlattices Microstruct., vol. 146, 106652, 2020.

[8] M. T. Islam et al., « Numerical simulation studies of a fully inorganic Cs2AgBiBr6

perovskite solar device», Opt. Mater., vol. 105, 109957, 2020.

[9] Le Figaro, « Le tour du monde en avion solaire », 2016. https://www.futura-

sciences.com/sciences/actualites/avion-cinq-ans-apres-tour-monde-solar-impulse-progres-continue-92609/ consulté le 20/03/2020.

[10] Y. Rousseau, « Au Japon, le succès d'une PME lilloise dans le solaire flottant », Les echos, 2014. https://www.lesechos.fr/2014/11/au-japon-le-succes-dune-pme-lilloise-dans-le-

solaire-flottant-313001 consulté le 20/03/2020.

[11] C. Lerouge, Recherche & Industrie Photovoltaïque (PV) aux Etats-Unis, Science physique, 2006.

[12] S. Quoizola, "épitaxie en phase vapeur de silicium Sur silicium mesoporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût", thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2007

[13] A. Moummi, N. Hamani, N. Moummi& Z. Mokhtari "estimation du rayonnement solaire par deux approches semi empiriques dans le site de biskra",8éme seminaire international sur la physique energetique, centre universitaire de bechar–algerie, novembre 2006.

[14] Mr. MAROUF ADIL « Création d'une entreprise d'installation des panneaux solaires» mémoire fin d'etudes master Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen. 2014.

[15] http://www.photovoltaique.info/Les-types-de-modules.html.

[16] M. A. Green, K. Emery, Y.Hishikawa, W. Warta. Progress in Photovoltaics : Research and Applications, 16, 435-440 (2008).

[17] La fabrication des cellules photovoltaïques « Hallou Solaire » (Google).

[18] Salima Alem-Boudjemline, Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaiques plastiques, Université d'Angers, 2004.p 153.

[19] Grine Abderrahmane, Etude caractéristique des panneaux photovoltaïque système arduino mémoire Université Mohamed Khider de Biskra, 2020 p, 74

Références bibliographiques(chapitre II)

[1] Mailoa, J. P., Bailie, C. D., Johlin, E. C., Hoke, E. T., Akey, A. J., Nguyen, W. H., . . . Buonassisi, T. (2015). A 2-terminal perovskite/silicon multijunction solar cell enabled by a silicon tunnel junction. Applied Physics Letters, 106(12), 121105. Repéré à http://dx.doi.org/10.1063/1.4914179.

[2] Z. El Jouad, G. Louarn, T. Praveen, P. Predeep, L. Cattin, J.C. Bernède, M. Addou, M.
Morsli. EPJ Photovoltaics 5 (2014) 50401.

[3] Green, M. A.; Emery, K.; Hishikawa, Y.; Warta, W.; Dunlop, E.D. Solar Cell Efficiency Tables (version 43). Prog. Photovolt: Res. Appl., 2014, 22, 1-9.

[4] Feltrin, A. Freundlich, A. Material Considerations for Terawatt Level Deployment of Photovoltaics. Renewable Energy, 2008, 33, 180-185.

[5] Jacobson, M. Z.; Delucchi, M.A. Providing All Global Energy with Wind, Water, and Solar Power, Part I: Technologies, Energy Resources, Quantities and Areas of Infrastructure, and Materials. Energy Policy, 2011, 39, 1154-1169.

[6] Denis Fichou, thése de doctorat Dipyrrométhènes métallés (Co,Ni,Cu) et dipyrannilidènes: de nouveaux matériaux organiques pour la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire, nstitut Parisien de Chimie Moléculaire / Equipe NASCO, 2014, p 203.

[7] Dominic, D'Astous, Développement de nouveaux matériaux de type n pour applications en photovoltaïque organique dans le proche infrarouge, thèse de doctorat, université de laval, 2023, p 135.

[8] Salima Alem-Boudjemline, Réalisation Et Caracterisation De Cellules Photovoltaïques Plastiques, Université D'Angers, 2006, p 153.

[9] Bobyl, A.V.; Terukov, E.I. Development of Cheap Solar Cells Based on Si Using Plasma-Chemical Technologies. *AgroEcoEngineering*. 2016, 88, pp. 35–45. Available online:**https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-deshevyh-solnechnyh elementov-na-osnove-si-s-ispolzovaniem-plazmohimicheskih-tehnologiy** (accessed on 27 June 2023).

[10] Dhass, A.; Patel, D.; Patel, B. Estimation of power losses in single-junction gallium-arsenide solar photovoltaic cells. *Int. J. Thermofluids* **2023**, *17*, 100303. [**Google Scholar**] [**CrossRef**]

[11] New World Record for Solar Cell Efficiency at 46% French-German Cooperation Confirms Competitive Advantage of European Photovoltaic Industry. Fraunhofer ISE. Available online: https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2014/new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent.html, 2023.

[12] Wutz, M.; Topic, M.; Grimm, M.; Schlemm, H.; Fahland, M.; Bertomeu, J.; Soppe, W.; Fischer, D.; Ballif, C.; Söderström, T.; et al. Final results of the european project flexcellence: Roll to roll technology for the production of high efficiency low cost thin

film solar cells. In Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany, 4–8 September 2006; pp. 1669–1672.

[13] Tjengdrawira, C.; Lamers, M.W.P.E.; Bennett, I.J.; De Jong, P.C. World first 17% efficient multi-crystalline silicon module. In Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Honolulu, HI, USA, 20–25 June 2010.

[14] Green, M.A. Crystalline and thin film silicon solar cells: State of the art and future potentia. Solar Energy 2003, 74, 181–198

[15] Kazmerski, L.L. Photovoltaics: A review of cell and module technologies. Renew. Sustain. Energy Rev. 1997, 1, 71–170.

[16] Shockley, W.; Queisser, H.J. Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. *J. Appl. Phys.* **1961**, *32*, 510–519

[17] Rashid Dallaev , Tatiana Pisarenko, Nikola Papež and Vladimír Holcman, Overview of the Current State of Flexible Solar Panels and Photovoltaic Materials, 16, 5839, . https://doi.org/10.3390/ma16175839 2023.

[18] Gremenok, V.F. Solar Cells Based On Semiconductor Materials; Gremenok, V.F., Tivanov, M.S., Zalesskiy, V.B., Eds.; Center of BSU: Minsk, Belarus, 2007; 222p, ISBN 985-476-443-5

[19] Contreras, M.A.; Egaas, B.; Ramanathan, K.; Hiltner, J.; Swartzlander, A.; Hasoon, F.; Noufi, R. Progress toward 20% efficiency inCu(In,Ga)Se2 polycrystalline thinfilm solar cells. Prog. Photovolt. Res. Appl. 1999, 7, 311–316.

[20] Kessler, F.; Herrmann, D.; Powalla, M. Approaches to flexible CIGS thin-film solar cells. Thin Solid Films 2005, 480–481, 491–498.

[21] Herrmann, D.; Kessler, F.; Klemm, U.; Kniese, R.; Friedlmeier, T.M.; Spiering, S.; Witte, W.; Powalla, M. Flexible, Monolithically Integrated Cu(In,Ga)Se2 Thin-Film Solar Modules. MRS Proc. 2005, 865, 151.

[22] Hartmann, M.; Schmidt, M.; Jasenek, A.; Schock, H.W.; Kessler, F.; Herz, K.; Powalla, M. Flexible and light weight substrate for Cu(In,Ga)Se2 solar cell and modules. In Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New York, NY, USA, 15–22 September 2000; pp. 638–639

[23] Andreev, V.M. Cascade Solar Batteries for Space and Ground Application; Engineering research; Vestnik RUDN University. 2020. №4. Available online: https://cyberleninka.ru/article/n/kaskadnye-solnechnye-batarei-kosmicheskogo-i-nazemnogo-prime neniya, 2023.

[24] Yoon, J.; Kim, U.; Yoo, Y.; Byeon, J.; Lee, S.-K.; Nam, J.-S.; Kim, K.; Zhang, Q.; Kauppinen, E.I.; Maruyama, S.; et al. Foldable Perovskite Solar Cells Using Carbon Nanotube-Embedded Ultrathin Polyimide Conductor. Adv. Sci. 2021, 8, 2004092.

[25] Daniel Lincot, Matériaux pour la conversion photovoltaïque, energie, Société chimique de France, 2002, p 6.

[26] Xin Zhang a, Hao Zhou a, Chen Hu a, Yuyi Zhao a, Xinxia Ma a, , Jiang Wu a,b,, Yongfeng Qi c, Weijie Fang a, Sixuan Jia a, Jingfei Yu, Performance analysis of all-inorganic Cs3Sb2I9 perovskite solar cells with micro-offset energy level structure by SCAPS-1D simulation and First-principles calculation, Solar Energy Materials and Solar Cells, 2023.

[27] Junhua Lu ,1, Shuo Chen , Hairong Wang , Long Qiu , Chenyu Wu , Wencan Qian , Zhijie Wang , Kai Huang ,, Jiang Wu, Huan Chen, Yuxing Gao, Replacing the electron-hole transport layer with doping: SCAPS simulation of lead-free germanium-based perovskite solar cells based on CsGeI3, Solar Energy Materials & Solar Cells 271 (2024) 112883.

Références bibliographiques(chapitre III)

[1] M. Burgelman, P. Nollet, S. Degrave, Modelling polycrystalline semiconductor solar cells, Thin Solid. Films, 361 (2000) 527-532.

[2] K. Decock, S. Khelifi, M. Burgelman, Modelling multivalent defects in thin film solar cells, Thin Solid Films, 519 (2011) 7481-7484.

[3] M. Burgelman, J. Marlein, Analysis of graded band gap solar cells with SCAPS, Proceedings of the23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, 2008, pp. 2151-2155.

[4] J. Verschraegen, M. Burgelman, Numerical modeling of intra-band tunneling for heterojunction solar cells in SCAPS, Thin Solid Films, 515 (2007) 6276-6279.

[5]] S. Degrave, M. Burgelman, P. Nollet, Modelling of polycrystalline thin film solar cells : new features in SCAPS version 2.3, Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, 2003, pp. 487-490

[6] A. Niemegeers, M. Burgelman, Numerical modelling of ac-characteristics of CdTe and CIS solarcells, Proceedings of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, 1996, pp.901-904.

[7] Ben Abderrazak Ghania, Etude par simulation numérique de la Cellule solaire à base de CZTS par SCAPS, Mémoire de fin d'étude, Université Med Khider Biskra, 2014, p 88.

[8] Samira Mouhous Chaouchi, " Etude Statistique de rayonnement solaire sur un plan incline ", mémoire de magister, université Abou Bekr Belkaid, 2012.

[9] Merad Faiza, « conception d'un programme de calcul du rayonnement solaire cas particulier de la région de Mostaganem », mémoire de magister, 2013.

[10] souisi fatma zohra", Modélisation d'une cellule solaire en couche mince a base de cuivre Indium sélénium", mémoire de magister, université Kasdi Marbah Ourgla, 2009

[11] Boufia Mounir et Deblaoui Laid, " Modélisation et simulation d'une cellule solaire couche mince à base di-séléniure de cuivre, d'indium et de Gallium [GIGS]", mémoire de master, université Kasdi Marbah Ourgla, 2012.

References bibliographique(chapitre IV)

[1] M.Gloechler, A.Fahrenbruch and J.Sites, 3 rd Word conference on photovoltaic energy conversion, the CdTe base case, p 491-494. 2003.

[2] scaps 2.8 simulation n layer the shallow donr is composition dependent, p layer the shallow acceptor doping is postion dependent, the interface do affect the cell behavior above 0.35 V their total density is important, but the precise shape and width of their energy distribution is of minor importance, 2009.

[3] SCAPS 3.3.02 ELIS-UGent: Version scaps3302.exe, 2015.