



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention de diplôme

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : Physique Energétique et Energies Renouvelables

Par :

Mme Bouayad Debbagh Wassila

Sous le thème

Influence de la couche tampon (TiO_2 , SnO_2) sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire

Soutenu publiquement le **25 juin 2023** à Tlemcen devant le jury composé de :

Mme **S. BENSMAINE**

M.C.A

Université De Tlemcen

Présidente

Mme **C. MERZOUK**

M.A.A

Université De Tlemcen

Encadrante

Mme **C. ZIDANI**

M.C.A

Université De Tlemcen

Examinatrice

Remerciements

Ce manuscrit a été réalisé au sein du département de physique de la faculté des sciences à l'université de Tlemcen et l'unité de recherche des matériaux et des énergies renouvelables « URMER ».

Mes remerciements s'adressent tout d'abord aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur de participer à ma soutenance et qui ont accepté d'évaluer ce travail de recherche.

Je remercie mon encadrante Mme **Chams El Hayat MERZOUK**. Ce fut un énorme plaisir pour moi d'évoluer à ses côtés durant ces derniers mois. Ce travail n'aurait pas été possible sans son soutien, sa disponibilité, sa qualité d'encadrement et sa grande rigueur scientifique. Ce sont ces qualités qui ont mené à l'aboutissement de ce mémoire.

Je remercie Mme **Souhila BENSMAINE**, maître de conférences classe A à l'université de Tlemcen d'avoir accepté de présider le jury. Je lui suis reconnaissante pour sa gentillesse et sa bienveillance durant tout mon cycle du Master et de Licence.

Je tiens également à remercier Mme **Chafika ZIDANI**, maître de conférences classe A à l'Université de Tlemcen d'avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.

Mes sincères remerciements et mon entière gratitude vont à Mme **Zahera DIB**, maître de conférences B au sein de l'université Abou Bakr Belkaid pour ses conseils et son dévouement tout au long de mon cursus universitaire.

J'exprime toute ma reconnaissance à Mme **Leila GHALMI** doctorante sous la direction de Mme **S. BENSMAINE** à l'Université de Tlemcen, pour son aide précieuse quant à l'initiation du logiciel SCAPS-1D et pour sa disponibilité dans toutes les étapes de la réalisation de ce travail.

Je remercie l'ensemble de mes enseignants de l'université Abou Bakr Belkaid pour leur savoir et leur qualité d'enseignement.

Je dédie ce modeste travail

À ma chère maman.

Car tu as été ma plus grande source d'inspiration et de soutien tout au long de ma vie. Tu es toujours là pour m'écouter, me conseiller et me soutenir, même dans les moments les plus difficiles Tu m'as appris à croire en moi-même, à poursuivre mes rêves et à travailler dur pour atteindre mes objectifs. Je veux que tu saches que je t'aime de tout mon cœur, et que je serai toujours là pour toi. Cette dédicace est une petite façon pour moi de te remercier pour tout ce que tu as fait et continueras à faire pour moi. Je suis si chanceuse d'avoir une mère comme toi.

À mon cher papa.

Je voulais prendre un moment pour te dire à quel point je t'aime et à quel point je suis reconnaissante d'avoir un père comme toi. Tu as toujours été là pour moi, me soutenant, me guidant et m'encourageant à poursuivre mes rêves.

À mon cher mari.

Je tiens à te dédier ce mémoire, car tu as été mon plus grand soutien, mon partenaire, mon ami, et mon confident tout au long de ce parcours. Tu m'as encouragée à poursuivre mes rêves. Tu m'as soutenue dans chaque décision que j'ai prise, tu m'as aidée à surmonter les obstacles. Cette dédicace est une petite façon pour moi de te dire à quel point je t'aime et à quel point je suis fière de toi. Tu es un mari merveilleux, un père incroyable et un être humain exceptionnel. Je suis reconnaissante pour tout ce que tu fais pour moi et pour notre famille, et je t'aime plus que tout au monde.

À mon petit trésor Abderrazak qui joue toujours le rôle d'un vrai héros.

À mon petit ange Achraf.

À ma nièce la princesse Malak,

Que cette dédicace soit un petit souvenir de votre enfance, une preuve de mon amour éternel pour vous.

À mes chères sœurs Nesrine et Asma

Je ne pourrais pas imaginer ma vie sans vous deux. Vous êtes mes meilleures amies, mes confidentes et mes alliées dans tous les aspects de la vie. Vous m'avez soutenue, encouragée et inspirée à être la meilleure version de moi-même, et je suis tellement reconnaissante pour cela.

À la mémoire de mes chers oncles DIB Mohamed El Amine et DIB Mohamed Tsoufik qui sont partis trop tôt par cette maladie dévastatrice. Votre départ a laissé un vide immense dans nos

vies, mais votre souvenir continu de briller dans nos cœurs. Vous étiez des hommes aimants, forts et généreux, et votre héritage ne sera jamais oublié. Nous continuerons à chérir les souvenirs que nous avons partagés ensemble et à nous inspirer de la force et du courage que vous avez montré jusqu'à la fin. Reposez en paix, chers oncles, vous nous manquez énormément.

BOUAYAD DEBBAGH WASSILA

Table des matières

Remerciements	
Dédicaces	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Les semi-conducteurs	
I-1 Introduction	4
I-2 Caractéristiques des semi-conducteurs :	4
I-2-1 Bande interdite	4
I-2-2 Dopage	4
I-2-3 Température	4
I-2-4 Effet photoélectrique	4
I-2-5 Utilisation	4
I-3 Types des semi-conducteurs :	5
I-3-1 Les semi-conducteurs intrinsèques.....	5
I-3-2 Les semi-conducteurs extrinsèques	5
I-3-2-1 semi-conducteur dopé N.....	5
I-3-2-2 semi-conducteur dopé P	7
I-4 Dopage des semi-conducteurs, introduction d'impuretés	8
I-5 Composants à base de semi-conducteur	9
I-5-1 Les diodes.....	9
I-5-2 Les transistors.....	9
I-6 Applications des semi-conducteurs	10
I-6-1 Les circuits intégrés.....	10
I-6-2 Les capteurs.....	10
I-6-3 Les cellules photovoltaïques	10
I-6-3-1 Cellules solaires de la 1ère génération.....	10

I-6-3-1-1 Silicium monocristallin	10
I-6-3-1-2 Silicium poly cristallin	11
I-6-3-2 Cellules solaires de la 2 ^{ème} génération	12
I-6-3-2-1 Cellule silicium amorphe en couches minces	12
I-6-3-2-2 Cellules photovoltaïques en couches minces de CdTe	13
I-6-3-2-2 Cellules photovoltaïques en CIS, CGS, et CIGS	14
I-6-3-2-3 Cellule multijonction	14
I-6-3-3 Cellules solaires de la 3 ^{ème} génération	15
I-6-3-3-1 Cellules organiques	15
I-6-3-3-2 Cellules nanocristallines à colorant (cellules de Gratzel)	15
I-6-3-3-3 Cellules pérovskite.....	16
I-7 Les avancés récentes dans le domaine des semi-conducteurs.....	17
I-7-1 Transistors à nano fils	17
I-7-2 Semi-conducteurs organiques	17
I-7-3 Semi-conducteurs 2D	17
I-7-4 Semi-conducteurs quantiques.....	17
I-7-5 Mémoire à changement de phase	17
I-8 Défis et perspectives de la technologie des semi-conducteurs.....	18
I-8-1 Miniaturisation	18
I-8-2 Dissipation thermique	18
I-8-3 Matériaux	18
I-8-4 Inter connectivité.....	18
I-8-5 Obsolescence	18
I-9 Conclusion.....	18

Chapitre II : Matériaux utilisés dans les différentes couches minces

II-1 Introduction.....	23
II-2 Composition d'une cellule solaire	23
II-2-1 Substrat	24
II-2-2 Contact arrière.....	24
II-2-3 Couche absorbante	24
II-2-4 Couche tampon	24

II-2-4-1 Propriétés de la couche tampon	25
II-2-4-2 Rôle de la couche tampon	25
II-2-5 Couche fenêtre	25
II-2-6 Contact antireflet.....	25
II-2-7 Contact avant	26
II-3 La bismuthinite Bi_2S_3	26
II-3-1 Les propriétés du Bi_2S_3	26
II-3-1-1 Propriétés physiques	26
II-3-1-2 Propriétés cristallines	27
II-3-1-3 Propriétés optiques	27
II-3-1-3-1 Bande interdite.....	27
II-3-1-3-2 Transparence.....	28
II-3-1-3-3 Indice de réfraction.....	28
II-3-1-4 Propriétés électriques.....	28
II-3-2 Utilisation du Bi_2S_3 dans la cellule solaire	28
II-3-3 Caractéristiques des cellules solaires à base de Bi_2S_3	28
II-3-4 Avantages et inconvénients de l'utilisation du Bi_2S_3	29
II-3-4-1 Avantages.....	29
II-3-4-2 Inconvénients	29
II-4 Le dioxyde de titane TiO_2	29
II-4-1 Les propriétés du TiO_2	29
II-4-1-1 Propriétés physiques	29
II-4-1-2 Propriétés cristallines.....	30
II-4-1-3 Propriétés optiques	31
II-4-1-4 Propriétés électriques.....	32
II-4-1-5 Utilisation du TiO_2 dans les cellules solaires	33
II-4-2 Caractéristiques des cellules solaires à base de TiO_2	33
II-4-3 Avantages et inconvénients de l'utilisation du TiO_2	34
II-4-3-1 Avantages.....	34
II-4-3-2 Inconvénients	34
II-5 L'Oxyde d'étain SnO_2	34

II-5-1 Les propriétés du SnO ₂	34
II-5-1-1 Propriétés physiques	34
II-5-1-2 Propriétés cristallines.....	35
II-5-1-3 Propriétés optiques	36
II-5-1-4 Propriétés électriques.....	37
II-5-2 Utilisation du SnO ₂ dans la cellule solaire.....	37
II-5-3 Caractéristiques des cellules solaires à base de SnO ₂	37
II-5-4 Avantages et inconvénients du SnO ₂	38
II-5-4-1 Avantages.....	38
II-5-4-2 Inconvénients	38
II-6 L'oxyde de Zinc ZnO.....	38
II-6-1 Les propriétés du ZnO	38
II-6-1-1 Propriétés physiques	38
II-6-1-2 Propriétés cristallines.....	39
II-6-1-3 Propriétés optiques	40
II-6-1-4 Propriétés électriques.....	41
II-6-2 Utilisation du ZnO dans la cellule solaire.....	41
II-6-3 Caractéristiques des cellules solaires à base de ZnO	41
II-6-4 Avantages et inconvénients de l'utilisation du ZnO.....	41
II-6-4-1 Avantages.....	42
II-6-4-2 Inconvénients	42
II-7 Conclusion	42

Chapitre III : Logiciel SCAPS-1D. Travail de simulation

III-1 Introduction	47
III-2 Les propriétés électriques de la cellule photovoltaïque.....	47
III-2-1 Courant de court-circuit I _{cc}	48
III-2-2 Tension à circuit ouvert V _{co}	48
III-2-3 Le facteur de forme FF	48
III-2-4 Rendement de conversion η	49
III-3 Présentation du logiciel SCAPS	49
III-3-1 Utilisation de logiciel SCAPS	50
III-4 Présentation des cellules étudiées.....	52

III-5 Paramètres d'entrée utilisés dans la simulation	54
III-6 Conclusion	55

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV-1 Introduction	58
IV-2 Caractéristiques électriques de la cellule solaire	58
IV-3 Résultats et discussion.....	60
IV-3-1 Effet de l'épaisseur et du dopage sur les caractéristiques électriques de la cellule $\text{Bi}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2/\text{ZnO}$	60
IV-3-1-1 Effet de l'épaisseur de la couche Bi_2S_3	60
IV-3-1-2 Effet du dopage de la couche Bi_2S_3 sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire.....	61
IV-3-1-3 Effet de l'épaisseur de la couche TiO_2 sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire	62
IV-3-1-4 Effet du dopage de la couche tampon TiO_2 sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire.....	64
IV-3-2 Effet de l'épaisseur et du dopage sur les caractéristiques électriques de la cellule $\text{Bi}_2\text{S}_3/\text{SnO}_2/\text{ZnO}$	67
IV-3-2-1 Effet de l'épaisseur de la couche Bi_2S_3 sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire.....	67
IV-3-2-2 Effet du dopage de la couche Bi_2S_3 sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire.....	67
IV-3-2-3 Effet de l'épaisseur de la couche tampon SnO_2 sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire	69
IV-3-2-4 Effet du dopage de la couche SnO_2 sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire.....	70
IV-3-3 Effet de la température sur les caractéristiques électriques de la cellule optimale $\text{Bi}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2/\text{ZnO}$	73
IV-4 Conclusion.....	74
Conclusion générale.....	74

Listes des figures

Figure I- 1. Silicium dopé au phosphore. (à $T = 0K$. b. $T \neq 0K$).....	6
Figure I- 2. Diagrammes de bandes faisant apparaître le niveau d'énergie des états de type donneur et leur occupation.....	7
Figure I- 3. Silicium dopé au Bore. a. $T = 0K$. b. $T \neq 0K$	8
Figure I-4. Diagrammes de bandes faisant apparaître le niveau d'énergie des états de type accepteur et leur occupation.....	7
Figure I- 5. Semi-conducteur de type N.	9
Figure I-6. Semi-conducteur de type P.	9
Figure I- 7. Les différentes technologies des cellules photovoltaïques.	10
Figure I- 8. Cellules solaires à base de silicium monocristallin.....	11
Figure I- 9. Cellule solaire à base de silicium polycristallin.	12
Figure I- 10. Cellule photovoltaïque en silicium amorphe.	13
Figure I-11. Cellule photovoltaïque en couche mince à base de cuivre	14
Figure I-12. Cellule multijonction	14
Figure I-13. Cellule photovoltaïque organique.....	14
Figure I- 14. structure de cellule Graetzel.	16
Figure I- 15. cellule pérovskite	16
Figure II-1. Structure de la cellule solaire en couches minces étudiée.....	23
Figure II- 2. Structure cristallographique du Bi_2S_3	27
Figure II- 3. Principales structures cristallines du dioxyde de titane.....	30
Figure II- 4: Spectre expérimental de transmittance d'un film en TiO_2	32
Figure II- 5. Maille élémentaire du SnO_2 (structure rutile).	36
Figure II- 6. Spectre typique de transmission d'une couche mince en SnO_2	36
Figure II- 7. Maille primitive de la phase Würtzite du ZnO	39
Figure II- 8. Dispersion des indices de réfraction.	40

Figure III- 1. Caractéristique I-V d'une cellule solaire	47
Figure III- 2. Fenêtre d'exécution « action panel » du logiciel SCAPS.....	50
Figure III- 3. Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou panneau principal.	51
Figure III- 4. Structure de la cellule solaire à base de SnO ₂	52
Figure III- 5. Structure de la cellule solaire à base de TiO ₂	53
Figure IV- 1. Caractéristique J(V) de la cellule solaire en TiO ₂	58
Figure IV-2. Caractéristique J(V) de la cellule solaire en SnO ₂	59
Figure IV- 3. Effet de l'épaisseur de la couche tampon TiO ₂ sur les caractéristiques électriques de la cellule	64
Figure IV- 4. Effet du dopage de la couche tampon TiO ₂ sur les caractéristiques électriques de la cellule.....	66
Figure IV- 5. Effet de l'épaisseur de la couche tampon SnO ₂ sur les caractéristiques électriques de la cellule	70
Figure IV- 6. Effet du dopage de la couche tampon SnO ₂ sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire	72

Listes des tableaux

Tableau II- 1. Quelques propriétés physiques du Bi ₂ S ₃	26
Tableau II- 2. Propriétés physiques du TiO ₂	30
Tableau II- 3. Caractéristiques de l'oxyde de titane.....	31
Tableau II-4. Propriétés physiques du SnO ₂	35
Tableau II- 5. Propriétés optiques et électriques du SnO ₂	37
Tableau II- 6. Propriétés physiques du ZnO.....	38
Tableau III- 1. Paramètres optiques et physiques des matériaux utilisés dans la simulation.....	54
Tableau IV- 1. Les performances photovoltaïques des deux cellules avant l'optimisation des paramètres.	59
Tableau IV- 2. Effet de l'épaisseur de la couche Bi ₂ S ₃ sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire	60
Tableau IV- 3. Effet du dopage de la couche Bi ₂ S ₃ sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire	61
Tableau IV- 4. Les meilleurs résultats obtenus pour la couche absorbante Bi ₂ S ₃	62
Tableau IV- 5. Effet de l'épaisseur de la couche TiO ₂ sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire	63
Tableau IV- 6. Effet du dopage de la couche TiO ₂ sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire.	65

Tableau IV- 7. Les meilleurs résultats obtenus pour la couche tampon TiO_2	66
Tableau IV- 8. Effet de l'épaisseur de la couche Bi_2S_3 sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire	67
Tableau IV- 9. Effet du dopage de la couche Bi_2S_3 sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire	68
Tableau IV- 10. Les meilleurs résultats obtenus pour la couche Bi_2S_3	68
Tableau IV- 11. Effet de l'épaisseur de la couche SnO_2 sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire	69
Tableau IV- 12. Effet du dopage de la couche SnO_2 sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire	71
Tableau IV- 13. Les meilleurs résultats obtenus pour la couche SnO_2	72
Tableau IV- 14. Effet de la température de la cellule solaire optimale sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire	73

Introduction générale

Introduction générale

Durant ces dernières années, les énergies fossiles s'épuisent de plus en plus surtout avec la surconsommation due à l'accroissement démographique.

D'autre part, les combustibles fossiles sont brûlés et libèrent du dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre qui piègent la chaleur dans notre atmosphère, ce qui en fait les principaux responsables du réchauffement planétaire et du changement climatique.

En plus, l'exploitation d'hydrocarbures d'origine non conventionnelle génère des pollutions chimiques massives des eaux et entraîne une demande insoutenable sur les ressources en eau potable. S'ajoutent à cela des impacts sévères sur la biodiversité et les services rendus par les écosystèmes.

Tous ces problèmes ont poussé les chercheurs à envisager d'autres sources d'énergies alternatives, renouvelables, plus durables et moins polluantes. Nous citons les plus connues actuellement et qui sont : l'énergie hydraulique, éolienne, solaire, géothermique, biomasse, et les énergies marines. Ce sont les principales pistes étudiées pour faire face à une pénurie prochaine d'énergie fossile et aux inconvénients de son utilisation.

Dans notre travail, nous nous intéressons à l'énergie solaire qui permet de fabriquer de l'électricité grâce à des panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques à partir de la lumière du soleil captée par ces panneaux. Ces panneaux solaires sont constitués de cellules photovoltaïques à base de matériaux semi-conducteurs qui servent à transformer le rayonnement solaire en électricité.

Dans le premier chapitre, nous exposons les différents types de semi-conducteurs, leurs caractéristiques, leurs applications, les avancées récentes et les défis et perspectives de la technologie dans ce domaine.

Dans le chapitre 2 intitulé « Matériaux utilisés dans les différentes couches minces », on donne en détail les matériaux semi-conducteurs utilisés dans la simulation des cellules solaires à savoir la Bismuthinite Bi_2S_3 , utilisée comme couche absorbante, le dioxyde de titane TiO_2 et l'oxyde d'étain SnO_2 , utilisés respectivement comme couche tampon et l'oxyde de zinc ZnO de la couche fenêtre. Dans ce chapitre, toutes les propriétés physiques, cristallines, optiques et électriques de ces matériaux ont été exposées, ainsi que leurs avantages et inconvénients dans les applications électroniques.

Comme notre travail est de faire une simulation utilisant le logiciel SCAPS_1D, le chapitre 3 a fait l'objet d'une présentation du logiciel avec les cellules solaires étudiées, les paramètres d'entrée des différents matériaux utilisés et les propriétés électriques à étudier (J_{cc} , V_{co} , FF et η).

Le chapitre 4 a été consacré aux résultats de simulation obtenus via le logiciel SCAPS_1D.

Le but de notre travail est de comparer les performances de la cellule de $\text{Bi}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2/\text{ZnO}$ et celles de la cellule $\text{Bi}_2\text{S}_3/\text{SnO}_2/\text{ZnO}$ c'est-à-dire l'influence de la couche tampon (TiO_2 , SnO_2) sur les caractéristiques de la cellule.

Introduction générale

Après avoir étudié l'influence de l'épaisseur et du dopage sur les différentes couches des cellules simulées, nous nous intéresserons à l'effet de la température sur les performances de la cellule optimale obtenue.

Chapitre I

Les Semi-Conducteurs

Chapitre I : Les semi-conducteurs

I-1 Introduction

Les semi-conducteurs sont généralement des solides cristallins dont la conductivité électrique varie en fonction de plusieurs paramètres tels que la température, la proportion d'impuretés incorporées dans leur matrice cristalline, et le flux de photons éclairant la surface de ces matériaux. Contrairement aux métaux, qui sont de bons conducteurs électriques mais dont la résistivité augmente avec la température, les matériaux semi-conducteurs possèdent une résistivité électrique qui diminue avec la température. À température ambiante, la résistivité des semi-conducteurs se situe entre 10^{-2} et $10^9 \Omega\text{cm}$, valeurs intermédiaires situées entre celles des bons conducteurs électriques ($10^{-6} \Omega\text{cm}$) et celles des matériaux isolants (10^{14} à $10^{22} \Omega\text{cm}$) [1].

Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord les caractéristiques et les types des semi-conducteurs, nous décrirons ensuite le dopage des semi-conducteurs et leurs composants. Par la suite, nous allons étudier les applications et les avancés dans le domaine des semi-conducteurs et nous terminerons par les défis et perspectives de la technologie des semi-conducteurs.

I-2 Caractéristiques des semi-conducteurs :

Les semi-conducteurs sont des matériaux qui ont une conductivité électrique intermédiaire [2] entre celle des conducteurs (comme les métaux) et celle des isolants (comme le verre).

I-2-1 Bande interdite

La bande interdite est une caractéristique essentielle des semi-conducteurs qui représente l'énergie minimale requise pour qu'un électron passe de la bande de valence à la bande de conduction et devienne libre de se déplacer et de contribuer à la conductivité électrique dans le matériau [3].

I-2-2 Dopage

Les semi-conducteurs peuvent être dopés avec des impuretés pour modifier leur conductivité. Le dopage peut être de type n (ajout d'atomes avec des électrons supplémentaires) ou de type p (ajout d'atomes avec des électrons manquants) [4].

I-2-3 Température

La conductivité des semi-conducteurs dépend de la température. À mesure que la température augmente, la conductivité augmente également [4].

I-2-4 Effet photoélectrique

Les semi-conducteurs peuvent être utilisés pour produire de l'électricité à partir de la lumière (effet photoélectrique), ce qui en fait des matériaux utiles pour les panneaux solaires [2].

I-2-5 Utilisation

Les semi-conducteurs sont utilisés dans une variété d'applications, notamment les diodes, les transistors, les circuits intégrés, les capteurs et les dispositifs optoélectroniques [5].

I-3 Types des semi-conducteurs :

Les semi-conducteurs sont généralement divisés en deux groupes :

- semi-conducteurs intrinsèques.
- semi-conducteurs extrinsèques.

I-3-1 Les semi-conducteurs intrinsèques

Les semi-conducteurs intrinsèques sont des matériaux purs et non dopés, c'est-à-dire qu'ils ne contiennent pas d'impuretés intentionnellement ajoutées. Dans les semi-conducteurs intrinsèques, la conductivité électrique est due aux électrons libres issus de la bande de conduction et aux trous issus de la bande de valence, qui se déplacent sous l'effet d'un champ électrique [6].

$$n = p = ni(T) = A * T^{\frac{3}{2}} * e^{\left(\frac{-Eg}{2KT}\right)} \quad [\text{cm}^{-3}] \quad \text{(I-1)}$$

Où :

A est une constante spécifique du matériau [$\text{cm}^{-3}/\text{k}^{3/2}$] [7]

Eg: band gap [J]

K=1, 38.10^{-23} J/K

T température (K) =300°K

Si $ni = 1,4.10^{10} \text{cm}^{-3}$

I-3-2 Les semi-conducteurs extrinsèques

Les semi-conducteurs extrinsèques sont des matériaux semi-conducteurs qui ont été intentionnellement dopés avec des impuretés pour modifier leurs propriétés électriques.

Les impuretés utilisées pour le dopage peuvent être de type

- N, si ce sont des électrons, (e) dans la bande de conduction

Ou bien,

- P si, ce sont des trous, (p) dans la bande de valence [6].

I-3-2-1 semi-conducteur dopé N

Des atomes (ou impuretés) de type donneur (électronique) ont été utilisés dans de tels matériaux introduits (généralement en petites quantités) plutôt pour faciliter la conduction par les électrons à travers les trous uniquement [7].

Un semi-conducteur dopé N est un semi-conducteur qui a été intentionnellement modifié en y ajoutant des impuretés (dopants) qui ont un nombre d'électrons supplémentaires par rapport aux

Chapitre I : Les semi-conducteurs

atomes de semi-conducteur. Les dopants les plus couramment utilisés pour créer des semi-conducteurs de type N sont le phosphore, l'arsenic et l'antimoine. La présence de ces dopants crée des niveaux d'énergie supplémentaires dans la bande interdite du matériau dopé, ce qui permet aux électrons supplémentaires des dopants de devenir mobiles et de contribuer à la conductivité électrique du matériau. Les semi-conducteurs dopés N sont utilisés dans de nombreux dispositifs électroniques, tels que les transistors, les diodes électroluminescentes (LED) et les cellules solaires. La densité de porteurs libres dans un semi-conducteur est :

$$n = Nd, p = \frac{ni^2}{Nd} \quad \text{(I-2)}$$

La densité des donneurs ionisés N_d^+ s'écrit

$$N_d^+ = \frac{N_d}{1 + 2 \exp\left(\frac{EF - Ed}{kT}\right)} \quad \text{(I-3)}$$

Où : N_d^+ est la densité des donneurs ionisés en $[\text{cm}^{-3}]$,

N_d est la densité totale des donneurs en $[\text{cm}^{-3}]$,

K est la constante de Boltzmann ($8,617 \times 10^{-5}$ eV/K),

T est la température en kelvin,

Ed est l'énergie du niveau de donneur en électron-volts [eV],

EF est le niveau de Fermi (Il représente l'énergie maximale qu'un électron peut avoir à température zéro dans un matériau en équilibre thermique) en électron-volts [eV].

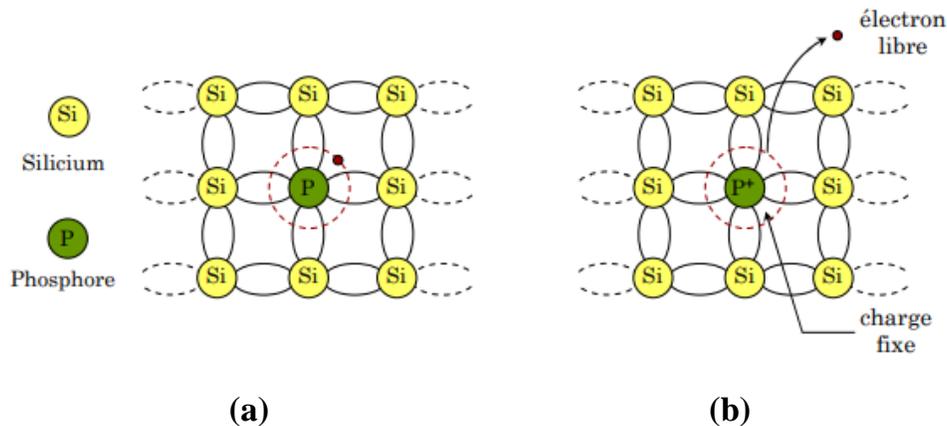


Figure I- 1. Silicium dopé au phosphore. (à $T = 0\text{K}$. b. $T \neq 0\text{K}$)

Chapitre I : Les semi-conducteurs

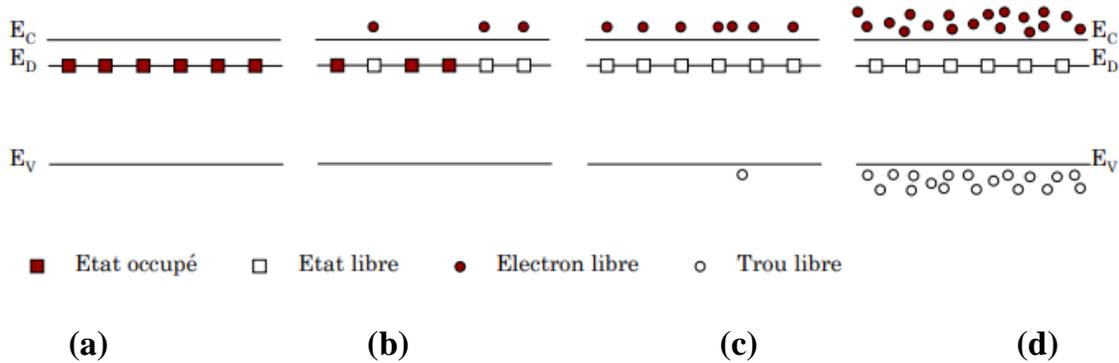


Figure I- 2. Diagrammes de bandes faisant apparaître le niveau d'énergie des états de type donneur et leur occupation.

- [a.** $T_0 = 0k$, $n_0 = p_0 = 0$. **b.** $0 < T_1 < 50K$, les impuretés s'ionisent
c. $50K < T_2 < 500K$, $n_0 = N_D \gg n_i(T_2) \gg p_0$. **d.** $T_3 > 500k$, $n_0 = p_0 = n_i(T_3)$.]

I-3-2-2 semi-conducteur dopé P

L'impureté dans ce cas est un accepteur d'électrons de type équivalent à un atome de la colonne III d'un cristal composé d'atomes de la colonne IV. La [figure I-3](#) montre un aperçu de ce qui arrive aux cristaux de silicium avec des atomes introduits de bore par association avec quatre atomes voisins, l'atome de bore gagne sept électrons [9].

La densité de porteurs libres dans un semi-conducteur est :

$$n = Na, p = \frac{ni^2}{Na} \quad (I-4)$$

La densité d'accepteurs N_a^- s'écrit

$$N_a^- = \frac{N_d}{1 + \frac{1}{4} \exp\left(\frac{E_a - E_F}{kT}\right)} \quad (I-5)$$

Où

N_a^- est la densité d'accepteurs en $[cm^{-3}]$

N_d est la densité de dopage en $[cm^{-3}]$

E_a est l'énergie de l'accepteur en électron-volts [eV]

E_F est le niveau de Fermi (Il représente l'énergie maximale qu'un électron peut avoir à température zéro dans un matériau en équilibre thermique) en électron-volts [eV]

K est la constante de Boltzmann ($8,617 \times 10^{-5}$ eV/K),

T est la température en kelvins.

Chapitre I : Les semi-conducteurs

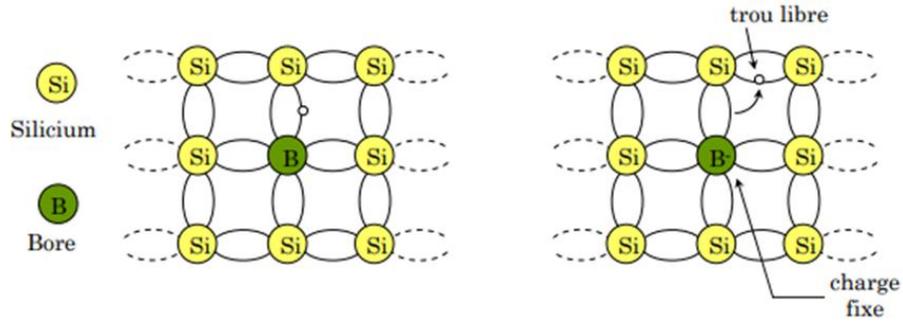


Figure I- 3. Silicium dopé au Bore. à. $T = 0K$. b. $T \neq 0K$.

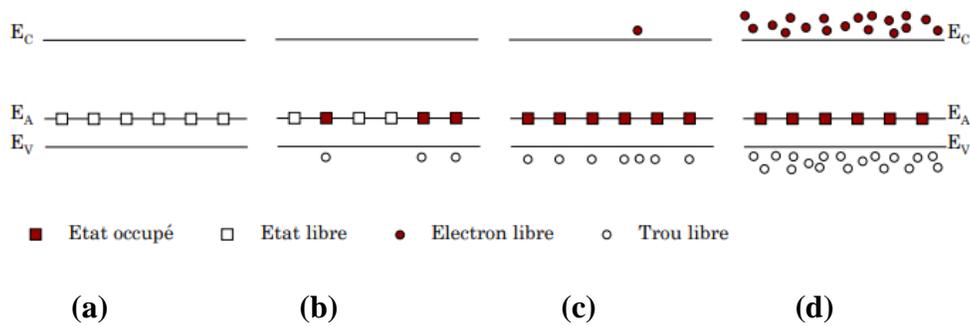


Figure I-4. Diagrammes de bandes faisant apparaître le niveau d'énergie des états de type accepteur et leur occupation

a. $T_0 = 0K$, $n_0 = p_0 = 0$. **b.** $0 < T_1 < 50K$, les impuretés s'ionisent.

b. $50K < T_2 < 500K$, $p_0 = N_A \gg n_i(T_2) \gg n_0$. **d.** $T_3 > 500K$, $n_0 = p_0 = n_i(T_3)$.

I-4 Dopage des semi-conducteurs, introduction d'impuretés

Pour un tel matériau, des atomes pentavalents de la colonne V de la classification périodique des éléments sont introduits (en général en faible quantité), afin de privilégier la conduction par électrons [3].

La [figure I-5](#) représente une matrice Si dopée au P. L'atome P possède 5 électrons de valence, quatre d'entre eux entrent en liaison avec les quatre électrons des atomes de Si voisins. Un faible apport d'énergie (0.04eV), par exemple dû à une température différente de 0 K, peut libérer le cinquième électron, qui ne trouve pas sa place dans la liaison formée, et qui se retrouve plongé dans le champ positif de l'ion P⁺. De ce fait, il devient un électron libre et l'atome pentavalent est appelé « atome donneur ».

Chapitre I : Les semi-conducteurs

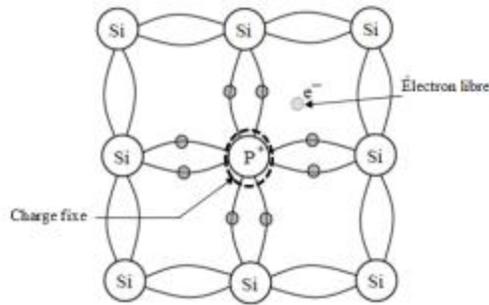


Figure I- 5. Semi-conducteur de type N.

Cette fois-ci, les impuretés sont de type accepteur ce qui correspond aux atomes de la colonne III de la classification périodique des éléments. Les éléments les plus utilisés dans le dopage sont le bore (B) et le gallium (Ga) [10].

La [figure I- 6](#) représente une matrice Si dopée au B. L'association avec ses quatre voisins confère à l'atome B sept électrons sur la couche externe ce qui est insuffisant pour le rendre stable et il est alors tenté d'en subtiliser un à un proche voisin. Le B se retrouve donc ionisé négativement (B^-) et on assiste au déplacement d'un trou libre d'atome en atome [7].

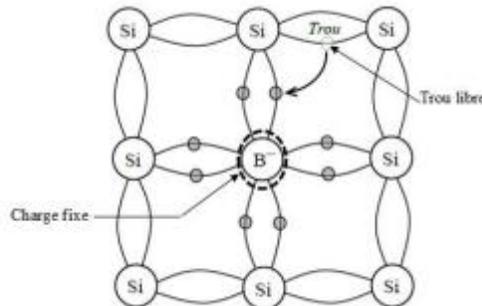


Figure I-6. Semi-conducteur de type P.

I-5 Composants à base de semi-conducteur

Les semi-conducteurs sont largement utilisés pour la fabrication de nombreux composants électroniques, notamment :

I-5-1 Les diodes

Les diodes sont des composants électroniques qui permettent de contrôler la direction du courant électrique. Les diodes sont fabriquées en utilisant des semi-conducteurs dopés P et N, qui sont mis en contact pour former une jonction PN [11].

I-5-2 Les transistors

Les transistors sont des composants électroniques utilisés pour amplifier ou commuter des signaux électriques. Les transistors sont fabriqués en utilisant des semi-conducteurs dopés P et

Chapitre I : Les semi-conducteurs

N, qui sont arrangés en couches pour former un transistor à jonction bipolaire (BJT) ou un transistor à effet de champ (FET) [12].

I-6 Applications des semi-conducteurs

I-6-1 Les circuits intégrés

Les circuits intégrés sont des ensembles de composants électroniques interconnectés qui sont fabriqués sur une puce de silicium. Les semi-conducteurs dopés P et N sont utilisés pour créer les jonctions et les transistors nécessaires à la fabrication de ces circuits [13].

I-6-2 Les capteurs

Les capteurs sont des dispositifs électroniques qui mesurent une grandeur physique et la convertissent en un signal électrique. Les capteurs sont souvent fabriqués en utilisant des semi-conducteurs dopés P et N, qui sont conçus pour détecter une grandeur physique spécifique telle que la température, la pression ou l'humidité [2].

I-6-3 Les cellules photovoltaïques

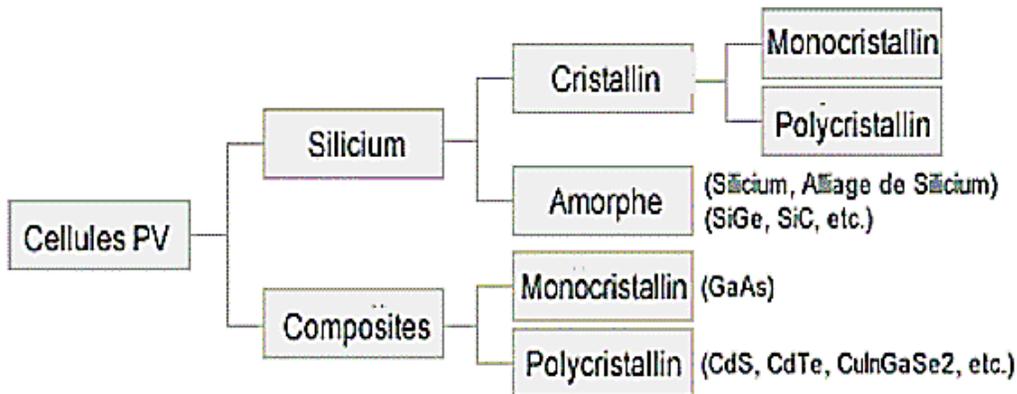


Figure I-7. Les différentes technologies des cellules photovoltaïques.

I-6-3-1 Cellules solaires de la 1ère génération

Les cellules solaires de première génération sont principalement fabriquées à partir de semi-conducteurs cristallins tels que le silicium [14], qui est un semi-conducteur intrinsèque, on distingue 2 catégories :

I-6-3-1-1 Silicium monocristallin

Une cellule monocristalline est constituée d'un bloc de silicium monocristallin. Pour obtenir des cellules solaires, ce cristal est découpé en tranches très fines. Ces cellules sont uniformes et d'aspect sombre [15].

Chapitre I : Les semi-conducteurs



Figure I-8. Cellules solaires à base de silicium monocristallin

- Avantages

Cette technologie optimise la production de modules photovoltaïques.

Les cellules monocristallines offrent le rendement le plus élevé (jusqu'à 20%) [16].

Les panneaux fabriqués avec cette technologie ont une excellente durée de vie (jusqu'à 30 ans).

- Inconvénients

Cette technologie est très coûteuse à fabriquer et le prix de vente du panneau est élevé.

Cette technologie affiche très peu de performances par mauvais temps.

1-6-3-1-2 Silicium poly cristallin

Les cellules solaires en silicium poly cristallin sont des cellules solaires photovoltaïques de première génération fabriquées à partir de lingots de silicium poly cristallin. Elles sont moins chères à produire que les cellules solaires en silicium monocristallin, mais ont une efficacité légèrement inférieure en raison de la présence de frontières de grains entre les cristaux de silicium [17].

Chapitre I : Les semi-conducteurs



Figure I-9. Cellule solaire à base de silicium polycristallin.

- Avantages

Les coûts de production sont inférieurs à ceux des cellules monocristallines.

La durée de vie du panneau est également bonne (jusqu'à 30 ans).

De plus, ces panneaux solaires ont une bonne flexibilité de rayonnement et fonctionnent bien même par temps nuageux [5].

- Inconvénients

Les cellules sont moins efficaces que la technologie monocristalline (11-15 %).

I-6-3-2 Cellules solaires de la 2^{ème} génération

I-6-3-2-1 Cellule silicium amorphe en couches minces

Les cellules solaires amorphes sont constituées de gaz de silicium. Ce gaz peut être projeté sur une variété de supports tels que des plaques de verre, des plastiques souples et même des métaux via un procédé de dépôt sous vide [11]. Les cellules sont gris foncé.

Chapitre I : Les semi-conducteurs



Figure I-10. Cellule photovoltaïque en silicium amorphe.

- Avantages

Il s'agit d'un type de pile bon marché que l'on trouve dans la plupart des objets du quotidien fonctionnant à l'énergie solaire (calculatrices, montres solaires, etc.) [11].

Cette technique est utile car elle peut être utilisée sur de nombreux supports et ne nécessite pas beaucoup d'ensoleillement.

- Inconvénients

Faible rendement (7-8%) et durée de vie limitée (10 années).

I-6-3-2-2 Cellules photovoltaïques en couches minces de CdTe

Ce type de cellule solaire est constitué de tellure de cadmium au lieu de silicium. Une couche absorbante en tellure de cadmium est appliquée sur le substrat de verre et recouverte d'une autre plaque de verre qui scelle hermétiquement la plaque [18].

- Avantages

CdTe est une technologie qui augmente l'efficacité des panneaux solaires tout en réduisant les coûts grâce à son excellente capacité d'absorption de la lumière et à son faible coefficient thermique [18].

- Inconvénients

Le principal inconvénient réside dans la toxicité des produits utilisés pour fabriquer ce type de panneau solaire.

Chapitre I : Les semi-conducteurs

I-6-3-2-2 Cellules photovoltaïques en CIS, CGS, et CIGS

Cette nouvelle technologie repose sur l'utilisation d'un mélange de semi-conducteurs (cuivre, gallium, indium et sélénium) en remplacement du silicium avec un rendement de 19,2 % [19].

Les cellules CIS représentent une nouvelle génération de cellules solaires à couches minces de type CIS (cuivre, indium, sélénium) ou CIGS (cuivre, indium, gallium, sélénium), plus facilement disponibles que le silicium dans les cellules photovoltaïques conventionnelles (bien que ces dernières sont déjà abondantes sur terre). De plus, son efficacité de conversion d'énergie est la plus élevée de toutes les cellules solaires à couches minces à ce jour [19].

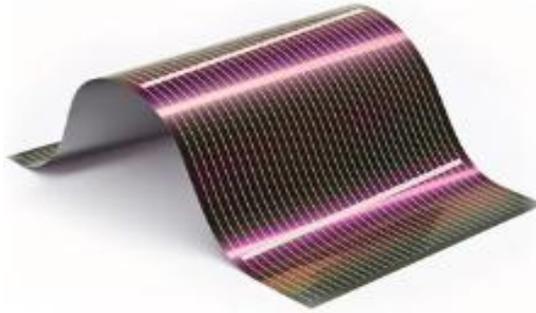


Figure I-11. Cellule photovoltaïque en couche mince à base de cuivre [20]

I-6-3-2-3 Cellule multijonction

Les multicellules se composent de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire pour atteindre l'efficacité de conversion la plus élevée [20].

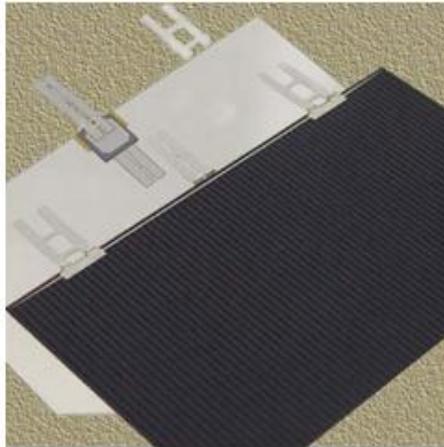


Figure I-12. Cellule multijonction

- Avantages

Très bon rendement (31,8% en métier, 44,7% en labo)

- Inconvénients

Chapitre I : Les semi-conducteurs

Coût élevé avec peu de ressources d'indium sur terre

I-6-3-3 Cellules solaires de la 3^{ème} génération

Les cellules solaires de troisième génération sont des dispositifs photovoltaïques qui utilisent des matériaux semi-conducteurs avancés pour convertir l'énergie solaire en électricité. Les matériaux semi-conducteurs utilisés dans les cellules solaires de troisième génération comprennent des composés tels que le pérovskite, les cellules solaires organiques [21].

I-6-3-3-1 Cellules organiques

Les cellules solaires organiques sont des dispositifs photovoltaïques qui utilisent des matériaux organiques pour convertir l'énergie solaire en électricité. Elles peuvent être fabriquées à partir de matériaux peu coûteux et peuvent être déposées en couches minces sur des substrats flexibles, ce qui les rend utiles pour les applications de cellules solaires légères et flexibles. Cependant, leur efficacité énergétique est généralement plus faible que celle des cellules solaires inorganiques [22].

Il existe trois types principaux

- Cellules solaires organiques moléculaires.
- Cellules solaires organiques à base de polymères.
- Cellules solaires hybrides.

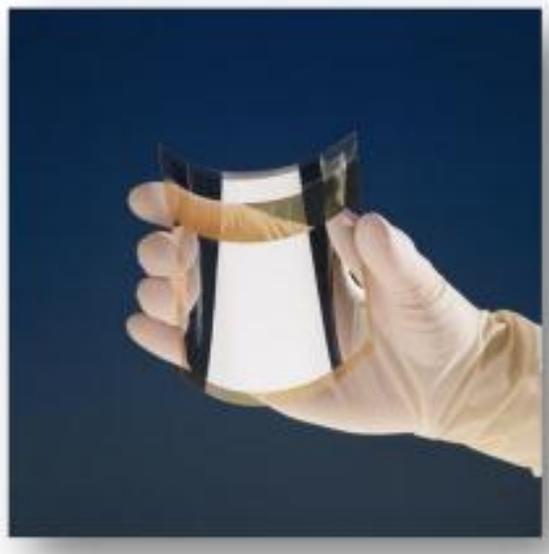


Figure I-13. Cellule photovoltaïque organique

I-6-3-3-2 Cellules nanocristallines à colorant (cellules de Gratzel)

Aussi connues sous le nom de cellules Gratzel du nom de leur inventeur, Michael Gratzel, ces cellules sont composées de semi-conducteurs à base d'oxyde inorganique [23].

Les cellules nanocristallines se caractérisent par leur durabilité et leur stabilité sur de nombreuses années, en plus d'être faciles à fabriquer sans les systèmes étendus requis pour les cellules

Chapitre I : Les semi-conducteurs

inorganiques. Actuellement, ce type de cellule a le rendement le plus élevé atteint par Sharp dans la catégorie solaire de 3e génération, avec un rendement en laboratoire de 10,4 %. De plus, ce sera la première cellule de 3e génération à arriver sur le marché dans un avenir proche [24]. Cependant, comme toutes les cellules solaires, elles présentent également l'inconvénient de laisser échapper de l'électrolyte liquide. Les chercheurs ont remplacé cet électrolyte liquide par un électrolyte solide. Malheureusement, les résultats n'étaient pas aussi bons que la première forme.

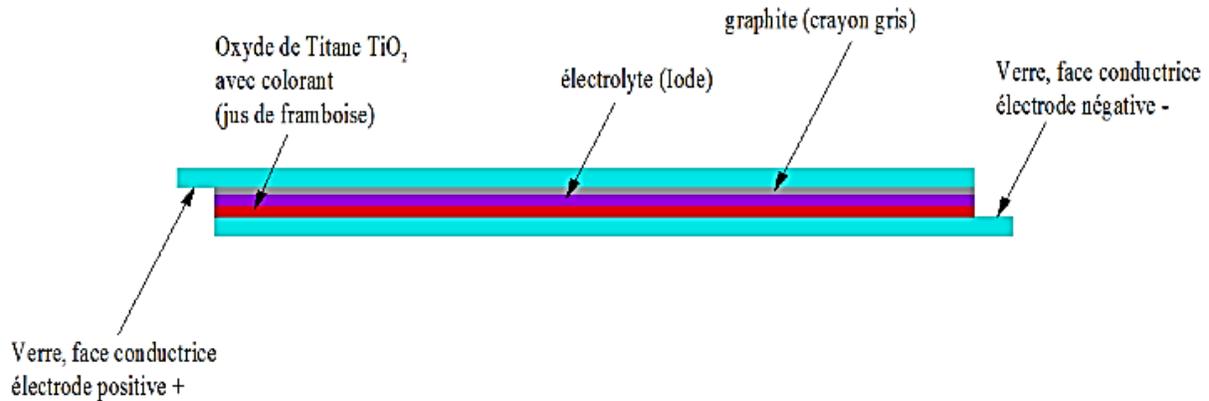


Figure I-14. structure de cellule Graetzel.

I-6-3-3-3 Cellules pérovskite

Une cellule pérovskite est un type de cellules solaires contenant un composé à structure pérovskite ($CaTiO_3$ - titanate de calcium). Il a l'avantage d'être bon marché à fabriquer, et un bon rendement (20,1% en labo) [25].

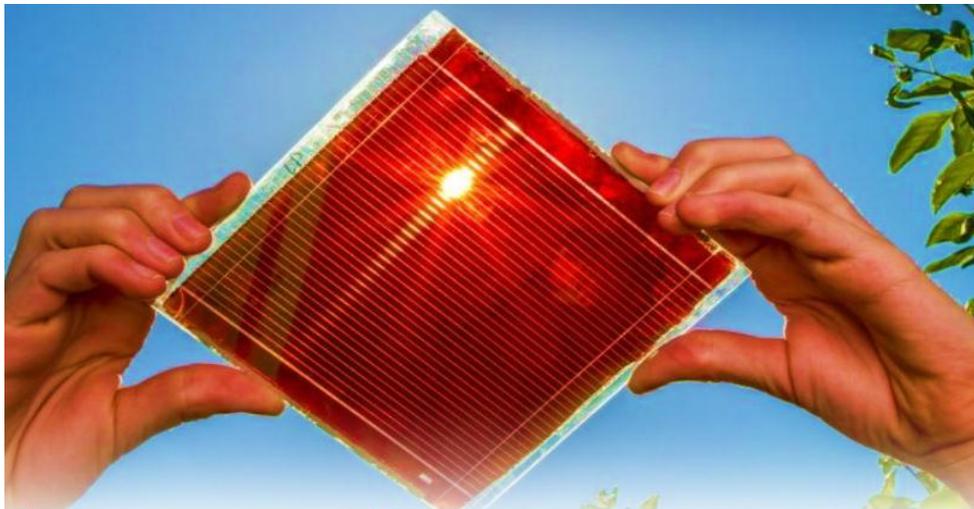


Figure I-15. cellule pérovskite

I-7 Les avancés récentes dans le domaine des semi-conducteurs

Il y a eu plusieurs avancées récentes dans le domaine des semi-conducteurs qui ont des implications significatives pour la technologie électronique moderne, notamment :

I-7-1 Transistors à nano fils

Les transistors à nano fils sont une nouvelle technologie de transistor qui utilise de minuscules fils de semi-conducteur pour l'ancienne jonction PN. Cette technologie offre une meilleure performance et une consommation d'énergie plus faible par rapport aux transistors traditionnels [1].

I-7-2 Semi-conducteurs organiques

Les semi-conducteurs organiques sont des matériaux organiques qui présentent des propriétés de semi-conducteur. Ces matériaux peuvent être utilisés pour créer des dispositifs électroniques flexibles tels que des écrans OLED et des capteurs flexibles [26].

I-7-3 Semi-conducteurs 2D

Les semi-conducteurs 2D sont des matériaux semi-conducteurs qui ne sont que quelques atomes d'épaisseur. Ces matériaux présentent des propriétés électroniques uniques et peuvent être utilisés pour créer des dispositifs électroniques extrêmement compacts [4].

I-7-4 Semi-conducteurs quantiques

Les semi-conducteurs quantiques présentent des propriétés quantiques telles que la taille quantique et le confinement de Coulomb qui se réfère au confinement d'électrons dans une région de l'espace limitée par des charges électriques positives. Ce phénomène est souvent observé dans les semi-conducteurs, où les électrons peuvent être piégés dans des régions de potentiels électrostatiques créés par des impuretés ou des défauts de la structure cristalline. Ces propriétés peuvent être utilisées pour créer des dispositifs électroniques de haute performance tels que des lasers et des détecteurs [3].

I-7-5 Mémoire à changement de phase

La mémoire à changement de phase est une technologie de mémoire non volatile qui utilise des semi-conducteurs à changement de phase pour stocker des données. Cette technologie offre une densité de stockage plus élevée et une vitesse de lecture plus rapide par rapport aux mémoires flash traditionnelles.

En somme, ces avancées récentes dans le domaine des semi-conducteurs ont ouvert de nouvelles possibilités pour la technologie électronique et ont conduit à des dispositifs plus performants et plus efficaces sur le plan énergétique [27].

I-8 Défis et perspectives de la technologie des semi-conducteurs

La technologie des semi-conducteurs est confrontée à des défis importants qui entraîneront des investissements considérables en recherche et développement pour relever ces défis et continuer à améliorer les performances et les fonctionnalités des dispositifs électroniques modernes [28].

I-8-1 Miniaturisation

Avec la demande croissante de dispositifs électroniques de plus en plus petits, les fabricants de semi-conducteurs doivent réduire la taille des transistors et des composants électroniques. Cependant, cette miniaturisation pose des défis liés à la fabrication, à la fiabilité et à la consommation d'énergie [29].

I-8-2 Dissipation thermique

Les dispositifs électroniques modernes sont de plus en plus puissants et génèrent donc plus de chaleur. La dissipation thermique est donc un défi majeur pour les semi-conducteurs, car une accumulation de chaleur peut affecter les performances et la durée de vie des composants électroniques [27].

I-8-3 Matériaux

Les semi-conducteurs sont principalement fabriqués à partir de silicium, mais la recherche de matériaux alternatifs pour les semi-conducteurs est en cours. Cependant, la découverte et la mise au point de nouveaux matériaux prévoient des investissements considérables en recherche et développement [27].

I-8-4 Inter connectivité

La connectivité entre les différents composants électroniques est un défi important pour la technologie des semi-conducteurs, car la transmission de signaux électroniques sur de longues distances peut entraîner des pertes de signal et des interférences [29].

I-8-5 Obsolescence

Les cycles de vie des produits électroniques deviennent de plus en plus courts, ce qui signifie que les semi-conducteurs doivent être maintenus mis à jour pour répondre aux besoins en constante évolution des consommateurs et de l'industrie [27].

I-9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons parlé des semi-conducteurs. D'abord, nous avons cité les différents types de semi-conducteurs et leurs caractéristiques. Ensuite, nous avons exposé la différence entre les semi-conducteurs intrinsèques et extrinsèques avec leurs différentes applications. Nous avons détaillé par la suite les différentes générations des cellules photovoltaïques avec leurs avantages et inconvénients. Nous avons clôturé ce chapitre en donnant les avancés, le défis et les perspectives de la technologie des semi-conducteurs.

Bibliographie

- [1] F. Mechai, "Etude et simulation des structures photovoltaïques à base de chalcogénures de métaux de transition MX₂ (M = W, Mo ; X = S, Se)," Mémoire de magister, Université de Tizi Ouzzou, 2016.
- [2] H. Yazid, "Contribution à l'Etude ab initio des Propriétés Fondamentales des Capteurs à Semi-conducteurs," Thèse de doctorat, Université de Adrar, 2020.
- [3] Y. Hakima, "Physique des Semi-conducteurs," Université 8 Mai 1945 Guelma.
- [4] C. A and M. P, Physique des semi-conducteurs, vol. 23. Ecole polytechnique de Marseille, 2004.
- [5] M. Burgelman, P. Nollet, and S. Degrave, "Modelling polycrystalline semiconductor solar cells," Thin Solid Films, vol. 361–362, pp. 527–532, Feb. 2000, doi: 10.1016/S0040-6090(99)00825-1.
- [6] L. Alicia, "Modélisation des défauts et des propriétés de transport au sein de semi-conducteurs à base de Sb₂Se₃ pour le photovoltaïque," Thèse de doctorat, L'Université de Rennes 1, 2019.
- [7] J.-M. Dutertre, "Introduction aux semi-conducteurs La jonction PN," livre Dunod, 2009.
- [8] I. DEFDEF, "Etude des propriétés structurales, électroniques et élastiques du semi-conducteur CdSnAs₂," Mémoire de master, Université de Msila, 2019.
- [9] Q. Xiang, J. Yu, and M. Jaroniec, "Graphene-based semiconductor photocatalysts," Chem Soc Rev, vol. 41, no. 2, pp. 782–796, 2012, doi: 10.1039/C1CS15172J.
- [10] Jean-Claude Sabonnadière, Nouvelles technologies de l'énergie 1 : les énergies renouvelables, vol. 1. La Voisier: Hermes Sciences, 2006.
- [11] L. Benhamadouche and N. Moussaoui, " L'étude Du Rendement Des Cellules Solaires Mono Et Double-jonction A Base De Silicium Amorphe Par Simulation," J. Artic., p. 6, Oct. 2016.
- [12] Y. Marouf, "Etude et simulation des cellules solaires multi-jonctions à base de matériaux semi-conducteurs III-V.," Mémoire de master, Université Mohamed Khider – Biskra, 2019.
- [13] C. Meriem, "Introduction sur les capteurs solaires photovoltaïques," Mémoire de Magister, Université de Adrar, 2009.

Chapitre I : Les semi-conducteurs

- [14] Walid El-Huni, “Modélisation de cellules solaires multi-tandem bas coût et très haut rendement à base de nitrures des éléments de III-V,” Thèse de doctorat, L’Université Paris-Sud XI, PARIS, 2016.
- [15] H. Berrezougue, “Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d’une cellule photovoltaïque,” Mémoire de master, Université Dr Moulay Tahar de Saida, 2016.
- [16] H.Laura, “Rendement Panneau Solaire | Calcul et Explications (2021),” In Sun We Trust, Dec. 23, 2021.
- [17] R.Badreddine D.Cheriki, “Amélioration de la caractéristique optique et électrique d’une cellule photovoltaïque à base de pérovskite,” Mémoire de master, Université de Msila, 2021.
- [18] M. Grau, “Réalisation de nouvelles structures de cellules solaires photovoltaïques à partir de couches minces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudres,” Thèse de doctorat, INSA Lyon, Lyon, 2012.
- [19] 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 de Mentouri- Constantine1, 2017.
- [20] R. G. Lavillat Théo, “Les différents types de cellules photovoltaïques,” Ecosources, 2013.
- [21] P. Destruel and I. Seguy, “Les cellules photovoltaïques organiques,” Reflets Phys.-J. Artic., no. 6, pp. 16–18, Oct. 2007, doi: 10.1051/refdp/2007064.
- [22] Harald Hoppe and Niyazi Serdar Sariciftci, “Organic solar cells: An overview,” Cambridge, vol. 19, no. 7, p. 11, Mar. 2011.
- [23] A. Decroly, “Élaboration et caractérisation de cellules photovoltaïques de troisième génération à colorant (DSSC),” Mons.
- [24] Belarbi Moussaab, “Contribution à la modélisation des paramètres électriques des cellules solaires sensibilisées par colorant,” Thèse de doctorat, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2015.
- [25] B. B and R. K, “Investigation and Improved Performance of MASnI₃ and MASnBr₃ Perovskites Solar Cells with Porous Silicon Layer,” Springer, 02 2023, pp. 826–832. doi: DOI: 10.1007/978-3-031-21216-1_85.
- [26] I. E. Jacobs and A. J. Moulé, “Controlling Molecular Doping in Organic Semiconductors,” Adv. Mater., vol. 29, no. 42, p. 1703063, Nov. 2017, doi: 10.1002/adma.201703063.
- [27] C. Ngô, Ngô Hélène, Physique des semi-conducteurs, 4e édition., vol. 2. in Sciences Sup, vol. 2. 2012.

Chapitre I : Les semi-conducteurs

- [28] B. Olivier, Composants à semi-conducteurs - De la physique du solide aux transistors. in Technosup. 2006.
- [29] F. Guy, Semi-conducteurs : les bases de la théorie k.p, Ecole Polytechnique., vol. 3. 2010.

Chapitre II

Matériaux utilisés dans les différentes couches minces

II-1 Introduction

Les cellules en couches minces sont des dispositifs photovoltaïques qui convertissent l'énergie lumineuse en électricité. Elles sont constituées de couches minces de matériaux semi-conducteurs déposés sur un substrat. Cependant, contrairement aux cellules solaires conventionnelles en silicium, les cellules en couches minces ont une épaisseur de seulement quelques micromètres, ce qui les rend plus légères et plus flexibles [1]. Ce chapitre se concentre sur les couches minces de matériaux semi-conducteurs et leurs compositions en particulier le Bi_2S_3 , le TiO_2 , le SnO_2 et le ZnO .

II-2 Composition d'une cellule solaire

Généralement, les cellules solaires à couches minces ont quatre couches principales et qui sont la couche fenêtre, la couche tampon, la couche absorbante, et le contact arrière [2].

Dans notre cas, nous disposons de deux cellules solaires à base de TiO_2 et SnO_2 comme couche tampon, le Bi_2S_3 comme couche absorbante et le ZnO comme couche fenêtre

La [figure II-1](#) illustre une structure de la cellule étudiée dans notre travail.

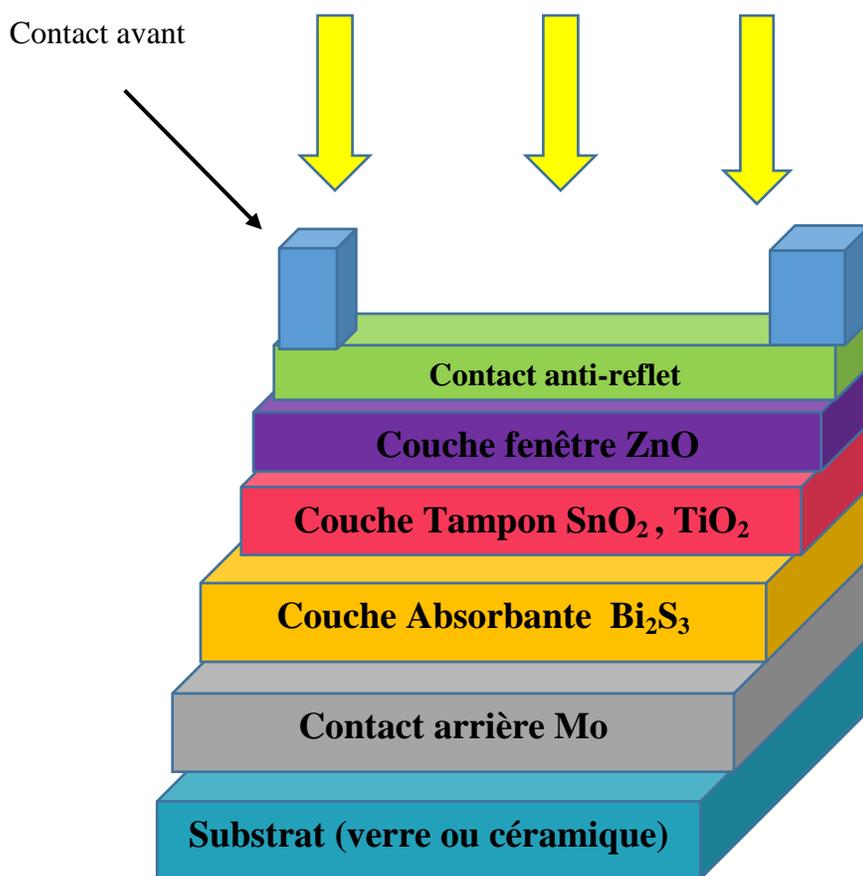


Figure II-1. Structure de la cellule solaire en couches minces étudiée

II-2-1 Substrat

Le substrat est un support qui permet différentes résistances mécaniques. Cette couche est généralement fabriquée en verre, avec des substrats flexibles ou métalliques d'épaisseur variant de 1 à 3 mm [3].

II-2-2 Contact arrière

Il s'agit d'un contact ohmique et le matériau utilisé pour le contact arrière est le plus souvent du Molybdène ou de l'ITO (oxyde d'indium-étain) [1].

Cette plaque en général faite de métal sert de support et de protection de la partie arrière de la cellule solaire [4].

II-2-3 Couche absorbante

C'est la couche primordiale d'une cellule solaire qui sert à absorber la lumière du soleil pour la convertir en énergie électrique [3]. Cette couche est généralement constituée de matériaux semi-conducteurs, tels que le silicium, le tellure de cadmium, le sélénium de cuivre et d'indium, la bismuthinite Bi_2S_3 , etc.

Lorsque les photons de la lumière solaire frappent la couche absorbante d'une cellule solaire, ils peuvent être absorbés par les atomes du matériau semi-conducteur. Lorsqu'un photon est absorbé, il libère de l'énergie qui peut exciter un électron de la bande de valence vers la bande de conduction, créant ainsi une paire électron-trou. Les électrons libérés ont suffisamment d'énergie pour se déplacer à travers la couche absorbante et sont collectés par les contacts électriques pour produire un courant électrique [5].

Le dépôt de la couche absorbante se fait généralement par deux techniques :

- La co-évaporation.
- Le recuit de précurseurs métalliques en présence de Sélénium ou de H_2Se [6].

II-2-4 Couche tampon

La couche tampon est située entre la couche absorbante et la couche d'oxyde transparent conducteur (OTC) [7]. Si un contact couche absorbante/OTC est directement réalisé, une jonction photovoltaïque peut exister mais son rendement sera limité par :

- L'inadaptation des bandes interdites.
- Les courants de fuite dus à la présence de zones désordonnées aux joints de grains. De ce fait, il est préférable d'introduire une fine couche, dite couche tampon, entre ces deux composés afin d'optimiser les performances de la cellule.

Chapitre II : Matériaux utilisés dans les différentes couches minces

II-2-4-1 Propriétés de la couche tampon [7]

- ❖ Une bande interdite intermédiaire permettant une transition « souple » entre celle du semi-conducteur et celle de l'OTC.
- ❖ Une conductivité de type N pour former la jonction avec la couche absorbante de type P.
- ❖ Une conductivité plus faible que la couche absorbante afin d'éviter les effets de fuite de courants.
- ❖ Elle doit être morphologiquement très homogène pour éviter tout effet de court-circuit au niveau des joints des grains.

II-2-4-2 Rôle de la couche tampon [8]

La couche tampon joue un rôle crucial dans l'optimisation des performances des cellules solaires, en aidant à maximiser la conversion de l'énergie solaire en électricité utilisable.

La couche tampon peut avoir plusieurs fonctions dépendant du matériau utilisé, elle sert à :

- ❖ Augmenter l'efficacité de la cellule solaire en augmentant la conductivité électrique de la couche active.
- ❖ Empêcher les réactions chimiques indésirables entre les couches actives et de contact, qui peuvent réduire la durée de vie de la cellule solaire.
- ❖ Permettre un meilleur alignement des niveaux d'énergie entre les différentes couches, ce qui peut améliorer l'efficacité de la collecte de charges et réduire les pertes de recombinaison.

II-2-5 Couche fenêtre

Le rôle de la couche fenêtre dans les cellules solaires est de permettre à la lumière solaire de traverser la cellule tout en empêchant les électrons de s'échapper. La couche fenêtre est située entre la couche active de la cellule solaire et l'extérieur de la cellule.

En utilisant le ZnO comme couche fenêtre, les cellules solaires peuvent bénéficier d'une transmission efficace de la lumière dans la cellule solaire tout en facilitant le mouvement des électrons vers les contacts électriques. De plus, le ZnO est un matériau abondant et peu coûteux, ce qui en fait une alternative attrayante aux matériaux plus coûteux [9].

II-2-6 Contact antireflet

La couche antireflet est une couche mince de matériau appliquée à la surface de la cellule solaire pour réduire la réflexion et augmenter l'absorption de la lumière solaire dans la cellule [10]. Les matériaux couramment utilisés pour les couches antireflets comprennent des oxydes métalliques tels que le dioxyde de silicium (SiO_2) et le dioxyde de zirconium (ZrO_2) [7].

II-2-7 Contact avant

Les contacts sur la face avant de la cellule sont généralement réalisés à l'aide d'une grille métallique avec une couche de Nickel de plusieurs dizaines de nanomètres d'épaisseur déposée sur le dessus OTC et la couche d'Aluminium de 0,5 à 1,0 μm d'épaisseur. Le Nickel est utilisé pour empêcher l'oxydation de l'Aluminium par l'Oxygène du OTC [11].

II-3 La bismuthinite Bi_2S_3

La bismuthinite Bi_2S_3 ou le sulfure de bismuth, est un semi-conducteur de structure orthorhombique avec un groupe d'espace P. Le composé nominal Bi_2S_3 est obtenu par fusion de deux éléments chimiques, le bismuth et le soufre, mais on n'a jamais obtenu par voie thermique, la forme intermédiaire BiS (phase très instable) [4].

Le sulfure de bismuth (Bi_2S_3) ne forme pas de cristaux mixtes avec le bismuth, ni avec le soufre. Il est insoluble dans le soufre liquide et sa solubilité dans le bismuth paraît faible à température modérée. La densité est d'environ $6,8 \text{ g/cm}^3$, et la température de fusion est de l'ordre de $620 \text{ }^\circ\text{C}$ [9].

II-3-1 Les propriétés du Bi_2S_3

Parmi les propriétés de la bismuthinite Bi_2S_3 , nous avons :

II-3-1-1 Propriétés physiques

Le [tableau II-1](#) présente quelques propriétés physiques de la bismuthinite Bi_2S_3

Tableau II- 1. Quelques propriétés physiques du Bi_2S_3 [11].

Formule brute	Bi_2S_3
Masse atomique	514,155
Couleur	Jaune-brunâtre
Clivage	[010], [100] et [110]
Eclat	Métallique
Point de fusion	620 C
Densité	6.78 g/cm^3
Magnétisme et radioactivité	Aucun

II-3-1-2 Propriétés cristallines [12]

Le Bi_2S_3 a une structure orthorhombique ce qui signifie qu'elle a trois axes de symétrie perpendiculaires les uns aux autres, en plus la maille cristalline du Bi_2S_3 est constituée de 4 unités de base, avec des longueurs de cotés a, b et c (**figure II-2**).

Le Bi_2S_3 présente une anisotropie dans ses propriétés physiques et chimiques en raison de sa structure cristalline orthorhombique.

Enfin le Bi_2S_3 est biréfringent, ce qui signifie qu'il possède deux indices de réfraction différents pour la lumière polarisée perpendiculairement à l'axe c de la maille cristalline et pour la lumière polarisée parallèlement à cet axe.

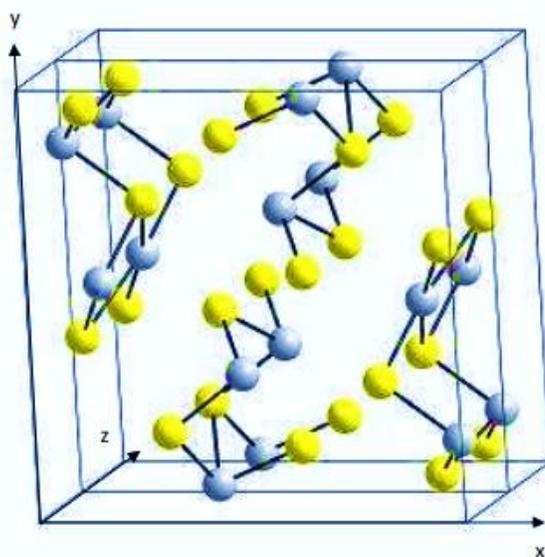


Figure II- 2. Structure cristallographique du Bi_2S_3 .

II-3-1-3 Propriétés optiques

Le sulfure de bismuth Bi_2S_3 est un matériau semi-conducteur qui présente des propriétés optiques intéressantes dont on cite les suivantes :

II-3-1-3-1 Bande interdite

Le Bi_2S_3 a une bande interdite d'environ 1,3 eV [12], ce qui signifie qu'il absorbe les photons ayant une énergie supérieure à cette valeur. Cette bande interdite correspond à une longueur d'onde dans le domaine de l'infrarouge proche.

Chapitre II : Matériaux utilisés dans les différentes couches minces

II-3-1-3-2 Transparence

Le Bi_2S_3 est transparent dans le domaine de l'infrarouge proche, c'est-à-dire pour des longueurs d'onde supérieures à environ 800 nm [13]. Cette transparence en fait un matériau intéressant pour des applications en optique et en photonique, comme la fabrication de filtres infrarouges [9].

II-3-1-3-3 Indice de réfraction

L'indice de réfraction du Bi_2S_3 varie en fonction de la longueur d'onde de la lumière. À une longueur d'onde de 1550 nm, l'indice de réfraction du Bi_2S_3 est d'environ 2,2, ce qui en fait un matériau à fort indice de réfraction [13].

II-3-1-4 Propriétés électriques

Le sulfure de bismuth (Bi_2S_3) est un semi-conducteur de type n avec une bande interdite d'environ 1,3 eV à température ambiante. Il possède une conductivité électrique élevée, une faible conductivité thermique et peut être dopé avec des impuretés pour améliorer ses propriétés électriques. Le Bi_2S_3 est également un matériau piézoélectrique utilisé dans les capteurs de pression et les dispositifs piézoélectriques, ainsi qu'un revêtement de protection contre la corrosion et dans les cellules solaires à couches minces [14].

II-3-2 Utilisation du Bi_2S_3 dans la cellule solaire

Le Bi_2S_3 peut être utilisé dans les cellules solaires comme couche tampon, couche absorbante, couche antireflet ou composant de nanocristaux. Ces utilisations exploitent les propriétés optiques et électriques intéressantes du Bi_2S_3 pour améliorer l'efficacité de la conversion de la lumière en électricité dans les cellules solaires[15].

Il peut être employé dans différents domaines comme les dispositifs thermoélectriques, le photovoltaïque, et la détection de biomolécules[13].

II-3-3 Caractéristiques des cellules solaires à base de Bi_2S_3

Les cellules solaires à base de Bi_2S_3 ont montré une efficacité de conversion relativement faible jusqu'à présent, mais sont compatibles avec les substrats flexibles et sont faciles à fabriquer [9]. De plus, le potentiel du Bi_2S_3 en tant que matériau thermoélectrique pourrait être utilisé pour améliorer l'efficacité de la cellule solaire. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour améliorer l'efficacité de ces cellules solaires et explorer leur potentiel pour les applications pratiques [13].

II-3-4 Avantages et inconvénients de l'utilisation du Bi_2S_3

II-3-4-1 Avantages

- Faible coût : Le bismuth et le soufre sont relativement abondants et peu coûteux, ce qui peut réduire les coûts de production du Bi_2S_3 par rapport à d'autres matériaux semi-conducteurs [14].
- Le Bi_2S_3 est compatible avec des substrats flexibles, ce qui en fait un candidat potentiel pour les cellules solaires flexibles [14].
- Propriétés thermoélectriques intéressantes : En plus de son utilisation dans les cellules solaires, le Bi_2S_3 peut être utilisé comme matériau thermoélectrique pour la production d'énergie électrique à partir de la chaleur [13].

II-3-4-2 Inconvénients

- Efficacité de conversion relativement faible : Jusqu'à présent, les cellules solaires à base de Bi_2S_3 ont montré une efficacité de conversion relativement faible. Cependant, des recherches sont en cours pour améliorer l'efficacité de ces cellules solaires [15].
- Bande interdite relativement étroite: Le Bi_2S_3 a une bande interdite relativement étroite d'environ 1,3 eV, ce qui peut limiter l'absorption de la lumière visible par le matériau, et affecter l'efficacité de la cellule solaire [9].
- Stabilité à long terme: La stabilité à long terme des cellules solaires à base de Bi_2S_3 n'a pas été complètement étudiée, ce qui peut limiter leur durée de vie et leur fiabilité [14].

II-4 Le dioxyde de titane TiO_2

Le dioxyde de titane ou oxyde de titane (IV) est un composé d'oxygène et de titane de formule TiO_2 . Il est utilisé dans de nombreuses applications (additif alimentaire, cosmétiques, pigments), pour ses propriétés d'absorption des rayons ultraviolets et son caractère colorant blanc (additif alimentaire), et se présente, sous forme de poudre nanométrique [11].

II-4-1 Les propriétés du TiO_2

Parmi les propriétés du dioxyde de titane TiO_2 , nous avons :

II-4-1-1 Propriétés physiques

Les propriétés physiques du TiO_2 sont récapitulées dans le [tableau II-2](#) suivant :

Tableau II- 2. Propriétés physiques du TiO_2 [11].

<i>État physique</i>	Le TiO_2 est un solide cristallin blanc et opaque.
<i>Point de fusion</i>	1843°C
<i>Densité</i>	3,9 g/cm ³
<i>Conductivité thermique</i>	Le TiO_2 a une faible conductivité thermique
<i>Magnétisme</i>	Diamagnétique (ce qui signifie qu'il ne présente pas de propriétés magnétiques permanentes)

II-4-1-2 Propriétés cristallines

Le dioxyde de titane existe sous plusieurs formes cristallines dont les trois principales sont l'anatase, le rutile et le brookite [8]. Leurs structures cristallographiques sont présentées dans la [Figure II-3](#)

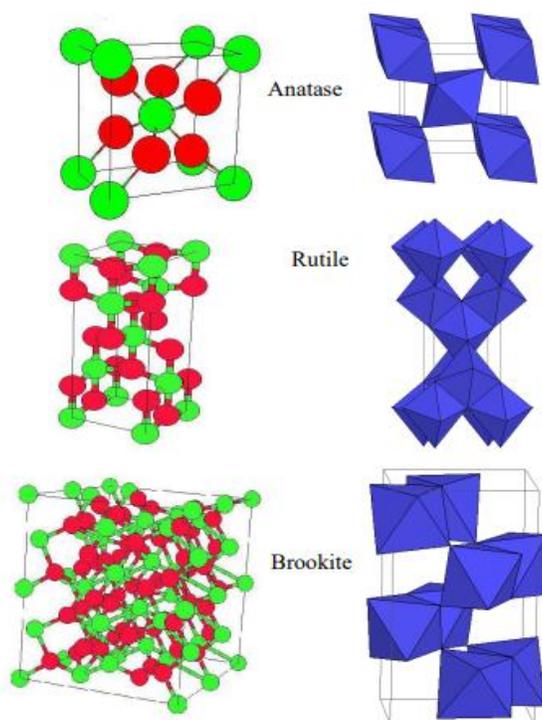


Figure II- 3. Principales structures cristallines du dioxyde de titane.

Chapitre II : Matériaux utilisés dans les différentes couches minces

Les deux formes cristallines les plus courantes du TiO_2 sont la forme anatase et la forme rutile comme il est présenté dans le **Tableau II.3**. Elles ont des structures cristallines différentes ainsi que des propriétés physiques et chimiques différentes. La forme anatase est généralement considérée comme la plus active pour les applications photocatalytiques, tandis que la forme rutile est plus stable à des températures élevées [8].

Tableau II- 3. Caractéristiques de l'oxyde de titane [16].

Nom	Dioxyde de titane, oxyde de titane IV, Titania		
	Formule chimique	TiO_2	
Masse molaire (g.mol^{-1})	79,89		
Apparence	Solide blanc		
Phase Cristalline	Rutile	Anatase	Brookite
System cristallin	Quadratique	Quadratique	Orthorhombique
Nombre de TiO_2 par maille	2	4	8
Paramètre de maille [Å°]	a=4,594	a=3,785	a= 9,184
	b=2,958	b=9,514	b=5,447
			c= 5,145
Rayon atomique (Å°)	r (Ti^{+4})= 0,605		
	r (O^{-2})= 1,36		
Compacité	0,705	0,645	0,655
Masse volumique (g.cm^{-3})	4,24	3,89	4,12
Indice de réfraction	2,61-2,89	2,48-2,56	2,58-2,70

II-4-1-3 Propriétés optiques

Le TiO_2 possède plusieurs propriétés optiques importantes, notamment une transparence variable en fonction de la longueur d'onde, une grande capacité de réflexion pour les rayonnements ultraviolets, un indice de réfraction élevé, une dispersion optique élevée et un effet photochromique.

Chapitre II : Matériaux utilisés dans les différentes couches minces

Ces propriétés sont utilisées dans de nombreuses applications, notamment en tant que matériau pour les lentilles et les prismes optiques, pour la protection solaire et pour les lunettes photochromiques [19].

- Transparence : le TiO_2 est généralement opaque à la lumière visible en raison de son large gap énergétique, mais il peut être transparent dans l'ultraviolet (voir [figure 4](#)).

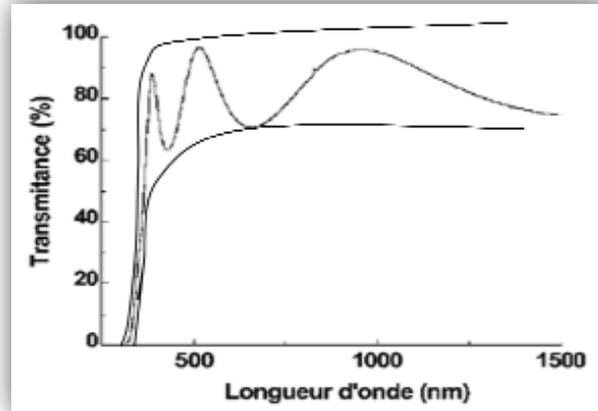


Figure II- 4: Spectre expérimental de transmittance d'un film en TiO_2 [16].

- Réflexion : Le TiO_2 a une grande capacité de réflexion pour les rayonnements ultraviolets, ce qui le rend utile pour les applications de protection solaire [17].
- Indice de réfraction : Le TiO_2 a un indice de réfraction élevé, ce qui le rend utile comme matériau pour les lentilles et les prismes optiques.
- Dispersion : Le TiO_2 présente une dispersion optique élevée, ce qui signifie que la lumière blanche peut se décomposer en ses couleurs caractéristiques lorsqu'elle traverse le matériau [18].

II-4-1-4 Propriétés électriques

Le calcul de la conductivité électrique dépend de la résistance électrique R , de la couche intrinsèque, ainsi que des paramètres géométriques, tels que la distance inter-électrodes L , l'épaisseur d , et la section w de la couche conductrice. La conductivité σ est reliée à ces paramètres par la relation suivante :

$$\sigma = \left(\frac{L}{S}\right) \left(\frac{1}{R}\right) \quad (\text{II-1})$$

Chapitre II : Matériaux utilisés dans les différentes couches minces

Avec :

σ : La conductivité électrique,

R : la résistance électrique,

S : La surface,

L : la distance inter-électrodes.

II-4-1-5 Utilisation du TiO₂ dans les cellules solaires

Le dioxyde de titane (TiO₂) est largement utilisé dans les cellules solaires en raison de ses propriétés photovoltaïques. Voici quelques-unes des utilisations du TiO₂ dans les cellules solaires

- Électrode : Le TiO₂ est utilisé comme couche d'électrode dans les cellules solaires à couches minces et dans les cellules solaires à colorant. Dans les cellules solaires à couches minces, le TiO₂ est déposé sous forme de film mince sur une surface de verre conducteur, tandis que dans les cellules solaires à colorant, il est utilisé comme substrat pour absorber les colorants sensibilisateurs [18].
- Barrière : Le TiO₂ est également utilisé comme barrière pour empêcher les fuites de charge dans les cellules solaires. Dans les cellules solaires à couches minces, le TiO₂ est utilisé comme barrière pour empêcher les électrons de s'échapper de la couche active [8].
- Photo catalyseur : Le TiO₂ peut également être utilisé comme photocatalyseur pour améliorer l'efficacité des cellules solaires. Lorsque le TiO₂ est exposé à la lumière, il produit des paires électron-trou qui peuvent être utilisés pour produire de l'électricité [16].
- Co-catalyseur : Le TiO₂ est également utilisé comme co-catalyseur dans les cellules solaires à colorant pour faciliter le transfert d'électrons entre le colorant et l'électrode [17].

II-4-2 Caractéristiques des cellules solaires à base de TiO₂

Parmi les caractéristiques des cellules solaires à base de TiO₂ on cite :

- **La durabilité** : Les cellules solaires à base de TiO₂ sont connues pour leur durabilité car le TiO₂ est un matériau stable et résistant à la corrosion. Cela signifie que les cellules solaires à base de TiO₂ ont une longue durée de vie et exigent peu d'entretien [8].
- **La stabilité à haute température** : les cellules solaires à base de TiO₂ sont stables à haute température, ce qui les rend adaptées aux environnements chauds [18].

Chapitre II : Matériaux utilisés dans les différentes couches minces

- La sensibilité spectrale : Les cellules solaires à base de TiO_2 sont plus sensibles à la lumière UV que les autres types de cellules solaires, ce qui signifie qu'elles peuvent être utilisées dans des applications où la lumière UV est importante, comme la détection de fuites d'eau.

II-4-3 Avantages et inconvénients de l'utilisation du TiO_2

L'utilisation du TiO_2 présente plusieurs avantages et inconvénients dans différents domaines, tels que l'industrie, l'environnement et les applications électroniques.

II-4-3-1 Avantages

- Abondance : Le TiO_2 est un matériau abondant dans la croûte terrestre, ce qui en fait une ressource facilement disponible [16].
- Faible coût : Le coût de production du TiO_2 est relativement faible par rapport à d'autres matériaux utilisés dans l'industrie [14].
- Haute stabilité chimique : Le TiO_2 est un matériau stable chimiquement et résistant à la corrosion, ce qui le rend adapté à des applications dans des environnements difficiles [8].

II-4-3-2 Inconvénients

- Toxicité : Certaines formes de TiO_2 peuvent être toxiques, notamment la forme nanocristalline, ce qui peut poser des risques pour la santé humaine et l'environnement.
- Biodisponibilité : Le TiO_2 peut être biodisponible, ce qui signifie qu'il peut s'accumuler dans les tissus des organismes vivants, et peut poser des problèmes pour la santé humaine et l'environnement [11].
- Faible conductivité électrique : Le TiO_2 a une faible conductivité électrique, ce qui le rend moins adapté aux applications électroniques.
- Faible efficacité : Bien que le TiO_2 ait une activité photo catalytique élevée, son efficacité énergétique est souvent faible.
-

II-5 L'Oxyde d'étain SnO_2

Le dioxyde d'étain (IV) ou oxyde stannique (SnO_2) qui se trouve à l'état naturel sous forme de cassitérite minérale. La cassitérite est un oxyde de couleur variable, allant du jaunâtre au noir, elle est connue et exploitée depuis les temps les plus anciens dans le polissage optique [18].

II-5-1 Les propriétés du SnO_2

II-5-1-1 Propriétés physiques

Voici quelques-unes de ses propriétés physiques de base

Chapitre II : Matériaux utilisés dans les différentes couches minces

Densité	6,95 g/cm³
Point de fusion	1630 °C
Conductivité thermique	11W/(m·K)
Dureté (MOHS² Scale)	7 à 8
Transparence	Transparent dans le spectre visible (choix idéal pour les applications optiques)

Tableau II-4. Propriétés physiques du SnO₂.

II-5-1-2 Propriétés cristallines du SnO₂

L'oxyde d'étain SnO₂ cristallise dans le système tétragonal rutile. La maille élémentaire du SnO₂ représentée avec les paramètres suivants : $a = b = 4.737 \text{ \AA}$ et $c = 3.186 \text{ \AA}$ est donnée dans la **Figure II-5**. La maille contient six atomes, quatre atomes d'oxygène et deux atomes d'étain.

Dans ce système, chaque atome d'oxygène est entouré de trois atomes d'étain et tout atome d'étain est entouré de six atomes d'oxygène [19].

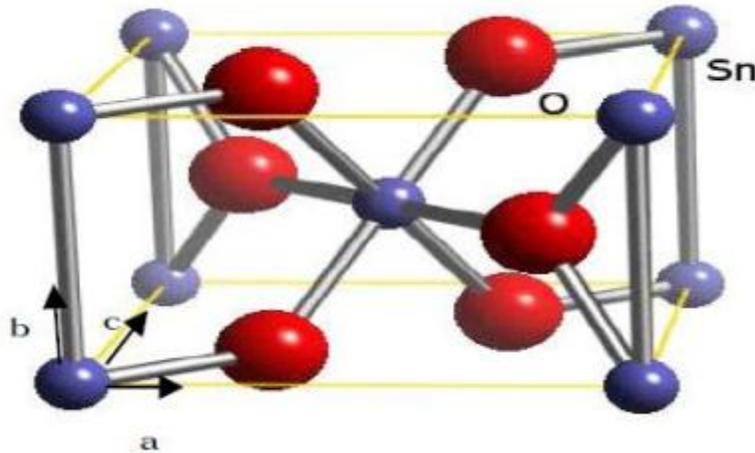


Figure II- 5. Maille élémentaire du SnO₂ (structure rutile).

II-5-1-3 Propriétés optiques

Le SnO₂ présente une réflexion importante du rayonnement solaire dans la gamme de l'infrarouge, et une forte absorption dans le domaine ultraviolet, tandis qu'il a une transmission de l'ordre de 85% dans la gamme du visible et il devient opaque au-delà de 1200 nm. Cette diminution de la transmission optique est due à la forte augmentation de l'absorption provoquée par la présence d'électrons libres. La **Figure II-6** présente le Spectre typique de transmission d'une couche mince de SnO₂ [19].

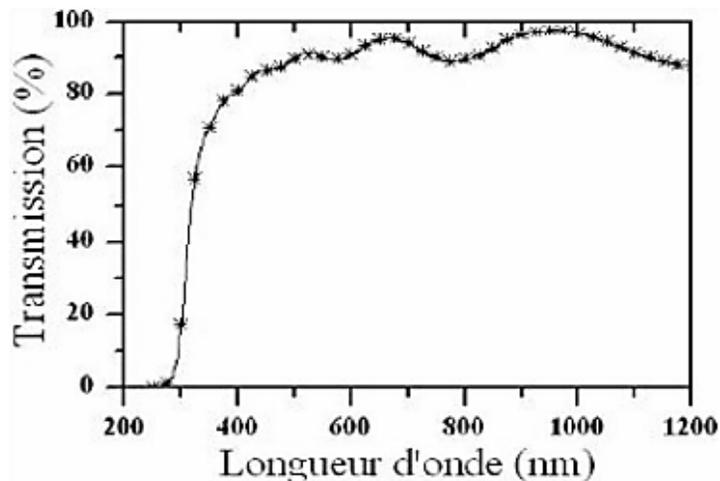


Figure II- 6. Spectre typique de transmission d'une couche mince en SnO₂.

Le SnO₂ a une bande interdite de 3,6 eV, ce qui est relativement élevé pour un matériau semi-conducteur. Cela signifie qu'il peut absorber efficacement la lumière visible et une partie de la lumière UV.

II-5-1-4 Propriétés électriques

Les propriétés électriques du SnO₂ caractéristiques sont la résistivité des films, la densité de porteurs de charge et leur mobilité. Plusieurs techniques [20] peuvent être utilisées :

- Méthode des quatre pointes.
- Méthode de deux pointes.
- Effet hall.

L'oxyde d'étain présente une concentration en électrons libres de l'ordre de 10^{19} à 10^{20} cm⁻³. Celui-ci peut être dopé pour améliorer ses propriétés électriques [19].

Tableau II- 5. Propriétés optiques et électriques du SnO₂ [14].

Epaisseur (μm)	Résistivité (Ohm. cm)	Transparence (%)
0.15	$3,4 \cdot 10^{-2}$	>75% (vis)
0.20	$1,5 \cdot 10^{-2}$	>75% (vis)
0.30	$3,0 \cdot 10^{-3}$	>75% (vis)
0.40	$5,0 \cdot 10^{-4}$	<70% (vis)
0.50	$1,0 \cdot 10^{-3}$	<70% (vis)

II-5-2 Utilisation du SnO₂ dans la cellule solaire

Le SnO₂, également connu sous le nom d'oxyde d'étain (IV), est un matériau semi-conducteur largement utilisé dans la fabrication de cellules solaires en raison de ses propriétés optiques et électriques favorables [21].

Le SnO₂ peut être utilisé comme matériau de couche de transport électronique dans les cellules solaires à couches minces, où il est déposé sur la couche de matériau photosensible. Le SnO₂ peut également être utilisé comme matériau d'électrode transparente dans les cellules solaires à base de silicium, où il est déposé sur la couche de matériau photosensible en tant que couche de contact électrique [19].

II-5-3 Caractéristiques des cellules solaires à base de SnO₂

Les cellules solaires à base de SnO₂ (oxyde d'étain) sont une technologie émergente de cellules solaires à couches minces. Voici quelques-unes de leurs caractéristiques :

- Matériau abondant et peu requis : L'étain est un matériau abondant dans la croûte terrestre, ce qui le rend peu requis à extraire et utiliser dans les cellules solaires [21].
- Transparence : la transparence est élevée dans le spectre visible, ce qui permet à la lumière de passer à travers la cellule solaire et d'atteindre la couche de matériau photosensible.

Chapitre II : Matériaux utilisés dans les différentes couches minces

- Efficacité énergétique : Les cellules solaires à base de SnO_2 ont une efficacité énergétique relativement faible par rapport aux autres types de cellules solaires, car le SnO_2 a une largeur de bande interdite relativement grande, ce qui signifie qu'il absorbe moins de lumière solaire [20].

II-5-4 Avantages et inconvénients du SnO_2

L'utilisation du SnO_2 présente également des avantages et des inconvénients.

II-5-4-1 Avantages

- Haute stabilité chimique : Le SnO_2 est très stable chimiquement et résiste à la corrosion, ce qui le rend utile pour les applications dans les environnements agressifs [20].
- Haute conductivité : Le SnO_2 a une conductivité électrique élevée, ce qui en fait un matériau utile pour les applications électroniques et les capteurs.
- Haute transparence : Le SnO_2 est transparent dans le domaine visible, ce qui le rend utile pour les applications optiques et photovoltaïques.
- Faible toxicité : Le SnO_2 est non toxique, ce qui le rend sûr pour une utilisation dans les applications médicales et autres applications où une toxicité réduite est souhaitable [14].

II-5-4-2 Inconvénients

- Sensibilité à l'humidité : Le SnO_2 peut absorber l'humidité de l'air.
- Faible mobilité des porteurs de charge : Le SnO_2 a une mobilité de porteurs de charge relativement faible par rapport à d'autres matériaux semi-conducteurs, ce qui peut affecter ses performances dans certaines applications [19].
- Coût : Bien que l'étain soit abondant, le coût de production du SnO_2 peut être plus élevé que celui d'autres matériaux semi-conducteurs.

II-6 L'oxyde de Zinc ZnO

L'oxyde de zinc ou ZnO , est un composé chimique d'atome de zinc et d'atome d'oxygène utile dans de nombreuses applications dans diverses industries [22].

II-6-1 Les propriétés du ZnO

II-6-1-1 Propriétés physiques

L'oxyde de zinc (ZnO) possède plusieurs propriétés physiques importantes citées dans le [tableau II-6](#)

Tableau II- 6. Propriétés physiques du ZnO [23]

Chapitre II : Matériaux utilisés dans les différentes couches minces

État physique	Le ZnO est un solide blanc sous forme de poudre cristalline
Point de fusion	1975°C
Conductivité thermique	L'oxyde de zinc a une conductivité thermique élevée
Absorption UV	ZnO est capable de bloquer les rayons UV

Ces propriétés physiques font de l'oxyde de zinc un matériau utile pour diverses applications industrielles, notamment l'électronique, l'optique, la catalyse, la médecine et la cosmétique.

II-6-1-2 Propriétés cristallines

L'oxyde de zinc (ZnO) a une structure cristalline hexagonale. Les propriétés cristallines du ZnO sont importantes car elles déterminent les propriétés physiques, chimiques et électroniques du matériau [23].

Les principales propriétés cristallines du ZnO sont les suivantes [11]

- Symétrie : La structure cristalline du ZnO est caractérisée par une symétrie hexagonale.
- Axes cristallographiques : Les axes cristallographiques de la structure du ZnO sont l'axe c (perpendiculaire au plan hexagonal) et l'axe a (le long des côtés du plan hexagonal) [24].
- Polarisation : Le ZnO a des propriétés de polarisation uniques en raison de sa structure cristalline hexagonale. Cela signifie qu'il peut être utilisé dans des applications telles que les transducteurs piézoélectriques et les dispositifs d'émission acoustique [24].

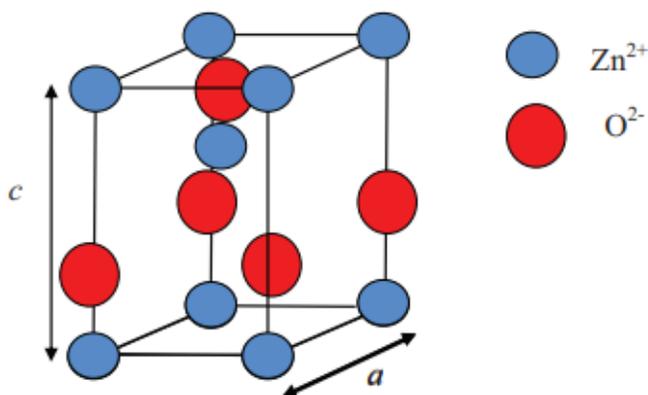


Figure II- 7. Maille primitive de la phase Wurtzite du ZnO [22].

La **Figure II-7** représente la maille primitive de la structure Würtzite ZnO, les paramètres de maille sont $a = 3,2498 \text{ \AA}$, $c = 5,2066 \text{ \AA}$ et $\beta = 120^\circ$. Sa structure cristalline hexagonale wurtzite lui confère des propriétés de polarisation uniques et permet sa croissance par épitaxie sur différents substrats.

II-6-1-3 Propriétés optiques

L'oxyde de zinc (ZnO) possède des propriétés optiques intéressantes qui le rendent utile pour plusieurs applications optoélectroniques, notamment les diodes électroluminescentes (LED), les cellules solaires et les capteurs optiques. Voici quelques-unes des propriétés optiques du ZnO :

- **Bande interdite** : Le ZnO est un semi-conducteur à large bande interdite, ce qui signifie qu'il peut être utilisé pour produire des émissions lumineuses dans le spectre UV et bleu-vert [22].
- **Transparence** : Le ZnO est transparent dans la région UV et visible, avec une transparence élevée supérieure à 80% dans la plage des longueurs d'onde de 400-800 nm [22].
- **Indice de réfraction** : L'indice de réfraction du ZnO est élevé, ce qui signifie que la lumière est fortement réfractée lorsqu'elle passe à travers le matériau. Cela le rend utile dans la conception des lentilles optiques et des dispositifs d'imagerie [9].

La **Figure II-8** montre la dispersion des indices de réfraction de la lumière en fonction de l'énergie du photon [22].

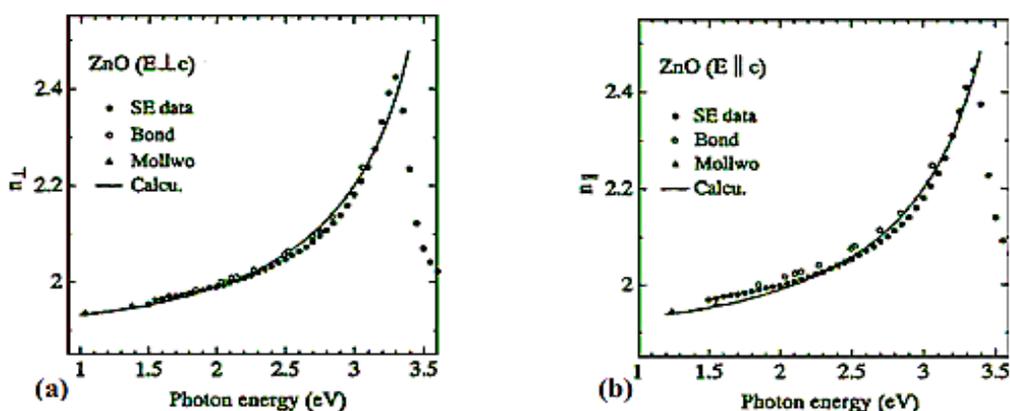


Figure II- 8. Dispersion des indices de réfraction [22].

- **Photoluminescence** : Lorsqu'il est excité par une source lumineuse, le ZnO émet une lumière dans la région UV et visible en raison de la recombinaison des électrons et des trous dans la bande interdite [25].

II-6-1-4 Propriétés électriques

L'oxyde de zinc (ZnO) est un semi-conducteur qui présente des propriétés électriques intéressantes dont voici quelques-unes

- **Bande interdite** : Le ZnO a une bande interdite d'environ 3,3 eV, ce qui le place dans la catégorie des semi-conducteurs à large bande interdite. Cette largeur de bande interdite est importante car elle détermine les propriétés électriques du matériau, telles que sa conductivité et sa réponse aux champs électriques [22].
- **Conductivité** : La conductivité électrique du ZnO peut être contrôlée en dopant le matériau avec des impuretés. Par exemple, le dopage au lithium augmente la conductivité électrique, tandis que le dopage à l'aluminium diminue la conductivité [22].
- **Mobilité des porteurs** : La mobilité des porteurs dans le ZnO est la vitesse à laquelle les charges électriques se déplacent à travers le matériau, est élevée. Elle est élevée, ce qui signifie que le ZnO peut être utilisé dans les dispositifs électroniques à haute vitesse, tels que les transistors [24].

II-6-2 Utilisation du ZnO dans la cellule solaire

Il existe de nombreuses applications faisant appel au ZnO dans plusieurs domaines. Parmi ces domaines, nous citons les cellules solaires, les diodes électroluminescentes, les vitrages intelligents et couches de revêtements anti UV ainsi que les capteurs chimiques et détecteurs mécaniques [24].

II-6-3 Caractéristiques des cellules solaires à base de ZnO

Les cellules solaires à base de ZnO ont certaines caractéristiques qui les distinguent des autres types de cellules solaires. Voici quelques-unes de ces caractéristiques :

- **Haute efficacité** : Les cellules solaires à base de ZnO ont une efficacité de conversion élevée de la lumière solaire en électricité.
- **Stabilité à long terme** : Les cellules solaires à base de ZnO ont une grande stabilité à long terme, ce qui signifie qu'elles peuvent produire de l'électricité de manière fiable pendant de nombreuses années [26].
- **Facilité de fabrication** : Le ZnO peut être facilement déposé sous forme de films minces à l'aide de techniques de dépôt peu coûteuses et facilement industrialisables.

II-6-4 Avantages et inconvénients de l'utilisation du ZnO

Parmi les avantages et les inconvénients de l'utilisation du ZnO, nous avons

Chapitre II : Matériaux utilisés dans les différentes couches minces

II-6-4-1 Avantages [23]:

- Abondance : Le zinc est un élément abondant dans la croûte terrestre, ce qui rend le ZnO disponible à un coût raisonnable.
- Propriétés optiques : Le ZnO a une large bande interdite, ce qui en fait un matériau semi-conducteur efficace pour la conversion de l'énergie solaire.
- Faible toxicité : le ZnO est un matériau stable et inerte qui ne libère pas de substances dangereuses dans l'environnement. Cela en fait un choix attrayant pour les applications de cellules solaires respectueuses de l'environnement.

II-6-4-2 Inconvénients[23]

- Coût : Bien que le zinc soit abondant, les coûts de production de ZnO peuvent être plus élevés que ceux d'autres matériaux semi-conducteurs.
- Durabilité : Le ZnO peut être sensible à la corrosion, ce qui peut affecter sa durabilité dans certaines applications.

II-7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressées aux différentes couches qui composent une cellule solaire dont les principales sont la couche absorbante, la couche tampon et la couche fenêtre.

Le matériau semi-conducteur de la couche absorbante dans notre travail est la bismuthinite Bi_2S_3 , nous avons donné quelques propriétés physiques, cristallines, optiques et électriques de ce matériau.

Par la suite, nous avons exposé les deux matériaux de la couche tampon à savoir le TiO_2 et le SnO_2 avec leurs différentes propriétés.

En dernier lieu, nous avons cité les propriétés du matériau semi-conducteur ZnO qui est utilisé dans la couche fenêtre.

Pour tous ces matériaux, nous avons énuméré quelques avantages et inconvénients dans la conception de cellules photovoltaïques ou de dispositifs optoélectroniques.

Bibliographie

- [1] O. Darfaned, "Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules solaires en couches minces à base de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$," thèse Doctorat, 2013.
- [2] L. Ahlam and H. Benchikh, "Etude et simulation d'une cellule solaire à base des éléments chalcogènes," mémoire de master, Université de Msila, 2018.
- [3] Z. Abdellatif, "caracterisation, modelisation et simulation des cellules PV a base de silicium en couche mince," Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid, 2005.
- [4] D. S. Benmansour, "Etude sur les matériaux Bi_2S_3 et CZTS contribuant à l'obtention de meilleurs rendements photovoltaïques," Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2020.
- [5] A. Chadel, « optimisation et simulation numérique du profil de la couche absorbante et des différentes couches de cellules photovoltaïques à base de CIGS », thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, p. 116, 2017."

Chapitre II : Matériaux utilisés dans les différentes couches minces

- [6] M. Mostefaoui, H. Mazari, S. Khelifi, A. Bouraiou, and R. Dabou, "Simulation of High Efficiency CIGS Solar Cells with SCAPS-1D Software," *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 736–744, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.809.
- [7] Z. Cheurf, "Comportement thermique de la phase monoxyde de titane TiO lors de la réduction du dioxyde de titane TiO₂ par le titane métallique ou par le carbone. Etude par diffraction X, in situ, entre 20 et 1750°," Mémoire de Magister, USTHB, 2011.
- [8] O. Boussoum, "Etude de l'effet d'une couche mince de TiO₂ sur les paramètres d'une cellule solaire au Silicium," Thesis, Université Mouloud Mammeri, Constantine, 2011.
- [9] H. Benattou, "Élaboration et caractérisations structurale et électrique par la spectroscopie d'impédance des composés (Bi₂S₃)(X)(ZnS)(1-X) et (ZnO)(X)(CdO)(1-X)," Université Djillali Liabes, Sidi Bel Abbès, 2017.
- [10] Z. Achour, "Réalisation de cellules solaires à base de couches minces de ZnO : Effet du dopage," Université Larbi ben M'hidi Oum el Bouaghi, 2019.
- [11] M. Azibi, "Etude de la structure électronique de TiO₂ rutile et de ZnO wurtzite dopés au fer et au nickel," Mémoire de Magister, UNIVERSITE SCIENCE TECHNIQUE HOUARI BOUMEDIAN, 2010.
- [12] T. Jing and et al., "Crystal Splitting in the Growth of Bi₂S₃," *American Chemical Society*, vol. 6, no. 12, 2012.
- [13] R. S. Mane, J. D. Desai, O.-S. Joo, and S.-H. Han, "Surface Morphology and Optical Studies of Non-aqueous Bi₂S₃ Thin Films," *Int J Electrochem Sci*, vol. 2, 2007.
- [14] K. Sahraoui, "Fabrication et Caractérisations Optique et Electrique de Couches Minces de Matériaux Composites de Type (Bi₂S₃)_x – (Ag₂S)(1-x)," thèse Doctorat, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES, 2016.
- [15] H. Benattou, N. Benramdane, and M. Medles, "Fabrication and investigation of structural, optical and dielectric properties of bismuth trisulfide (Bi₂S₃) thin film," 2017.
- [16] O. Boubrik, "L'effet d'une couche mince de TiO₂ sur les performances d'une cellule solaire au Silicium," Université de Tizi-Ouzou, 2011.
- [17] F. Hanini *et al.*, "Propriétés structurales, optiques et électriques des couches minces de TiO₂ dopé Cu obtenues par voie Sol-gel." Jan. 10, 2014.
- [18] H. Fraoucene, "Effet de la température (traitement thermique) sur les propriétés optoélectroniques et structurales de TiO₂ nanotube.," mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010.

Chapitre II : Matériaux utilisés dans les différentes couches minces

- [19] S. Yahyaoui, "L'effet de la molarité des différentes sources d'étain sur les propriétés des couches minces d'oxyde d'étain SnO₂ élaborées par Spray Ultrasonique," mémoire de master, Université Mohamed Khider - Biskra.
- [20] C. Chaabi Hamadane ET AMROUNE Ramzi, "Étude les propriétés structurales, optiques et électriques des couches minces de SnO₂ dopées Zinc élaborées par spray pyrolyse," Université de Msila, 2019.
- [21] N. Boubrik, "Comparaison des effets antireflets du SnO₂ et ZnO utilisés comme couches antireflet sur les propriétés de la cellule solaire à homo-jonction.," mémoire de MAGISTER, Université de Tizi Ouzou, 2013.
- [22] T. Brouri, "Élaboration et étude des propriétés électriques des couches minces et des nanofils de ZnO," Université Paris-Est, PARIS, 2011.
- [23] sabrin derbel, "Electrodéposition et caractérisation de couches minces ZnO," MEMOIRE DE MAGISTER, Université Ferhat ABBAS- Setif1, 2014.
- [24] K. Laurent, "Etude expérimentale de la microstructure et des propriétés électriques et optiques de couches minces et de nanofils d'oxydes métalliques (d-Bi₂O₃ et ZnO) synthétisés par voie électrochimique," Université Paris-Est, PARIS, 2010.
- [25] L. Darkaoui, "Contribution à la fabrication et la caractérisation des couches minces de ZnO pur et dope élaboré par la technique spray," Thèse de doctorat, UNIVERSITE SCIENCE TECHNIQUE HOUARI BOUMEDIAN, 2011.
- [26] S. E. Lachhab, A. Bliya, E. Al Ibrahim, and L. Dlimi, "Comparative study of the results numerical and experimental carried out on the performance of the ZnO/CdS/CZTS structure.," *Optik*, vol. 252, p. 168514, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.ijleo.2021.168514.

Chapitre III
Logiciel SCAPS-1D.
Travail de simulation

III-1 Introduction

Les structures des cellules photovoltaïques présentent de nombreuses problématiques telles que les courants de transport et les phénomènes de recombinaison. Pour mieux comprendre leur fonctionnement, la simulation numérique est largement utilisée. Plusieurs logiciels ont été développés, dont le SCAPS-1D, qui est un outil de simulation de cellules solaires en couches minces.

Ce chapitre décrit le travail de simulation de cellules solaires en couches minces à base de TiO_2 et SnO_2 comme couche tampon.

III-2 Les propriétés électriques de la cellule photovoltaïque

Nous pouvons déterminer les grandeurs caractéristiques d'une cellule photovoltaïque à partir de la caractéristique $I(V)$ qui décrit le fonctionnement de la cellule [1].

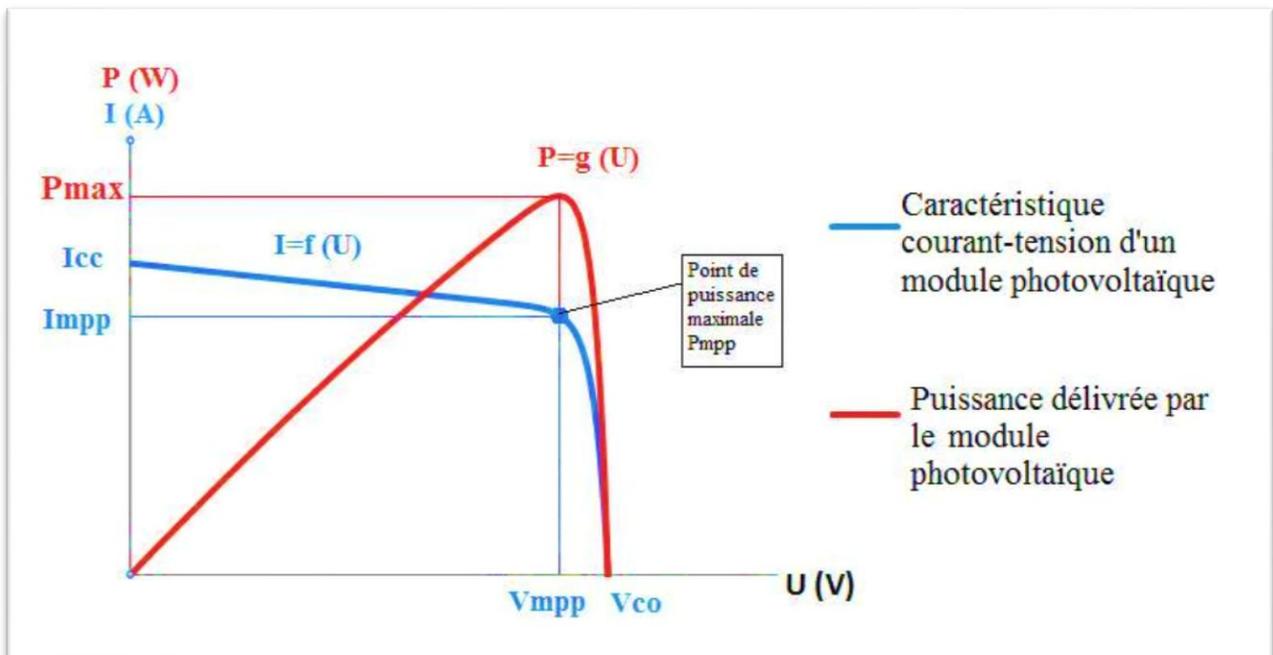


Figure III- 1. Caractéristique I-V d'une cellule solaire [1].

Avec

- cc = (court-circuit)
- co = (circuit ouvert)
- Mpp = maximum power point (point de puissance maximale)

III-2-1 Courant de court-circuit I_{cc}

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$).

Il croit linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [1].

Sa valeur est déterminée par l'équation suivant

$$I_{cc} = q \int F(\lambda) [1 - R(\lambda) \times IQE(\lambda)] d\lambda \quad (III-1)$$

Avec

$F(\lambda)$: la densité du flux incident par unité de surface et de temps[2].

$R(\lambda)$: le coefficient de réflexion.

IQE : le rendement quantique interne de la cellule

La densité de courant de court-circuit J_{sc} est le rapport entre le courant de court circuit I_{cc} et la section S . l'unité de cette densité est Ampère/m²

III-2-2 Tension à circuit ouvert V_{co}

Courant nul correspondant à la tension maximal (V_{co} pour $I_{co} = 0$) On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule [2].

Le V_{co} est donnée par :

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (III-2)$$

III-2-3 Le facteur de forme FF

Le facteur de forme FF est la fraction de la puissance maximale délivrée par une cellule P_{max} dans des conditions d'éclairage, de température et de débit d'air ambiant donnés, du courant de court-circuit I_{cc} et de la tension de circuit ouvert V_{co} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale) [3].

Chapitre III : Logiciel SCAPS-1D. Travail de simulation

La relation du facteur de forme est

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (III-3)$$

III-2-4 Rendement de conversion η

Le rendement de conversion (η) exprime en pourcentage, est défini comme le rapport de la puissance maximale délivrée par la cellule photovoltaïque et la puissance lumineuse incidente[3].

Le rendement est donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{max} \times V_{max}}{P_{inc}} \quad (III-4)$$

III-3 Présentation du logiciel SCAPS

SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) est un logiciel de simulation destiné à l'étude des cellules solaires. Il permet de modéliser les propriétés électriques des cellules solaires, telles que les caractéristiques courant-tension, les capacités et les temps de vie des porteurs de charge [4].

Le programme SCAPS 1-D résout les équations pour des structures contenant un certain nombre de couches (semi-conducteur) qui ont un profil de dopage arbitraire (comme fonction de la position), avec une distribution énergétique arbitraire des niveaux profonds des donneurs ou des accepteurs sous différents types d'éclairement [5].

La fenêtre principale du logiciel SCAPS est présentée sur la [figure III-2](#)

Chapitre III : Logiciel SCAPS-1D. Travail de simulation



Figure III- 2. Fenêtre d'exécution « action panel » du logiciel SCAPS

III-3-1 Utilisation de logiciel SCAPS

Pour utiliser le logiciel SCAPS, il est tout d'abord nécessaire de télécharger le logiciel et de l'installer sur un ordinateur. Une fois installé, il est possible de créer un nouveau projet et de définir les paramètres de la cellule solaire à simuler tels que les dimensions, les matériaux utilisés, les contacts électriques[6], etc.

La figure III-3 présente la fenêtre principale du logiciel SCAPS

Chapitre III : Logiciel SCAPS-1D. Travail de simulation

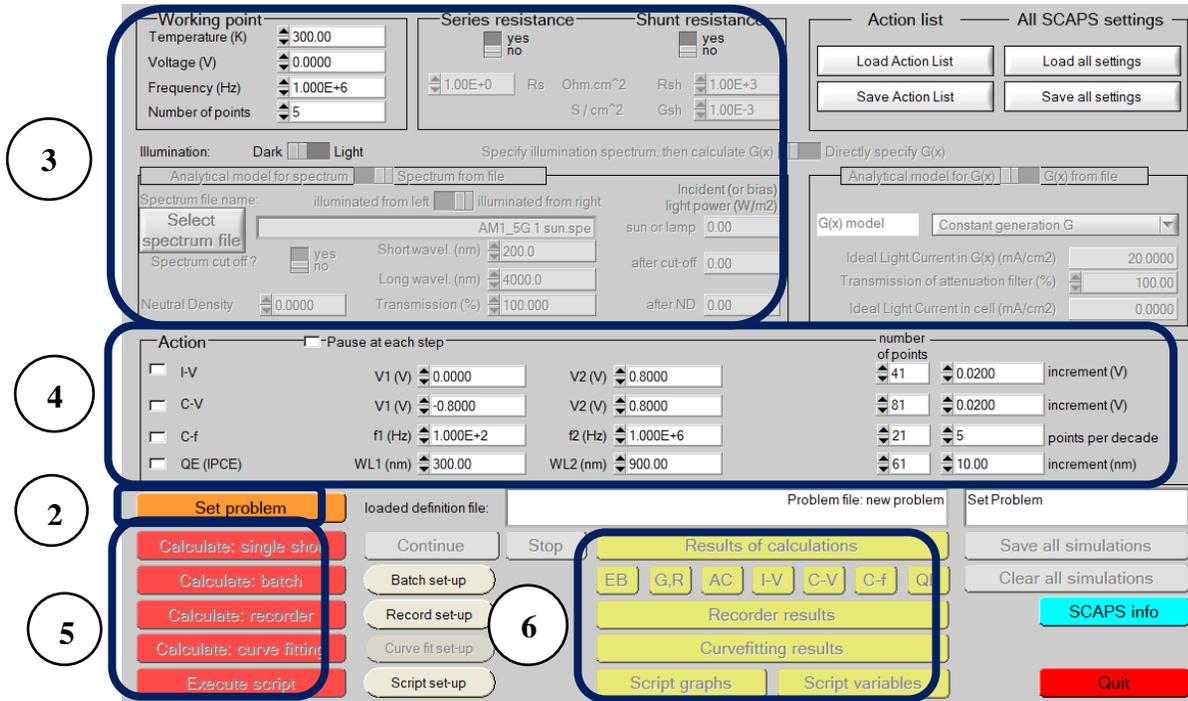
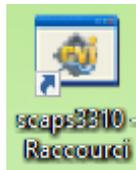


Figure III- 3: Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d’action ou panneau principal.

La signification des blocs numérotés de 1 à 5 est expliquée dans le texte suivant.

Il y a des panneaux dédiés pour les actions de base :

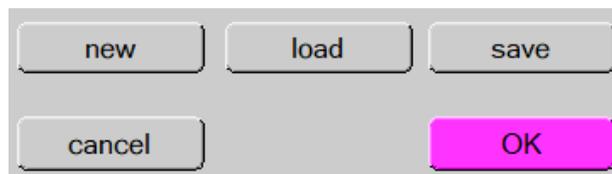
(1) Lancer le SCAPS



(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).



Chapitre III : Logiciel SCAPS-1D. Travail de simulation

- (4) Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.
- (5) Commencer les calculs.
- (6) Afficher les courbes de simulation.

III-4 Présentation des cellules étudiées

Les figures (III-4) et (III-5) présentent les structures des cellules à base de SnO_2 et TiO_2 respectivement sur SCAPS.

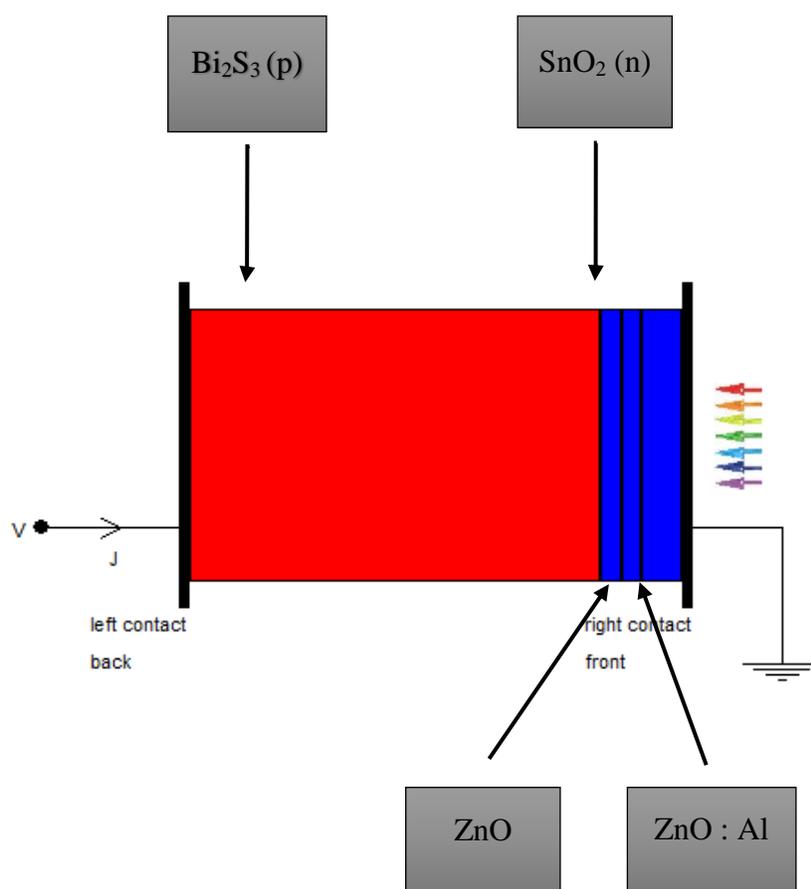


Figure III- 4. Structure de la cellule solaire à base de SnO_2

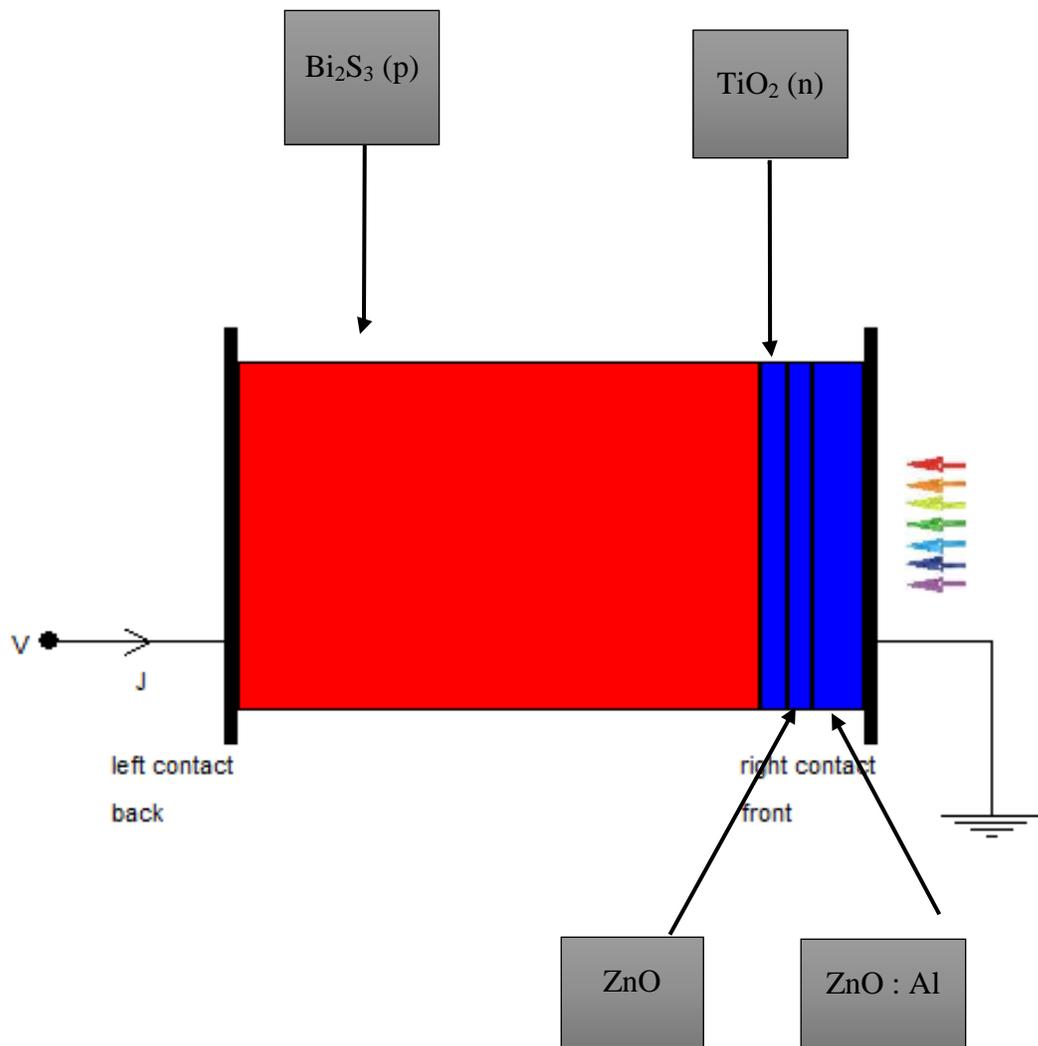


Figure III- 5. Structure de la cellule solaire à base de TiO_2

III-5 Paramètres d'entrée utilisés dans la simulation

Les paramètres des différentes couches utilisées dans la simulation sont regroupés dans le tableau (III-1).

Tableau III- 1. Paramètres optiques et physiques des matériaux utilisés dans la simulation

	Bi₂S₃	TiO₂	SnO₂	ZnO	ZnO:Al
Epaisseur (µm)	1	0.05	0.05	0.05	0.2
Bande de gap (eV)	1.2	3.2	3.6	3.3	3.5
Affinité électrique (eV)	4.5	4.26	4	4.45	4.65
Permittivité diélectrique (eV)	13	9	9	9	9
Densité de bande de conduction effective (cm⁻³)	1.5*10 ¹⁸	2*10 ¹⁸	2.2*10 ¹⁸	2.2*10 ¹⁸	2.2*10 ¹⁷
Densité effective de la bande de valence (cm⁻³)	1.8*10 ¹⁹	1.8*10 ¹⁹	1.8*10 ¹⁹	1.8*10 ¹⁹	1.8*10 ¹⁹
Mobilité d'électron (cm² /Vs)	200	2*10 ⁴	10 ²	10 ²	100
Mobilité de trou (cm² /Vs)	1100	1*10 ³	25	25	25
Densité de donneur	0	10 ¹⁸	10 ¹⁸	10 ¹⁸	10 ¹⁸
Densité de porteurs	3*10 ¹³	0	0	0	0
Références	[7]	[8]	[8]	[9]	[10]

III-6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cité les différentes propriétés électriques que nous étudions. Nous avons par la suite présenté le logiciel SCAPS-1D et les démarches à suivre par exécuter un travail de simulation.

Nous avons à la fin donné les différents paramètres physiques d'entrée pour les matériaux utilisés dans les différentes couches minces à savoir le Bi_2S_3 , le TiO_2 , le SnO_2 , le ZnO et le ZnO:Al .

Bibliographie

- [1] A. Touahria, « Modélisation VHDL-AMS d'une cellule photovoltaïque », Mémoire de master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2021.
- [2] D. Daniel, « Caractérisation de panneaux photovoltaïques par mesure d'impédance », Thèse de doctorat, UTBM - Université de Technologie de Belfort-Montbeliard, 2020.
- [3] D. Jawad, « Analyse des signaux transitoires émis par les arcs électriques générés dans les panneaux photovoltaïques », Thèse de doctorat, GIPSA, 2013.
- [4] Abdelaziz Ait Abdelkadir et et al, « Numerical simulation and optimization of n-Al-ZnO/n-CdS/p-CZTSe/p-NiO (HTL)/Mo solar cell system using SCAPS-1D », *Optics*, vol. 8, août 2022, doi: 10.1016/j.rio.2022.100257.
- [5] A. E. Benzetta, M. Abderrezek, et M. E. Djeghlal, « Numerical study of CZTS/CZTSSe tandem thin film solar cell using SCAPS-1D », *Optik*, vol. 242, p. 167320, sept. 2021, doi: 10.1016/j.ijleo.2021.167320.
- [6] N. Bensmaine, « Amélioration des performances d'une cellule solaire à base de couches de revêtement antireflet en ZnO », Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2020.
- [7] D. S. Benmansour, « Etude sur les matériaux Bi₂S₃ et CZTS contribuant à l'obtention de meilleurs rendements photovoltaïques », Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2020.
- [8] Z. Bensnane, I. Benni « Evaluation-et-simulation-des-performances » Mémoire de Master, ESSA, Tlemcen, 2020.
- [9] G. Ben Abderrezak « Etude par simulation numérique de la Cellule solaire à base de CZTS par SCAPS » Mémoire de Master, Université de Biskra, 2014.
- [10] B. A. Mourad et R. Seddik, « Simulation et Optimisation d'une Cellule Solaire à base de Cu (In,Ga)Se₂ ».

Chapitre IV

Résultats et discussion

IV-1 Introduction

Le but de notre travail est de comparer les performances de la cellule solaire $\text{Bi}_2\text{S}_3 / \text{TiO}_2 / \text{ZnO}$ et celles de la cellule $\text{Bi}_2\text{S}_3 / \text{SnO}_2 / \text{ZnO}$, c'est-à-dire connaître par simulation, l'effet du matériau de la couche tampon sur les caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque.

Nous déterminerons les caractéristiques de ces deux cellules en étudiant l'effet de l'épaisseur et du dopage des couches absorbante et tampon respectivement en vue de choisir la cellule solaire optimale.

Après avoir trouvé le meilleur matériau pour la couche tampon, nous étudierons l'effet de la température sur l'amélioration des caractéristiques de la cellule optimale.

IV-2 Caractéristiques électriques de la cellule solaire

La caractéristique $J(V)$ obtenue pour chaque cellule est représentée dans les figures 1 et 2 :

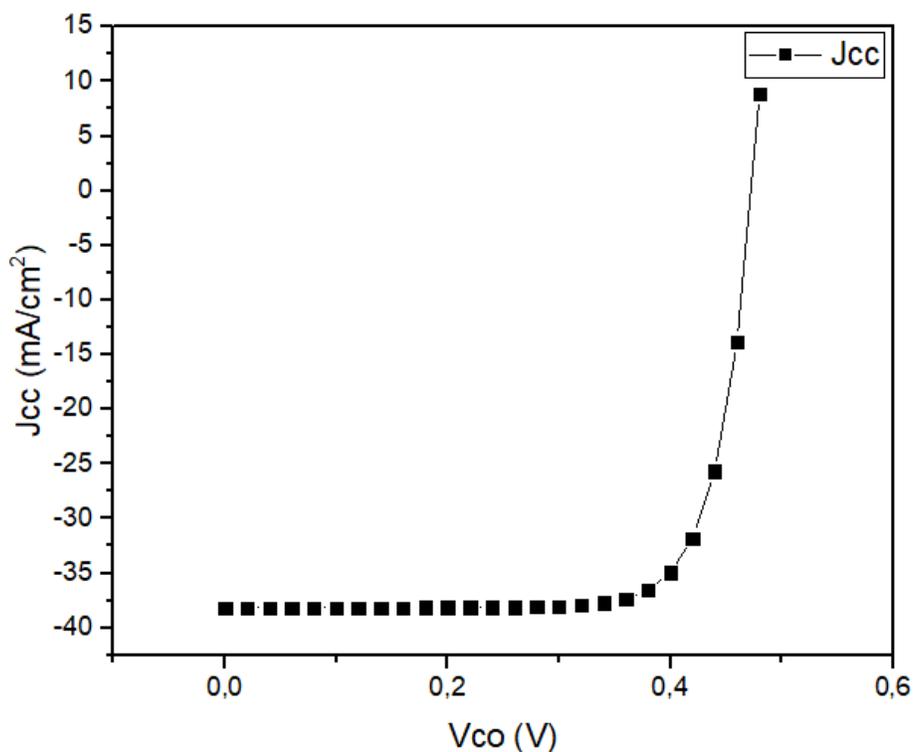


Figure IV- 1. Caractéristique $J(V)$ de la cellule solaire en TiO_2

Chapitre IV : Résultats et discussion

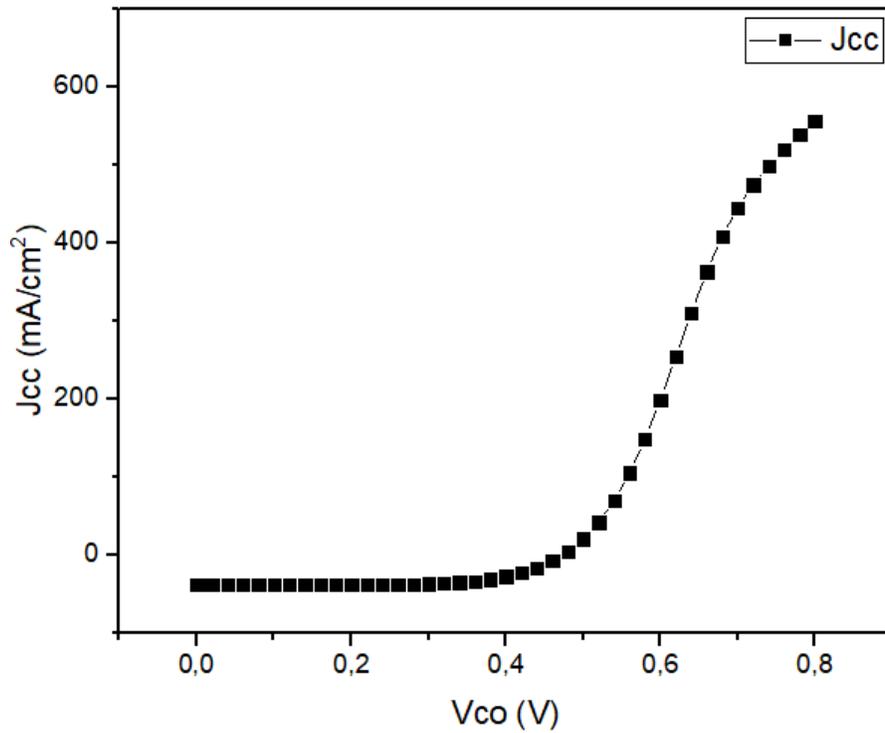


Figure IV-2. Caractéristique J(V) de la cellule solaire en SnO₂

Les résultats de la simulation obtenue avant l'optimisation sont regroupés dans le **Tableau IV- 1**. Ces résultats comprennent la tension à circuit ouvert, la densité de courant de court-circuit, le facteur de forme et le rendement.

Tableau IV- 1. Les performances photovoltaïques des deux cellules avant l'optimisation des paramètres.

	V _{co} (V)	J _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Cellule à base de TiO₂	0.4732	38.152763	77.65	14.02
Cellule à base de SnO₂	0.4734	38.052117	67.28	12.12

IV-3 Résultats et discussion

IV-3-1 Effet de l'épaisseur et du dopage sur les caractéristiques électriques de la cellule Bi₂S₃ / TiO₂ / ZnO

IV-3-1-1 Effet de l'épaisseur de la couche Bi₂S₃ sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire

Afin de connaître l'effet de l'épaisseur de la couche tampon TiO₂ sur les paramètres photovoltaïques de la cellule, il faut d'abord prendre la meilleure épaisseur de la couche absorbante Bi₂S₃ et pour faire ce travail nous avons fixé l'épaisseur à E=0.03μm et le dopage à D=1*10¹⁸cm⁻³ pour la couche TiO₂ et le dopage à 3*10¹³cm⁻³ pour la couche Bi₂S₃.

Tableau IV- 2. Effet de l'épaisseur de la couche Bi₂S₃ sur les caractéristiques électriques de la

Epaisseur (μm)	V_{CO} (V)	J_{CC} (mA /cm²)	FF(%)	η (%)
1	0.4732	38.152763	77.65	14.02
2	0.5087	38.725337	77.46	15.26
3	0.5360	38.816712	77.60	16.15
4	0.5535	38.856084	78.49	16.88

cellule solaire

En examinant les résultats on peut observer les tendances suivantes

Tension de circuit ouvert (V_{CO}) : On peut voir que la tension de circuit ouvert augmente légèrement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche Bi₂S₃. Cela peut indiquer une amélioration de la séparation des charges et de la stabilité de la cellule solaire.

La densité du courant de court-circuit (J_{CC}) : La densité du courant de court-circuit semble relativement stable pour toutes les épaisseurs de la couche Bi₂S₃. Cela suggère que l'épaisseur de la couche n'a pas d'impact significatif sur le courant de court-circuit.

Facteur de remplissage (FF) : Le facteur de remplissage présente une tendance légèrement croissante avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche Bi₂S₃. Cela suggère que l'augmentation de l'épaisseur peut favoriser la collecte des charges et améliorer l'efficacité de la cellule solaire.

Efficacité de conversion (η) : L'efficacité de conversion semble augmenter progressivement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche Bi₂S₃. Cela indique que

Chapitre IV : Résultats et discussion

l'épaisseur accrue de la couche peut améliorer les performances globales de la cellule solaire.

Ces résultats suggèrent que l'épaisseur de la couche Bi_2S_3 joue un rôle important dans les performances de la cellule solaire. Une épaisseur optimale peut permettre d'obtenir des performances électriques supérieures, notamment en termes de tension de circuit ouvert, de facteur de remplissage et d'efficacité de conversion. Il convient de noter que ces résultats sont spécifiques aux conditions expérimentales utilisées dans l'étude et peuvent varier en fonction des paramètres de fabrication et des matériaux utilisés.

IV-3-1-2 Effet du dopage de la couche Bi_2S_3 sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire

Connaissant la meilleure épaisseur de la couche absorbante et qui est $E=4\ \mu\text{m}$, nous allons à présent trouver le dopage optimal pour cette couche. Pour cela, nous fixons $E=0.03\ \mu\text{m}$ et $D=1*10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ pour la couche tampon TiO_2 .

Tableau IV- 3. Effet du dopage de la couche Bi_2S_3 sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire

Dopage (cm^{-3})	V_{co} (V)	J_{CC} (mA/cm^2)	FF(%)	η (%)
$3*10^{13}$	0.5535	38.856084	78.49	16.88
$3*10^{14}$	0.6172	38.843664	82.51	19.87
$3*10^{15}$	0.6796	38.698370	83.67	22
$3*10^{16}$	0.7401	38.248618	84.54	23.93
$3*10^{17}$	0.8	37.657262	85.70	25.82

Les résultats présentés dans le **Tableau IV- 2** décrivent l'effet du dopage de la couche Bi_2S_3 sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire, en supposant une épaisseur optimale de la couche absorbante Bi_2S_3 de $4\ \mu\text{m}$. Les caractéristiques électriques sont mesurées pour différentes valeurs de dopage de la couche Bi_2S_3 , tandis que la couche TiO_2 est dopée à une concentration constante de $1*10^{18}\ \text{cm}^{-3}$.

En examinant les données du **Tableau IV- 3**, on peut noter les commentaires suivants

Tension de circuit ouvert (V_{co}) : On observe une augmentation progressive de la tension de circuit ouvert avec l'augmentation du dopage de la couche Bi_2S_3 . Cela suggère que le dopage peut améliorer la séparation des charges et faciliter la génération de tension dans la cellule solaire.

Chapitre IV : Résultats et discussion

La densité du courant de court-circuit (J_{cc}) : La densité du courant de court-circuit semble relativement stable pour toutes les concentrations de dopage de la couche Bi_2S_3 . Cela indique que le dopage de la couche n'a pas d'impact significatif sur le courant de court-circuit.

Facteur de remplissage (FF) : Le facteur de remplissage montre une tendance croissante avec l'augmentation du dopage de la couche Bi_2S_3 . Cela suggère que le dopage peut favoriser la collecte des charges et améliorer l'efficacité de la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Efficacité de conversion (η) : L'efficacité de conversion augmente régulièrement avec l'augmentation du dopage de la couche Bi_2S_3 . Cela indique que le dopage peut augmenter l'efficacité globale de la cellule solaire.

En combinant les informations du **Tableau IV- 4** et celles du **Tableau IV- 5**, nous pouvons déterminer les meilleurs résultats obtenus pour la couche absorbante Bi_2S_3 . Dans ce cas l'épaisseur optimale de la couche Bi_2S_3 est de $4\mu m$, tandis que le dopage optimal est de $3*10^{17}cm^{-3}$. Les caractéristiques électriques correspondantes pour ces valeurs optimales sont regroupées dans le **Tableau IV- 6**.

Tableau IV- 4. Les meilleurs résultats obtenus pour la couche absorbante Bi_2S_3

Bi_2S_3	V_{CO} (V)	J_{CC} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Epaisseur optimale $4\mu m$	0.5535	38.856084	78.49	16.88
Dopage optimal $3*10^{17}cm^{-3}$	0.8	37.657262	85.70	25.82

Ces résultats suggèrent que l'épaisseur et le dopage de la couche Bi_2S_3 jouent un rôle crucial dans l'optimisation des performances de la cellule solaire. Les valeurs optimales déterminées peuvent fournir des informations précieuses pour la conception et l'optimisation des dispositifs photovoltaïques utilisant la configuration $Bi_2S_3 / TiO_2 / ZnO$.

IV-3-1-3 Effet de l'épaisseur de la couche TiO_2 sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire

D'après les résultats obtenus, nous avons fixé dans la couche absorbante l'épaisseur à $4\mu m$ et le dopage à $3*10^{17}cm^{-3}$, et pour le TiO_2 le dopage à $D=1*10^{18}cm^{-3}$.

Chapitre IV : Résultats et discussion

Tableau IV- 5. Effet de l'épaisseur de la couche TiO₂ sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire

Epaisseur (μm)	V _{CO} (V)	J _{CC} (mA /cm ²)	FF(%)	η (%)
0.01	0.8	37.632959	85.6	25.8
0.02	0.8	38.639850	85.74	25.82
0.03	0.8	37.657262	85.70	25.82
0.04	0.8	37.644078	85.59	25.81
0.05	0.8	37.626158	85.69	25.79

Le **Tableau IV- 7** présente les résultats de l'effet de l'épaisseur de la couche de TiO₂ sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire, en supposant une épaisseur fixe de la couche absorbante Bi₂S₃ de 4μm et un dopage de $3 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$.

En examinant les données du **Tableau IV- 8**, on peut observer que la tension de circuit ouvert (V_{co}) reste constante à 0.8 V pour toutes les épaisseurs de la couche TiO₂. Cela indique que l'épaisseur de la couche TiO₂ n'a pas d'impact significatif sur la tension de circuit ouvert.

La densité du courant de court-circuit (J_{cc}) reste également relativement stable pour toutes les épaisseurs de la couche TiO₂, avec une valeur d'environ 37 mA/cm²-38 mA/cm².

Le facteur de remplissage (FF) et l'efficacité de conversion (η) restent également constants pour toutes les épaisseurs de la couche TiO₂, avec des valeurs d'environ 85.6%-85.74% pour FF et 25.8% - 25.82% pour η. Cela suggère que l'épaisseur de la couche TiO₂ n'a pas d'impact significatif sur ces caractéristiques électriques.

Chapitre IV : Résultats et discussion

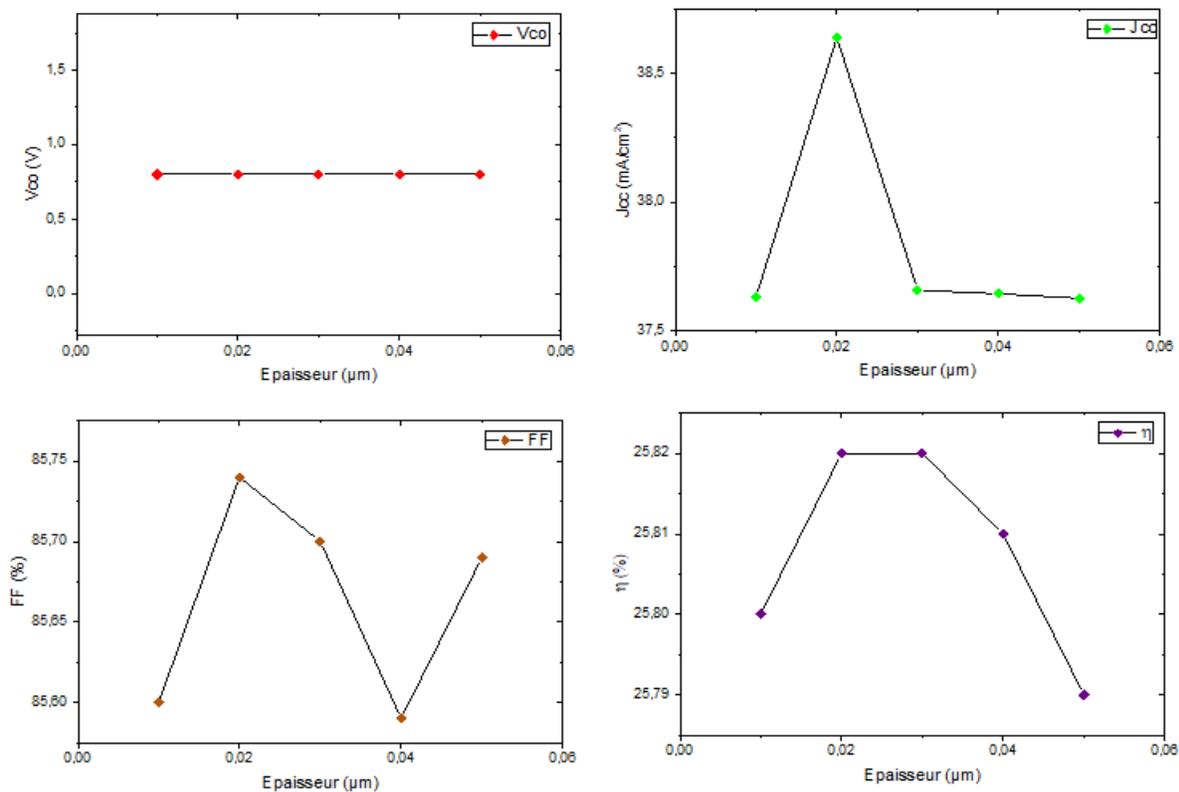


Figure IV- 3. Effet de l'épaisseur de la couche tampon TiO₂ sur les caractéristiques électriques de la cellule

IV-3-1-4 Effet du dopage de la couche tampon TiO₂ sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire

En ce qui concerne l'effet du dopage de la couche tampon TiO₂, le **Tableau IV- 9** présente les résultats pour différentes concentrations de dopage, avec une épaisseur fixe de 0.03 μm pour la couche TiO₂, une épaisseur de 4μm pour la couche absorbante Bi₂S₃ dopée à $3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ et une concentration de dopage $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ dans la couche TiO₂.

Chapitre IV : Résultats et discussion

Tableau IV- 6. Effet du dopage de la couche TiO₂ sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire.

Dopage (cm⁻³)	V_{CO} (V)	J_{CC} (mA /cm²)	FF(%)	η (%)
1*10 ¹⁵	0.8003	37.469183	61.26	18.37
1*10 ¹⁶	0.8003	37.472547	62.48	18.74
1*10 ¹⁷	0.8002	37.500349	73.86	22.16
1*10 ¹⁸	0.8	37.657262	85.70	25.82
1*10 ¹⁹	0.8	37.667533	85.65	25.81

Les résultats montrent que la tension de circuit ouvert (V_{co}) reste constante à environ 0.8 V pour toutes les concentrations de dopage de la couche TiO₂.

La densité du courant de court-circuit (J_{cc}) reste également relativement stable, avec des valeurs d'environ 37 mA/cm² - 37.5 mA/cm² pour toutes les concentrations de dopage.

Le facteur de remplissage (FF) augmente avec l'augmentation de la concentration de dopage, passant de 61.26% à 85.70%. Cela suggère que le dopage de la couche TiO₂ peut améliorer la collecte des charges et l'efficacité de conversion.

L'efficacité de conversion (η) reste constante à environ 25.81%-25.82% pour toutes les concentrations de dopage de la couche TiO₂.

Chapitre IV : Résultats et discussion

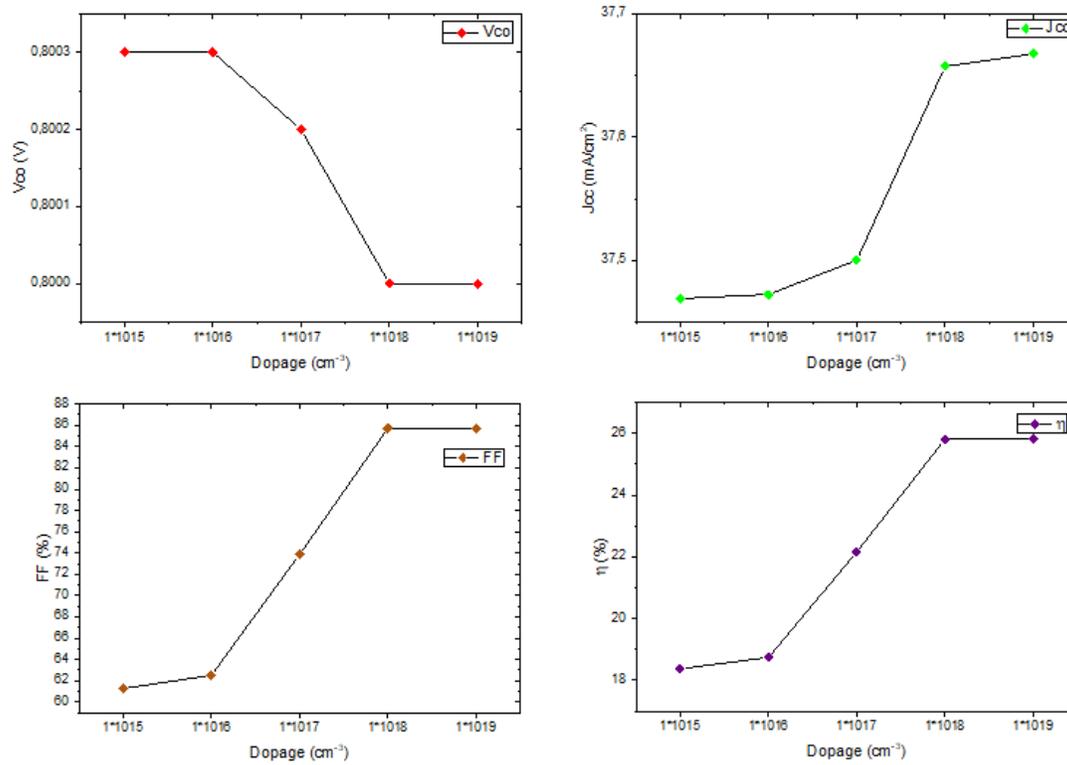


Figure IV- 4 : Effet du dopage de la couche tampon TiO₂ sur les caractéristiques électriques de la cellule.

Ces résultats indiquent que l'épaisseur de la couche TiO₂ n'a pas d'effet significatif sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire, tandis que le dopage de la couche TiO₂ peut influencer le facteur de remplissage et potentiellement améliorer l'efficacité de conversion de cellule solaire.

Tableau IV- 7. Les meilleurs résultats obtenus pour la couche tampon TiO₂

TiO ₂	V _{co} (V)	J _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Epaisseur optimale 0.03μm	0.8	37.657262	85.70	25.82
Dopage optimal 1*10¹⁸ cm⁻³	0.8	37.657262	85.70	25.82

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV-3-2 Effet de l'épaisseur et du dopage sur les caractéristiques électriques de la cellule $\text{Bi}_2\text{S}_3 / \text{SnO}_2 / \text{ZnO}$

IV-3-2-1 Effet de l'épaisseur de la couche Bi_2S_3 sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire

Afin de connaître l'effet de l'épaisseur de la couche tampon SnO_2 sur les paramètres photovoltaïques de la cellule, il faut d'abord prendre la meilleure épaisseur de la couche absorbante Bi_2S_3 et pour faire ce travail nous fixons $E=0.03 \mu\text{m}$ et $D=1*10^{18}\text{cm}^{-3}$ pour la couche SnO_2 et le dopage à $3*10^{13}\text{cm}^{-3}$ pour la couche absorbante Bi_2S_3 .

Tableau IV- 8. Effet de l'épaisseur de la couche Bi_2S_3 sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire

Epaisseur (μm)	V_{CO} (V)	J_{CC} (mA / cm^2)	FF(%)	η (%)
1	0.4734	38.052117	67.28	12.12
2	0.5088	38.630135	67.49	13.26
3	0.5361	38.722596	68.03	14.12
4	0.5536	38.762267	69.03	14.81

En examinant les données du **Tableau IV- 10**, on peut constater que la tension de circuit ouvert (V_{co}) reste relativement constante à environ 0.5536 V pour toutes les épaisseurs de la couche Bi_2S_3 .

La densité du courant de court-circuit (J_{cc}) augmente légèrement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche de Bi_2S_3 , passant de $38.052117 \text{ mA/cm}^2$ à $38.762267 \text{ mA/cm}^2$.

Le facteur de remplissage (FF) montre une légère amélioration avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche Bi_2S_3 , passant de 67.28% à 69.03%.

Cependant, l'efficacité de conversion (η) reste relativement faible, avec des valeurs comprises entre 12.12% et 14.81% pour toutes les épaisseurs de la couche Bi_2S_3 .

IV-3-2-2 Effet du dopage de la couche Bi_2S_3 sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire

La meilleure épaisseur de la couche Bi_2S_3 étant de $4\mu\text{m}$, nous fixons l'épaisseur à $0.03 \mu\text{m}$ et le dopage à $1*10^{18}\text{cm}^{-3}$ pour la couche tampon pour trouver le meilleur dopage de la couche absorbante.

Chapitre IV : Résultats et discussion

Tableau IV- 9. Effet du dopage de la couche Bi₂S₃ sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire

Dopage (cm⁻³)	V_{CO} (V)	J_{CC} (mA /cm²)	FF(%)	η (%)
3*10 ¹³	0.5536	38.762267	69.03	14.81
3*10 ¹⁴	0.6173	38.747687	73.30	17.53
3*10 ¹⁵	0.6795	38.593178	75.20	19.72
3*10 ¹⁶	0.7401	38.130662	75.90	21.42
3*10 ¹⁷	0.7401	38.130662	75.90	21.42

Les résultats montrent que la tension de circuit ouvert (V_{co}) augmente de 0.5536 V à 0.7401 V en passant de 3*10¹³cm⁻³ à 3*10¹⁶cm⁻³.

La densité du courant de court-circuit (J_{cc}) diminue légèrement avec l'augmentation de la concentration de dopage, passant de 38.762267 mA/cm² à 38.130662 mA/cm².

Le facteur de remplissage (FF) montre une amélioration significative avec l'augmentation de la concentration de dopage, passant de 69.03% à 75.90%.

L'efficacité de conversion (η) passe de 14.81% à 21.42%. Cela montre que le rendement de la cellule s'améliore nettement avec l'augmentation de la concentration du dopage.

Ces résultats indiquent que l'épaisseur optimale de la couche Bi₂S₃ est de 4μm et que le dopage optimal est de 3*10¹⁶cm⁻³. Ces valeurs fournissent les meilleures performances en termes de facteur de remplissage et d'efficacité de conversion.

Tableau IV- 10. Les meilleurs résultats obtenus pour la couche Bi₂S₃.

Bi₂S₃	V_{CO} (V)	J_{CC} (mA/cm²)	FF (%)	η (%)
Epaisseur optimale 4μm	0.5536	38.762267	69.03	14.81
Dopage optimal 3*10¹⁶ cm⁻³	0.7401	38.130662	75.90	21.42

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV-3-2-3 Effet de l'épaisseur de la couche tampon SnO₂ sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire

En ce qui concerne l'effet de l'épaisseur de la couche tampon SnO₂, le **Tableau IV- 11** présente les résultats pour différentes épaisseurs de la couche SnO₂, avec une épaisseur fixe de 4μm pour la couche Bi₂S₃ dopée à 3*10¹⁶cm⁻³ et une concentration de dopage de 1*10¹⁸cm⁻³ dans la couche SnO₂.

Tableau IV- 11. Effet de l'épaisseur de la couche SnO₂ sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire

Epaisseur (μm)	V_{CO} (v)	J_{CC} (mA /cm²)	FF(%)	η (%)
0.03	0.7401	38.130662	75.90	21.42
0.04	0.7401	38.142007	81.09	22.89
0.05	0.7401	38.141471	81.35	22.96
0.06	0.7401	38.140104	81.36	22.97
0.07	0.7401	38.138717	81.36	22.97
0.08	0.7401	38.137347	81.37	22.96

Les résultats montrent que la tension de circuit ouvert (V_{co}) reste constante à environ 0.7401V pour toutes les épaisseurs de la couche SnO₂.

La densité du courant de court-circuit (J_{cc}) reste également relativement stable, avec des valeurs d'environ 38.130662 mA/cm² à 38.142007 mA/cm² pour toutes les épaisseurs de la couches SnO₂.

Le facteur de remplissage (FF) montre également une amélioration significative avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche SnO₂, passant de 75.90 % à 81.37 %.

L'efficacité de conversion (η) montre également une amélioration avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche SnO₂, atteignant une valeur maximale de 22.97 %.

Ces résultats suggèrent que l'épaisseur optimale de la couche SnO₂ pour obtenir de bonnes performances de la cellule solaire est d'environ 0.06 μm, avec une concentration de dopage de 1*10¹⁸cm⁻³ dans la couche SnO₂.

Chapitre IV : Résultats et discussion

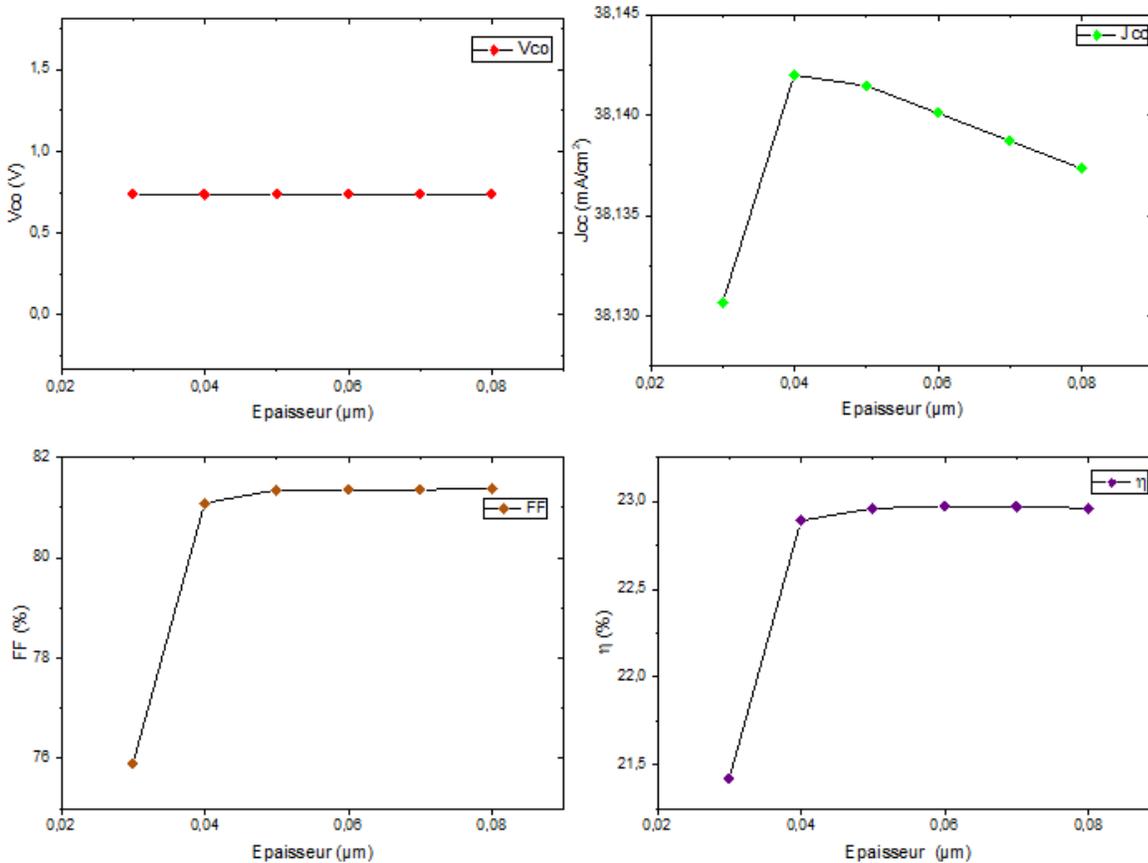


Figure IV- 5. Effet de l'épaisseur de la couche tampon SnO₂ sur les caractéristiques électriques de la cellule

IV-3-2-4 Effet du dopage de la couche SnO₂ sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire

Dans le **Tableau IV- 12**, on peut observer l'effet du dopage de la couche SnO₂ sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire, en supposant une épaisseur fixe de SnO₂ à 0.06 μm et une épaisseur de la couche absorbante Bi₂S₃ de 4 μm dopée à $3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

Chapitre IV : Résultats et discussion

Tableau IV- 12. Effet du dopage de la couche SnO₂ sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire

Dopage (cm⁻³)	V_{CO} (V)	J_{CC} (mA /cm²)	FF (%)	η (%)
1*10 ¹⁵	0.8003	37.469183	61.26	18.37
1*10 ¹⁶	0.8003	37.472547	62.48	18.74
1*10 ¹⁷	0.8002	37.500349	73.86	22.16
1*10 ¹⁸	0.8	37.657262	85.70	25.82
1*10 ¹⁹	0.8	37.667533	85.65	25.81

Les résultats montrent que la tension de circuit ouvert (V_{co}) reste relativement stable avec une valeur d'environ 0.8 V pour différentes concentrations de dopage de la couche SnO₂, allant de 1*10¹⁵cm⁻³ à 1*10¹⁹cm⁻³.

La densité du courant de court-circuit (J_{cc}) augmente légèrement avec l'augmentation de la concentration de dopage de la couche SnO₂, passant de 37.469183 mA/cm² à 37.667533mA/cm².

Le facteur de remplissage (FF) montre également une amélioration avec l'augmentation du dopage de la couche SnO₂, passant de 61.26 % à 85.70 % pour les concentrations de dopage de 1*10¹⁵cm⁻³ à 1*10¹⁸cm⁻³.

L'efficacité de conversion (η) présente une amélioration significative avec l'augmentation de concentration de dopage de la couche SnO₂, passant de 18.37% à 25.82%.

Chapitre IV : Résultats et discussion

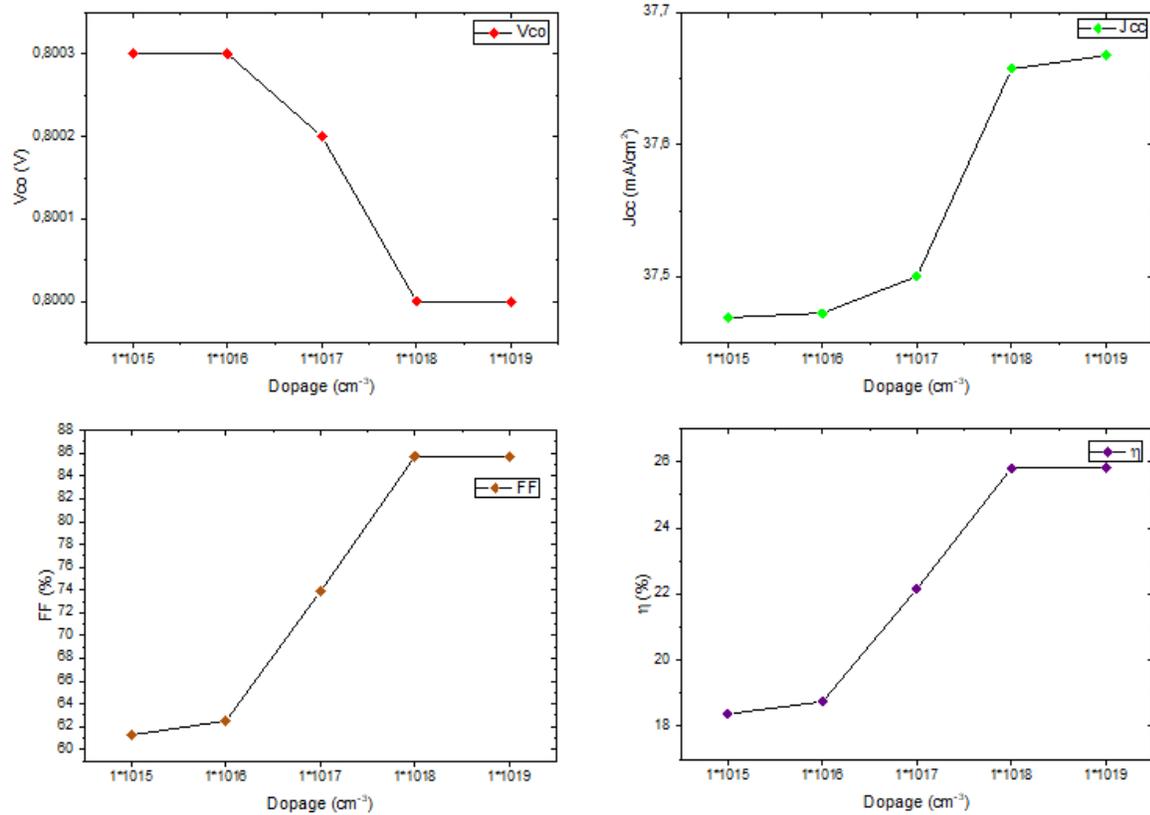


Figure IV- 6. Effet du dopage de la couche tampon SnO₂ sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire

Le **Tableau IV- 13** résume les meilleurs résultats obtenus pour la couche SnO₂, avec une épaisseur optimale de 0.06 μm et une concentration de dopage optimal de 1*10¹⁸ cm⁻³.

Tableau IV- 13. Les meilleurs résultats obtenus pour la couche SnO₂

SnO ₂	V _{CO} (V)	J _{CC} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Epaisseur optimale 0.06μm	0.7401	38.140104	81.36	22.97
Dopage optimal 1*10¹⁸ cm⁻³	0.8	37.657262	85.70	25.82

En conclusion, les résultats indiquent pour la couche SnO₂ dans la configuration donnée, une concentration de dopage de 1*10¹⁸ cm⁻³ conduit à de meilleurs performances en termes de courant de court-circuit, facteur de remplissage et efficacité de conversion.

IV-3-3 Effet de la température sur les caractéristiques électriques de la cellule optimale Bi₂S₃/TiO₂/ZnO

Après avoir trouvé la cellule optimale et qui est Bi₂S₃/TiO₂/ZnO, nous allons à présent voir l'effet de la température sur les caractéristiques électriques de cette cellule solaire.

Tableau IV- 14. Effet de la température de la cellule solaire optimale sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire

Température (K)	V _{CO} (V)	J _{CC} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
300	0.8	37.657262	85.70	25.82
310	0.7825	37.657465	85.14	25.09
320	0.7650	37.657643	84.56	24.36
330	0.7474	37.657822	83.95	23.65

Les résultats montrent que la tension de circuit ouvert (V_{co}) diminue légèrement avec l'augmentation de la température. A une température de 300 K, la tension V_{co} est de 0.8 V, puis elle diminue progressivement avec l'augmentation de la température, atteignant une valeur de 0.7474 V à une température de 330 K.

La densité du courant de court-circuit (J_{cc}) reste relativement stable sur la plage de température considérée, avec des valeurs proches de 37.657 mA/cm².

Le facteur de remplissage (FF) diminue légèrement avec l'augmentation de la température, passant de 85.70% à 83.95% pour une augmentation de la température de 300 K à 330 K.

L'efficacité de conversion (η) présente également une diminution légère avec l'augmentation de la température, passant de 25.82% à 23.65% pour la même plage de température.

Chapitre IV : Résultats et discussion

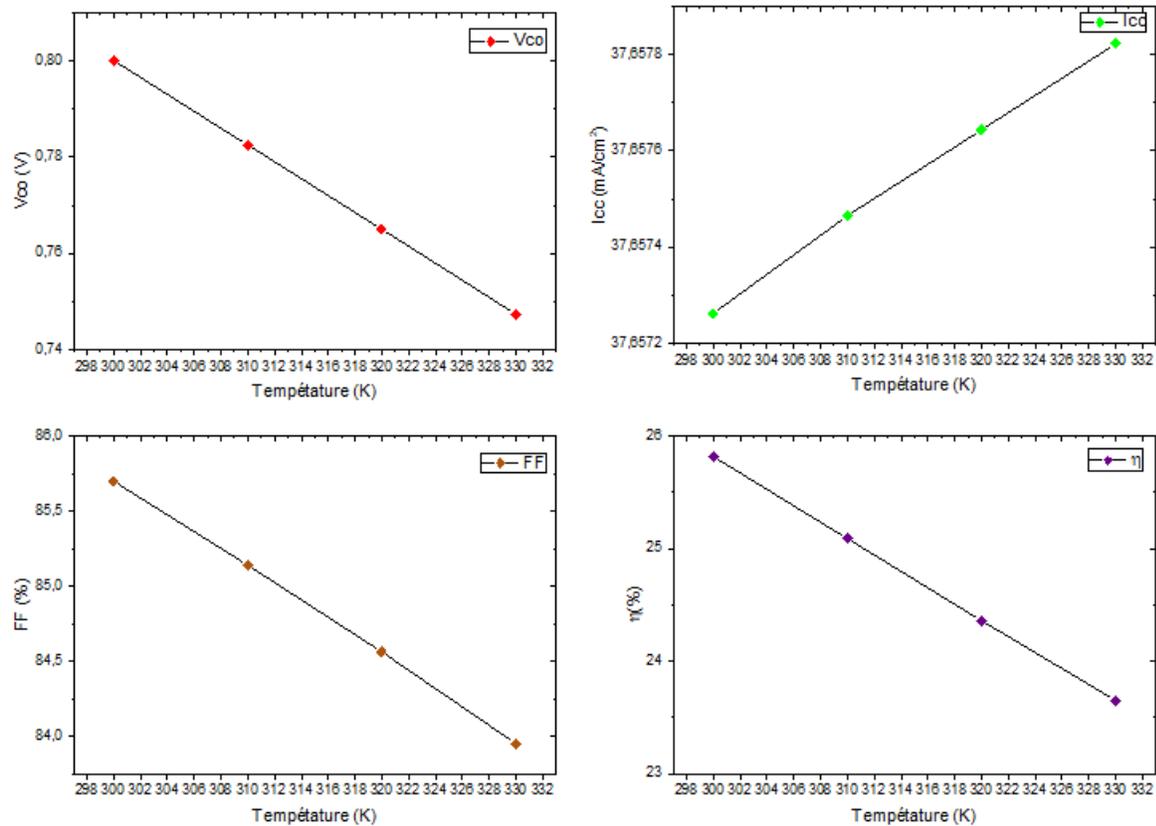


Figure IV- 7. Effet de la température sur les caractéristiques électriques de la cellule optimale $\text{Bi}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2/\text{ZnO}$

IV-4 Conclusion

En conclusion, les résultats indiquent que l'augmentation de la température a un impact négatif sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire, entraînant une diminution de la tension de circuit ouvert, du facteur de remplissage et de l'efficacité de conversion. Il est donc important de maintenir la température de fonctionnement dans une plage optimale pour assurer des performances optimales de la cellule solaire.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, le but était de faire un travail de simulation utilisant le logiciel SCAPS-1D en comparant les performances de la cellule $\text{Bi}_2\text{S}_3 / \text{TiO}_2 / \text{ZnO}$ et celles de la cellule $\text{Bi}_2\text{S}_3 / \text{SnO}_2 / \text{ZnO}$.

Nous avons d'abord étudié l'influence de l'épaisseur et du dopage de la couche absorbante Bi_2S_3 et des couches tampons TiO_2 et SnO_2 sur les caractéristiques des cellules solaires.

Nous avons par la suite, trouvé la meilleure cellule du point de vue rendement et qui est celle qui utilise le TiO_2 comme couche tampon.

A la fin, nous avons exposé notre cellule optimale au soleil pour voir la température adéquate aux meilleures performances de la cellule optimale.

Cellule optimale à 300K	$\text{Bi}_2\text{S}_3 / \text{TiO}_2 / \text{ZnO}$
V_{co} (V)	0.8
J_{cc} (mA/cm²)	37.657262
FF (%)	85.70
η (%)	25.82

Dans ce tableau, nous avons récapitulé les caractéristiques électriques (V_{co} , J_{cc} , FF, η) de la cellule optimale $\text{Bi}_2\text{S}_3 / \text{TiO}_2 / \text{ZnO}$.

Les matériaux TiO_2 (dioxyde de titane) et SnO_2 (dioxyde d'étain) sont couramment utilisés comme couches tampons dans les cellules solaires à couches minces en raison de leurs propriétés optiques et électroniques favorables. Voici quelques perspectives et domaines de recherche liés à ces matériaux :

Optimisation des propriétés optiques : Les couches tampons TiO_2 et SnO_2 peuvent être modifiées pour améliorer leur absorption de la lumière solaire dans la région du spectre appropriée. Des recherches sont en cours pour développer des structures nanostructurées ou des films minces dopés qui permettent d'optimiser l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire.

Amélioration de la conductivité : La conductivité électronique des couches tampons joue un rôle crucial dans le transfert des charges et la collecte des électrons dans les cellules solaires. Des études sont menées pour améliorer la conductivité des couches TiO_2 et SnO_2 en utilisant différentes techniques de dopage et de modification de la structure cristalline.

Conclusion générale

Études sur les hétérojonctions : Les interfaces entre la couche tampon et les autres couches dans les cellules solaires à couches minces sont d'importance capitale pour l'efficacité globale du dispositif.

Des recherches sont menées pour comprendre et optimiser les propriétés des hétérojonctions entre le TiO_2 ou le SnO_2 et les couches voisines, telles que les couches absorbantes de silicium ou de matériau semiconducteur à base de cuivre, d'indium, de gallium et de sélénium (CIGS).

Durabilité et stabilité à long terme : Les cellules solaires à couches minces doivent être durables et maintenir leurs performances sur une longue période. Des études sont menées pour évaluer la durabilité des couches tampons TiO_2 et SnO_2 , y compris leur résistance à l'oxydation, à la corrosion et à d'autres facteurs environnementaux.

Nouveaux matériaux et structures : En plus du TiO_2 et du SnO_2 , de nouveaux matériaux et structures de couches tampons sont explorés pour améliorer encore les performances des cellules solaires à couches minces. Par exemple, des alliages, des composites et des matériaux hybrides sont étudiés pour combiner les avantages de différents matériaux et optimiser les propriétés électroniques et optiques.

Il convient de noter que les domaines de recherche mentionnés ci-dessus sont dynamiques et susceptibles d'évoluer avec de nouvelles découvertes et avancées technologiques.

Résumé :

Dans un contexte marqué par une diminution des réserves d'énergies fossiles, le recours aux énergies renouvelables particulièrement le solaire photovoltaïque est devenue un défi majeur.

A ce titre, le développement de nouveaux matériaux semi-conducteurs pour les applications photovoltaïques semble prometteur.

Ce travail a été consacré à une étude de simulation de deux cellules solaires à base de TiO_2 et SnO_2 comme couche tampon.

Nous avons évalué numériquement en utilisant le simulateur SCAPS-1D, la densité du courant de court-circuit J_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{co} , le facteur de remplissage FF et le rendement électrique η pour les deux structures $Bi_2S_3 / TiO_2 / ZnO$ et $Bi_2S_3 / SnO_2 / ZnO$, en passant par l'optimisation des paramètres structuraux et physiques tels que l'épaisseur, le dopage de la couche absorbante et des deux couches tampons TiO_2 et SnO_2 . Après la simulation on obtient la cellule optimale $Bi_2S_3 / TiO_2 / ZnO$ sur laquelle nous avons étudié l'effet de la température.

Nous avons obtenu les résultats suivants :

- Pour la structure $Bi_2S_3 / TiO_2 / ZnO$: un rendement de conversion de 25.82% pour une épaisseur de 0.03 μm et un dopage de $1 \cdot 10^{18} cm^{-3}$.

Mot clés : simulation, SCAPS 1D, cellules photovoltaïques, caractéristiques photovoltaïques

Abstract :

In a context marked by a decrease in fossil energy reserves, the use of renewable energies, particularly photovoltaic solar energy, has become a major challenge. In this regard, the development of new semiconductor materials for photovoltaic applications seems promising. This work was devoted to a simulation study of two solar cells based on TiO_2 and SnO_2 as buffer layers. Using the SCAPS-1D simulator, we numerically evaluated the short-circuit current density J_{sc} , open-circuit voltage V_{oc} , fill factor FF, and electrical efficiency η for the two structures $Bi_2S_3 / TiO_2 / ZnO$ and $Bi_2S_3 / SnO_2 / ZnO$ by optimizing structural and physical parameters such as thickness, doping of the absorbing layer, and both TiO_2 and SnO_2 buffer layers. After simulation, we obtained the optimal $Bi_2S_3 / TiO_2 / ZnO$ cell, on which we studied the effect of temperature. We obtained the following results:

- For the $Bi_2S_3 / TiO_2 / ZnO$ structure: a conversion efficiency of 25.82% for a thickness of 0.03 μm and doping of $1 \cdot 10^{18} cm^{-3}$.

Keywords: simulation, SCAPS 1D, photovoltaic cells, photovoltaic characteristics.

ملخص

في سياق يتسم بانخفاض احتياطات الوقود الأحفوري، أصبح استخدام الطاقات المتجددة، ولا سيما الطاقة الشمسية الكهروضوئية، يمثل تحديًا كبيرًا. على هذا النحو، فإن تطوير مواد أشباه موصلات جديدة للتطبيقات الكهروضوئية يبدو واعدًا. تم تخصيص هذا العمل لدراسة محاكاة لخليتين شمسيتين على أساس TiO_2 و SnO_2 . لقد قمنا بالتقييم عدديًا باستخدام محاكي SCAPS-1D، وكثافة تيار الدائرة القصيرة J_{cc} ، وفلطة الدائرة المفتوحة V_{co} ، وعامل التعبئة FF والكفاءة الكهربائية η لنفس بنية $Bi_2S_3 / TiO_2 / ZnO$ هيكل $Bi_2S_3 / SnO_2 / ZnO$ ، من خلال تحسين المعلمات الهيكلية والفيزيائية مثل السماكة وتنشيط الطبقتين العازلة TiO_2 و SnO_2 ، بعد المحاكاة سنحصل على أفضل خلية $Bi_2S_3 / TiO_2 / ZnO$ تحت تأثير درجة حرارة. حصلنا على النتائج التالية: بالنسبة لخلايا أكسيد الثيتانيوم: كفاءة تحويل تبلغ 25.82% بسمك 0.03 ميكرومتر وتنشيط $1 \cdot 10^{18} cm^{-3}$. الكلمات المفتاحية: المحاكاة، SCAPS 1D، الخلايا الكهروضوئية، الخصائص الكهروضوئية.

