



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE 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 du diplôme :

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : Physique Energétique et Energies Renouvelables

Par :

Mr SAIDI Mohammed Amine

Sous le thème

Effet du silicium poreux sur les performances des cellules solaires : Modélisation et simulation

Soutenu publiquement le **22 juin 2023** à Tlemcen devant le jury composé de :

Mr N. BENMOUSSA	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mme K. RAHMOUN	Professeure	Université de Tlemcen	Encadrante
Mme B. BENABADJI	M.C.B	Université de Tlemcen	Examinatrice

Année Universitaire : 2022-2023

Remerciement

Ce travail de mémoire a été effectué à l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen (UABT), de faculté des sciences, département de physique, au sein de l'Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables (URMER) sous la direction du Professeur **Khadidja RAHMOUN**.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers ma directrice de mémoire de master, Madame **K. Rahmoun**, professeur à la faculté des sciences de l'Université d'Abou Bekr Belkaid de Tlemcen (UABT). Son encadrement, ses vastes connaissances et ses explications tout au long de mon travail m'ont été très bénéfiques.

Je souhaite également exprimer mon profond respect envers Monsieur **Nasr Eddine BENMOUSSA**, Professeur à la faculté des sciences de l'UABT, pour avoir accepté de présider le jury de mon mémoire de master.

Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance envers Madame **Batoul BENABADJI**, Maître de Conférences à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.

Dédicaces

Je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Je dédie humblement ce travail à mes parents, qui ne cessent de m'apporter leur amour et leur soutien. Je ne saurais trop leur rendre hommage pour tout ce qu'ils ont fait pour moi.

Je leur souhaite longue vie et bonne santé.

Je voudrais également exprimer ma gratitude envers mon frère, mes sœurs, ma famille et mes amis pour leur soutien tout au long de ce mémoire.

Enfin, je remercie chaleureusement tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail et en particulier ma collègue Soufi Hadjer.

SAIDI MOHAMMED AMINE

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Liste des figures

Listes des tableaux

Introduction générale

Chapitre I : Généralités sur les cellules photovoltaïques

I-1 Introduction	4
I-2 L'énergie du soleil.....	4
I-2-1 La géométrie Terre-Soleil	4
I-2-2 Caractéristique du rayonnement solaire	4
I-2-2-1 Le rayonnement solaire	5
I-2-2-2 Masse d'air (Air Mass).....	5
I-3 La cellule photovoltaïque	7
I-3-1 Introduction	7
I-3-2 Historique	7
I-3-3 Principe de fonctionnement.....	8
I-4 Types des cellules solaires	9
I-4-1 Les cellules solaires à base de silicium	9
I-4-1-1 Cellules à base de silicium monocristallin	9
I-4-1-2 Cellules solaires à base de silicium polycristallin.....	9
I-4-2 Cellules solaires en couches minces.....	10
I-4-2-1 Les cellules à base de silicium amorphe	10
I-4-2-2 Cellules CIS, CIGS	10
I-4-2-3 Cellules CZTS	10
I-4-3 Cellule photovoltaïque organique	11
I-4-4 Cellules solaires sensibilisés par un colorant DSSC	11
I-4-5 Cellules pérovskites.....	12
I-5 Paramètres pour la caractérisation des cellules solaires :.....	14

I-5-1	Caractéristiques I-V d'une cellule solaire	14
I-5-2	Paramètres d'une cellule solaire.....	14
I-5-2-1	Paramètres physiques	14
I-5-2-2	Paramètres photovoltaïques.....	14
I-5-2-2-1	Courant de court-circuit I_{cc}	14
I-5-2-2-2	Tension à circuit-ouvert V_{co}	15
I-5-2-2-3	Facteur de forme FF et la puissance maximale P_{max}	15
I-5-2-2-4	le rendement η	15
I-5-2-2-5	le rendement quantique	15
I-6	Avantages et inconvénients.....	16
I-6-1	Avantages	16
I-6-2	Inconvénients	17
I-7	Conclusion.....	17

Chapitre II : Silicium Poreux et Kesterites, Notions fondamentales

II-1	Introduction.....	21
II-2	Partie I : Le silicium poreux.....	21
1-	Silicium poreux.....	21
2-	Bref Historique	22
3-	Formation du silicium poreux.....	22
3-1	Régime de formation.....	22
3-2	Elaboration du silicium poreux.....	23
3-2-1	Elaboration sèche	23
3-2-2	Elaboration humide	24
4-	Caractéristique de silicium poreux	25
4-1	La porosité	25
4-2	L'épaisseur	27
4-3	La surface spécifique	28
4-4	La morphologie.....	28
5-	Propriétés du silicium poreux.....	30
5-1	La photoluminescence	30
5-2	indice de réfraction	30
5-3	l'oxydation	31

5-4 La Réflectance	31
6- Application du silicium poreux	31
II-3 Partie II : Les k�esterites CZT(S,Se)	32
1- Etat de l'art	32
2- Propriétés du CZT (S, Se).....	32
2-1 Propriété structurelle.....	32
2-2 Propriétés physique.....	33
2-3 Propriétés optiques.....	34
2-4 Propriétés �lectrique.....	34
3- Applications du CZTS	35
II-4 Conclusion	35

Chapitre III : Modélisation et simulation

III-1 Introduction	39
III-2 Présentation du logiciels SCAPS.....	39
III-Paramètres optiques et physiques des cellules étudiées	39
IV- Modélisation : structures étudiées	41
V- Etude des différents modèles	42
V-1 Etude de la cellule à base de CZTS du Modèle 1	42
V-1-1 Effet de la variation de l'épaisseur de CZTS du modèle 1a.....	42
V-1-2 Effet de la variation de l'énergie de gap de la couche CZTS pour le modèle (1 b) avec silicium poreux	46
V-1-3 Effet de la variation de la température pour le modèle (1 b) avec silicium poreux	49
V-2 Effet de la variation de l'épaisseur de CZTSe (modèle 2a)	52
V-2-1 Effet de Variation de l'énergie de gap de la couche CZTSe.....	57
V-2-2 Effet de la variation du défaut N_t de la couche CZTSe.....	60
V-2-3 Effet de la variation de la température sur le modèle 2b	63
IV- Conclusion.....	66

Conclusion générale

Listes des figures

Chapitre I : Généralités sur les cellules photovoltaïques

FIGURE I-1 LA POSITION DU SOLEIL EN UN SITE VARIE SUIVANT LA ROTATION DE LA TERRE SUR ELLE-MEME ET AUTOUR DU SOLEIL.	4
FIGURE I-2 COMPOSANTS DU RAYONNEMENT SOLAIRE AU SOL.	5
FIGURE I-3 DIFFERENTES CONSTANTES D'ILLUMINATIONS.	6
FIGURE I-4 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES SPECTRES AM0 ET AM1.5. LE DOMAINE SPECTRAL UTILE AUX CELLULES EN SILICIUM EST MIS EN EVIDENCE.	7
FIGURE I-5 REPRESENTATION EN COUPE D'UNE CELLULE PV	9
FIGURE I- 6 DIFFERENCE ENTRE DES CELLULES AU SILICIUM MONOCRISTALLIN (A GAUCHE) ET DES CELLULES AU SILICIUM POLYCRISTALLIN (A DROITE).	10
FIGURE I- 7: CELLULE PV ORGANIQUE, SOUPLE ET PLIABLE.	11
FIGURE I- 8 STRUCTURE SIMPLIFIEE D'UNE CELLULE DE TYPE DSSC.....	11
FIGURE I- 9 RENDEMENTS RECORD DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES OBTENUS EN LABORATOIRE	12
FIGURE I- 10 UNE SORTIE DU NOUVEAU GRAPHIQUE INTERACTIF MONTRE LE DEVELOPPEMENT DE DEUX TYPES DE CELLULES SOLAIRES AU SILICIUM (EN BLEU), QUI SONT LA TECHNOLOGIE PV LA PLUS LARGEMENT DEPLOYEE AUJOURD'HUI, ET DES CELLULES SOLAIRES EN PEROVSKITE (EN ORANGE), UNE TECHNOLOGIE PV PLUS RECENTE QUI EST JUSTE COMMENCENT A ETRE COMMERCIALISES.	13
FIGURE I- 11 CARACTERISTIQUE I-V D'UNE CELLULE SOLAIRE PV.	14
FIGURE I- 12 SCHEMA ELECTRIQUE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.	16

Chapitre II : Silicium Poreux et Kesterites, Notions fondamentales

FIGURE II- 1 : IMAGES MEB DE A) PORES RECTILIGNES DE DIAMETRE 80 NM OBTENUS AVEC UNE DENSITE DE COURANT DE 250 MA/CM ² , B) PORES TORTUEUX DE DIAMETRE 10 NM OBTENUS AVEC UNE DENSITE DE COURANT DE 50 MA/CM ²	22
FIGURE II- 2 : CARACTERISTIQUE DENSITE DE COURANT-TENSION REALISEE SUR UN SUBSTRAT DE SILICIUM DOPE P (100Ω.CM) ET AVEC UNE CONCENTRATION D'ACIDE FLUORHYDRIQUE DE 50%. LA TENSION EST DETERMINEE PAR RAPPORT A UNE ELECTRODE DE REFERENCE.	23
FIGURE II- 3 : LA DISSOLUTION CHIMIQUE – L'OBTENTION DU SILICIUM POREUX A PARTIR D'UNE SOLUTION ACIDE..24	24
FIGURE II- 4 (A) SCHEMA D'UNE CELLULE D'ANODISATION « SIMPLE » AVEC CONTACT METALLIQUE EN FACE ARRIERE. (B) SCHEMA D'UNE CELLULE D'ANODISATION « DOUBLE RESERVOIR » AVEC CONTACT SUR LA FACE ARRIERE DE TYPE ELECTROLYTE.....	25
FIGURE II- 5 : MESURES DE MASSE POUR DETERMINER LA POROSITE.	26
FIGURE II- 6 : EVOLUTION DE LA POROSITE EN FONCTION DE LA DENSITE DE COURANT OBTENUE POUR DEUX CONCENTRATIONS EN HF.....	27
FIGURE II- 7 : EVOLUTION DE L'EPaisseur DE LA COUCHE POREUSE AVEC LA DUREE D'ANODISATION POUR UNE DENSITE DE COURANT ET UNE CONCENTRATION EN HF DONNEES.....	28
FIGURE II- 8 : VARIATION DE LA SURFACE SPECIFIQUE EN FONCTION DE LA POROSITE POUR DEUX POROSITES INITIALES DIFFERENTES.....	28

FIGURE II- 9 : ECHELLE DES TAILLES DES PORES REALISEES PAR GRAVURE ELECTROCHIMIQUE DU SILICIUM POREUX[25].....	29
FIGURE II- 10 : VARIATION DE L'INDICE DE REFRACTION EN FONCTION DE LA POROSITE POUR UN SUBSTRAT DE SILICIUM DOPE AVEC 1019 CM-3 DE BORE.....	30
FIGURE II- 11 : ANALYSE DES SPECTRES DE REFLEXION DES COUCHES DE PS SUR LES REGIONS DE TYPE N ET P AVEC (100) ET (111) ORIENTATIONS PAR RAPPORT A L'ECHANTILLON DE C-Si	31
FIGURE II- 12 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES STRUCTURES DE KËSTERITE ET DE STANNITE DE CZTS. LES STRUCTURES CZTSE SONT OBTENUES EN REMPLAÇANT S PAR DES ATOMES DE SE.....	33
FIGURE II- 13 : RELATION ENTRE LE BANDGAP DE CZTS ET LE RENDEMENT DE CELLULES SOLAIRES A BASE DE CZTS DEDUIT DU MODELE DE SHOCKLEY-QUEISSER AVEC UN SPECTRE SOLAIRE AM1.5G.	34

Chapitre III : Modélisation et simulation

FIGURE III-1. STRUCTURES DE CELLULES A BASE DE CZTS (A) SANS SILICIUM POREUX (B) AVEC SILICIUM POREUX (MODELE 1).....	41
FIGURE III-2. STRUCTURES DE CELLULES A BASE DE CZTSE SANS (A) SILICIUM POREUX ET (B) AVEC SILICIUM POREUX DE TYPE N, (MODELE 2).....	41
FIGURE III-3. MICROGRAPHIE MEB DE LA CELLULE EN SILICIUM POREUX[62].	42
FIGURE III-4. VARIATION DE LA DENSITE DE COURANT I EN FONCTION DU VOLTAGE V POUR LES DEUX CAS SANS ET AVEC SILICIUM POREUX.	44
FIGURE III-5. VARIATION DU VCO EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DES DEUX CELLULES.	44
FIGURE III-6. VARIATION DE JSC DES DEUX CELLULES EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR.	45
FIGURE III-7. VARIATION DU FF DES DEUX CELLULES EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR.....	45
FIGURE III-8. VARIATION DU RENDEMENT DES DEUX CELLULES EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR.....	46
FIGURE III-9. VARIATION DU VCO EN FONCTION DE L'ÉNERGIE DE GAP DE LA CELLULE MODELE (1B).....	47
FIGURE III-10. VARIATION DE JSC EN FONCTION DE L'ÉNERGIE DE GAP DE LA CELLULE MODELE (1B).....	48
FIGURE III-11. VARIATION DU FACTEUR DE FORME FF EN FONCTION DE L'ÉNERGIE DE GAP DE LA CELLULE MODELE (1B).....	48
FIGURE III-12. VARIATION DU RENDEMENT EN FONCTION DE L'ÉNERGIE DE GAP DE LA CELLULE MODELE (1B).....	49
FIGURE III-13. VARIATION DE VCO EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE LA CELLULE MODELE (1B).....	50
FIGURE III-14. VARIATION DE JSC EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE LA CELLULE MODELE (1B).....	51
FIGURE III-15. VARIATION DE FF EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE LA CELLULE MODELE (1B).....	51
FIGURE III-16. VARIATION DU RENDEMENT EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE LA CELLULE MODELE (1B).	52
FIGURE III-17. VARIATION DE LA DENSITE DE COURANT I EN FONCTION DU VOLTAGE V POUR LES DEUX CAS SANS ET AVEC SILICIUM POREUX.	54
FIGURE III-18 . VARIATION DU VCO EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DES DEUX CELLULES (MODELE 2).....	55
FIGURE III-19. VARIATION DE JSC EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DES DEUX CELLULES (MODELE 2).....	55
FIGURE III-20. VARIATION DE FF EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DES DEUX CELLULES (MODELE 2).....	56
FIGURE III-21. VARIATION DU RENDEMENT EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DES DEUX CELLULES (MODELE 2)	56
FIGURE III-22. VARIATION DE VCO EN FONCTION DE L'ÉNERGIE DE GAP DE LA CELLULE MODELE (2B).	58
FIGURE III-23 . VARIATION DE JSC EN FONCTION DE L'ÉNERGIE DE GAP DE LA CELLULE MODELE (2B).	58
FIGURE III-24 . VARIATION DU FACTEUR DE FORME FF EN FONCTION DE L'ÉNERGIE DE GAP DE LA CELLULE MODELE (2B).....	59
FIGURE III-25. VARIATION DU RENDEMENT EN FONCTION DE L'ÉNERGIE DE GAP DE LA CELLULE MODELE (2B).....	59
FIGURE III-26. VARIATION DU VCO EN FONCTION DE DEFAUT DE CZTSE DE LA CELLULE MODELE (2B).....	61
FIGURE III-27. VARIATION DE JSC EN FONCTION DE DEFAUT DE CZTSE DE LA CELLULE MODELE (2B).	61
FIGURE III-28 : VARIATION DU FF EN FONCTION DE DEFAUT DE CZTSE DE LA CELLULE MODELE (2B).....	62
FIGURE III-29. VARIATION DU RENDEMENT EN FONCTION DE DEFAUT DE CZTSE DE LA CELLULE MODELE (2B).	62
FIGURE III-30. VARIATION DU VCO EN FONCTION DE LA TEMPERATURE SUR LA CELLULE MODELE 2B.	63

FIGURE III-31. VARIATION DE JSC EN FONCTION DE LA TEMPERATURE SUR LA CELLULE MODELE 2B.	64
FIGURE III-32. VARIATION DE FF EN FONCTION DE LA TEMPERATURE SUR LA CELLULE MODELE 2B.....	64
FIGURE III-33. VARIATION DU RENDEMENT EN FONCTION DE LA TEMPERATURE SUR LA CELLULE MODELE 2B.	65

Listes des tableaux

Chapitre II : Silicium Poreux et K esterites, Notions fondamentales

TABLEAU II- 1 CLASSIFICATION DES TROIS FAMILLES DU SILICIUM POREUX.	29
TABLEAU II- 2: QUELQUES PROPRIETES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES ELEMENTS CU, ZN, SN, S	33

Chapitre III : Mod elisation et simulation

TABLEAU III-1. PARAMETRES OPTIQUES ET PHYSIQUES DES MATERIAUX UTILISES DANS LA SIMULATION	40
TABLEAU III-2: LA CELLULE CZTS SANS SILICIUM POREUX.....	42
TABLEAU III-3. LA CELLULE CZTS AVEC SILICIUM POREUX	43
TABLEAU III-4 : TABLEAU RECAPITULATIF DES RESULTATS	43
TABLEAU III-5. RESULTATS DE LA VARIATION DE L'ENERGIE DE GAP DE LA CELLULE MODELE (1B).	47
TABLEAU III-6. RESULTATS DE LA VARIATION DE LA TEMPERATURE SUR LA CELLULE MODELE (1B).	49
TABLEAU III-7. RESULTATS DE LA CELLULE CZTSe SANS SILICIUM POREUX	53
TABLEAU III-8. RESULTATS DE LA SIMULATION POUR LA CELLULE CZTSe AVEC SILICIUM POREUX	53
TABLEAU III-9 . TABLEAU RECAPITULATIF DES RESULTATS.....	53
TABLEAU III-10 . RESULTATS DE LA VARIATION DE L'ENERGIE DE GAP DE LA COUCHE CZTSe	57
TABLEAU III-11. RESULTATS DE LA VARIATION DE DEFAUT DU CZTSe (MODELE 2B).....	60
TABLEAU III-12 : RESULTATS DE LA VARIATION DE LA TEMPERATURE SUR LA CELLULE MODELE 2B	63
TABLEAU III-13. COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS LORS DE LA SIMULATION AVEC D'AUTRES RESULTATS DE LA LITTERATURE.....	66

Introduction générale

Au vingtième siècle, la demande croissante en énergie électrique a conduit à une forte consommation d'énergies fossiles générant ainsi une pollution accrue et des émissions de gaz à effet de serre.

Afin de résoudre ce problème environnemental, le développement des énergies renouvelables est apparu comme une solution incontournable. Les sources d'énergie renouvelable sont nombreuses, notamment l'énergie solaire, hydraulique, éolienne, biomasse, marémotrice et géothermique. Parmi ces sources, l'énergie photovoltaïque est l'une des plus prometteuses, grâce à sa capacité à convertir la lumière du soleil en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques fabriquées à partir de semi-conducteurs.

Le silicium est un matériau très utilisé dans l'industrie photovoltaïque pour sa fiabilité et son efficacité, présente des limites en termes d'émission de lumière et de gap faible à température ambiante.

C'est pourquoi, le silicium poreux a suscité un grand intérêt depuis sa découverte, notamment en raison de sa photoluminescence intense à température ambiante et de son rendement quantique nettement supérieur à celui du silicium massif. De nombreuses études ont été menées pour mieux comprendre les caractéristiques morphologiques, électriques, optiques et thermiques du silicium poreux. Les propriétés prometteuses du silicium poreux en font une alternative intéressante au silicium massif dans l'industrie photovoltaïque, ouvrant ainsi des perspectives d'amélioration de l'efficacité des cellules solaires.

L'utilisation de matériaux nanostructurés, tels que le silicium poreux (PSi), a été proposée comme une voie prometteuse pour améliorer les performances des cellules solaires notamment en silicium. Ce mémoire de fin d'étude vise à étudier l'effet du silicium poreux sur les performances des cellules solaires pour la première fois en kèsterites CZT(S,Se).

Dans le **premier chapitre** de notre étude, nous exposons les notions générales relatives aux cellules solaires. Nous y expliquons le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque (PV), les différents types de cellules photovoltaïques ainsi que les grandeurs caractéristiques propres aux cellules solaires.

Le **deuxième chapitre** de notre étude se concentre sur l'étude du matériau qu'est le silicium poreux. Nous présentons une étude bibliographique générale sur le silicium poreux, son oxydation son indice de réfraction et sa réflectance, ainsi que sa morphologie.

Dans cette même partie du chapitre (Partie II), nous présentons les matériaux kèsterites CZT(S,Se), en détaillant leurs propriétés optiques, physiques et structurelles, ainsi que leurs applications dans l'industrie photovoltaïque.

Dans le **troisième chapitre**, nous modélisons et simulons la cellule photovoltaïque à base de CZTS à l'aide du logiciel SCAPS. Nous étudions deux modèles différents en y ajoutant une couche de silicium poreux, afin de comparer leurs performances. Nous faisons ensuite varier les paramètres

tels que la température, le gap énergétique et les défauts, afin d'améliorer les performances des cellules solaires.

Enfin, pour conclure notre étude, nous présentons une synthèse globale de nos travaux et une analyse des perspectives d'amélioration des performances des cellules photovoltaïques en utilisant le silicium poreux.

CHAPITRE I

Généralités sur les Cellules Photovoltaïques

I-1 Introduction

Le recours à l'énergie photovoltaïque est en plein essor, son usage se démocratise et les panneaux PV font partie du quotidien. Dans ce chapitre, nous présentons une étude générale sur l'énergie photovoltaïque ainsi que des notions fondamentales sur la conversion photovoltaïque, en terminant par les avantages et les inconvénients de cette énergie.

I-2 L'énergie du soleil

I-2-1 La géométrie Terre-Soleil

Le soleil est une étoile ayant pour diamètre 1.39 millions kilomètres autour de laquelle gravite la terre qui. C'est l'étoile la plus proche de la terre avec distance d'environ 150 millions de kilomètres. Sa chaleur permet la photosynthèse des végétaux et la présence d'eaux à l'état liquide[1].

Il est composé essentiellement de six éléments l'hydrogène H , hélium He, Carbone C, Azote N, Néon Ne, Oxygène O, et structuré en plusieurs couches, le noyau est chauffé à des températures pouvant atteindre 14 millions de degrés par des réactions de fusion nucléaire[2] .

La terre décrit autour du soleil une trajectoire déterminée par la ligne soleil terre appelée une trajectoire éclipse, dont le soleil occupe un foyer[3], [Figure I.1](#).

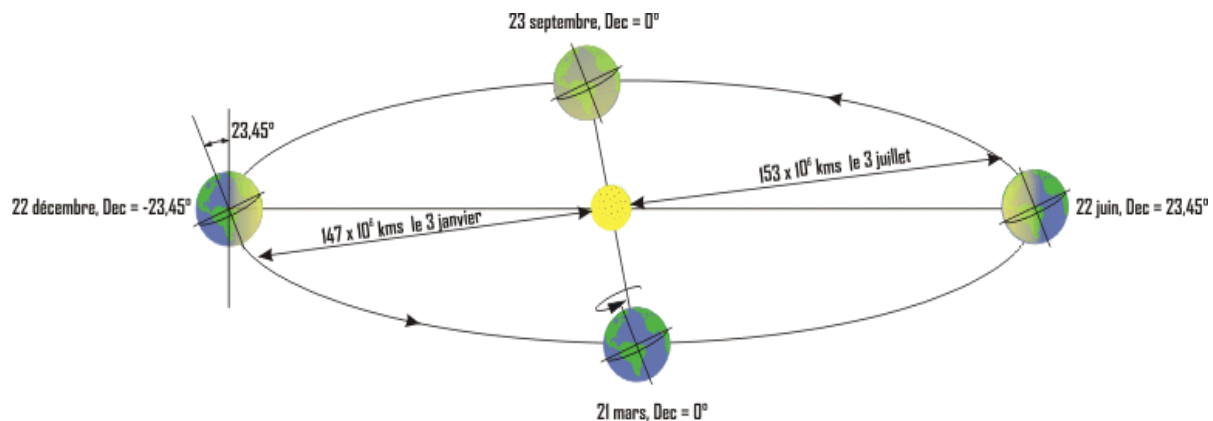


Figure I-1. La position du soleil en un site varie suivant la rotation de la terre sur elle-même et autour du soleil.

L'axe de rotation de la terre par rapport au plan de l'orbite terrestre (l'écliptique) sur elle-même est incliné de $23^{\circ} 27'$, cette inclinaison vaut donc $-23^{\circ} 27'$ au solstice d'hiver et $+23^{\circ} 27'$ au solstice d'été et est nulle aux équinoxes. La déclinaison est le responsable des saisons car elle explique les différences saisonnières soient plus marquées vers les hautes latitudes [1].

I-2-2 Caractéristique du rayonnement solaire

I-2-2-1 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est un ensemble d'ondes électromagnétiques émises par le soleil.

Il se compose de photons dont la longueur d'onde varie de l'ultraviolet UV ($0.2 \mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2.5 \mu\text{m}$) [4].

En traversant l'atmosphère le rayon solaire est absorbé, diffusé et subit une modification de son spectre. On distingue plusieurs composants au sol [5].

- a- le rayonnement direct : c'est le rayonnement atteignant directement la surface terrestre sans diffusion par l'atmosphère, les rayons sont parallèles entre eux [4]
- b- L'albédo : c'est le rayonnement réfléchi par les obstacles tels que les nuages ou le sol. Il s'est quantifié par un coefficient d'albédo compris entre 0 et 1 rapport entre l'énergie solaire réfléchie et l'énergie solaire incidente.
- c- Rayonnement globale : le rayonnement globale est tout simplement la somme de ces divers contribution comme le montre la [figure I-2](#) [4].

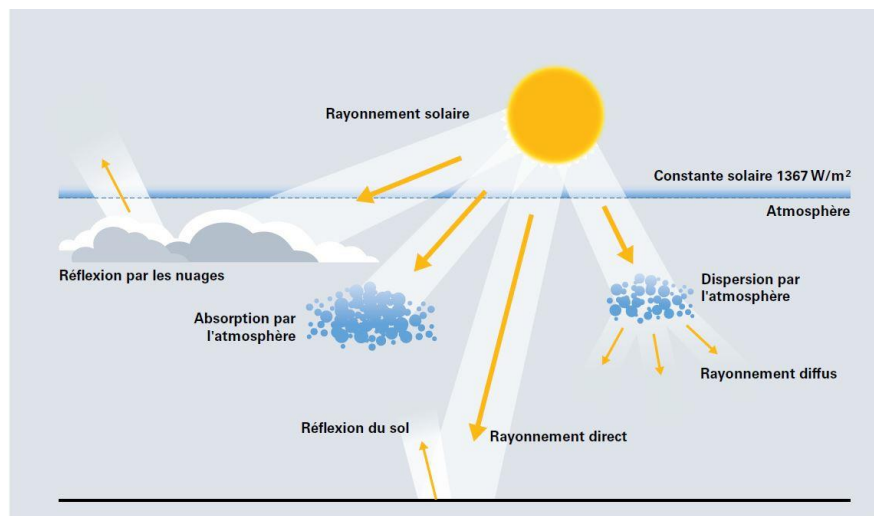


Figure I-2. composants du rayonnement solaire au sol [4].

I-2-2-2 Masse d'air (Air Mass)

La masse d'air optique est définie comme le rapport entre la longueur du trajet optique d'un faisceau lumineux traversant l'atmosphère terrestre pour atteindre un point donné à la surface de la Terre et la longueur du trajet optique que ce même faisceau lumineux aurait parcouru s'il était arrivé directement du zénith (c'est-à-dire si le Soleil était directement au-dessus de l'observateur). [1].

La [figure I-3](#) illustre les différentes constantes d'illumination de la masse d'air en fonction de la longueur d'onde [6].

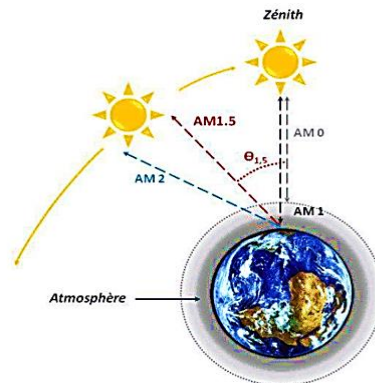


Figure I-3. différentes constantes d'illuminations [6].

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

AM0, Le rayonnement solaire hors atmosphère.

AM1 ($\theta = 0$), Soleil au zénith

Soleil à 41.8° noté AM1.5, c'est le spectre standard le plus étudié, il donne une irradiance de 970W/m^2 et des références pour la mesure de la cellule solaire[1], [7].

L'intensité I_D reçue à la surface terrestre peut être calculé grâce à la formule suivante :

$$I_D = 1.353 (0.7^{AM})^{0.678} \quad (I-2)$$

La [figure I-4](#) illustre une représentation graphiques des spectres AM0 et AM1.5 [8].

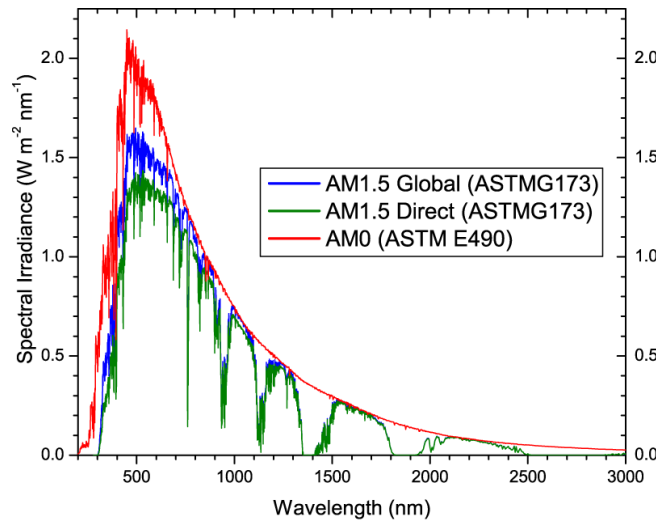


Figure I-4. Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 [8].

D'après la figure I-4, on voit clairement sur le spectre AM1.5, les bandes d'absorption correspondant aux gaz de l'atmosphère tels que le CO₂ et l'H₂O. La quantité d'énergie solaire incidente à un endroit donné dépend de divers facteurs, tels que l'heure de la journée, la météo et la latitude. La masse d'air 1,5 (AM1,5) est le spectre solaire (rayonnement atteignant la surface de la Terre) le plus largement utilisé pour étudier et comparer les performances de différentes cellules solaires dans des conditions standardisées. AM1.5 ou « 1 soleil » est défini comme égal à 1000 W m⁻². Le nombre « 1,5 » indique que la distance parcourue par la lumière du soleil à travers l'atmosphère jusqu'à la surface de la Terre est 1,5 fois la distance la plus courte (lorsque le Soleil est au-dessus de la tête). Le soleil est donc rayonne principalement dans le domaine du visible et du proche infrarouge [1], [9].

I-3 La cellule photovoltaïque

I-3-1 Introduction

L'énergie solaire est issue des réactions de fusion thermonucléaire et émise par le soleil sous forme d'onde électromagnétique dans l'espace, elle représente presque la totalité de l'énergie disponible et libre sur terre [1].

La cellule PV est une composante électrique fabriquée généralement à base de silicium qui produit de l'électricité à partir de la conversion directe de la lumière venant du soleil, en électricité [9].

Dès que la cellule solaire est connectée à un circuit électrique, elle délivre une tension continue et une puissance proportionnelle à la puissance lumineuse incidente [10].

I-3-2 Historique

- En 1839, l'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien Antoine Becquerel.

- 1875 : présente son exposé sur l'effet photovoltaïque dans les semiconducteurs devant l'académie des sciences.
- En 1912, le phénomène de l'effet photovoltaïque a été expliqué par Albert Einstein, il fallut attendre 30 ans pour sa mise en application pratique dans la réalisation de la 1ere cellule PV[9].
- 1954 : La présentation de la première cellule photovoltaïque par le laboratoire Bell avec un rendement de 6% [4].
- 1959 : Le satellite Vanguard mis en orbite par la NASA est c'est le premier satellite alimenté par des cellules photovoltaïque.
- A partir des années 70 les panneaux photovoltaïques se développent sur des applications terrestres et maritimes. Ils permettent de fournir de l'électricité a des sites isolés tels que les déserts et la mer.

I-3-3 Principe de fonctionnement

L'effet photovoltaïque est obtenu par l'absorption des photons dans un matériau dit semi-conducteur (possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie) [10].

Ce matériau comporte deux parties, l'une dopée de type p (trous) et l'autre dopée de type n (excès d'électrons). La juxtaposition (mise en contact des deux parties du matériau) des zones p et n forme un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p ce qui forme une jonction (dite p-n) [9], [11].

Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie supérieure ou égale à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir engendrant ainsi un pair électron-trou [11].

Lorsque cette jonction est éclairée, les photons d'énergies supérieures au gap communiquent leurs énergies aux atomes ce qui permet un passage des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction en laissant des trous capables de se déplacer générant ainsi un pair-trou [10].

Les charges placées aux bornes de la cellule amènent les électrons de la zone n à se connecter aux trous de la zone p via la connexion externe, ce qui entraîne la circulation d'un courant électrique; l'effet repose donc sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage pour améliorer sa conductivité [11].

La [Figure I-5](#). Représente l'effet photovoltaïque d'une cellule PV

Les cellules P.V (photovoltaïques) sont assemblées pour former des modules.

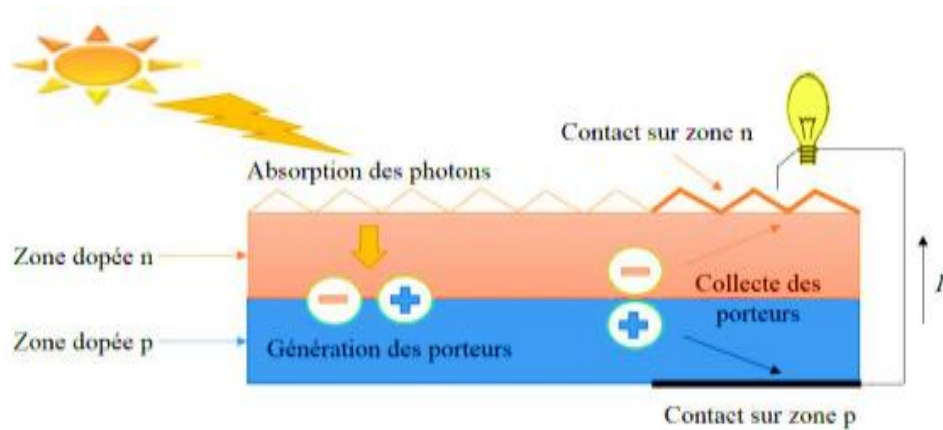


Figure I-5. Représentation en coupe d'une cellule PV [12].

I-4 Types des cellules solaires

Il existe énormément des technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque, la majorité des panneaux photovoltaïques est encore en phase de développement [4].

Parmi les technologies des cellules solaires, nous distinguons :

I-4-1 Les cellules solaires à base de silicium

Le silicium existe en grande quantité à la surface du globe terrestre, et est l'élément le plus abondant après l'oxygène O. Il occupe une grande place dans l'industrie photovoltaïque grâce à ces avantages considérables tels que la disponibilité, la qualité photovoltaïque qui assure un bon rendement etc. [4], [13]. Il se présente sous différentes formes dont les plus répandues sont le silicium monocristallin, le silicium polycristallin et le silicium amorphe.

I-4-1-1 Cellules à base de silicium monocristallin

Le silicium monocristallin est obtenu par la méthode classique connue sous le nom de procédé Czochralski qui consiste en la croissance d'un monocristal de silicium sous forme de lingot à partir de silicium fondu [1].

Ces cellules représentent la première génération avec un rendement situé entre 12% et 18 % en atteignant 24.7% en laboratoire [11].

La méthode d'élaboration de ces cellules est très énergivore et coûteuse mais elles sont les plus efficaces des types de cellules solaires à base de silicium [7].

I-4-1-2 Cellules solaires à base de silicium polycristallin

Le silicium polycristallin est obtenu à partir de la refondre des chutes obtenues lors des opérations d'équeutage et de polissage et même par le tirage de monocristaux [10].

Ce type de cellules supporte mieux la présence d'impuretés que les cellules monocristallines, elles représentent environ 60% des installations grâce à son coût moins élevé [11].

Leur rendement se situe entre 11% et 15%, mais elles sont les plus répandues puisqu'elles offrent un bon rapport qualité-prix [14]. La Figure I-6. Représente la différence entre des cellules au silicium monocristallin et des cellules au silicium polycristallin.

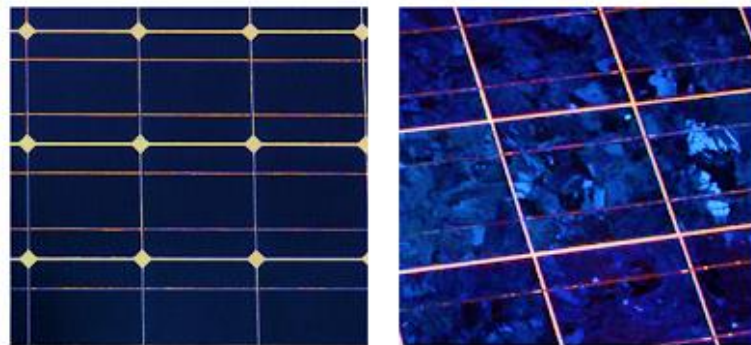


Figure I-6. Différence entre des cellules au silicium monocristallin (à gauche) et des cellules au silicium polycristallin (à droite).

I-4-2 Cellules solaires en couches minces

Cette technologie est plus écologique, moins énergivore et nécessite peu de matériaux à leurs fabrications mais leur rendement est plus faible que les cellules actuellement commercialisés [14].

Parmi ces technologies on distingue

I-4-2-1 Les cellules à base de silicium amorphe

Le silicium est aussi utilisé en couche mince dite "amorphe" c'est un ensemble d'atomes désordonné [1]. Il permet de produire des panneaux de grandes surfaces à un coût très bas en utilisant peu de matière première [4].

Ce type de cellules est souple, pliable et léger, leur rendements est plus faible que celui des cellules cristallines (environ 9% en industrie), elles ont l'avantage de fonctionner par temps nuageux [7].

I-4-2-2 Cellules CIS, CIGS

Le cuivre-indium disulfure (CIS) est un matériau qui a un coefficient d'absorption entre 100 et 1000 fois supérieur à celui du silicium amorphe [11]. L'avantage de cette technique est qu'elle allie un rendement élevé comme les cellules cristallines avec la technique des couches minces mais la disponibilité limitée de ces matériaux est un inconvénient majeur.

I-4-2-3 Cellules CZTS

Les cellules CZTS renferment un absorbant fait de cuivre, de zinc, d'étain, de soufre et de sélénium de formule $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$. La fabrication de ces cellules est similaire à la fabrication des cellules

CIGS sauf que les conditions optimales d'assemblage peuvent varier. En utilisant cet absorbeur dans les cellules solaires à couches minces, les rendements de conversion des dispositifs ont dépassé 20 % en laboratoire et atteignent 13 % dans l'industrie [15].

I-4-3 Cellule photovoltaïque organique

La recherche sur les cellules solaires organiques s'est développée au cours des 30 dernières années, mais ce n'est qu'au cours de la dernière décennie, qu'elle a suscité un intérêt scientifique et économique déclenché par une augmentation rapide des rendements de conversion d'énergie [16].

Ces cellules offrent des avantages majeurs tels que le coût de fabrication faible, la possibilité de les réaliser sur des substrats flexibles et la possibilité de les déposer en grandes surfaces [figure I.7](#), en revanche leur rendement est beaucoup plus faible que les cellules inorganiques et une durée de vie inférieure [11], [17].



Figure I-7. Cellule PV organique, souple et pliable.

I-4-4 Cellules solaires sensibilisées par un colorant DSSC

Les cellules DSSC (Dye-Sensitized-Solar-Cells) ou cellules de Grätzel [Figure I-7](#) sont couramment utilisées. Un colorant organique est appliqué sur une couche de dioxyde de titane TiO_2 (semi-conducteur de type n) dans ces cellules, qui est ensuite mise en contact avec un électrolyte (solution aqueuse contenant un couple redox) [11].

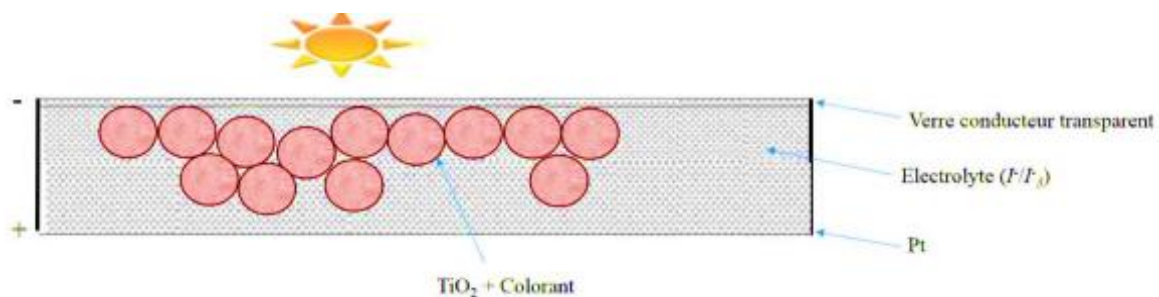


Figure I-8. Structure simplifiée d'une cellule de type DSSC

Leur rendement est encore plus faible par rapport aux autres technologies (le meilleur rendement obtenu avec ces cellules est de 10.4% réalisé par la société Sharp pour une cellule de 1 cm²).

I-4-5 Cellules pérovskites

Le pérovskite est l'un des matériaux les plus prometteurs [18] ayant la possibilité de remplacer le silicium des panneaux solaires. Les cellules à pérovskite ont connu le développement le plus rapide de l'histoire.

Les cellules solaires à pérovskites présentent une conductivité vitale par rapport aux cellules à base de silicium et un cout de fabrication plus faible mais en revanche elles sont encore instable [19]. Le rendement de ces cellules pourrait atteindre plus de 30% soit des performances plus élevées en moyenne.

La figure I-9 des rendements record des cellules photovoltaïques obtenus en laboratoire pour l'année 2022 montre que les progrès technologiques continuent de contribuer à l'amélioration de l'efficacité des cellules solaires. Les multijonctions à base de matériau III-V atteignent des rendements records au niveau du laboratoire. Malgré leurs bonnes performances, ces matériaux ont un coût de production élevé. C'est la raison pour laquelle plusieurs groupes ont étudié l'incorporation de matériaux III-V avec Si pour obtenir une cellule solaire en tandem à un coût de production faible mais à un haut rendement [20].

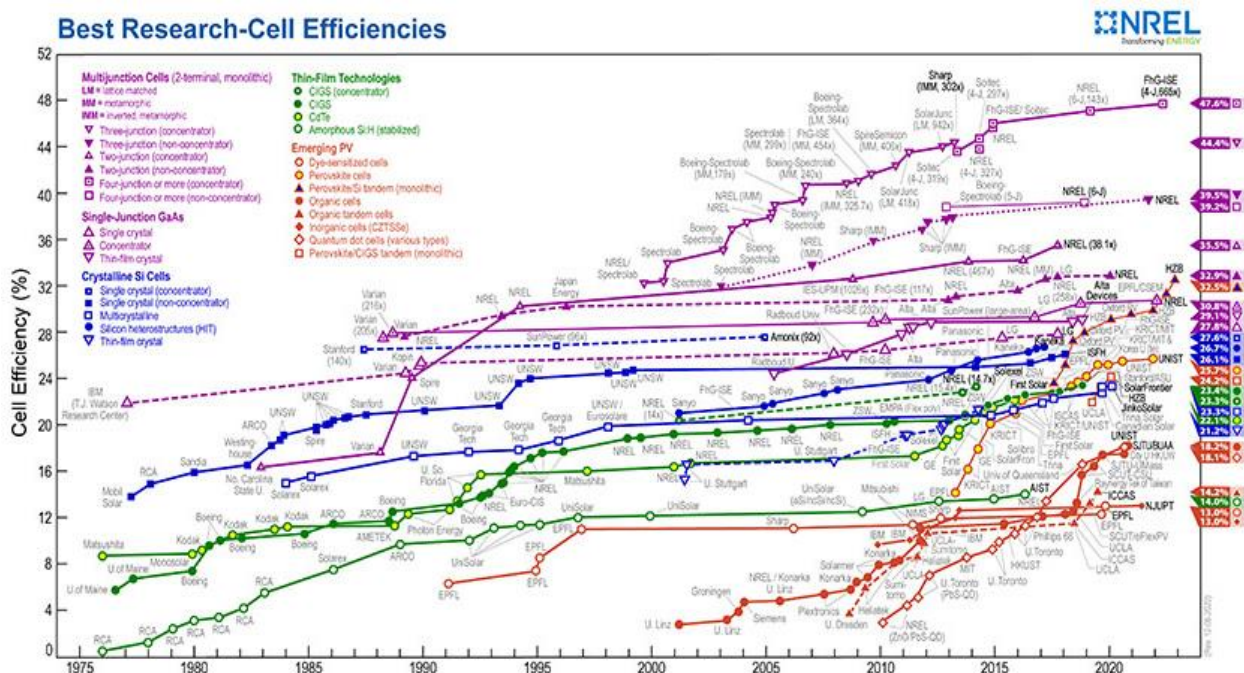


Figure I-9. Rendements record de cellules photovoltaïques obtenus en Laboratoire.

Les cellules solaires en silicium à jonction unique convertissent la lumière d'environ 300 nm à 1100 nm. Un spectre plus large pour récolter la lumière peut être obtenu en empilant un certain nombre de cellules solaires avec différents spectres opérationnels dans une configuration multi-jonction. Pour cette raison, les cellules solaires à jonctions multiples peuvent atteindre des rendements de conversion plus élevés que les cellules solaires au silicium à jonction unique traditionnelles [21].

Les cellules solaires en tandem pérovskite-silicium ont montré un progrès rapide au cours des 5 dernières années en termes d'efficacité de leur cellule de recherche et sont actuellement à l'étude en tant que candidats pour la prochaine génération de dispositifs PV industriels [20], [Figure I-9](#).

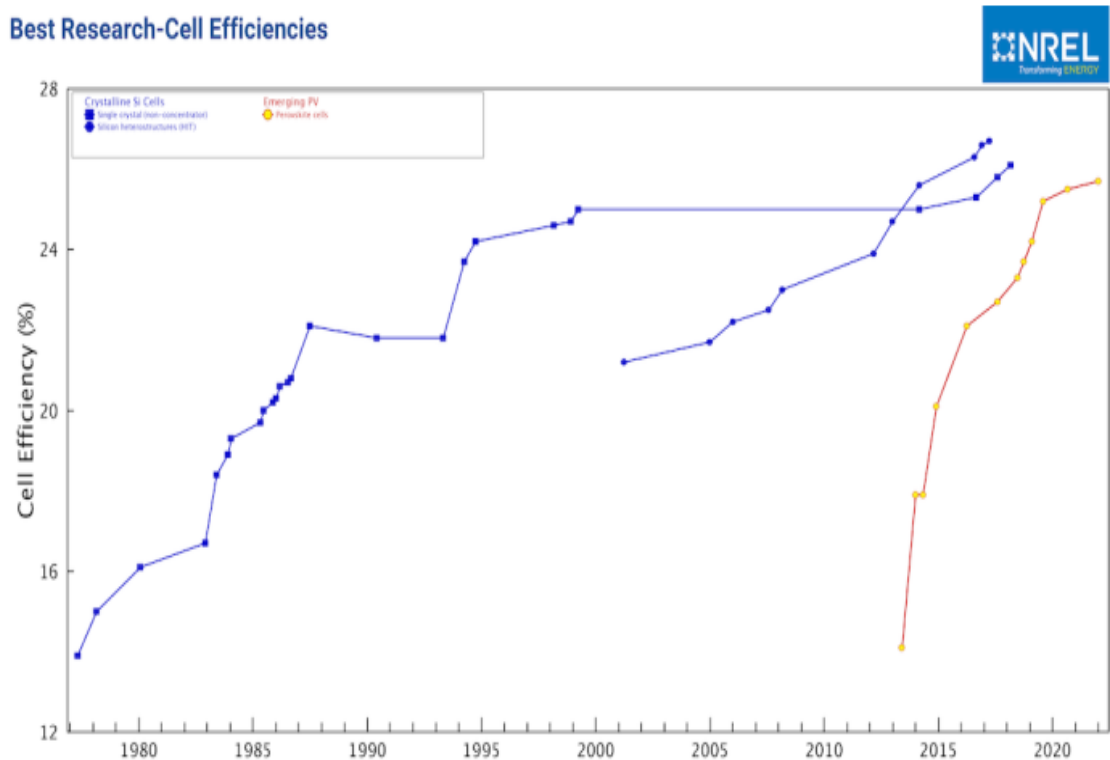


Figure I- 10. Comparaison du développement de cellules solaires au silicium et en pérovskite.

La [figure I-10](#) illustre les cellules solaires cristallines et les cellules solaires à base de pérovskites. Les cellules solaires cristallines, représentées en bleu, ont atteint un rendement de 27% en laboratoire, tandis que les cellules solaires à base de pérovskites, représentées en orange, ont atteint un rendement de 26% en laboratoire.

I-5 Paramètres pour la caractérisation des cellules solaires

I-5-1 Caractéristiques I-V d'une cellule solaire

Comme le montre la [figure I-11](#), le tracé de la densité de courant en fonction de la tension dans l'obscurité et sous un éclairage permet d'effectuer une évolution de la performance des cellules solaires [11].

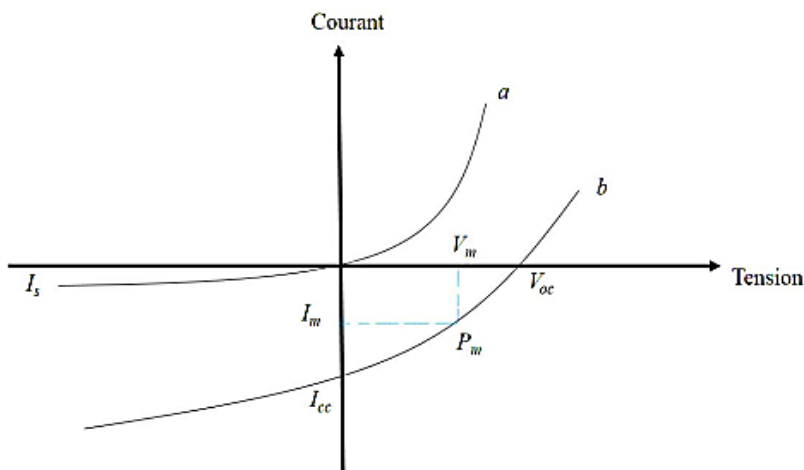


Figure I-8. Caractéristique I-V d'une cellule solaire PV.

Cette figure montre que la caractéristique courant/tension dans l'obscurité passe par l'origine, alors que la courbe sous éclairage est décalée d'une valeur I_{cc} reflétant la génération constante de courant par la lumière [11].

I-5-2 Paramètres d'une cellule solaire

I-5-2-1 Paramètres physiques

Les paramètres physiques sont

Le gap énergétique, la durée de vie des porteurs, la constante diffusion, les masses effectives, la concentration intrinsèque, le coefficient d'absorption et de réflexion [22].

I-5-2-2 Paramètres photovoltaïques

En utilisant les paramètres extraits des caractéristiques courant-tension, il est possible de comparer différentes cellules photovoltaïques allumées en même temps [20].

Ces paramètres sont définis comme suit

I-5-2-2-1 Courant de court-circuit I_{cc}

C'est le paramètre le plus important que l'on puisse obtenir avec une cellule solaire. Lorsque l'intensité d'illumination augmente le courant augmente aussi et dépend de la longueur d'onde du rayonnement incident, de la mobilité des porteurs, de la température et de la surface éclairée. Lorsque la tension $V=0$, I_{cc} est la valeur du courant [4].

I-5-2-2-2 Tension à circuit-ouvert V_{co}

C'est la tension mesurée pour laquelle, à l'obscurité ($I=0$) le courant ne circule pas dans la cellule PV.

Elle dépend des matériaux de la couche active, l'éclairement de la cellule et le type des cellules solaires [11].

V_{co} est donnée par

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (I-3)$$

I-5-2-2-3 Facteur de forme FF et la puissance maximale P_{max}

Le facteur de forme détermine la qualité de la cellule, Il est donné par la formule suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co}.I_{cc}} = \frac{I_m.V_m}{V_{co}.I_{cc}} \quad (I-4)$$

Où

I_m : est le courant

V_m : est la tension du point

C'est deux paramètres permettent d'extraire le maximum de puissance (P_{max})

La puissance maximale est donnée par

$$P_{max} = I_m \times V_m \quad (I-5)$$

I-5-2-2-4 le rendement η

C'est le rapport de la puissance produite par la cellule de la puissance du rayonnement solaire incident [4]

$$\eta = \frac{P_{sor}}{P_{in}} = \frac{FF.I_{cc}.V_{co}}{P_{in}} \quad (I-6)$$

C'est un paramètre important puisqu'il permet d'évaluer les performances de la cellule par une seule connaissance de sa valeur.

I-5-2-2-5 le rendement quantique

Le rendement quantique externe, noté EQE (external quantum efficiency), est le rapport entre le nombre d'électrons dans circuit externe et le nombre de photons incidents [4].

$$EQE = \frac{\text{nbr d'électrons dans le circuit externe}}{\text{nbr de photons incidents}} \quad (\text{I-7})$$

Pour simuler les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque, il est convenable d'utiliser les circuits équivalents.

Le circuit équivalent se compose généralement d'un générateur de courant, deux résistances (série R_s et shunt R_{sh}) et une diode placée en parallèle avec le générateur.

Il est représenté par la [figure I-9](#) ci-dessous

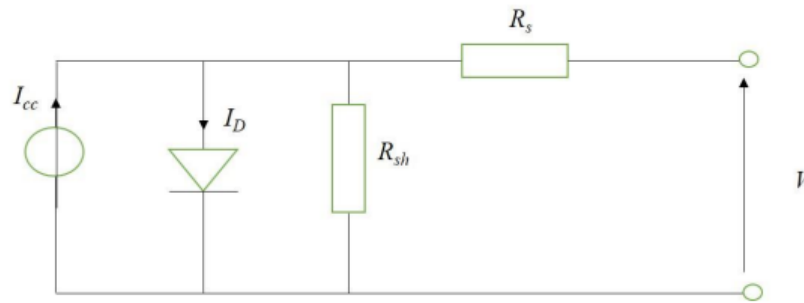


Figure I-12. Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [8].

R_s est la résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance de l'électrode et du matériau. La pente de la courbe $I(V)$ au point V_{co} représente l'inverse de la résistance série ($1/R_s$). R_{sh} est la résistance shunt liée aux effets de bord et à la recombinaison volumique.

La pente de la courbe $I(V)$ au point I_{cc} représente l'inverse de la résistance shunt ($1/R_{sh}$) ([Figure 1.9](#)). En général, la valeur de R_{sh} est supérieure d'au moins un ordre de grandeur à R_s . Pour minimiser les pertes, on doit diminuer R_s et augmenter R_{sh} .

Le cas idéal est représenté par R_{sh} égal à l'infini et R_s égal à zéro [4].

I-6 Avantages et inconvénients

I-6-1 Avantages

- Le système PV offre une fiabilité élevée, elle ne comporte pas de pièces mobiles, c'est la raison pour laquelle on l'utilise sur les engins spatiaux [23].
- L'électricité photovoltaïque est produite aussi près que possible du lieu de consommation, de façon décentralisée, directement chez l'utilisateur [5].
- Production assurée ; il n'y a aucun risque majeur, aucun bruit.
- Energie renouvelable, et gratuite.

I-6-2 Inconvénients

- Cout très élevé, surtout si on voudrait stocker de l'énergie avec des batteries
- La technologie de fabrication des modules PV est complexe et délicate.
- Rendement de conversion faible (28% pour les cellules monocristallines).
- Production d'énergie dépend de la lumière de soleil, toujours variable [24].

I-7 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'aborder des notions importantes sur l'énergie du soleil comprenant le rayonnement solaire et ses caractéristiques, les différents types des cellules PV, ainsi que le mécanisme de la conversion PV et les caractéristiques d'une cellule photovoltaïques.

Bibliographie

- [1] A. Labouret and M. Viloz, *Energie Solaire Photovoltaïque*, 3ème édition. Dunod, 2010.
- [2] M. Asplund and N. Grevesse, “The chemical composition of the Sun,” *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 47, no. 1, pp. 481–522, Sep. 2009.
- [3] M. S. Devetakovic, D. Dordevice, and Aleksandra D. Krstic, “Design of Solar Systems for Buildings and Use of BIM Tools: Overview of Relevant Geometric Aspects,” *FME Transactions*, vol. 47, no. 2, p. 397, Nov. 2019.
- [4] W. Dib, “Modélisation des structures PV, Aspect fondamentaux et appliqués,” Thèse de doctorat, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2010.
- [5] J. Bernard, *Genie energetique : Energie solaire (calcul et optimisation)*, 2e édition. in nouvelle édition. INSA Toulouse: Ellipses, 2011.
- [6] L. F. Zoë, “Untangling the influence of air-mass history in interpreting observed atmospheric composition,” *Atmospheric Research*, vol. 104–105, pp. 1–39, 2012.
- [7] D. M. Trung, “Elaboration de cellules solaires photovoltaïques à base de polymères conjugués, études des systèmes réticulables..” Thèse de doctorat, Université Bordeaux1, 2009.
- [8] N. Oleksiy, “Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités,” Mémoire de master, INSA Lyon, Lyon, 2005.
- [9] 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.
- [10] J.C. Sabonnadière, *Nouvelles technologies de l'énergie 1: les énergies renouvelables*, vol. 1. La Voisier: Hermes Sciences, 2006.
- [11] B. Moussaab, “Contribution à la modélisation des paramètres électriques des cellules solaires sensibilisées par colorant,” Thèse de doctorat, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2015.
- [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] A. Nouar, “Etude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales,” Mémoire de master, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [14] M. Sadok, “Détermination des Paramètres, Performances et Etude de la Dégradation des Modules Photovoltaïques en milieu saharien,” Thèse de doctorat, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2011.
- [15] 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 Mentouri Constantine, 2017.
- [16] H. Hoppe and N. S. Sariciftci, “Organic solar cells: An overview,” *Cambridge*, vol. 19, no. 7, p. 11, Mar. 2011.
- [17] 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.
- [18] O. Ourahmoun, “Les cellules solaires à base de matériaux,” *Univ. Tizi Ouzou*, vol. 21, pp. 516–520, Décembre 2018.

- [19] R. Badreddine and D. Cheriki, “Amélioration de la caractéristique optique et électrique d’une cellule photovoltaïque à base de pérovskite,” Mémoire de master, Université de Msila, 2021.
- [20] W. 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.
- [21] E. A. Gibson, Solar Energy Capture Materials, 2019 ebook collection. in Inorganic materials. 2019.
- [22] H.Chabane, “Etude d’un Cellule Solaire a Base De Structure Pin,” Thèse de magister, Université Hadj Lakhdar de Batna, 2015.
- [23] S. Bensalem, “Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires,” Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas - Sétif, 2011.
- [24] K. Helali, “Modélisation d’une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative,” Mémoire de magister, Université Mouloud Mammari - Tizi-Ouzzou, 2012.

CHAPITRE II

Silicium Poreux et K esterites, Notions fondamentales

II-1 Introduction

Depuis la découverte du silicium poreux, ce matériau fascinant a suscité un grand intérêt dans de nombreux domaines en raison de ses propriétés uniques. Dans ce chapitre, notre objectif est de fournir une étude approfondie sur le silicium poreux, y compris sa formation, ses applications et ses caractéristiques. Nous allons explorer les caractéristiques uniques du silicium poreux, telles que sa structure poreuse à l'échelle nanométrique, ses propriétés optiques et électriques, ainsi que ses applications dans différents domaines. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous aborderons l'état de l'art sur les k esterites CZTS et présenterons leurs propriétés intéressantes ainsi que leurs applications particulièrement dans les cellules solaires.

II-2 Partie I : Le silicium poreux

1- Silicium poreux

Le silicium poreux (SiP ou bien PS) est un matériau utilisé pour des applications potentielles en microélectronique et en biologie, en raison de ses procédés de fabrication simple et ses propriétés assez remarquables [25]. Il a été développé à la fin des années 1950 sous une forme micro structur e du silicium élaborée. Sa structure poreuse est connue pour avoir des propriétés structurales et optiques notamment l'isolation électrique et de la photoluminescence permettant son utilisation en photonique, détection et même en photovolta ique. Basé sur ses propriétés pour changer les paramètres optiques avec le changement la porosité, PS peut être utilisée pour concevoir un revêtement antireflet de cellules solaires, de guides d'ondes, résonateurs etc. [25], [26]. L'oxydation s'est aussi avérée être une bonne solution pour la stabilisation du matériau.

la [figure II-1](#) représente une illustration de la structure de canaux rectilignes obtenue par la méthode d'anodisation du silicium poreux, visualisée par microscopie électronique à balayage (MEB) [26].

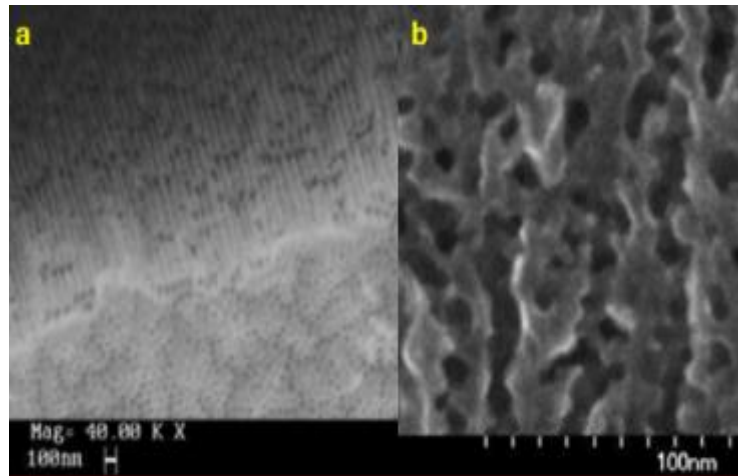


Figure II-1. Micrographie MEB de silicium poreux a) pores rectilignes de diamètre 80 nm obtenus avec une densité de courant de 250 mA/cm², b) pores tortueux de diamètre 10 nm obtenus avec une densité de courant de 50 mA/cm² [26].

2- Bref Historique

L'histoire de silicium poreux a commencée en 1956, Lorsque Uhler et ses collaborateurs ont observé l'apparition d'une couche fine brune sur les surfaces de silicium au cours d'une étude l'électro polissage avec une solution d'acide fluorhydrique HF [27].

En 1957, une observation similaire à été faite par Fuller et Ditzenberg mais dans une solution de HF HNO₃ et un courant électrique, un aspect poreux a été observé.

Le premier appareil basé sur SiP au monde a été breveté en 1976, un capteur de gaz, et en 1981, Imai des laboratoires NTT à Tokyo a créé une structure isolée électriquement à partir de silicium poreux en utilisant ses propriétés pour la première fois [27].

Ce n'est qu'en 1990 ou Canham a découvert la photoluminescence du silicium poreux à température ambiante un nouvel engouement a été déclenché. Cette propriété a retenu la plus grande attention, et a fait l'objet de nombreuses études de recherche [28]. Depuis, le silicium poreux peut être utilisé pour produire une grande variété de dispositifs.

3- Formation du silicium poreux

3-1 Régime de formation

Les propriétés optiques et morphologiques de la couche de silicium poreux dépendent fortement des paramètres d'anodisation suivants [27] :

- L'orientation cristallographique
- Le niveau de dopage du SiP
- La concentration et le pH d'acide fluorhydrique HF dans l'électrolyte
- La densité de courant anodique de formation J

- Le temps et la température d'anodisation
- L'éclairement éventuel du substrat

Il est possible de contrôler le processus de formation et de reproduire les résultats si ces paramètres sont contrôlés. Les réactions électrochimiques du silicium monocristallin présentent trois régimes différents dans l'acide fluorhydrique aqueux.

La [figure II-2](#) montre la densité de courant en fonction de la tension (I-V) pour la formation de silicium poreux dans une cellule électrolytique standard, dans laquelle trois zones peuvent être distinguées (A, B et C) [29].

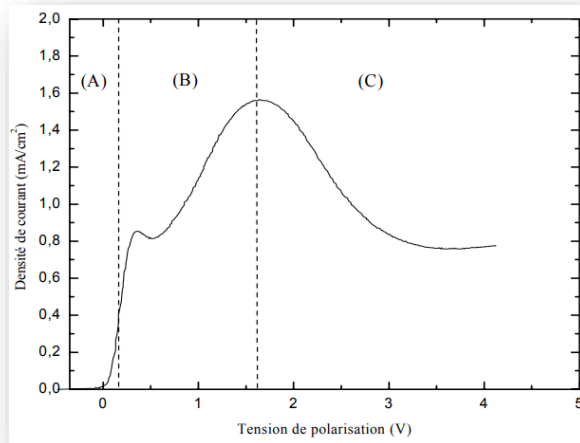


Figure II-2. Caractéristique densité de courant-tension réalisée sur un substrat de silicium dopé p ($100\Omega\cdot\text{cm}$) et avec une concentration d'acide fluorhydrique de 50%. La tension est déterminée par rapport à une électrode de référence [29].

Une dissolution localisée du silicium cristallin conduit à la formation de pores à la surface du silicium lorsque la tension est très basse (zone A). Des tensions plus élevées, inférieures à I_c , peuvent créer beaucoup de porosité et un polissage de la surface du substrat (zone de transition). En présence de hautes tensions, la dissolution de la surface du silicium se produit de manière homogène, entraînant un électro polissage (zone C).

3-2 Elaboration du silicium poreux

Les trois grandes méthodes d'élaboration du silicium poreux sont l'élaboration sèche dite « structuration surfacique par plasma », ou la dissolution chimique et l'anodisation électrochimique par la voie dite « humide ».

3-2-1 *Elaboration sèche*

Dans la voie d'élaboration sèche du silicium poreux, deux méthodes sont utilisées :

L'érosion par plasma (Spark Processing) et le dépôt par PECVD de nanocristaux de silicium. Cette méthode ne demande pas une solution aqueuse ou anodique. Lors de l'érosion par plasma[30], il se produit une décharge haute tension entre l'anode et le cathode (silicium). Le silicium émet des électrons qui vont être accélérés vers l'anode, ionisant les molécules de gaz de l'enceinte. L'impact de ces derniers à la surface du silicium lib re une chaleur suffisante à l'évaporation du silicium.

Le dépôt PECVD de nanocristaux de silicium est effectué à partir de silane SiH_4 par décharge dans un champ de radiofréquence. Il est possible d'obtenir des taux de dépôt de plusieurs nanomètres à la minute [31].

3-2-2 *Elaboration humide*

Les deux méthodes par élaboration humides sont la dissolution chimique et l'anodisation électrochimique.

3-2-2-1 *La dissolution chimique*

Elle consiste à obtenir du silicium poreux à partir d'une solution composée d'acide fluorhydrique HF, l'acide nitrique HNO_3 , et l'eau H_2O [32], sans intervention d'un courant électrique.

La formation de silicium poreux est conduite par l'oxydation puis la dissolution de l'oxyde mais de façon limitée, en faîte après un certain temps le processus chimique va s'arrêter par lui-même.

La [figure II-3](#) présente la dissolution chimique [33].

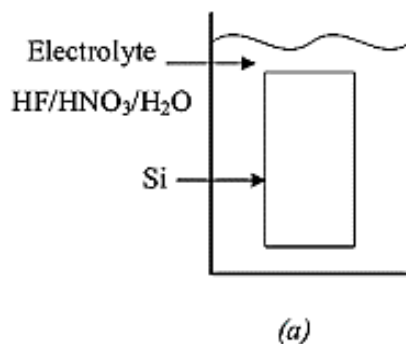


Figure II-3. La dissolution chimique – L'obtention du silicium poreux à partir d'une solution acide [33].

3-2-2-2 *L'anodisation électrochimique*

Le silicium poreux est réalisé par gravure électrochimique du silicium dans un électrolyte à base d'acide fluorhydrique HF. Cette réaction est appelée l'anodisation. Cette dernière consiste à faire varier un paramètre électrique au milieu d'un système électrolyte-silicium.

On distingue deux types de cellules d'anodisation, la première est au Téflon, la deuxième est en polypropylène :

- 1- Cellule d'anodisation simple : elle utilise un contact électrique métallique à l'arrière du wafer de silicium. Ce type de cellule permet l'obtention de couche de silicium poreux

homogènes et uniformes, et une bonne maîtrise de la porosité et l'épaisseur des couches [34].

- 2- Cellule d'anodisation à double réservoir : Elle est composée de deux demi-réservoir dans lesquels sont placé les mélanges Ethanol/HF où les deux faces sont en contact avec des électrolytes dans lesquelles plongent deux électrodes [27].

La figure II-4 présente respectivement les cellules d'anodisation simple et double réservoir pour la fabrication du silicium poreux [35].

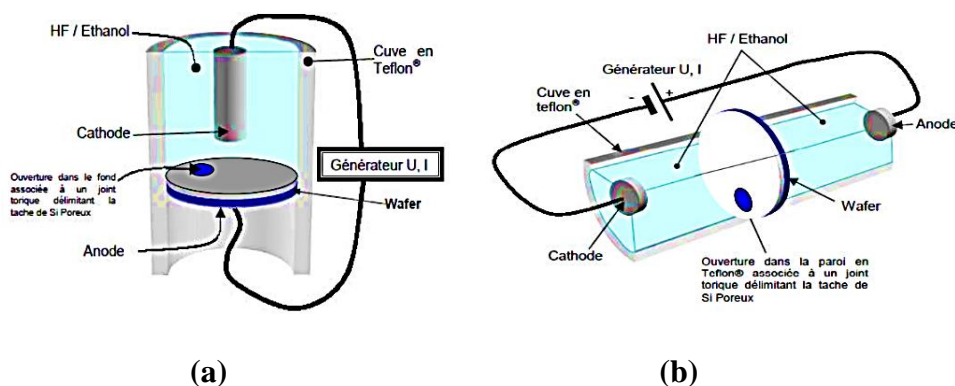


Figure II-4. (a) schéma d'une cellule d'anodisation « simple » avec contact métallique en face arrière. (b) schéma d'une cellule d'anodisation « double réservoir » avec contact sur la face arrière de type électrolyte[35].

4- Caractéristique de silicium poreux

Les caractéristiques morphologiques du silicium poreux sont obtenues par voie électrochimique comprennent leur porosité, épaisseur, surface spécifique et la morphologie.

4-1 La porosité

La porosité est définie comme le pourcentage en volume d'air dans le matériau. Elle peut varier entre 15 et 90%.

La porosité est déterminée par la formule suivante

$$\frac{\rho_{Si} - \rho_{SiP}}{\rho_{Si}} \tag{II-1}$$

ρ_{Si} : densité du silicium

ρ_{SiP} : densité du silicium poreux

Elle est obtenue par gravimétrie en utilisant la formule suivante

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \quad (\text{II-2})$$

Avec

m_1 : masse de l'échantillon avant anodisation

m_2 : masse de l'échantillon après anodisation

m_3 : masse de l'échantillon après dissolution totale de la couche poreuse dans la soude.

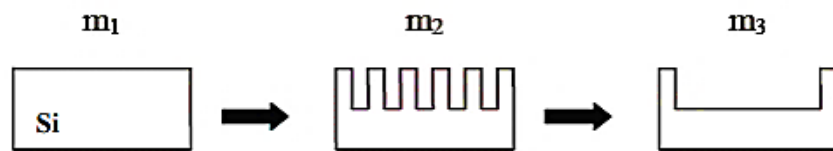


Figure II-5. Mesures de masse pour déterminer la porosité [36].

Il est important de noter que la porosité est une caractéristique importante du silicium poreux mais elle ne donne aucune information sur les propriétés microscopiques telles que la forme ou la taille des pores [28].

La porosité d'un matériau est contrôlée à travers les paramètres suivants :

- La densité de courant d'anodisation
- La résistivité du silicium et le type de dopage
- La concentration d'acide fluorhydrique HF

La [figure II-6](#) présente l'évolution de la porosité en fonction de la densité de courant d'anodisation pour deux valeurs de la concentration d'acide fluorhydrique HF [37]. La porosité de la couche poreuse augmente lorsque la densité de courant augmente, en effet l'augmentation de la densité de courant facilite l'opération d'anodisation. Cependant elle diminue lorsque la concentration en HF augmente.

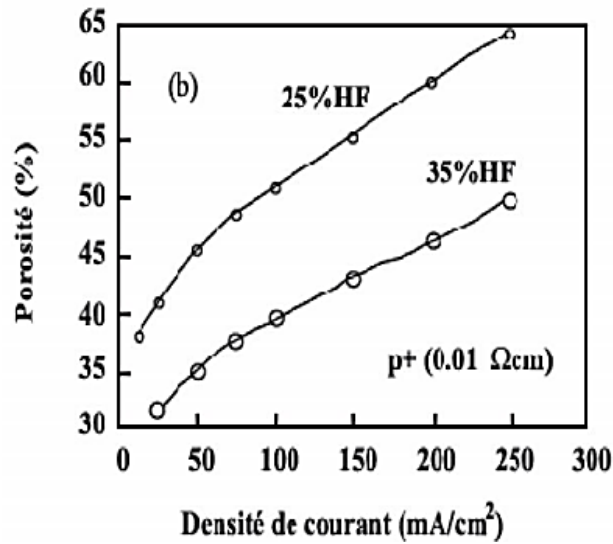


Figure II-6. Evolution de la porosité en fonction de la densité de courant obtenue pour deux concentrations en HF [37].

4-2 L'épaisseur

L'épaisseur est déterminée par observation en coupe par le MEB (microscope électronique à balayage) ou bien par pesée de l'échantillon, en utilisant la formule suivante [36].

$$d = \frac{m_1 - m_3}{\rho_{\text{Si}} \cdot A} \quad (\text{II-3})$$

Avec

d : épaisseur de la couche poreuse

ρ_{Si} : densité du silicium

A : aire de la surface porosifiée

m_1 : masse de l'échantillon avec anodisation

m_3 : masse de l'échantillon après dissolution totale de la couche poreuse dans la soude.

Comme on peut voir à la [figure II-7](#), l'épaisseur des couches de silicium poreuse croît linéairement avec le temps d'anodisation dans le cas des couches réalisées avec des substrats de type p et de type p+.

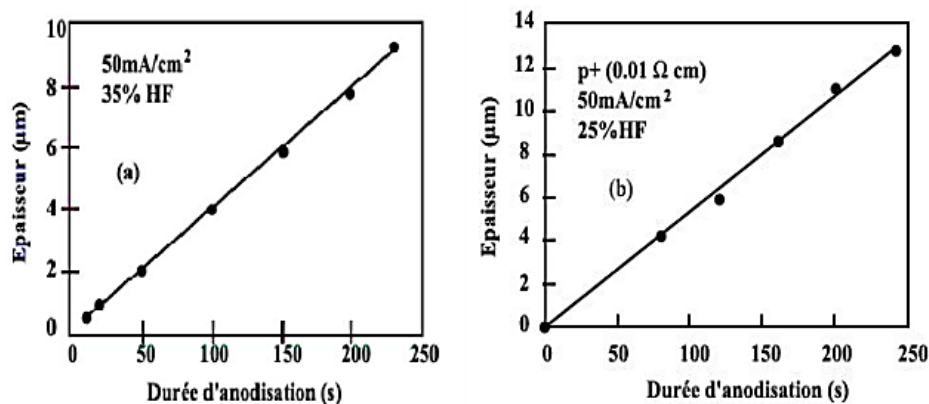


Figure II-7. Evolution de l'épaisseur de la couche poreuse avec la durée d'anodisation pour une densité de courant et une concentration en HF données [37].

4-3 La surface spécifique

La surface spécifique est l'une des caractéristiques les plus importantes du silicium poreux, elle est définie comme étant le rapport entre la surface développée et le volume de la couche poreuse.

En raison de sa nature poreuse, la couche présente une surface particulière importante, elle est mesurée par absorption de gaz. La surface spécifique diminue en fonction de l'augmentation de la porosité et peut passer de 900 m²/cm³ pour une porosité de 50% à environ 100 m²/cm³ pour une porosité de 95% [28].

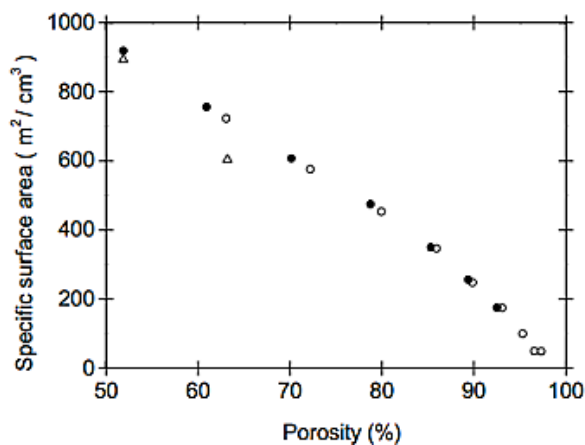


Figure II-8. Variation de la surface spécifique en fonction de la porosité pour deux porosités initiales différentes [38].

4-4 La morphologie

La morphologie des couches poreuse détermine les propriétés thermiques et physique du matériau. Il existe différents types de substrats utilisés pour l'anodisation du silicium poreux, qui détermine

sa morphologie, c'est-à-dire la taille et la forme de ses pores. On distingue une grande variété de pores, des morphologies spongieuses à cylindriques parfaites sont rencontrées dans des dimensions allant de 1 nm à 10 nm.

Selon l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée IUPAC [39], on distingue trois catégories du silicium poreux peut être obtenue sous différentes conditions et avec différentes morphologies comme le montre le [tableau II-1](#).

Tableau II-1. Classification des trois familles du silicium poreux [39].

Type du substrat	Forme des pores de la couche poreuse	Type de pores	Diamètres des pores (nm)	Surface spécifique
P, et n sous éclairément	Structure homogène	Nano poreux	1-5	300-800m ² /cm ³
P ⁺ , N ⁺	Structure colonnaire	Méso poreux	2-50	100-300m ² /cm ³
N	Structure spongieuse	Macro poreux	>50	10-100m ² /cm ³

La [figure II-9](#) établit la classification des types de silicium poreux en fonction de la taille des pores [40].

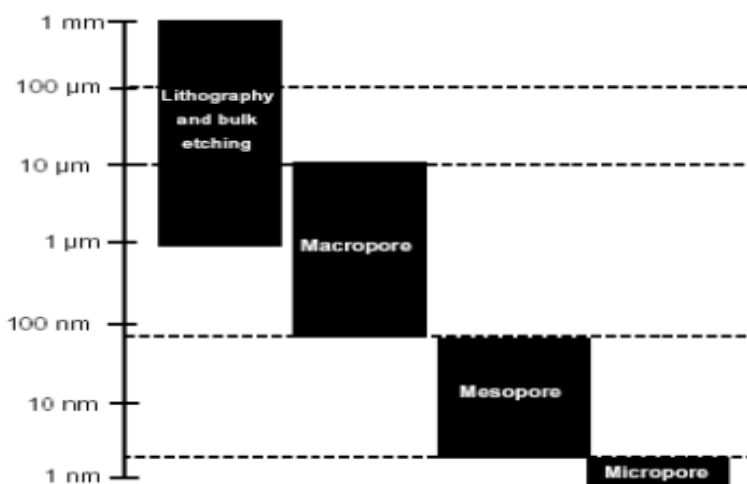


Figure II-9. Echelle des tailles des pores réalisées par gravure électrochimique du silicium poreux [40].

5- Propriétés du silicium poreux

Le silicium poreux a des propriétés optiques intéressantes, parmi-elles on distingue,

5-1 La photoluminescence

Après la découverte de Canham en 1990 dans le domaine visible du spectre (550nm-780nm), la possibilité d'utiliser le silicium comme matériau luminescent est apparue car contrairement au silicium massif, le SiP émet de la lumière à température ambiante sous excitation lumineuse (photoluminescence) ou excitation électrique ( lectroluminescence) [28].

Le spectre de luminescence est dans le visible, sa position spectrale dépend de sa porosité. Il montre un décalage vers le bleu avec une porosité croissante. Du fait du long temps de séjour dans l'électrolyte, l'émission lumineuse est plus intense (plus grande porosité) [27].

5-2 indice de réfraction

L'indice de réfraction du silicium poreux dépend de sa porosité. En général, plus la porosité est élevée, plus l'indice de réfraction est faible comme représenté par la [figure II-10](#). Cela est d  à la présence d'air dans les pores, qui a un indice de réfraction plus faible que le silicium. L'indice de réfraction peut être mesuré expérimentalement à l'aide de techniques telles que la microscopie électronique en transmission. Généralement, pour les cellules solaires, un indice de réfraction faible est souhaitable car il permet une meilleure absorption de la lumière solaire par le matériau [41].

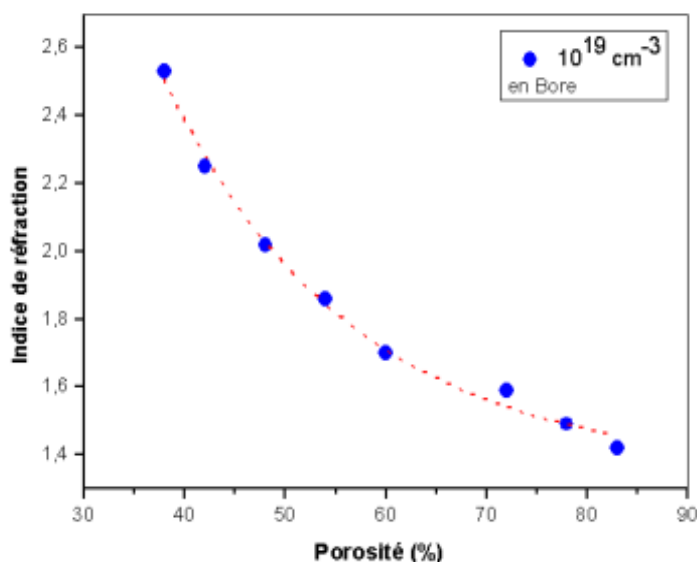


Figure II-10. Variation de l'indice de réfraction en fonction de la porosité pour un substrat de silicium dopé avec 10^{19} cm^{-3} de bore [41].

5-3 l'oxydation

L'utilisation de l'oxydation comme méthode de passivation présente plusieurs avantages, notamment sa simplicité et la possibilité de produire des surfaces biocompatibles pouvant être davantage fonctionnalisées par salinisation [28]. De plus, l'oxydation peut être effectuée en utilisant une variété de procédés, tels que l'oxydation thermique, l'oxydation chimique, l'oxydation assistée par plasma, l'oxydation renforcée par irradiation et l'oxydation anodique [27].

Par rapport aux oxydes natifs et aux oxydes chimiques, l'oxydation thermique fournit une isolation uniforme et relativement peu de défauts d'interface. Le groupement hydroxyle Si-OH sur la surface accélérera le processus d'oxydation, rendant toute la surface hydrophile [28].

5-4 La Réflectance

La [figure II-11](#) montre que la couche de PS formée sur l'échantillon de c-Si de type n (100) avec une structure poreuse a montré la réflectance effective la plus faible, réduisant la réflexion de la lumière et augmentant la capture de la lumière dans une plage de longueurs d'onde allant de 400 à 1000 nm. Cette couche de PS est composée de cristaux de nano-Si et de nanopores, et la réduction de l'indice de réfraction contrôlé par les pores en fonction de la porosité élevée a entraîné une diminution de la réflexion de la lumière. Par conséquent, le silicium poreux est considéré comme la meilleure option pour la couche ARC de PS dans les cellules solaires pour améliorer l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité [42].

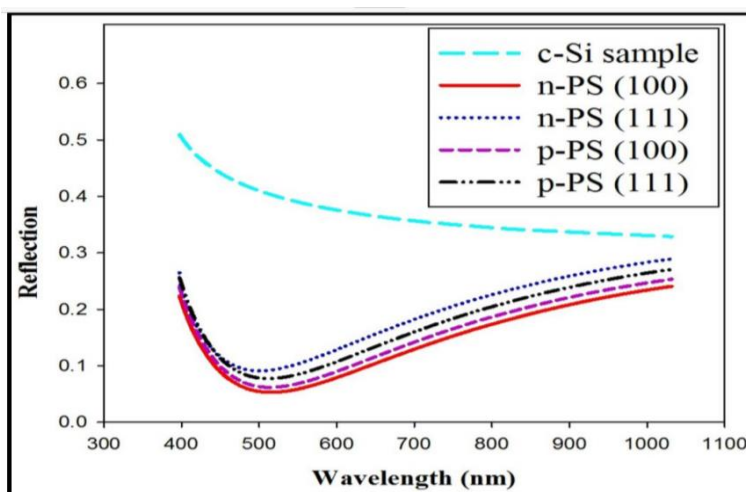


Figure II-11. Analyse des spectres de réflexion des couches de PS sur les régions de type n et p avec (100) et (111) orientations par rapport à l'échantillon de c-Si [42].

6- Application du silicium poreux

Les applications du silicium poreux sont tellement nombreuses et variées grâce à ses remarquables caractéristiques et propriétés [43]. Ce dernier est présent dans plusieurs domaines spécifiques

comprennent l'optoélectronique [44], le photonique [45], les capteurs [46], la biologie et la médecine [47], et même l'énergie et le photovolta ique.

Le silicium poreux est un matériau prometteur pour les cellules photovolta iques en raison de ses propriétés optiques et électriques uniques. Le silicium poreux présente une large gamme de tailles de pores et de densités, qui peuvent être contrôlées lors de sa fabrication, permettant ainsi de moduler ses propriétés optiques et électriques [43]. L'un des avantages du silicium poreux est sa capacité à absorber la lumière sur une plus grande plage de longueurs d'onde que le silicium massif, grâce aux effets de confinement quantique dans les pores. Cela signifie que les cellules photovolta iques en silicium poreux peuvent avoir une efficacité améliorée en convertissant plus efficacement la lumière en électricité [43].

II-3 Partie II : Les k esterites CZT(S,Se)

1- Etat de l'art

Le $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) est un matériau semi-conducteur prometteur pour les cellules solaires à couche mince. Il est composé de cuivre, de zinc, d'étain et de soufre, ce qui en fait un matériau à base de quaternaire avec des propriétés intéressantes pour la conversion de l'énergie solaire en électricité [48].

Le CZTS présente des avantages importants en tant que matériau pour les cellules solaires à couche mince. L'un des avantages les plus importants est sa haute abondance et sa faible toxicité. Contrairement aux matériaux à base de cadmium utilisés dans les cellules solaires à couche mince, le CZTS ne contient pas de métaux lourds toxiques, ce qui le rend plus écologique et plus sûr à utiliser. Les cellules PV basées sur des couches minces CZTS devraient avoir un rendement dépassent les 32% sur la base de calculs théorique.

Il possède des propriétés optiques prometteuses parmi-elles :

- Indice de réfraction de 2.07.
- Un fort coefficient d'absorption et une photoconductivité de l'ordre de 10^4 cm^{-1} .
- Rendement énergétique de 6.77%.

2- Propriétés du CZT (S, Se)

2-1 Propriété structurelle

Le CZTS et le CZTSe sont des composés quaternaires à base de k esterite qui ont des compositions chimiques différentes. Cependant, ils partagent des similitudes structurelles en raison de leur appartenance à la même famille de composés. Les deux matériaux ont une structure cristalline tétraogonale avec un groupe d'espace $I-42m$, où les atomes de Cu, Zn, Sn et S (ou Se) sont arrangés dans une structure de type tétraèdre. Cette organisation en tétraèdre de la structure cristalline est une caractéristique commune des composés de k esterite.

En raison de leur structure cristalline similaire, les deux composés ont des propriétés structurales apparentées telles que la symétrie cristalline, la taille de maille et le type de structure. Cependant, malgré ces similarités, les différences dans la composition chimique peuvent avoir un impact significatif sur les propriétés électroniques et optiques des matériaux, ce qui peut conduire à des différences de performances dans les applications photovoltaïques [49].

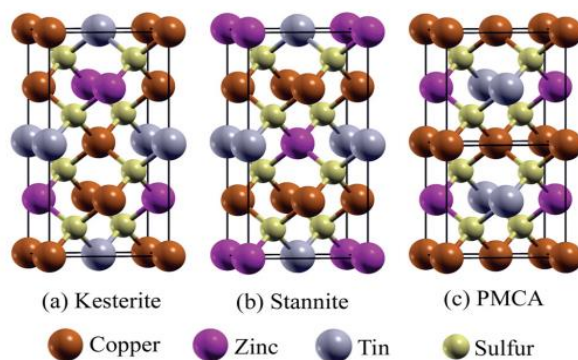


Figure II-12. Représentation schématique des structures de késterite et de stannite de CZTS. Les structures CZTSe sont obtenues en remplaçant S par des atomes de Se [50].

2-2 Propriétés physique

Voici un tableau montrant certaines caractéristiques physiques et chimiques des éléments Cu, Zn, Sn et S, utilisés dans la synthèse du matériau $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$.

Tableau II-2. Quelques propriétés physiques et chimiques des éléments Cu, Zn, Sn, S

<i>Paramètres</i>	Cu	Zn	Sn	S	Se
<i>Masse atomique (g/mol)</i>	63.546	65.409	118.71	32.07	78.96
<i>Configuration électronique</i>	[Ar] $3d^{10}4s^1$	[Ar] $4s^2 3d^{10}$	[Kr] $4d^{10} 5s^2 5p^2$	[Ne] $3s^2 3p^4$	[Ne] $3s^2 3p^4$
<i>Température de fusion (°C)</i>	1083.4	419.5	231.9	115.2	221

2-3 Propriétés optiques

De nombreuses études ont été menées sur les propriétés optiques des couches minces. Cette propriété fait référence au fait qu'il possède un coefficient d'absorption optique élevé ($> 10^4 \text{ cm}^{-1}$), quelques microns de couches minces peuvent absorber la lumière et la bande interdite directe (1,0 eV pour CZTSe, 1,5 eV pour CZTS) est proche de la valeur idéale pour les cellules solaires à des jonctions uniques, ce qui fait de CZTS un matériau idéal pour les applications photovoltaïques. Le CZTSe est connu pour avoir une meilleure absorption de la lumière et une plus grande capacité de diffusion des porteurs que le CZTS, ce qui conduit à une meilleure efficacité de conversion d'énergie solaire [51].

Le domaine du gap optique pour les alliages de késterites (CZTSe et CZTS) est représenté sur la Figure II-13 [52].

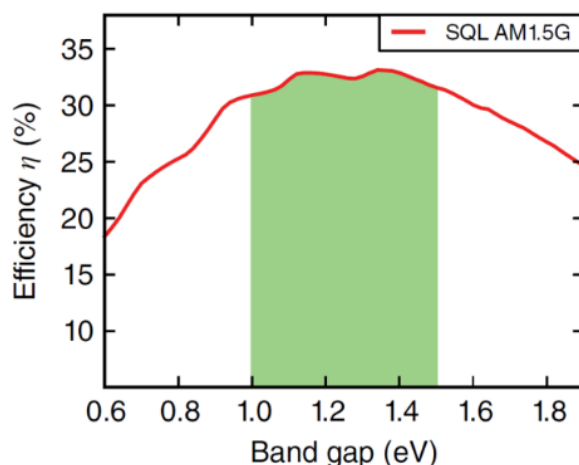


Figure II- 13 . Relation entre le bandgap de CZTS et le rendement de cellules solaires à base de CZTS déduit du modèle de Shockley-Queisser avec un spectre solaire AM1.5G [52].

2-4 Propriétés électrique

Le CZTS ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$) et le CZTSe ($\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$) sont des matériaux semi-conducteurs de type p-n qui ont des propriétés de transport électronique intéressantes pour les applications photovoltaïques. Bien que ces deux matériaux aient des propriétés électriques similaires en termes de conductivité et de mobilité des porteurs de charge, le CZTSe présente une performance supérieure en termes de conversion d'énergie solaire en raison de sa plus grande absorption de lumière [53].

En effet, la bande interdite du CZTSe est plus étroite que celle du CZTS, ce qui lui permet d'absorber une plus grande quantité de lumière solaire et d'augmenter l'efficacité de conversion d'énergie solaire. Par exemple, une étude a montré que le CZTSe a une efficacité de conversion d'énergie solaire de 11,6 %, tandis que le CZTS a une efficacité de conversion d'énergie solaire de 8,4 %.

La conductivité elektrische des deux matériaux est influencée par la teneur et la distribution des défauts de cristal, tels que les lacunes de Zn et les défauts de soufre ou de sélénium, ainsi que par la présence d'impuretés et la nature des jonctions p-n. La présence de défauts de cristal peut limiter la mobilité des porteurs de charge et réduire la conductivité elektrische du matériaux [53].

3- Applications du CZTS

Le CZTS et le CZTSe sont des matériaux importants pour l'industrie photovolta ique en raison de leurs propriétés optiques et électriques intéressantes, de leur faible c ut et de leur durabilité, et peuvent être utilisés pour produire de l'énergie solaire dans les zones rurales et éloignées où l'accès à l'électricité est limité. En plus de la production de cellules solaires à couche mince, le CZTS et le CZTSe peuvent également être utilisés dans la fabrication de modules photovolta iques flexibles et légers pour une intégration facile dans des applications mobiles [53].

II-4 Conclusion

L'intérêt de ce chapitre est de donner une étude bibliographique générale sur le silicium poreux et le matériaux CZTS afin de les présenter pour les appliquer ensuite dans une cellule solaire. Nous avons commencé par décrire brièvement l'histoire du silicium poreux, ensuite leur formation, caractéristique et propriété, en rappelant ses différents types. Nous avons fait ensuite une brève présentation des k sterites en insistant sur leur propriété structurelle, électriques et physiques. Quelques applications de ces deux matériaux dans l'industrie ont été présentées.

Bibliographie

- [24] J. Bustillo, “Caractérisation non destructive du silicium poreux par méthode ultrasonore,” Thèse de doctorat, Université François – Rabelais de Tours, 2013.
- [25] K.Rahmoun, H.I.Faraoun, G.Bassou, N.E. Chabane Sari, Determination of mechanical properties of porous silicon with image analysis and finite element, *Physics Procedia* 55 (2014) 390 – 395
- [26] K.Rahmoun, S.Fakiri, Modeling to predict effective dielectric constant of porous silicon low-dielectric-constant thin films *Spectroscopy letters* 47 (2014) 348–355 doi.org/10.1080/00387010.2013.859157
- [27] B. Gauthier-Manuel, “Nouvelles applications de ce matériau aux propriétés remarquables,” *Électrochimie & Nanosciences et Matériaux*, pp. 327–328, Mar. 2009.
- [28] S.Fakiri, “Caractérisation des couches et multicouches de différents types de silicium poreux oxydé,” Thèse de doctorat, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2018.
- [29] K.Khalidi, “L’immobilisation d’Acétylcholinestérase sur Silicium/ Silicium poreux fonctionnalisé : Application à la Réalisation de biocapteurs ampérométriques pour la détection des substances,” Thèse de doctorat, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2016.
- [30] T. Hadjersi , “Etude et réalisation d’un dispositif optoélectronique à base de silicium poreux obtenu par voie chimique,” Thèse de doctorat, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediane -USTHB-, 2005.
- [31] F. Edelberg and S. Bergh, “Luminescence from plasma deposited silicon film,” *Applied Physics*, vol. 81, no. 5, pp. 2410–2417, 1997.
- [32] H. Foll, M. Christophersen, and J. Carstensen and al, “Formation and application of porous silicon,” *Material science and engineering*, vol. 39, no. 4, pp. 93–141, Nov. 2002.
- [33] D.R. Turner, “Electropolishing silicon in hydrofluoric acid solutions,” *Electrochemical Society*, vol. 105, no. 7, pp. 402–408, 1958.
- [34] S.Fakiri, “Modélisation de la Permittivité Diélectrique du Silicium poreux Oxydé et Non Oxydé,” Mémoire de master, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2012.
- [35] I.Rahmoun, “Réalisation et caractérisation de Silicium poreux pour des applications optoélectroniques,” Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran (Mohamed Boudiaf), 2009.
- [36] T. Nychporuk, Nouvelles morphologies du silicium nanostructuré issues de l’anodisation électrochimiques : Elaboration, propriétés physico-chimiques et applications, Laboratoire de Physique de la Matière de IINSA de Lyon.
- [37] Z. Lyes, “Caractérisation du silicium en couche mince déposé sur le silicium poreux par la technique de pulvérisation DC magnétron,” Mémoire de magister, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediane -USTHB-, 2010.
- [38] A. Halimaoui, “Porous Silicon Science and Technology, edited by J.C. Vial and J. Derrien.,” Springer-Verlag. New Yrok, vol. 33, 1995.
- [39] N.Benasid, “Le Silicium Poreux et son rôle dans L’amélioration des performances des cellules photovoltaïques,” Mémoire de master, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2020.

- [40] V. Chaudhary and S. Sharma, "An overview of ordered mesoporous material SBA-15: synthesis, functionalization and application in oxidation reactions," *J. Porous Materials*, vol. 24, pp. pages741-749, 2017.
- [41] A. Najar and L.Haji, "L'amplification optique dans des guides d'onde en silicium poreux dopés aux terres rares," *L'Université de Rennes 1*, 2009.
- [42] K. A. Salman, Z. Hassan, and K. Omar, "Effect of Silicon Porosity on Solar Cell Efficiency," *Int J Electrochem Sci*, vol. 7, 2012.
- [43] M. Ayat, "Réalisation de capteurs chimiques et biocapteurs à base de silicium poreux et pillars de silicium pour la détection d'espèces chimiques toxiques," Thèse de doctorat, USTHB, 2019.
- [44] M. Delvaux and S. Demoustier-Champagne, "Biosensors and Bioelectronics," *SCImago*, vol. 18, no. 7, pp. 943–951, 2003.
- [45] C. Mazzoleni and L. Pavesi, "Application to optical components of dielectric porous silicon multilayers," *Appl. Physics Letters*, vol. 67, p. 2983, 1995.
- [46] Z.M Rittersma, A Splinter, and A Bödecker, "A novel surface-micromachined capacitive porous silicon humidity sensor," *Sens. Actuators B*, vol. 68, pp. 210–217, 2000.
- [47] O. I. Ksenofontova, A. V. Vasin, and V. V. Egorov, "Porous Silicon and Its Applications in Biology and Medicine," *Technical Physics*, vol. 59, pp. 66–77, 2014.
- [48] M. P. Suryawanshi, G. L. Agawane, and S. M. Bhosale, "CZTS based thin film solar cells: a status review," *Materials Technology*, vol. 28, no. 1, pp. 98–109, 2013.
- [49] R. Caballero, E. Garcia-Llamas, and J.M. Merino, "Non-stoichiometry effect and disorder in Cu₂ZnSnS₄ thin films obtained by flash evaporation: Raman scattering investigation," *Acta Mater*, vol. 65, pp. 412–417, Feb. 2014.
- [50] A. Khare, B. Himmetoglu, M. Johnson, D. J. Norris, M. Cococcioni, and E. S. Aydil, "Calculation of the lattice dynamics and Raman spectra of copper zinc tin chalcogenides and comparison to experiments," *J. Appl. Phys.*, vol. 111, no. 8, p. 083707, Apr. 2012, doi: 10.1063/1.4704191.
- [51] F. Belarbi, "Etude des performances d'une cellule solaire à base d'un matériau ternaire CuXS₂," Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2020.
- [52] J. Li et al., "Defect Control for 12.5% Efficiency Cu₂ZnSnSe₄ Kesterite Thin-Film Solar Cells by Engineering of Local Chemical Environment," *Adv. Mater.*, vol. 32, no. 52, p. 2005268, Dec. 2020, doi: 10.1002/adma.202005268.
- [53] 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.

Chapitre III

Modélisation et simulation

Résultats et discussion

III-1 Introduction

Le silicium poreux est un matériau prometteur pour augmenter l'efficacité des cellules solaires en raison de ses propriétés optiques et électroniques uniques. Il est souvent utilisé comme couche antireflet, car il permet de réduire la réflexion lumineuse.

Dans ce chapitre Nous allons examiner les effets de la couche de silicium poreux sur les performances des cellules solaires à base de CZTS, notamment leur rendement, leur facteur de forme, leur VCO et leur ICC. ; Ainsi nous avons choisi d'utiliser le logiciel SCAPS, développé par Marc Burgelman de l'Université de Gent en Belgique, comme outil de simulation numérique.

III-2 Présentation du logiciels SCAPS

SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) est un logiciel open-source développé par l'Université de Louvain en Belgique pour simuler les caractéristiques électriques des cellules solaires à l'aide de méthodes de simulation numérique [54].

Il est largement utilisé pour prédire les performances des cellules solaires. La simulation sur SCAPS permet de prédire les caractéristiques électriques des cellules solaires en fonction de leurs paramètres géométriques, optiques et électriques.

Elle permet également d'analyser les effets de différents facteurs tels que les variations de température, l'irradiance solaire, la concentration solaire, etc. sur les performances des cellules solaires. En utilisant SCAPS, les scientifiques et les ingénieurs peuvent évaluer rapidement et efficacement les performances des cellules solaires et optimiser leur conception pour atteindre des performances optimales [55].

La simulation sur SCAPS est donc un outil précieux pour la recherche et le développement de cellules solaires plus efficaces et plus rentables.

III-Paramètres optiques et physiques des cellules étudiées

Le [tableau III.1](#) ci-dessous représente les paramètres essentiels des matériaux utilisés dans la simulation des cellules étudiées.

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

	CZTS	CZTSe	NiO	CdS	Al:ZnO	i:ZnO	n-PS
Epaisseur(μm)	Variable	Variable	0.04	0.08	0.05	0.05	Variable
Energie de bande de gap (eV)	1.45	1	3.8	2.42	3.33	3.33	Variable
Affinité Electronique (eV)	4.5	4.6	1.46	4.4	4.50	4.50	4.09
Permittivité diélectrique	9	8.6	10.07	10	8.12	8.12	Variable
Densité de bande de conduction effective (cm^{-3})	$2.2 \cdot 10^{18}$	$7.91 \cdot 10^{17}$	$2.8 \cdot 10^{19}$	$1.2 \cdot 10^{18}$	$4.1 \cdot 10^{18}$	$4.1 \cdot 10^{18}$	$2.8 \cdot 10^{18}$
Densité effective de la bande de valence (cm^{-3})	$1.9 \cdot 10^{19}$	$4.5 \cdot 10^{18}$	10^{19}	$1.8 \cdot 10^{19}$	$8.2 \cdot 10^{18}$	$8.2 \cdot 10^{18}$	$1.004 \cdot 10^{19}$
Mobilité électronique (cm^2 / Vs)	60	40	12	100	100	100	1500
Mobilité des trous (cm^2 / Vs)	20	10	2.8	50	20	20	450
Concentration de dopage des donneurs N_D	0	0	0	$2.1 \cdot 10^{17}$	10^{21}	10^{21}	10^{22}
Concentration de dopage des accepteurs N_P	10^{19}	$5 \cdot 10^{17}$	10^{22}	0	0	0	0
Références	[56]	[57]	[58]	[59]	[59]	[57]	[60]

IV- Modélisation : structures étudiées

L'objectif de ce travail consiste à étudier l'impact du silicium poreux sur les performances des cellules photovoltaïques basées sur le matériau CZTS. Pour ce faire, deux modèles de cellules photovoltaïques à base de CZTS seront examinés. Nous allons tout d'abord étudier le premier modèle, qui consiste en une cellule à base de CdS et de CZTS, puis nous allons ajouter une couche de silicium poreux (Figure 1 a,b) pour évaluer la différence de performance. Le deuxième modèle (Figure 2 a,b) sera une cellule à base de CZTSe et de NiO, et sera traité de la même manière que le premier modèle, c'est-à-dire sans et avec une couche de silicium poreux. Les modèles sont représentés par les figures III.1 et III.2 suivantes :

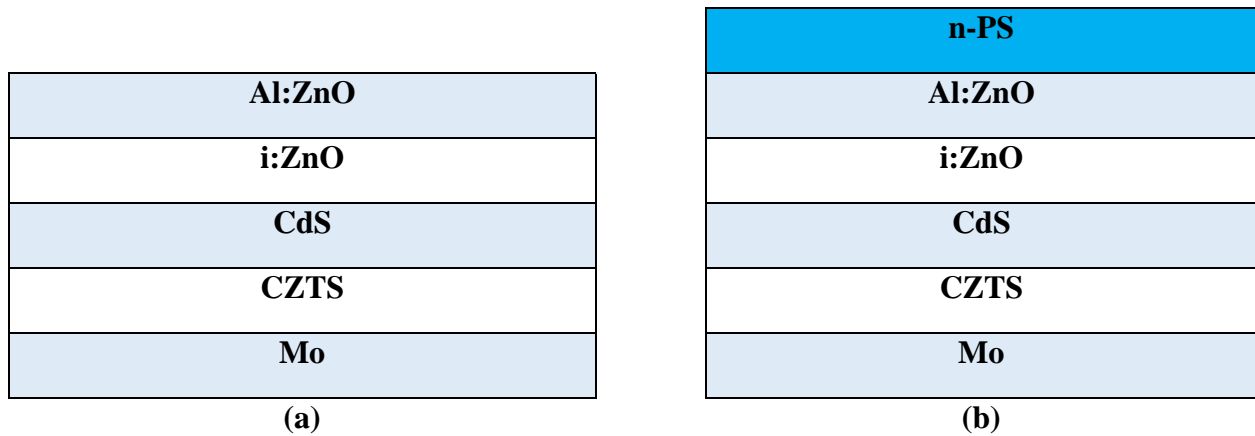


Figure III-1. Structures de cellules à base de CZTS (a) sans Silicium poreux (b) avec silicium poreux (**Modèle 1**).

Le modèle à base de CZTSe est représenté par les schémas de la figure III.2 ci-dessous

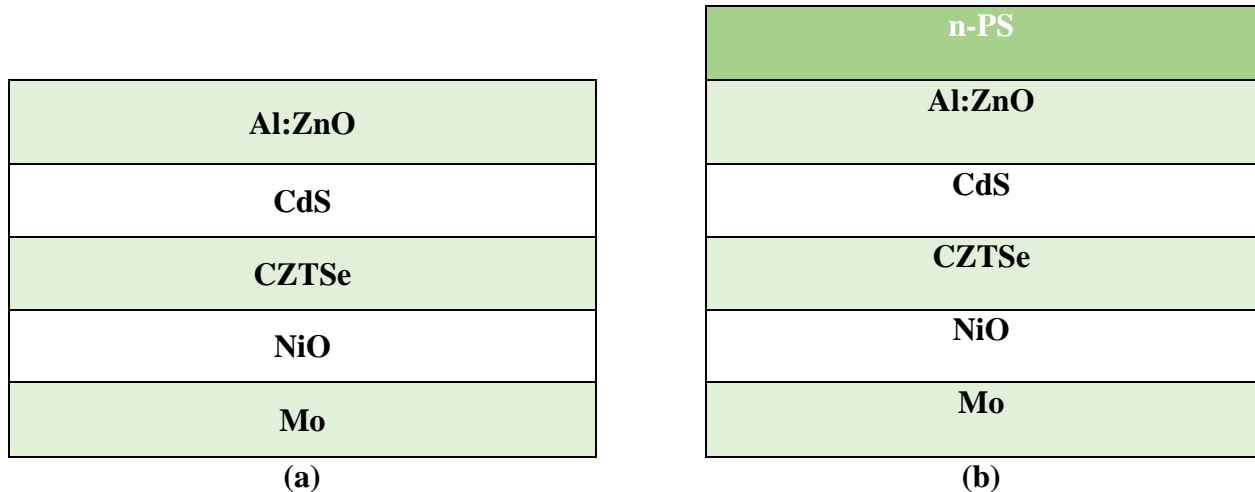


Figure III-2. Structures de cellules à base de CZTSe sans (a) Silicium poreux et (b) avec silicium poreux de type n, (**Modèle 2**).

V- Etude des différents modèles

V-1 Etude de la cellule à base de CZTS du Modèle 1

V-1-1 Effet de la variation de l'épaisseur de CZTS du modèle 1a

Des travaux expérimentaux ont été menés par l'équipe Saad Eddine Lachhab et al [61] pour des épaisseurs variantes entre 0.3 et 4 μ m. Notre simulation est menée en faisant varier l'épaisseur du CZTS de 0.1 à 3.5 μ m. Les résultats obtenus sont représentés sur le [tableau 2](#).

Tableau III-2. la cellule CZTS sans silicium poreux

Epaisseur CZTS (μ m)	Vco (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF%	η %
0.1	0.60	6.55	71.57	3.65
0.5	0.62	18.44	78.24	8.98
1.0	0.64	23.32	80.67	12.10
1.5	0.65	25.39	81.87	13.62
2.0	0.66	26.52	82.33	14.49
3.5	0.67	28.07	83.28	15.88

En effet nous remarquons qu'une couche de silicium poreux d'une épaisseur de 39 μ m comme réalisé expérimentalement par Salman et al. [62] et de 91% de porosité ([figure III.3](#)) permet d'augmenter les performances de la cellule ([Tableau 3](#)) donnant un rendement passant de **15.88%** à **21.30%** avec une couche de CZTS de 3.5 μ m comme nous avons montré précédemment.

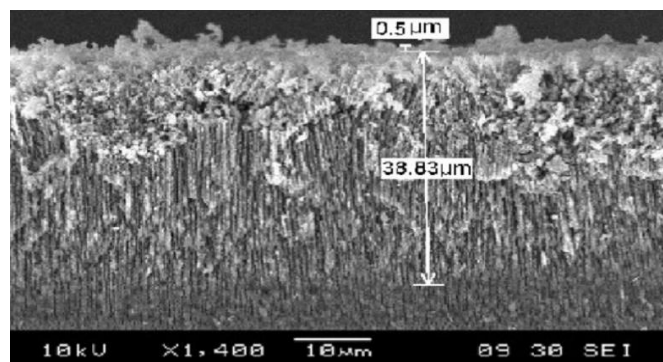


Figure III-3. Micrographie MEB de la cellule en silicium poreux[62].

De la même manière nous faisons varier l'épaisseur de la couche CZTS pour le modèle avec une couche de silicium poreux. Le [tableau 3](#) représente les résultats de la simulation.

Tableau III-3. La cellule CZTS avec silicium poreux

Epaisseur CZTS (μm)	V _{co} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF%	η%
0.1	0.77	6.68	71.80	3.74
0.5	0.85	18.80	77.77	12.43
1.0	0.95	23.60	73.21	16.56
1.5	1.07	25.63	67.22	18.46
2.0	1.18	26.74	61.85	19.62
3.5	1.53	28.25	49.13	21.30

Le [tableau 4](#) récapitule notre travail, à la fois avec et sans silicium poreux en comparaison avec les résultats obtenus par Benzetta et al [59].

Tableau III-4. Tableau récapitulatif des résultats

Cellules	V _{co} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF%	η%
AZO/ZnO/CdS/CZTS	0.67	28.07	83.28	15.88
AZO/ZnO/CdS/CZTS [59]	0.64	35.12	82.15	15.10
PS/AZO/ZnO/CdS/CZTS	1.53	28.25	49.13	21.30

Les courbes représentatives des caractéristiques de la cellule I-V, V_{co}, J_{sc}, FF, η sont représentées par les [figures \(4-8\)](#) pour les modèles avec et sans silicium poreux.

Les courbes obtenues mettent clairement en évidence l'impact significatif de l'ajout de silicium poreux sur les performances de la cellule photovoltaïque. Les valeurs obtenues pour les différents paramètres tels que le V_{co}, l'J_{sc}, le FF et le rendement, indiquent une nette amélioration des performances de la cellule avec l'ajout de silicium poreux. En effet, le V_{co} passe de 0.6793V à 1.5343V, l'J_{sc} augmente légèrement de 28.075657mA/cm² à 28.256547mA/cm², alors que le FF diminue de 83.28% à 49.13%. Enfin, le rendement passe de 15.88% à 21.30%. Ces résultats confirment l'efficacité de l'utilisation du silicium poreux pour améliorer les performances des cellules.

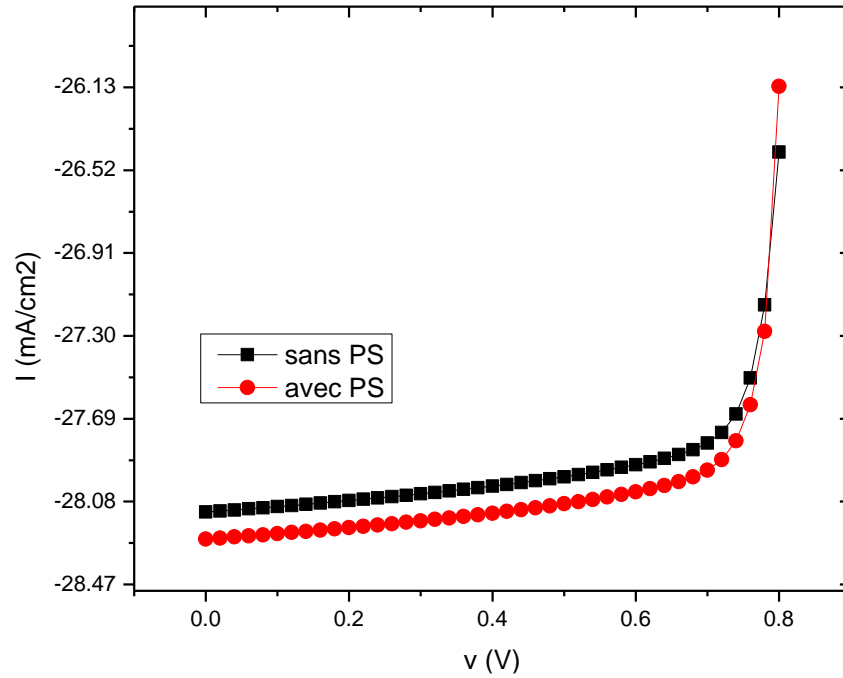


Figure III-4. Variation de la densité de courant I en fonction du voltage V pour les deux cas sans et avec silicium poreux.

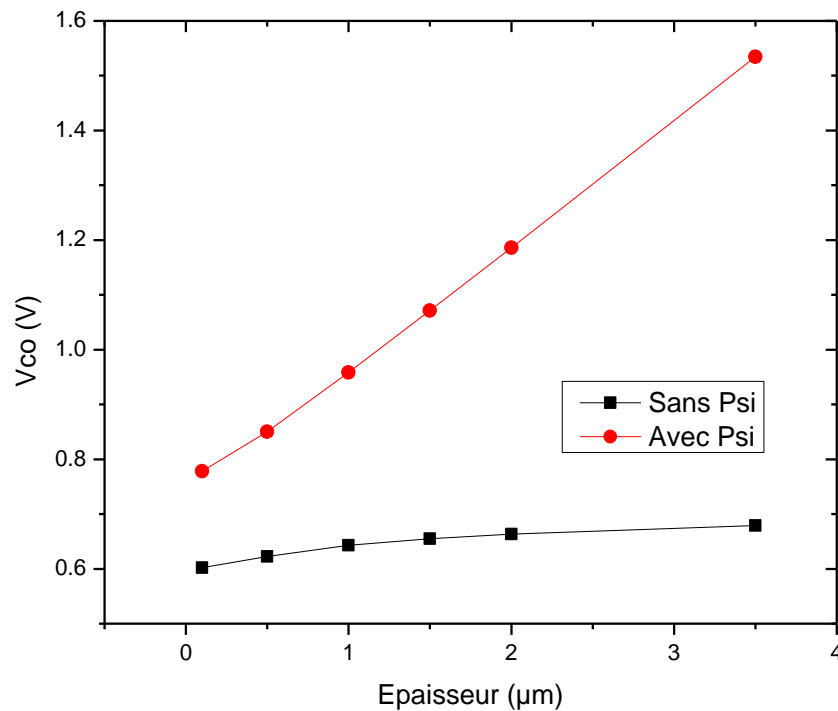


Figure III-5. Variation du V_{co} en fonction de l'épaisseur des deux cellules.

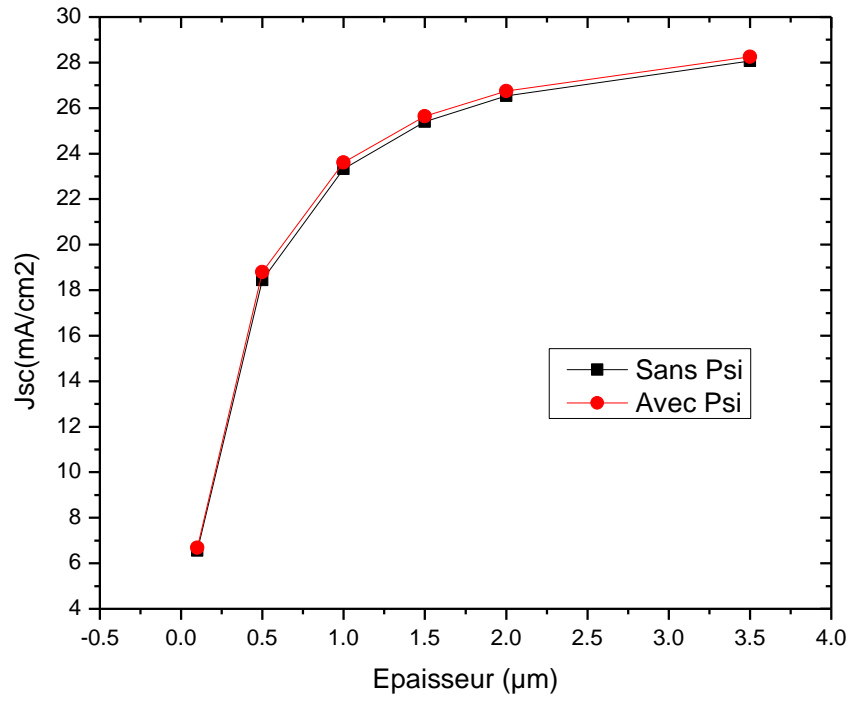


Figure III-6. Variation de Jsc des deux cellules en fonction de l'épaisseur.

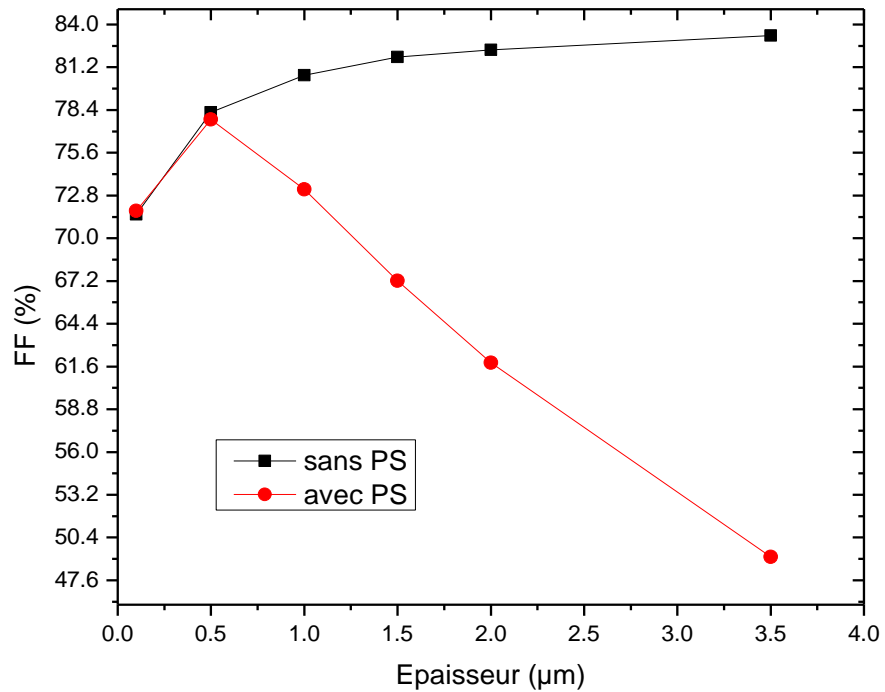


Figure III-7. Variation du FF des deux cellules en fonction de l'épaisseur.

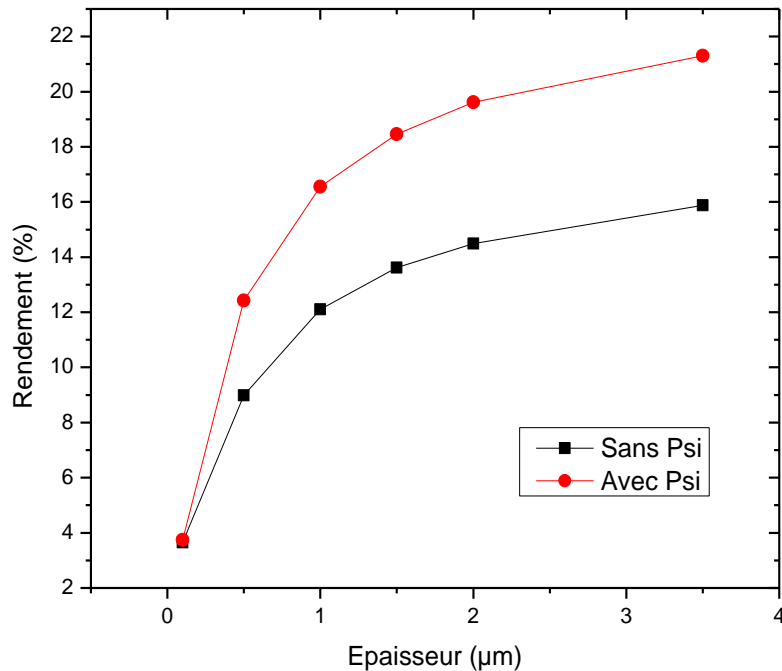


Figure III-8. Variation du rendement des deux cellules en fonction de l'épaisseur.

V-1-2 Effet de la variation de l'Énergie de gap de la couche CZTS pour le modèle (1 b) avec silicium poreux

Après avoir obtenu de bonnes performances de la cellule du modèle 1b, nous allons maintenant procéder à l'optimisation de la cellule en examinant l'effet de la variation de l'énergie de bande interdite et de la température, afin d'améliorer encore davantage ses performances.

Nous remarquons que le meilleur rendement est obtenu pour $E_g=1.1$ eV passant de **21.30%** à **30.28%**.

Les autres grandeurs physiques, telles que le facteur de forme FF, la densité du courant de court-circuit J_{sc} et la tension en circuit ouvert V_{oc} , ont également été étudiées pour différentes énergies de gap de CZTS (tableau 5).

Tableau III-5. Résultats de la variation de l'énergie de gap de la cellule modèle (1b).

Energie de gap du CZTS	Vco (V)	Jsc(mA/cm2)	FF%	η %
1.0	0.77	45.69	84.49	29.85
1.1	1.09	41.35	66.81	30.28
1.2	1.51	36.67	49.67	27.62
1.3	1.53	33.48	49.07	25.24
1.4	1.52	30.61	49.29	23.07
1.5	1.53	26.74	49.23	20.16

Les résultats de ces études sont présentés dans les figures (8-11). Le facteur de forme (FF) diminue avec l'augmentation de l'énergie de gap tout comme la densité du courant de court-circuit (Jsc), tandis que la tension en circuit ouvert (Vco) augmente avec l'augmentation de l'énergie de gap.

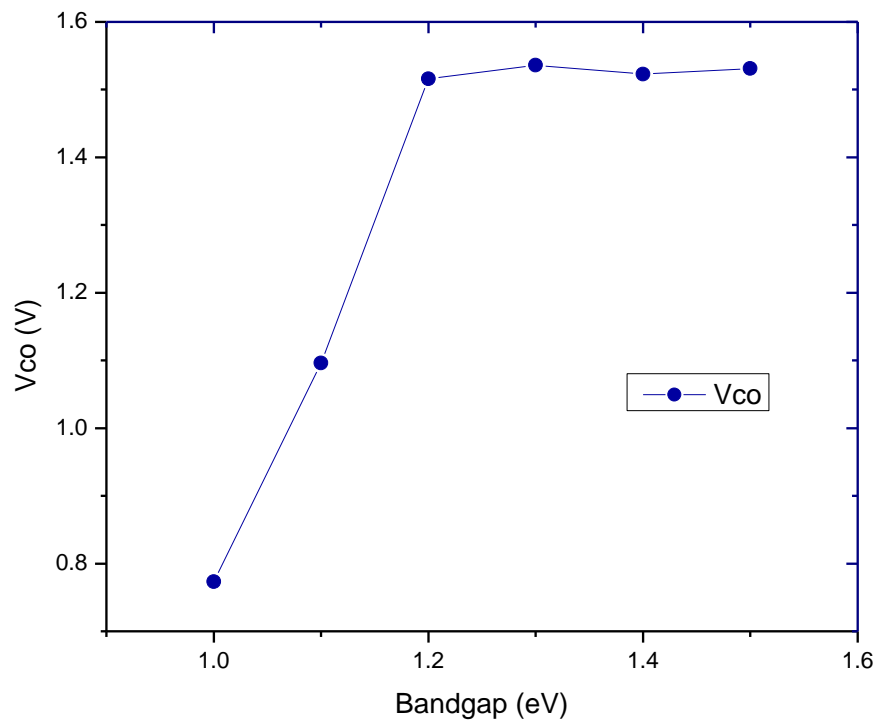


Figure III-9. Variation du Vco en fonction de l'énergie de gap de la cellule modèle (1b).

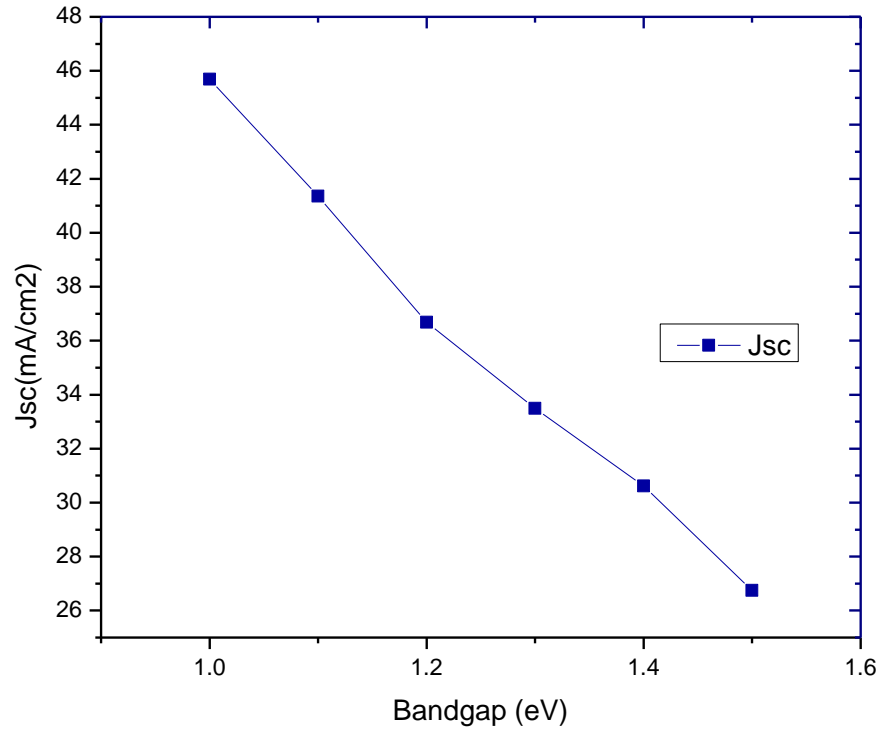


Figure III-10. Variation de J_{sc} en fonction de l'énergie de gap de la cellule modèle (1b).

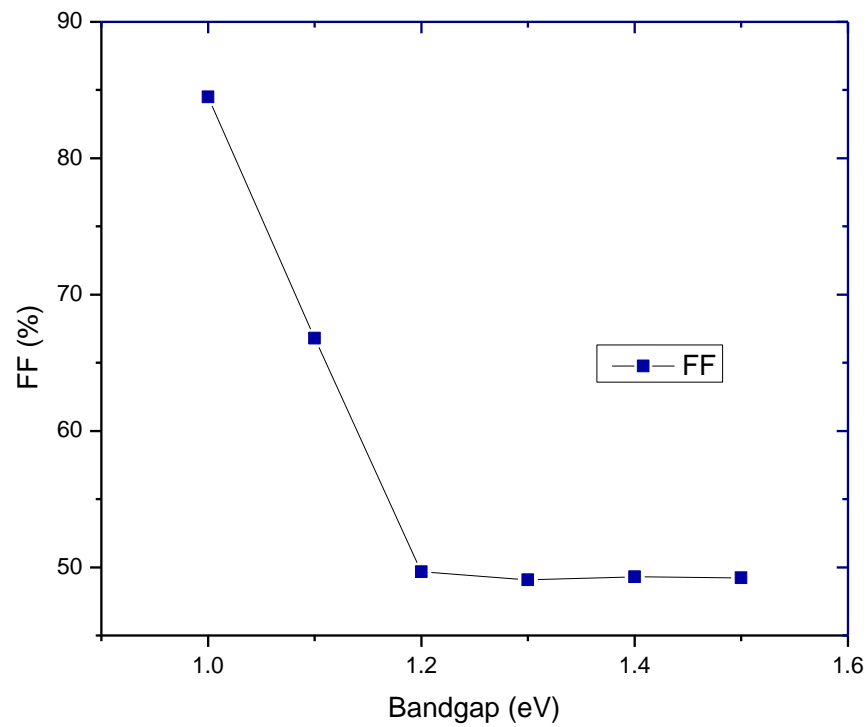


Figure III-11. Variation du facteur de forme FF en fonction de l'énergie de gap de la cellule modèle (1b).

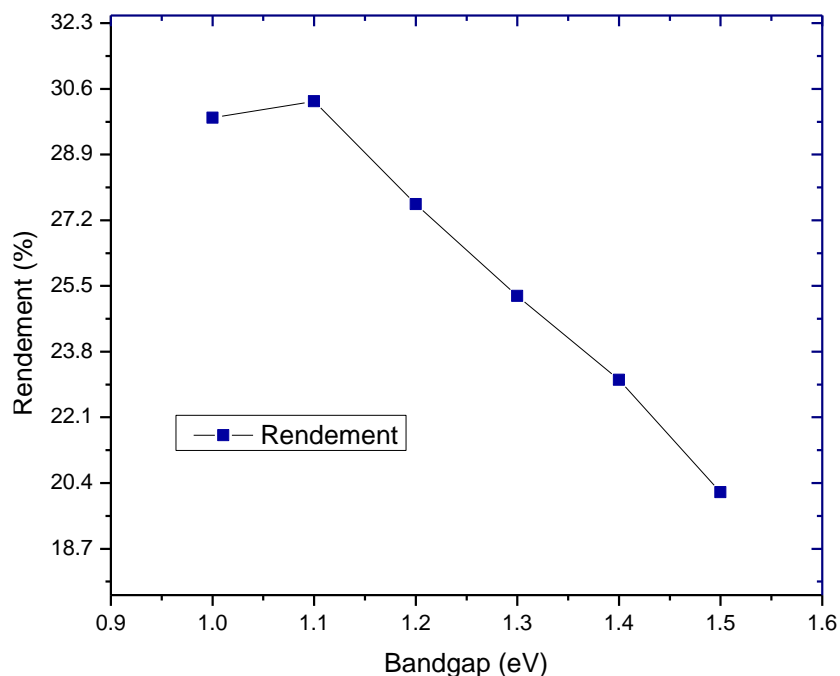


Figure III-12. Variation du Rendement en fonction de l'énergie de gap de la cellule modèle (1b).

V-1-3 Effet de la variation de la température pour le modèle (1 b) avec silicium poreux

La température a un effet significatif sur les performances de la cellule solaire à base de CZTS. À mesure que la température augmente, plusieurs phénomènes se produisent qui peuvent affecter les performances de la cellule solaire

D'après le tableau 6 et les figures (12-15) on peut conclure l'effet de la variation de la température sur les grandeurs physiques de notre cellule solaire.

Tableau III-6. Résultats de la variation de la température sur la cellule modèle (1b).

Température (K)	V _{co} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF%	η%
300	1.53	28.25	49.13	21.30
350	2.04	28.31	37.58	21.76
400	2.56	28.35	30.29	22.00
450	2.76	28.37	28.13	22.05
500	1.86	28.38	40.68	21.54

Lorsque la température a été augmentée de 300 à 500 K, les résultats montrent que le rendement maximal a été atteint à une température de 450 K, avec une valeur allant de 21,30 à 22,05 %. De même, la tension en circuit ouvert (V_{co}) a également atteint sa valeur maximale à cette température. Toutefois, pour le facteur de forme, la valeur maximale a été enregistrée à une température de 300 K. En outre, la densité du courant de court-circuit (J_{sc}) a augmenté avec l'augmentation de la température.

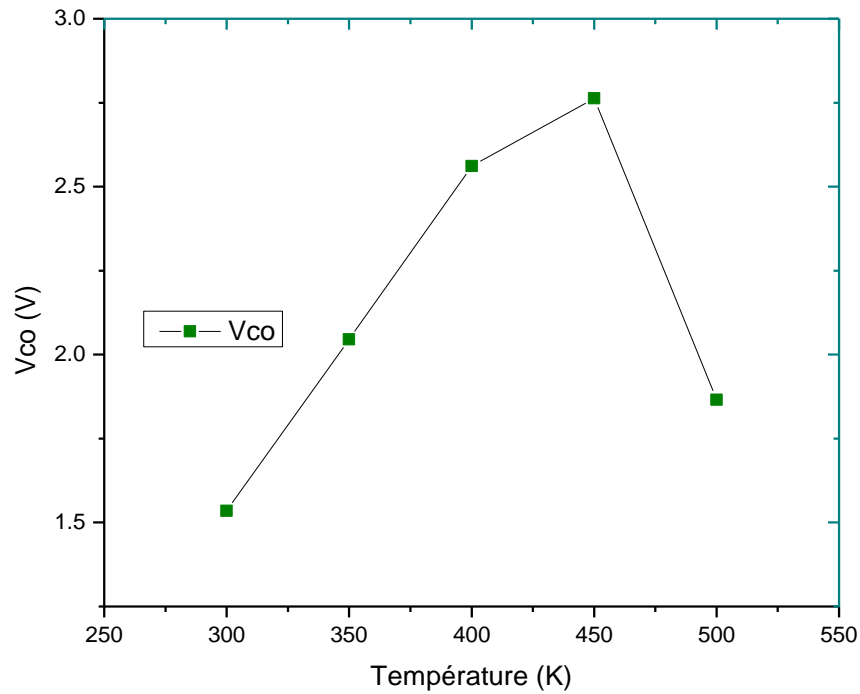


Figure III-13. Variation de V_{co} en fonction de la température de la cellule modèle (1b).

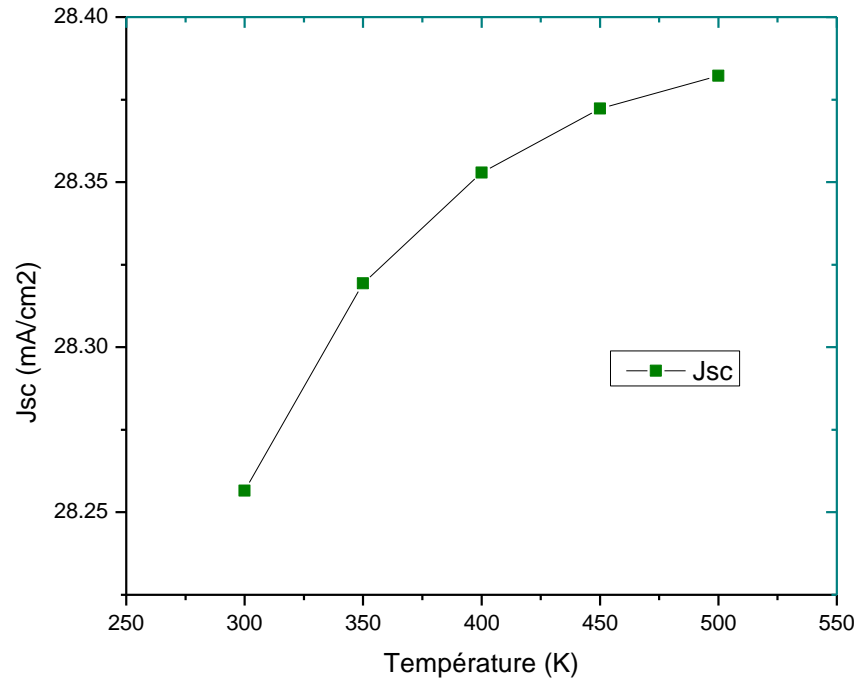


Figure III-14. Variation de J_{sc} en fonction de la température de la cellule modèle (1b).

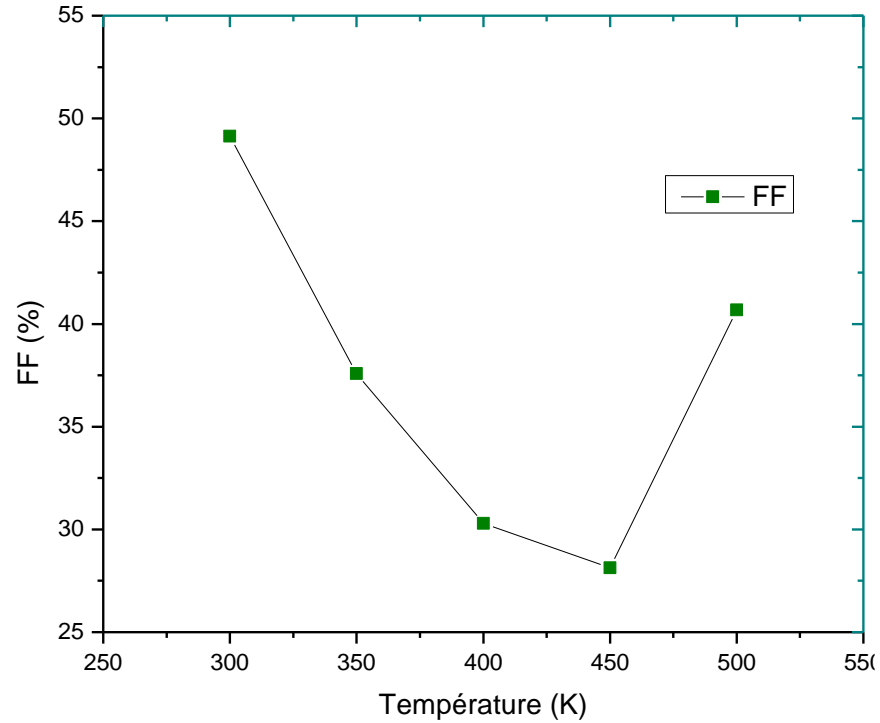


Figure III-15. Variation de FF en fonction de la température de la cellule modèle (1b).

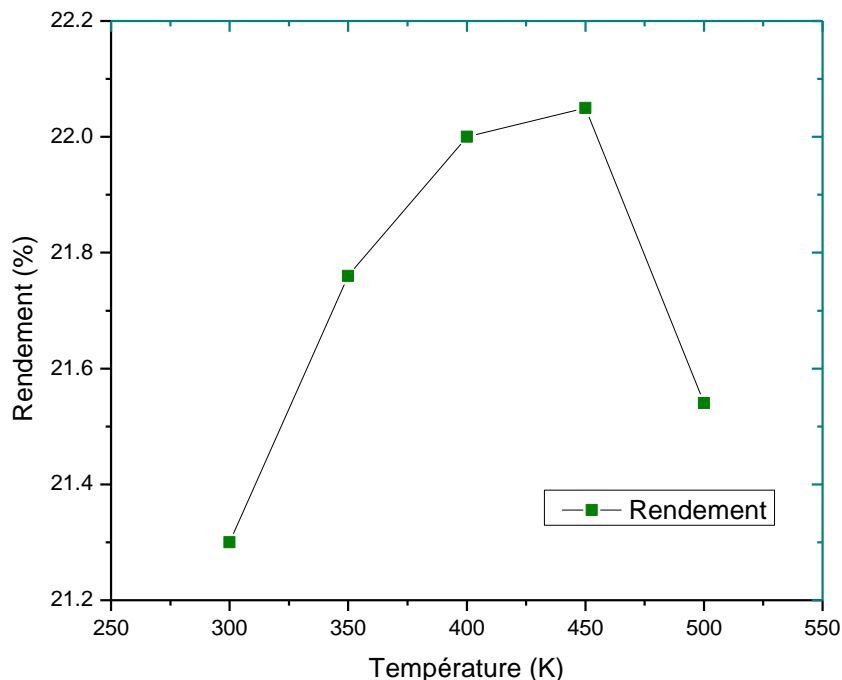


Figure III-16. Variation du rendement en fonction de la température de la cellule modèle (1b).

V-2 Effet de la variation de l'épaisseur de CZTSe (modèle 2a)

En 2020, une recherche a été menée sur l'utilisation du NiO dans les cellules solaires. Les résultats ont été publiés dans la revue ACS Applied Energy Materials par l'équipe Cheng li et al [63]. Les chercheurs ont fabriqué une cellule solaire à base de NiO en utilisant une couche mince de NiO comme matériau de transport de trous. Les résultats ont montré que la cellule solaire à base de NiO avait un rendement de conversion élevé pour une cellule solaire à couche mince.

Notre recherche vise à étudier la première structure de cellule solaire à couches minces, (modèle 2a), qui est composée de cinq couches : AZO, CdS, CZTSe, NiO et Mo. Nous allons également ajouter du silicium poreux à la structure pour évaluer l'impact de ce matériau sur les performances de la cellule solaire (**modèle 2b**).

Les résultats de la simulation que nous avons effectués avec le logiciel SCAPS sont présentés dans les [tableaux 7 et 8](#), qui illustrent respectivement les performances de la cellule solaire avec et sans l'ajout de silicium poreux en faisant varier l'épaisseur de la couche active CZTSe.

Tableau III-7. Résultats de la cellule CZTSe sans silicium poreux

Epaisseur CZTSe(μm)	V _{co} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF%	$\eta\%$
0.1	0.83	25.61	85.76	18.23
0.3	0.82	40.79	86.02	28.89
0.5	0.81	44.79	85.90	31.35
0.7	0.80	46.27	85.94	32.13
0.9	0.80	46.98	85.93	32.41
1.1	0.79	47.39	85.72	32.43

Tableau III-8. Résultats de la simulation pour la cellule CZTSe avec silicium poreux

Epaisseur (μm)	V _{co} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF%	$\eta\%$
0.1	0.91	25.33	86.58	20.05
0.3	0.91	40.20	86.45	31.94
0.5	0.91	44.00	86.35	34.78
0.7	0.91	45.30	86.23	35.61
0.9	0.90	45.85	86.10	35.85
1.1	1.72	46.10	44.88	35.80

Le [tableau III.9](#) récapitule notre travail, à la fois avec et sans silicium poreux, en comparaison avec les résultats obtenus par l'équipe de Abdelaziz et al [58]. Une amélioration du rendement est nettement observée allant de **32.41** à **35.85%**. Les variations de I-V, V_{CO}, I_{SC}, FF et le rendement pour les deux modèles étudiés sont illustrées par les [figures \(17-21\)](#).

Tableau III-9 . Tableau récapitulatif des résultats

Structure pour e(CZTS)=0.9 μm	V _{co} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF%	$\eta\%$
AZO/CdS/CZTSe/NiO/Mo	0.80	46.98	85.93	32.41
AZO/CdS/CZTSe/NiO/Mo [58]	0.83	45.41	86.49	32.98
PS/AZO/CdS/CZTSe/NiO/Mo	1.72	46.10	44.88	35.85

En observant les courbes représentatives des figures (17-21), on peut noter une augmentation du V_{co} et du rendement jusqu'à une épaisseur de $0,9 \mu\text{m}$ du CZTSe. Cela suggère que la valeur de $0,9 \mu\text{m}$ est l'épaisseur optimale pour obtenir un meilleur rendement de la cellule solaire à base de CZTSe.

En revanche, les courbes pour de la densité du courant de circuit court (J_{SC}) et le facteur de remplissage (FF) diminuent en fonction de l'épaisseur du matériau CZTSe. Ces résultats indiquent que l'épaisseur optimale du matériau CZTSe peut varier en fonction des paramètres de mesure et des caractéristiques spécifiques de la cellule solaire.

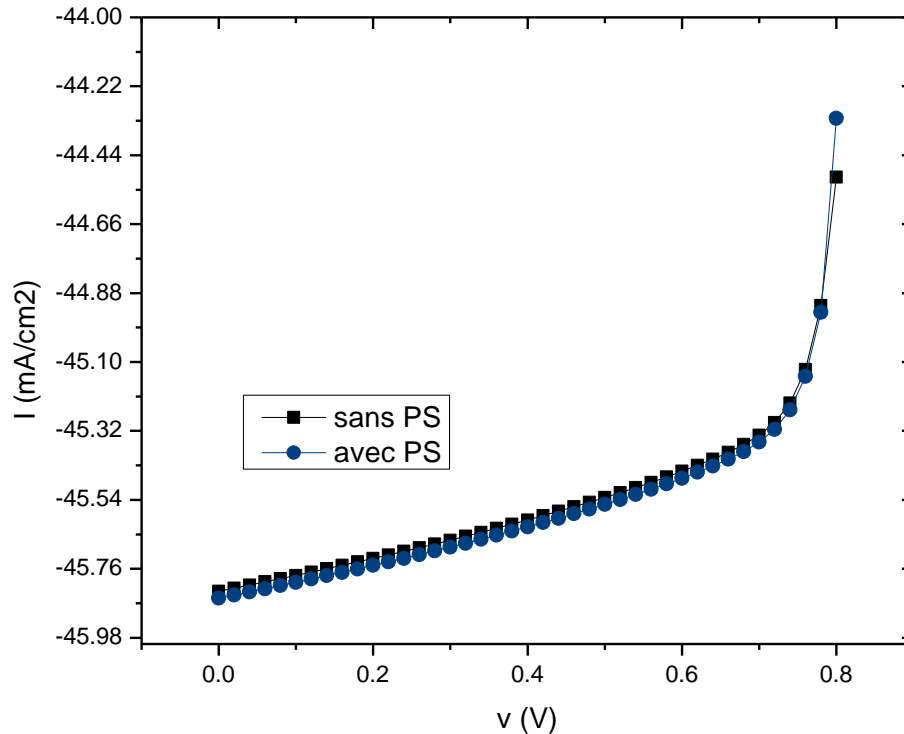


Figure III-17. Variation de la densité de courant I en fonction du voltage V pour les deux cas sans et avec silicium poreux.

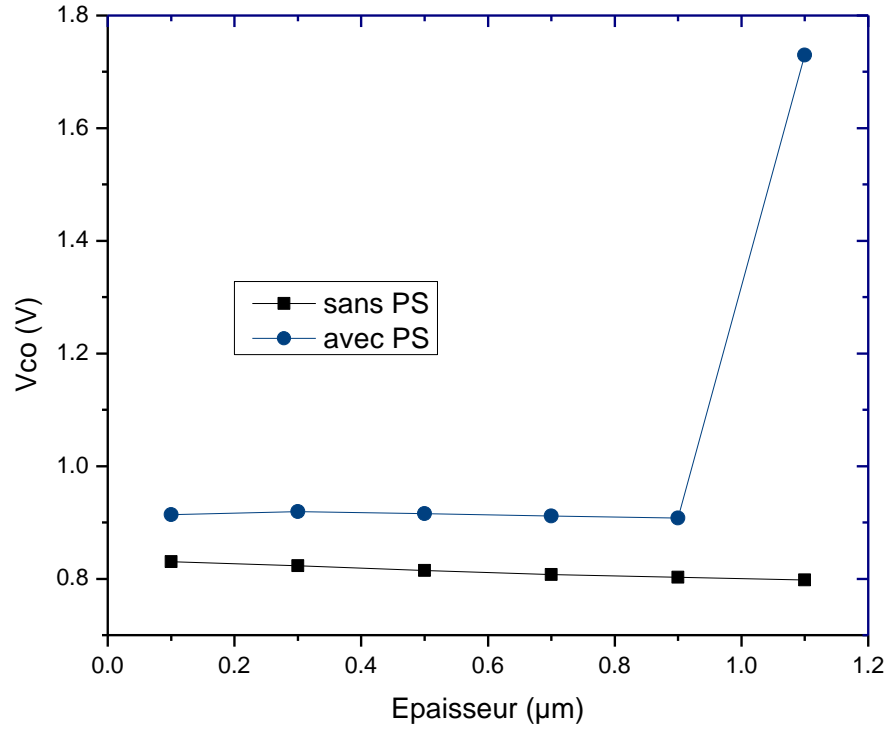


Figure III-18. Variation du V_{co} en fonction de l'épaisseur des deux cellules (modele 2)

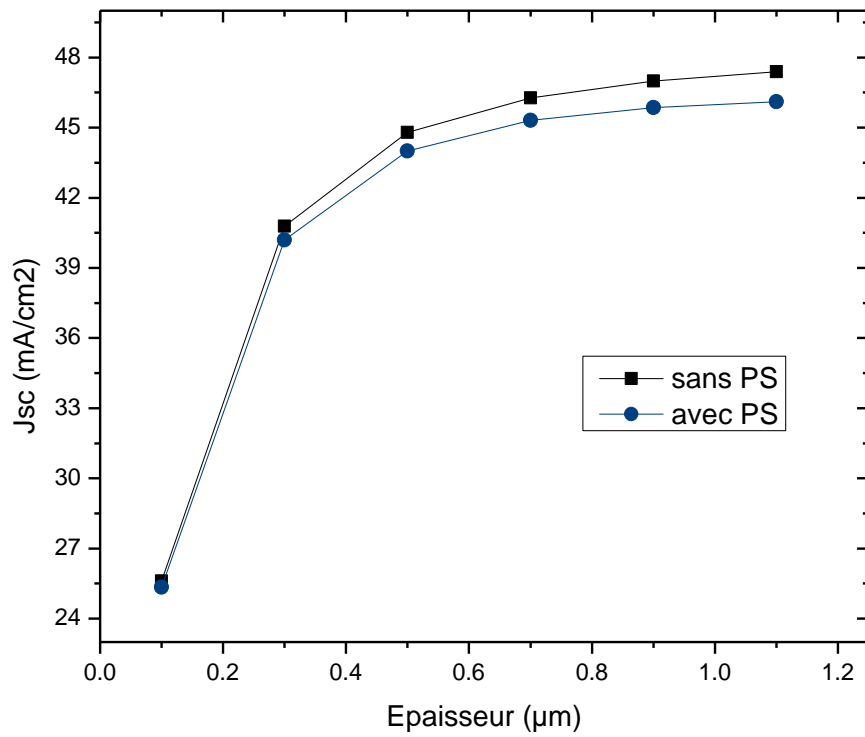


Figure III-19. Variation de J_{sc} en fonction de l'épaisseur des deux cellules (modèle 2)

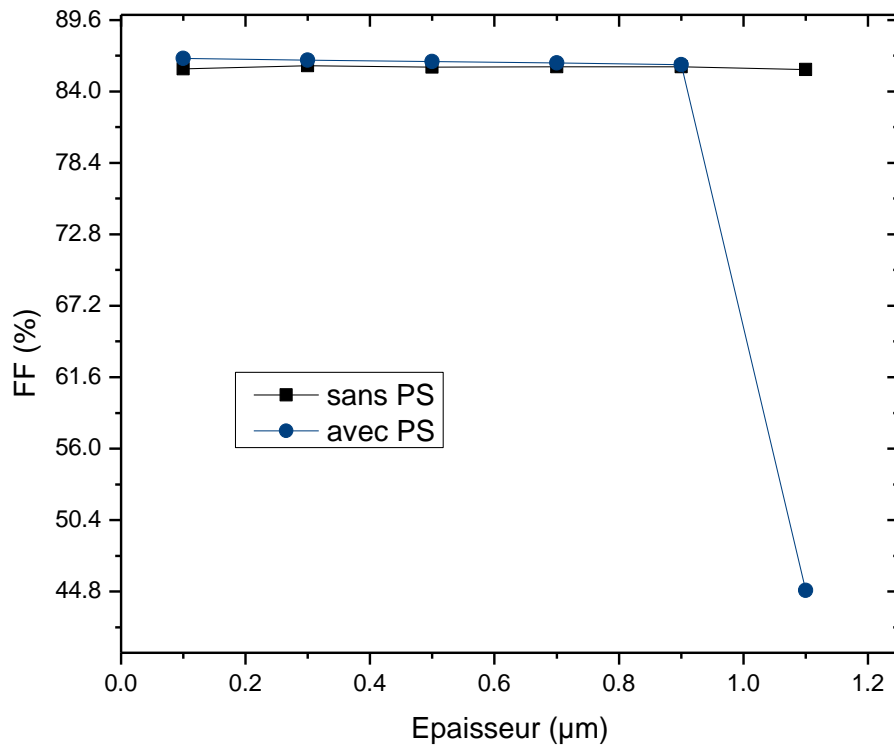


Figure III-20. Variation de FF en fonction de l'épaisseur des deux cellules (modèle 2)

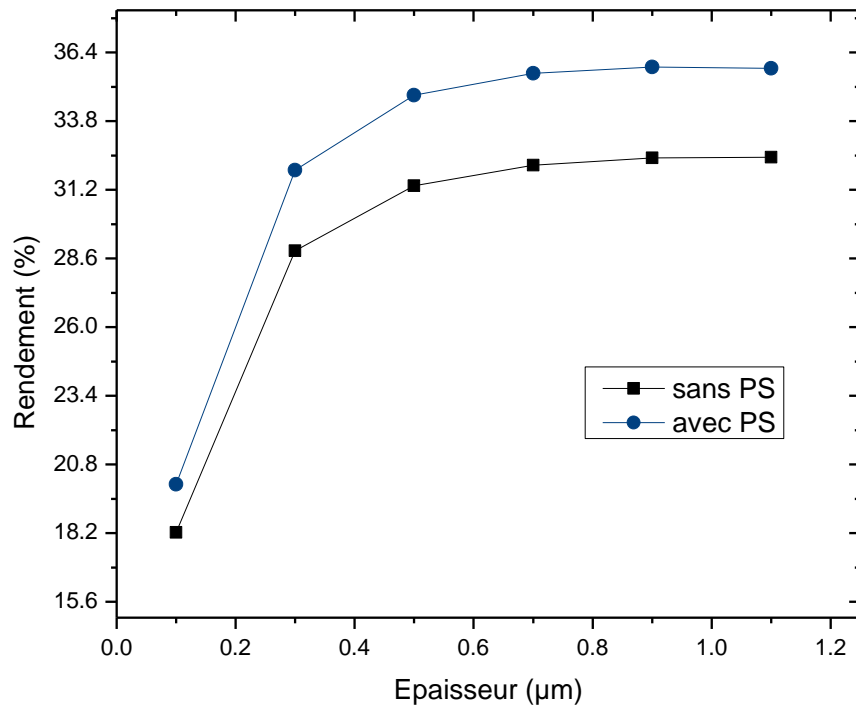


Figure III-21. Variation du rendement en fonction de l'épaisseur des deux cellules (modèle 2)

V-2-1 Effet de Variation de l'énergie de gap de la couche CZTSe

La variation de l'énergie de bande interdite de la couche CZTSe est un paramètre important pour les cellules solaires à base de CZTSe. Cette variation peut être contrôlée par la composition du matériau et les conditions de croissance, et peut affecter les performances optiques et électroniques de la cellule solaire.

Le [tableau III.10](#) ci-dessous représente les résultats de la variation de l'énergie de gap de la couche CZTSe.

Tableau III-10. Résultats de la variation de l'énergie de gap de la couche CZTSe

Bandgap (eV)	Vco (V)	Jsc (mA/cm2)	FF%	η %
0.7	0.62	58.58	82.65	30.31
0.8	0.72	52.48	84.34	32.02
0.9	0.82	50.23	85.66	35.34
1.0	0.90	45.85	86.10	35.85
1.1	0.93	32.32	77.70	23.57
1.2	0.99	13.61	67.90	9.16

Les [figures \(22-25\)](#) présentent les différentes variations des caractéristiques de la cellule solaire (modèle 2b) en fonction de l'énergie de bande interdite (ou "gap") du CZTSe.

On observe que VCO augmente tandis que Jsc diminue avec l'augmentation de l'énergie de bande interdite. La valeur optimale pour l'énergie de bande interdite est $E_g=1\text{eV}$, qui correspond à un FF et un rendement maximal de la cellule solaire de **35.85%**

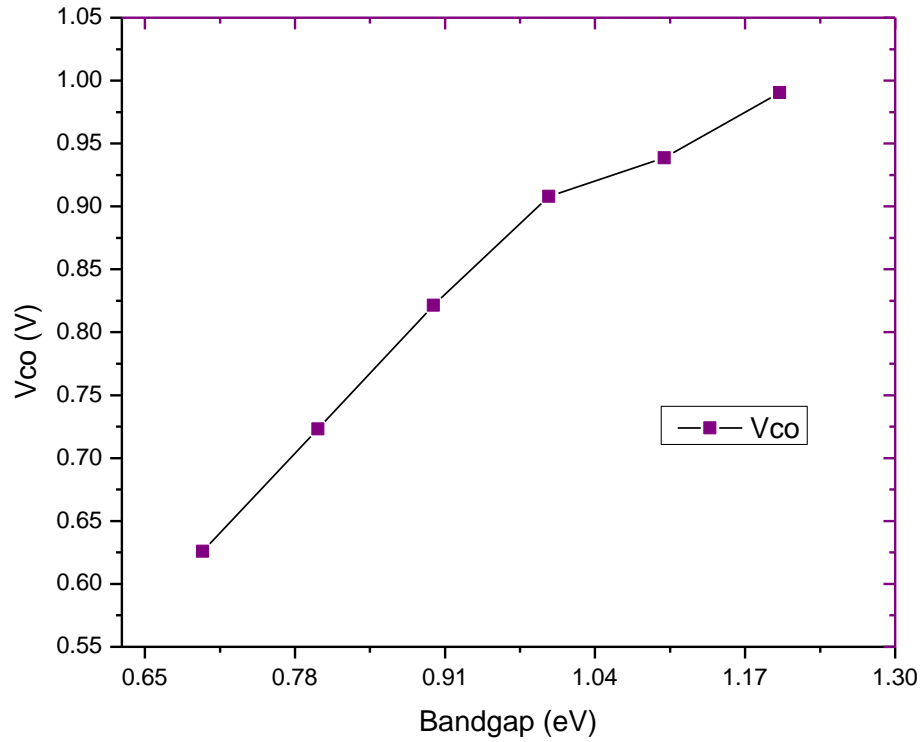


Figure III-22. Variation de V_{co} en fonction de l'énergie de gap de la cellule modèle (2b).

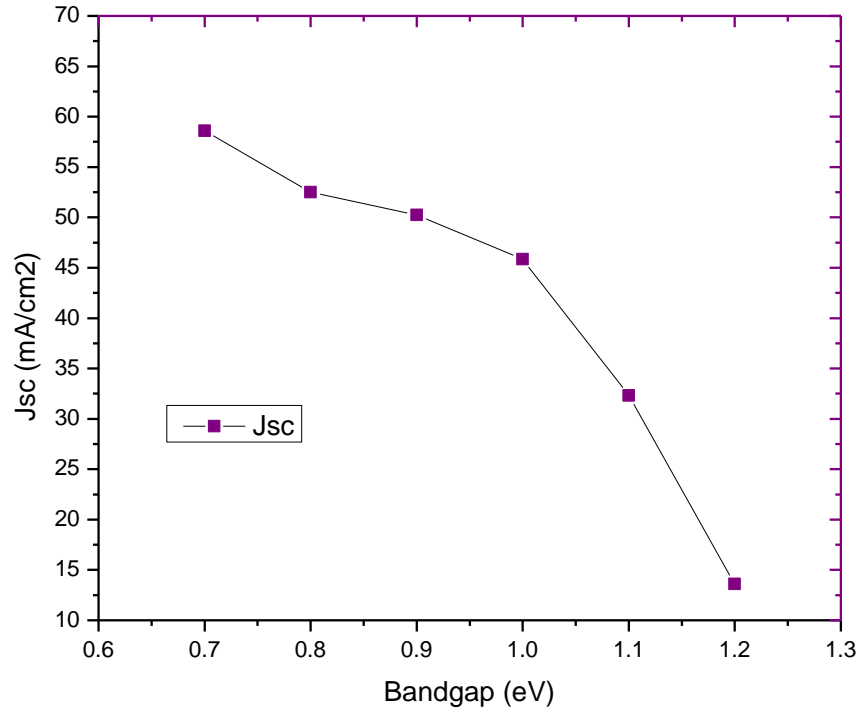


Figure III-23 . Variation de J_{sc} en fonction de l'énergie de gap de la cellule modèle (2b).

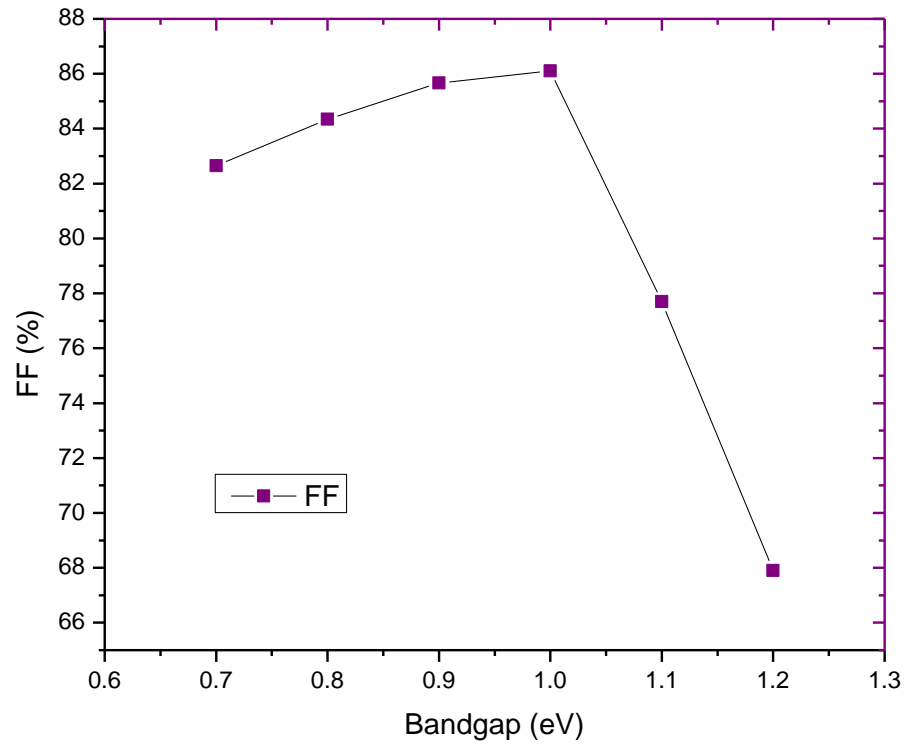


Figure III-24. Variation du facteur de forme FF en fonction de l'énergie de gap de la cellule modèle (2b).

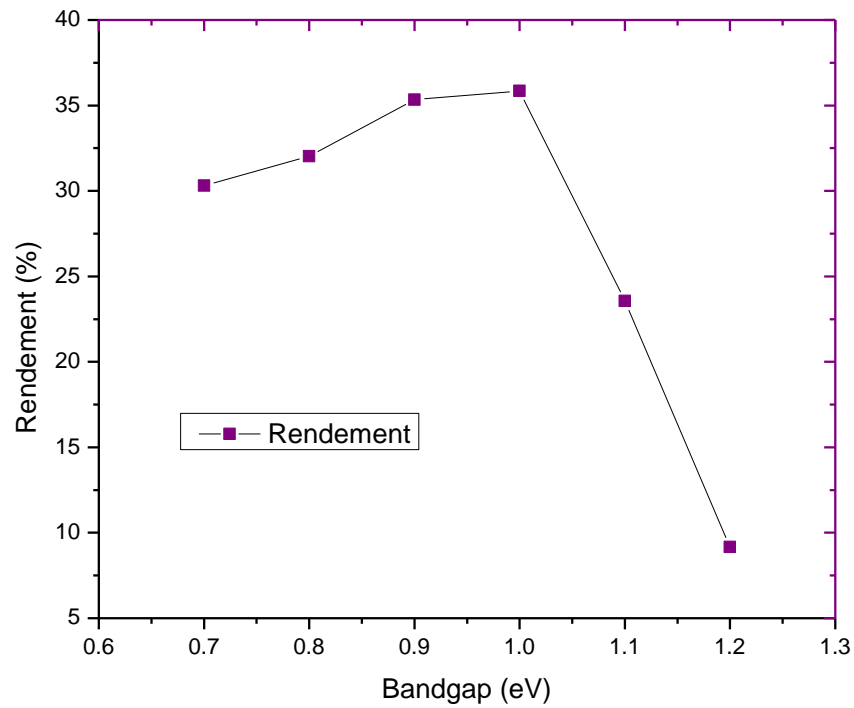


Figure III-25. Variation du Rendement en fonction de l'énergie de gap de la cellule modèle (2b).

V-2-2 Effet de la variation du défaut N_i de la couche CZTSe

La variation du nombre total de défauts dans la couche de CZTSe peut avoir un impact significatif sur les performances de la cellule solaire.

L'augmentation du nombre de défauts entraîne une réduction de la mobilité des porteurs de charge, ce qui peut réduire le courant et le rendement de la cellule solaire. À l'inverse, la diminution du nombre de défauts peut améliorer la mobilité des porteurs de charge, réduire les pertes par recombinaison et augmenter le courant et le rendement de la cellule solaire.

En introduisant des défauts dans la couche CZTSe en se basant sur les travaux de Abdelaziz et al [58], le rendement se voit augmenter jusqu'à 38.06%.

Le tableau 11 résume la variation de défaut de la couche CZTSe.

Tableau III-11. Résultats de la variation de défaut du CZTSe (modèle 2b)

Défaut	V _{co} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF%	η%
10⁴	7.45	46.65	10.63	36.96
10⁶	0.95	46.65	85.56	38.06
10⁸	0.95	46.65	85.56	38.06
10¹⁰	0.95	46.65	85.50	38.05
10¹²	0.95	46.65	85.63	38.03
10¹⁴	0.90	45.85	86.10	35.85
10¹⁶	0.80	19.41	69.50	10.85

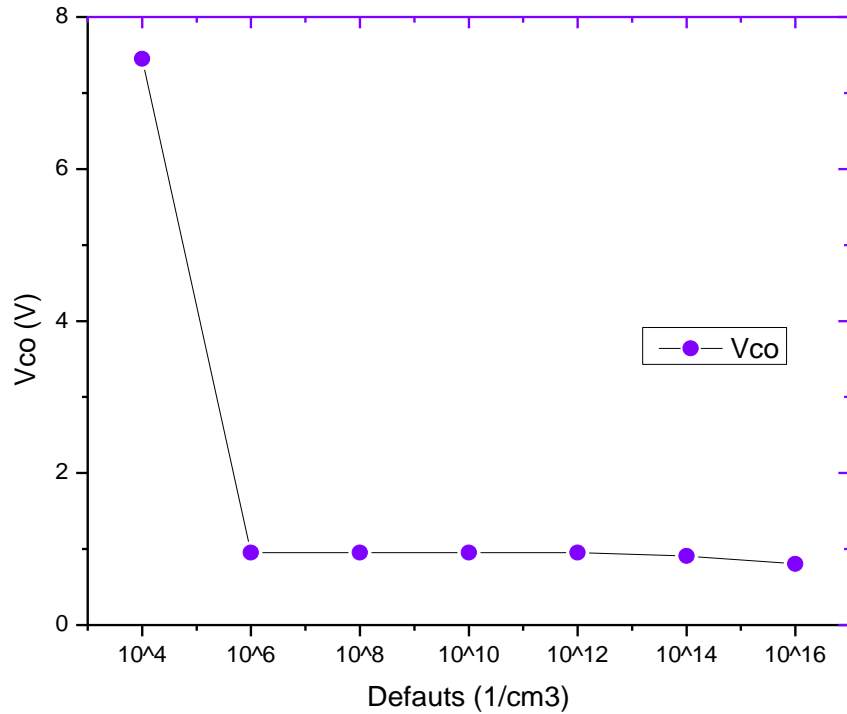


Figure III-26. Variation du V_{co} en fonction de défaut de CZTSe de la cellule modèle (2b).

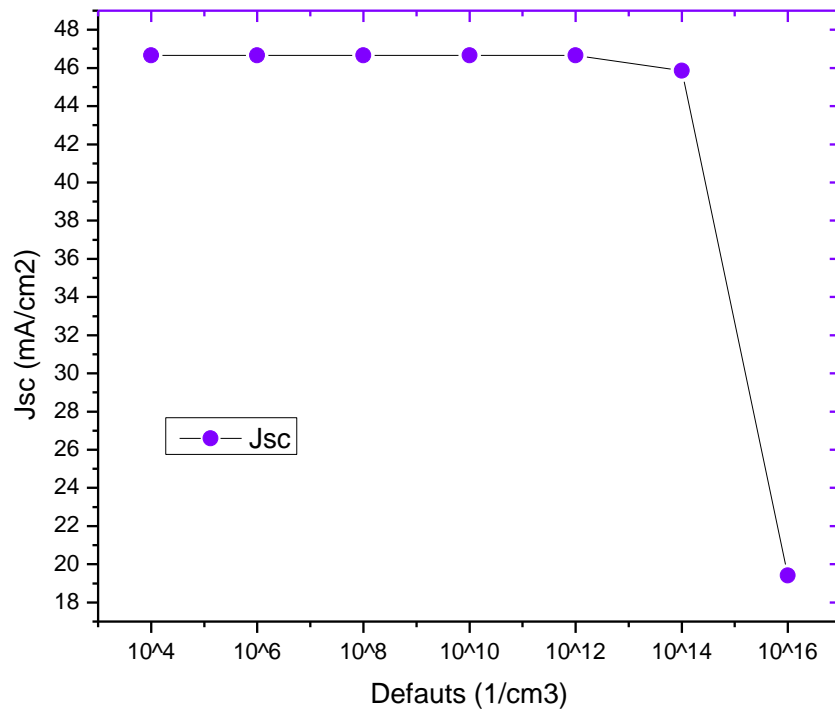


Figure III-27. Variation de J_{sc} en fonction de défaut de CZTSe de la cellule modèle (2b).

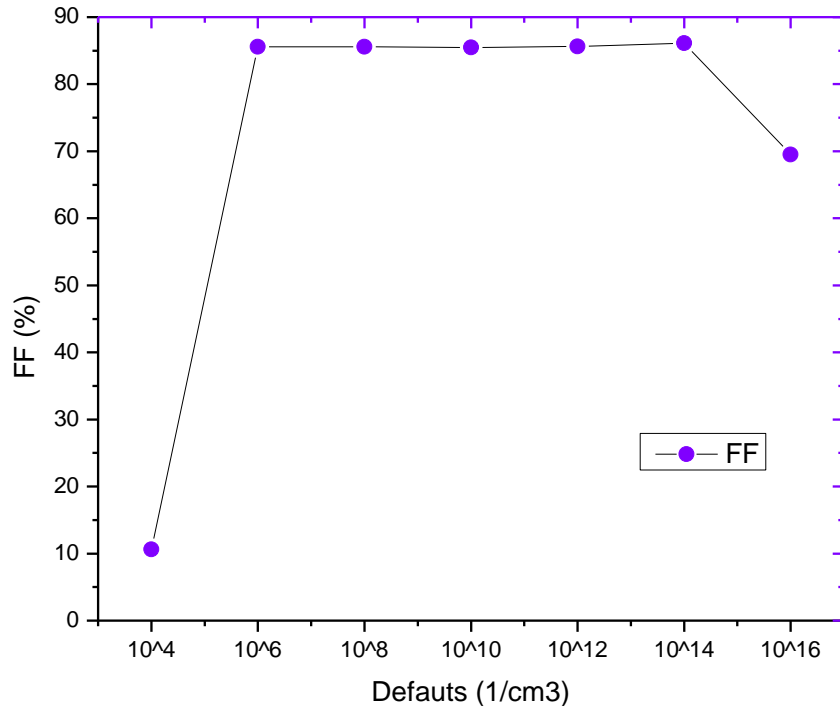


Figure III-28 : Variation du FF en fonction de défaut de CZTSe de la cellule modèle (2b).

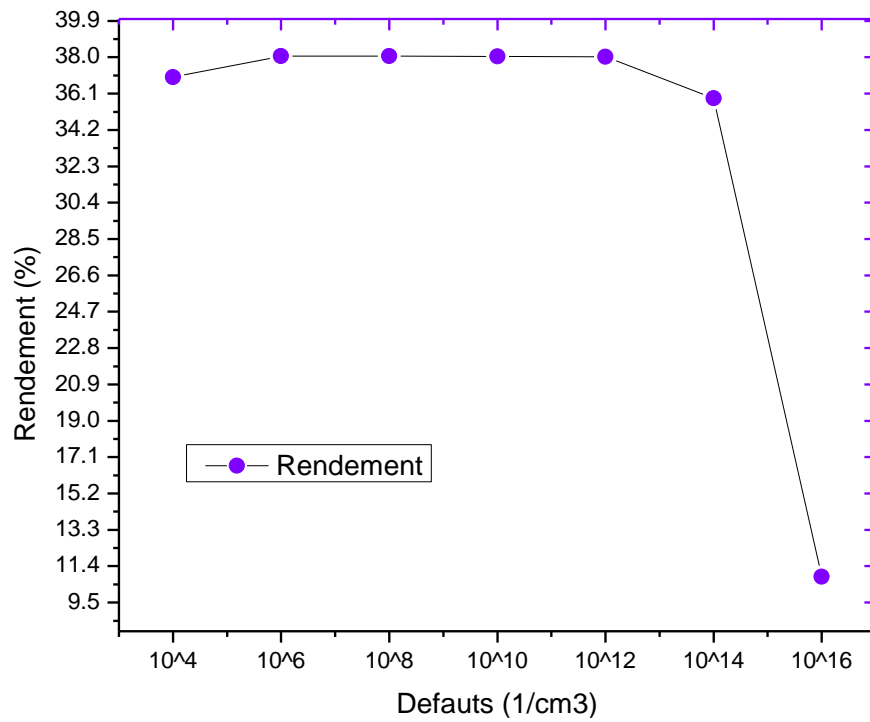


Figure III-29. Variation du rendement en fonction de défaut de CZTSe de la cellule modèle (2b).

V-2-3 Effet de la variation de la température sur le modèle 2b

Effectivement, la température peut avoir un impact significatif sur les performances de la cellule solaire à base de CZTSe. Le [tableau 12](#) résume l'effet de la variation de la température sur la cellule solaire modèle 2b, tandis que les [figures \(30-33\)](#) présentent cette variation.

On peut observer une diminution des trois paramètres VCO, FF et rendement de la cellule solaire avec l'augmentation de la température, contrairement au courant de court-circuit (Isc) qui augmente avec l'augmentation de la température.

Tableau III-12. Résultats de la variation de la température sur la cellule **modèle 2b**

Température (K)	Vco (V)	Jsc (mA/cm2)	FF%	η %
300	0.90	45.85	86.10	35.85
350	0.88	45.73	85.13	35.28
400	0.85	46.89	83.43	33.55
450	0.82	46.95	81.53	31.57
500	0.78	46.98	79.52	29.51

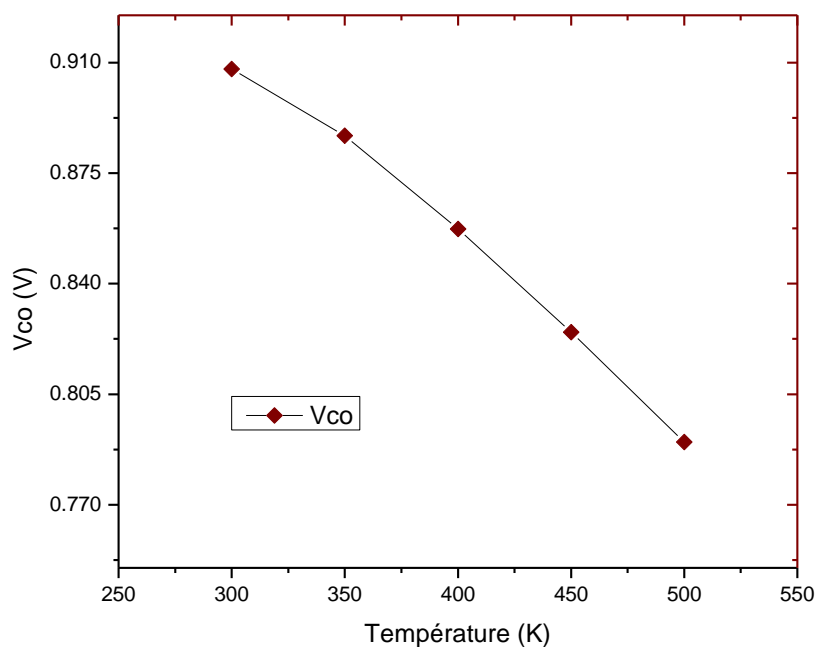


Figure III-30. Variation du Vco en fonction de la température sur la cellule modèle 2b.

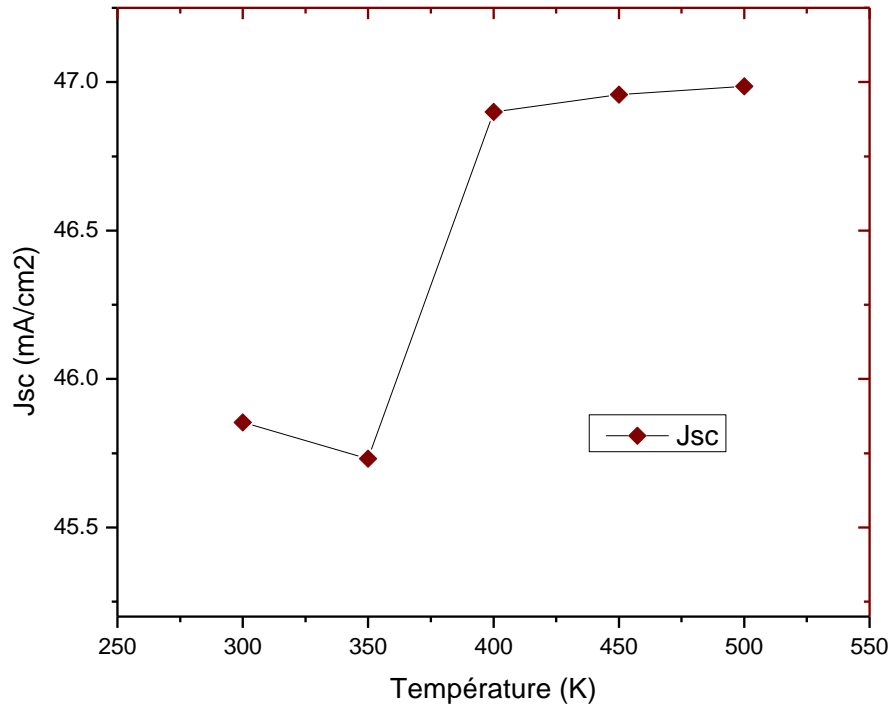


Figure III-31. Variation de J_{sc} en fonction de la température sur la cellule modèle 2b.

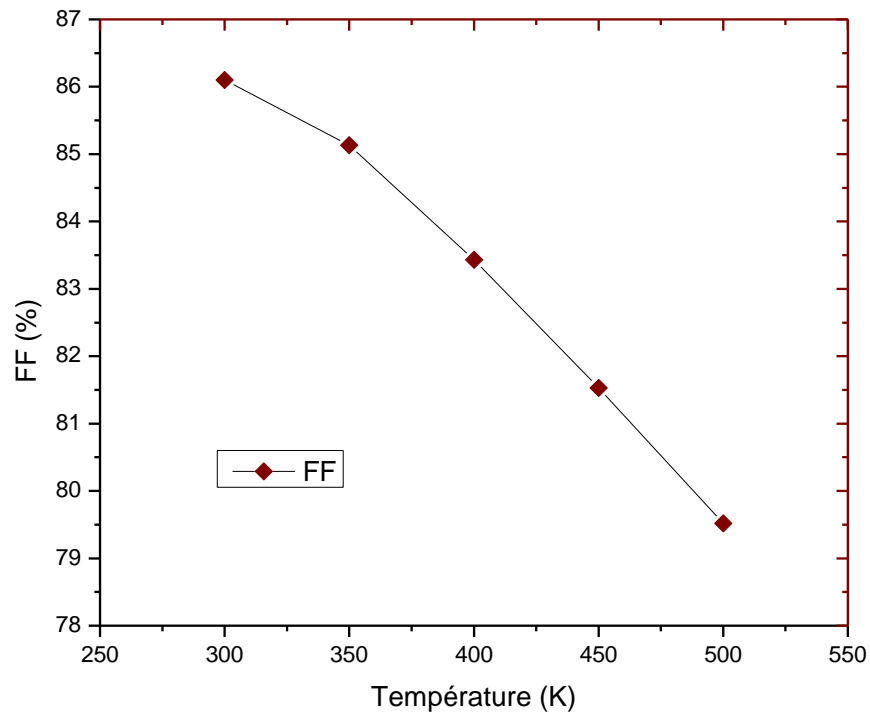


Figure III-32. Variation de FF en fonction de la température sur la cellule modèle 2b.

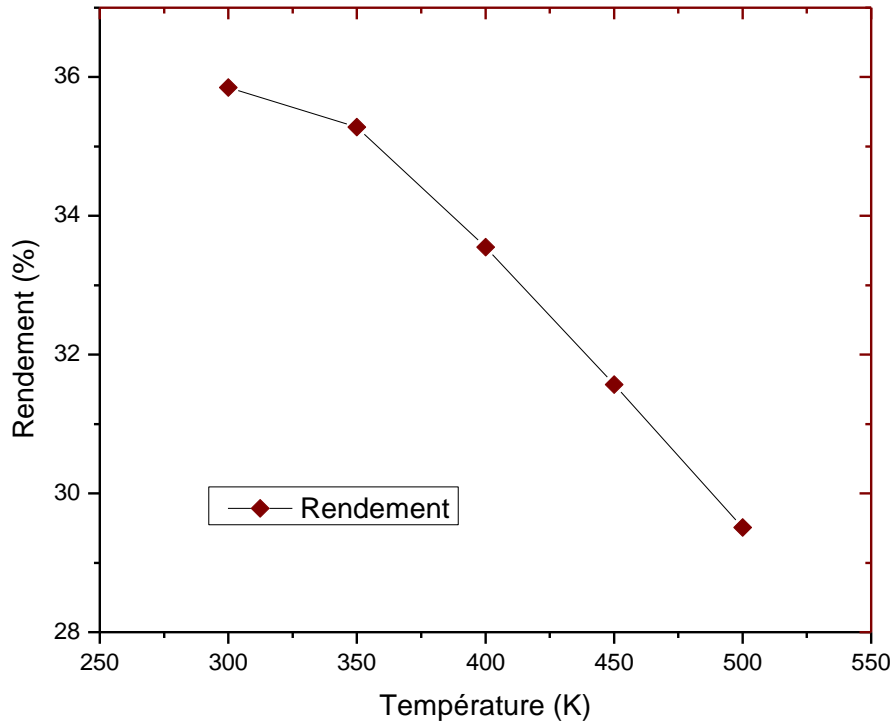


Figure III-33. Variation du rendement en fonction de la température sur la cellule modèle 2b.

Le [tableau 13](#) synthétise les valeurs obtenues pour les différents modèles et met en évidence une nette amélioration des performances de la cellule photovoltaïque à base de CZT(S,Se) avec l'ajout d'une couche de silicium poreux comme couche anti reflet avec son indice de réfraction très faible du à sa forte porosité (91%). Les résultats obtenus sont également comparables aux données expérimentales, ce qui confirme l'efficacité de l'utilisation du silicium poreux pour améliorer les performances des cellules PV. Plusieurs recherches ont été entreprises avec des cellules à base de Silicium cristallins[38], [64], [65] d'autres sur des cellules à base de pérovskites [6] et pour la première fois dans nos travaux sur des cellules à base de kèsterite CZT(S,Se).

Tableau III-13. Comparaison des résultats obtenus lors de la simulation avec d'autres résultats de la littérature.

Cellules	V _{co} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF%	η%
AZO/ZnO/CdS/CZTS [59]	0.64	35.12	82.15	15.10
PS/AZO/ZnO/CdS/CZTS	1.09	41.35	66.81	30.28
AZO/CdS/CZTSe/NiO /Mo [58]	0.83	45.41	86.49	32.98
PS/AZO/CdS/CZTSe/NiO /Mo	0.95	46.65	85.56	38.06
c-Si (p, n)/PSi (n) [38]	0.56	43.46	82.07	20.26
c-Si (n et p) / PS(ARC) layer / ZnO [65]	0.58	43.21	71.11	17.9

IV- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons tenté d'étudier l'effet du silicium poreux en tant que couche fenêtre sur les performances des cellules solaires. Nous avons choisi de nous concentrer sur une cellule solaire de deuxième génération à base de CZT(S,Se) en raison de ses performances solides dans la conversion d'énergie solaire en électricité.

Nous avons ajouté une couche de silicium poreux en tant que couche fenêtre et avons observé les différences de performance par rapport à une cellule solaire sans silicium poreux. Nous avons ensuite optimisé les paramètres de la cellule solaire, en ajustant la température et en jouant sur les défauts du CZT(S,Se). Les résultats ont montré une amélioration significative du rendement, passant de **15,88% à 30,26%** pour le premier modèle, et de **32,41% à 38,6%** pour le deuxième modèle. En conclusion, ces résultats soulignent l'importance du silicium poreux en tant que couche fenêtre agissant comme une couche antireflet pour améliorer les performances des cellules solaires à base de CZT(S,Se).

Bibliographie

- [54] “SCAPS: A new simulator for the investigation of thin-film solar cells and modules,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, no. 18–19, pp. 3422–3433, 2008.
- [55] “SCAPS-1D: A new general-purpose 1D solar cell simulation tool,” *Physica B: Condensed Matter*, vol. 401–402, pp. 204–207, 2009.
- [56] Y. H. Khattak, F. Baig, H. Toura, S. Beg, and B. M. Soucase, “CZTSe Kesterite as an Alternative Hole Transport Layer for MASnI₃ Perovskite Solar Cells,” *J. Electron. Mater.*, vol. 48, no. 9, pp. 5723–5733, Sep. 2019, doi: 10.1007/s11664-019-07374-5.
- [57] S. Ashutosh and et al., “Numerical simulations on CZTS/CZTSe based solar cell with ZnSe as an alternative buffer layer using SCAPS-1D” 43 (2021) 3735-3739
- [58] A. Ait 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, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.rio.2022.100257.
- [59] A. E. Benzetta, M. Abderrezek, and M. E. Djeghlal, “Numerical study of CZTS/CZTSSe tandem thin film solar cell using SCAPS-1D,” *Optik*, vol. 242, p. 167320, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.ijleo.2021.167320.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] K. A. Salman, K. Omar, and Z. Hassan, “Improved performance of a crystalline silicon solar cell based on ZnO/PS anti-reflection coating layers,” *Superlattices Microstruct.*, vol. 50, no. 5, pp. 517–528, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.spmi.2011.08.014.
- [63] L. Cheng et al. et, “Highly Efficient NiO-Based Hole Transport Layer for Planar Perovskite Solar Cells,” *ACS Applied Energy Materials*, vol. 3, no. 1, pp. 163–169, 2020.
- [64] T. Dzhafarov, “Silicon Solar Cells with Nanoporous Silicon Layer,” in *Solar Cells - Research and Application Perspectives*, A. Morales-Acevedo, Ed., InTech, 2013. doi: 10.5772/51593.
- [65] N. Bensmaine, “Amélioration des performances d’une cellule solaire à base de couches de revêtement antireflet en ZnO,” *Mémoire de master*, Université Abou Bakr Belkaid, 2020.

Conclusion générale

L'amélioration des performances de la cellule solaire, principalement son rendement de conversion avec réduction de son coût de production, est l'objectif majeur des recherches photovoltaïques. Dans ce mémoire, nous avons mené une étude visant à évaluer l'impact de l'utilisation de silicium poreux en tant que couche fenêtre sur les performances des cellules solaires à base de CZT(S,Se).

Nous avons délibérément choisi de nous concentrer sur les cellules solaires à base de CZT(S,Se), qui appartiennent à la deuxième génération de cellules solaires. Cette sélection a été motivée par les performances solides de cette technologie dans la conversion de l'énergie solaire en électricité, ce qui en fait une option prometteuse pour les applications photovoltaïques.

Dans le premier chapitre de notre étude, nous avons présenté une revue générale sur les cellules solaires, en discutant des différentes générations de cellules solaires et de leurs avantages et inconvénients. Nous avons également examiné les grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire, telles que le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, la puissance maximale et le rendement de conversion.

Dans un second chapitre, nous avons approfondi les propriétés du silicium poreux et son intérêt pour les applications photovoltaïques puis nous avons présenté le contexte général des cellules solaires et avons exposé les propriétés des matériaux kesterites CZT(S,Se).

Dans le troisième chapitre, nous avons utilisé le logiciel de simulation SCAPS pour modéliser les cellules solaires et avons constaté que l'ajout d'une couche de silicium poreux en tant que couche fenêtre a entraîné une augmentation significative du rendement de conversion de l'énergie solaire en électricité. Les résultats ont montré une amélioration de **6,17%** pour le premier modèle et de **6,19%** pour le deuxième modèle, par rapport aux cellules solaires sans silicium poreux. Ces résultats très prometteurs ouvrent la voie à de nouvelles pistes d'optimisation des dispositifs photovoltaïques CZT(S,Se) par l'utilisation de matériaux poreux tels que le silicium poreux. L'étude expérimentale de cellules solaires intégrant une couche de silicium poreux constitue une perspective à ce travail de mémoire

En résumé, notre étude a prouvé que l'ajout de silicium poreux en tant que couche fenêtre sur les cellules solaires à base de CZT(S,Se) peut entraîner une augmentation significative de leur rendement. Ce résultat prometteur pourrait avoir des implications importantes pour la production d'énergie solaire et contribuer à la transition énergétique mondiale vers une économie à faible émission de carbone. Les résultats de cette étude pourraient également être utilisés pour développer des cellules solaires à haut rendement et faible coût pour une utilisation plus efficace de l'énergie solaire. En outre, l'utilisation du silicium poreux pourrait être appliquée à d'autres types de cellules solaires pour améliorer leurs performances.

Résumé

L'étude explore l'impact de l'incorporation d'une couche de silicium poreux sur les performances de cellules solaires à base de CZTS et de CZTSe. Les résultats montrent une amélioration significative du rendement de conversion d'énergie (PCE) des deux types de cellules solaires après optimisation pour des valeurs qui pouvant atteindre les 38%. Cette approche innovante propose ainsi une solution prometteuse pour améliorer les performances des cellules solaires. Les résultats obtenus contribuent à l'avancement des connaissances dans le domaine des cellules solaires et pourraient avoir des applications concrètes dans le domaine de l'énergie solaire. En conclusion, cette étude est importante pour la recherche et le développement de technologies d'énergie renouvelable plus efficaces et économiques.

ملخص

تستكشف هذه الدراسة الابتكارية تأثير إضافة طبقة من السيليكون المسامي على أداء الخلايا الشمسية القائمة على لكلا أنواع الخلايا الشمسية بعد (PCE) تظهر النتائج تحسینًا كبيرًا في كفاءة تحويل الطاقة CZTS و CZTSe. التحسين لقيم تصل إلى 38%. تساهم هذه الدراسة في تقدم المعرفة في مجال الخلايا الشمسية من خلال اقتراح نهج مبتكر لتحسين أدائها. النتائج المستحقة تشجيعًا ويمكن أن تكون لها تطبيقات عملية في مجال الطاقة الشمسية.

Abstract

This innovative study explores the impact of incorporating a layer of porous silicon on the performance of CZTS and CZTSe-based solar cells. The results show a significant improvement in the energy conversion efficiency (PCE) of both types of solar cells after optimization to values that can reach up to 38%. This study contributes to the advancement of knowledge in the field of solar cells by proposing an innovative approach to improve their performance. The results obtained are promising and could have practical applications in the field of solar energy.