

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان
Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen
كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique et Electronique (GEE)
Filière : Electronique



Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : ELECTRONIQUE

Spécialité : INSTRUMENTATION

Présenté par : BENALI Nardjes & HANAFI Ilhem

Sujet

CONTRIBUTION A L'ETUDE D'UNE CELLULE SOLAIRE A BASE DE CZTS

Soutenu en juin 2024, devant le jury composé de

M ^r ZOUGAGH Nabil	MCB	Univ. Tlemcen	Président
M ^{me} GUEN Ahlam	Pr	Univ. Tlemcen	Encadreur
M ^{me} MERAD Faiza	MRB	CDS. Oran	Co-Encadreur
M ^r BOURSALI Amin	MCB	Univ. Tlemcen	Examineur
MR KANOUN Ahmed Ali	MRA	CDS. Oran	Invité

Année Universitaire 2023-2024

Remerciements

Je remercie tout d'abord **ALLAH** tout puissant de m'avoir donné la force, la patience, la volonté, le courage et la connaissance afin d'accomplir ce modeste travail.

Nos premiers remerciements s'adressent de tout cœur et tout naturellement à notre Encadrante **Madame GUEN Ahlam BOUAZZA**, Professeur à l'université Abou Bekr Belkaid Tlemcen pour la qualité exceptionnel de son encadrement, son aide, ses compétences, ses efforts, ses conseils, et ses orientations au cours de ce mémoire qui nous ont permis de mener à bien et finaliser ce travail de Master en Instrumentation. Nous lui sommes également reconnaissantes pour sa disponibilité et ses qualités humaines qui nous ont permis de travailler dans les meilleures conditions.

Nous tenons à exprimer ma profonde gratitude à notre **Co-encadreur Madame MERAD Faiza**, Maitre de recherche classe « B » au centre de développement des satellites ORAN qui n'a ménagé aucun effort afin de nous défrayer le chemin, elle nous a aussi orienté tout le long de ce travail, nous permettant de finaliser ce mémoire en se montrant disponible malgré ses occupations.

Nous tenons à remercier **Monsieur ZOUGAGH Nabil**, Maitre de conférence classe « B » à l'université Abou BekrBelkaid Tlemcen, de nous avoir fait l'honneur d'accepter de présider ce jury.

Nous voudrions aussi adresser nos plus vifs remerciements à **Monsieur BOURSALI Amin** Maitre de conférence classe « B » à l'université de Tlemcen de nous avoir fait l'honneur d'examiner ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos plus sincères remerciements à **Monsieur KANOUN Ahmed Ali**, Maitre de recherche classe « A » au centre de développement des satellites ORAN pour avoir accepté notre invitation et pris le temps de participer à la soutenance de ce mémoire.

Enfin nous ne saurions oublier de remercier toutes les personnes qui nous sont chères, et particulièrement nos parents, nos frères, nos sœurs, pour leurs encouragements, la confiance et le soutien morale dont ils ont fait preuve tout au long de ce travail. Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin au succès de ce travail de mémoire de Master Instrumentation.

Dédicace

Mon cœur déborde d'amour pour vous tous, mes êtres les plus chers.

Mes parents adorés, vous qui m'avez donné la vie et m'avez guidé sur le chemin de la réussite, je vous dédie ce travail avec toute la tendresse de mon âme. Vos sacrifices et votre amour inconditionnel sont gravés à jamais dans mon cœur. Puisse ce modeste ouvrage être une humble offrande en retour de tout ce que vous m'avez offert. Que dieu vous protège et vous comble de santé et de bonheur.

Mon frère Ayoub et ma sœur Ismahene et son mari Abdou, vous êtes les rayons de soleil qui illuminent ma vie. Je vous chéris de tout mon être et vous admire profondément.

Grand-père maternel, tes encouragements et tes prières m'ont porté jusqu'ici. Que ta bénédiction continue de me guider.

A la mémoire de mes grands-mères ainsi que mon grand-père paternel, que dieu vous accueille dans son paradis. Vous vivez à jamais dans mon cœur.

Famille bien-aimée, tantes, oncles, cousins, cousines, en particulier ma tante Fatiha, vous êtes la source de ma force et de ma joie.

Mon ami Ayoub, tu es le pilier sur lequel je m'appuie depuis toujours. Mes amies Ilhem et Samira, vous êtes les rayons de soleil qui réchauffent mon cœur et éclairent mon chemin. Votre amitié est un trésor inestimable qui donne de la joie et de la lumière à chaque instant de ma vie.

Ilham, mon cher binôme travailler à tes côtés a été un véritable privilège et une source constante d'inspiration, ta détermination, ton soutien inébranlable et ta collaboration précieuse ont été les piliers de notre réussite commune. Ensemble, nous avons surmonté les défis, partagé les joies et construit des souvenirs inoubliables.

Que cet ouvrage soit le reflet de l'amour inconditionnel que je porte à chacun d'entre vous.

Vous êtes la plus belle bénédiction que Dieu m'ait offerte.

BENALI Nardjes

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes chers parents,

À ma mère Fatiha, mon père Abedlali, pour leur soutien inconditionnel et leurs encouragements constants qui ont été ma source de force tout au long de ce parcours.

À mon cher frère Mohammed, à mes chers sœurs Hadjira, Salima, Hanane et Wafaa pour leur soutien moral et leurs conseils précieux qui ont éclairé mon chemin dans les moments difficiles. Et n'oublier pas Mon beau-frère Sid Ahmed et ma petite nièce Mira, et ma belle-sœur Khadija.

À mes chers amis En particulier iman et Housseem ; et mes amis universitaires Ilyes et Mohammed, pour leur amour et leur soutien indéfectible qui ont rendu cette réalisation possible.

À mon binôme nardjes, avec qui j'ai partagé des moments de stress, de joie et de réussite tout au long de cette année. Ton soutien, ton engagement et ta collaboration ont été essentiels à l'accomplissement de ce projet. Ensemble, nous avons surmonté les défis et atteint nos objectifs. Je te remercie sincèrement pour ton travail acharné et ton amitié. Ce mémoire est le fruit de nos efforts communs et je suis fier de l'avoir réalisé à tes côtés.

Pour conclure, je souhaite exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui ont apporté leur contribution, que ce soit de près ou de loin, au succès de ce mémoire. Et à tous ceux qui apprécient la bonne chose et ne se laissent pas abattre par les difficultés de la vie.

HANAFI ILHAM

Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I : Notions générales sur les cellules solaires

I.1. Introduction	4
I.2. L'énergie solaire	4
I.2.1. Le spectre solaire	5
I.2.2. Notion de Masse d'Air	8
I.3 Présentation des cellules solaires (photovoltaïques : PV).....	9
I.3.1. Définitions	9
I.3.2. Modélisation électrique d'une cellule PV	11
I.3.3. Structure physique	13
I.3.3.1. Couche semi conductrice dopé p (collecteur)	14
I.3.3.2. Couche semi conductrice dopé n (émetteur)	14
I.3.3.3. Doigts de contact et contact métallique de la face arrière	14
I.3.3.4. Couche anti-réflexion.....	15
I.3.4. Définition de l'effet photovoltaïque	15
I.4. Historique concernant les cellules PV	16
I.5. Principe de fonctionnement d'une cellule PV	17
I.6. Types des cellules solaires	19
I.6.1. 1er Génération (filière du silicium)	19
I.6.1.1. Cellule à base de Silicium monocristallin	19
I.6.1.2. Cellule à base de silicium poly-cristallin	19
I.6.2. 2ème Génération (filière des couches minces)	19
I.6.2.1. Silicium Amorphe.....	19
I.6.2.2. Tellure de Cadmium CdTe.....	20
I.6.2.3. Di séléniure de Cuivre Indium CIS, Diséléniure de Cuivre et de Gallium CGS, Diselenuire de Cuivre et d'Indium et de Gallium CIGS	21
I.6.3. 3 ^{ème} Génération	21
I.6.3.1. Filière des cellules organiques.....	21
I.6.3.2. Filière Tandem.....	22

I.6.3.3. Filière Pérovskite	23
I.7. Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire.....	24
I.7.1. Courant de court-circuit I_{cc}	24
I.7.2. Tension de circuit ouvert V_{oc}	24
I.7.3. Facteur de forme FF	25
I.7.4. Rendement de conversion η	26
I.8. Avantages et Inconvénients.....	26
I.8.1. Avantage.....	26
I.8.2 Inconvénients.....	27
I.9. Conclusion.....	27

Chapitre II : Les cellules PV réalisées à partir des couches dites “couches minces”

II.1. Introduction	28
II.2. Couche mince.....	28
II.2.1. Propriétés des couches minces.....	28
II.2.2. Application des couches minces	30
II.2.3. Techniques de dépôt des couches minces	30
II.2.3.1. Méthodes chimiques	30
II.2.3.1.a. Dépôt Chimique en phase vapeur (CVD)	30
II.2.3.1.b. Spray pyrolyse	31
II.2.3.1.c. Méthode sol-gel	31
II.2.3.2. Méthodes physiques.....	32
II.2.3.2.a. Dépôts physiques en phase vapeur	32
II.2.3.2.b. Évaporation thermique	32
II.2.3.2.c. Implantation d'ions	32
II.2.3.2.d. Ablation Laser	33
II.2.4. Méthodes de préparation de couches minces de $Cu_2-II-IV-S_4$	33
II.2.5. Avantages et inconvénients des couches minces	34
II.2.5.1 Avantages.....	34
II.2.5.2. Inconvénients	34
II.3. Cellule solaires à base de CZTS.....	35
II.3.1. Généralités.....	35
II.3.2 propriétés du CZTS	35

II.3.2.1. Propriétés électriques	36
II.3.2.2 propriétés optiques.....	38
II.4 Cellules Photovoltaïques à base de Pérovskite	39
II.4.1 Pérovskite	39
II.4.2 Structure de la pérovskite.....	40
II.4.3.1. Propriétés électriques de la pérovskite.....	41
II.4.3.2 Propriétés optiques	41
II.5. Sulfure de cadmium CdS	42
II.5.1 Propriétés électriques	42
II.5.2 propriétés optiques	43
II.6 Oxyde de zinc	43
II.6.1. Propriétés électriques	44
II.6.2 propriétés optiques	45
II.7. Conclusion.....	45

Chapitre III : Simulation par logiciel "Solar Cell Capacitance Simulator" d'une cellule PV à base de CZTS

III.1. Introduction	46
III.2. Présentation du logiciel SCAPS-1D.....	46
III.2.1. Le SCAPS offre les avantages suivants.....	47
III.2.2. Utilisation du SCAPS et simulation	47
III.2.3 Lancer SCAPS.....	47
III.2.3.1 Définir le point de fonctionnement	49
III.2.3.2 Résistance série et résistance parallèle	50
III.2.3.3 Light source	50
III.2.3.4 Action	50
III.2.3.5 Définir le problème	51
III.2.3.6 Fenêtre de résultat	52
III.3 Structure étudiée	53
III.4 Résultats et discussion	58
III.4.1 Effet de la couche CZTS	58
III.4.1.1 Influence de l'épaisseur	58
III.4.1.2 Influence du dopage N_A	60

III.4.1.3 l de la concentration de défaut	62
III.4.2 Effet de la couche la couche BSF en Pérovskite MAPbI ₃	65
III.4.2.1 Effet de l'épaisseur	65
III.4.2.2 Effet du dopage N _A	66
III.4.3.2 Effet du dopage N _D	72
III.4.3.3 Effet de la concentration de défaut.....	74
III.4.4 Effet de la couche anti-reflet ZnO	76
III.4.4.1 Effet de l'épaisseur	76
III.4.4.2 Effet du dopage N _D	79
III.4.4.2 Effet de la concentration de défaut.....	81
III.4.5 Effet de la variation de la température	83
III.4.6 impact de la variation des résistances séries et parallèles	85
III.4.6.1 Effet de la variation des résistances séries.....	85
III.4.6.2 Effet de la variation des résistances parallèles.....	86
III.4.7 Effet de la variation de l'air masse	88
III.8 Conclusion.....	89
Conclusion générale.....	91
PERSPECTIVES	91
Résumé	92

Liste des figures

Chapitre I : Notions générales sur les cellules solaires

FIGURE I.1: LA CONSOMMATION EN ENERGIE POURS DIFFERENTES SOURCE EN 2017 [3].....	1
FIGURE I.2: LES RESERVES MONDIALES ESTIMEES EN ENERGIES FOSSILES. [3].....	5
FIGURE I.3: SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE [4].	7
FIGURE I.4 : LE RAYONNEMENT SOLAIRE ET LE NOMBRE D' AIR MASSE [6].....	9
FIGURE I.4 : STRUCTURE BASIQUE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE [9]	10
FIGURE I.5 : STRUCTURE BASIQUE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE [10]	10
FIGURE I.6 : CONVERSION DE L'ENERGIE DU SOLEIL EN ENERGIE ELECTRIQUE.....	11
FIGURE I.7 : SCHEMA EQUIVALENT DE LA CELLULE SOLAIRE.	11
FIGURE I.8 : CARACTERISTIQUE D'UNE CELLULE PV	13
FIGURE I.9 : LA JONCTION PN [10].....	13
FIGURE I.10 : MISE EN EVIDENCE DES NIVEAUX D'ENERGIE AU VOISINAGE DE LA JONCTION. PN [11].....	14
FIGURE I.11 : STRUCTURE PHYSIQUE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE. [12].....	15
FIGURE I.12 : CHARLES FRITTS 27 FEVRIER 1850 MORT EN 1903. [14].....	17
FIGURE I.13 : SCHEMA REPRESENTANT LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE. [7].....	18
FIGURE I.14 : COMPARAISON DES IONS ENTRE LE SILICIUM AMORPHE, POLY-C ET CRISTALLIN. [13]	20
FIGURE I.15 : CELLULE SOLAIRE AU TELLURE DE CADMIUM EN COUCHE MINCE. [16].....	20
FIGURE I.17 : CELLULE EN CIS	21
FIGURE I.16 : CELLULE EN CIGS.....	21
FIGURE I.18 : STRUCTURE GENERALE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ORGANIQUE.....	22
FIGURE I.19 : PLAQUE TANDEMS. [12].....	22
FIGURE I.20 : STRUCTURE D'UN CRISTAL DE PEROVSKITE GENERIQUE ABX3. [12].....	23
FIGURE I.21 : CARACTERISTIQUE V_{CO-I_PH}	25

Chapitre II : Les cellules PV réalisées a partir des couches dites “couches minces“

FIGURE II.1 : TECHNIQUES DE DEPOT DES COUCHES MINCES [2].....	30
FIGURE II.2 : SCHEMA DE PRINCIPE DE DEPOT CHIMIQUE EN PHASE VAPEUR [5].....	31
FIGURE II.3 : SCHEMA SYNOPTIQUE D'UN EQUIPEMENT DE DEPOT PAR SPRAY PYROLYSE [4].	31
FIGURE II.4: METHODES DE CHAUFFAGES EN EVAPORATION THERMIQUE SOUS VIDE. [1]	32
FIGURE II.5 : DEPOT DES DIFFERENTES COUCHES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE A BASE DE CZTS ET MICROGRAPHIE MEB DES DIFFERENTES COUCHES [1].	34
FIGURE II.6: STRUCTURE KESTERITE DANS LAQUELLE CZTS SE CRISTALLISE. ELLE EST DERIVEE DE LA STRUCTURE SPHALERITE PAR DUPLICATION DE LA CELLULE UNITAIRE [10]	36
FIGURE II.7 : SPECTRE TYPIQUE DE TRANSMITTANCE D'UNE COUCHE MINCE DE CZTS.....	38
TABLEAU II.3:ENERGIE DE GAP DU COMPOSE CZTS.....	39
FIGURE II.8 : MEILLEURS RENDEMENTS OBTENUE DANS LE DOMAINE DE RECHERCHE SUR LES CELLULES PV A PEROVSKITE CERTIFIES PAR NREL POUR DIFFERENTES COMPOSITIONS CHIMIQUES DES PEROVSKITES MIXTES [24].....	40
FIGURE II.9 : STRUCTURE HYBRIDE DE LA PEROVSKITE [22].....	41
FIGURE II.10 : COURBE D'ABSORPTION DES MATERIAUX : (λ) DE C-SI, A-SI : H (10% H), GAAS ET CH3NH3PBI3 [15]	42
FIGURE II.13 : MAILLE DE ZINC BLENDE ET WURTZITE [16].....	42
FIGURE II.14 : STRUCTURE CRISTALLINE DE ZNO EN PHASE A GAUCHE : ZINC BLENDE, A DROITE WURTZITE D'APRES OZGUR ET AL [18].....	44

Chapitre III : Simulation par logiciel "Solar Cell Capacitance Simulator" d'une cellule PV à base de CZTS

FIGURE III.1: LA FENETRE DU PANNEAU D'ACTION DU LOGICIEL SCAPS, LE PANNEAU PRINCIPAL.....	47
FIGURE III.2: LA FENETRE QUI PERMET DE SELECTIONNER LES GRANDEURS SIMULEES.....	48
FIGURE III.3: DEFINIR LE PROBLEME (SET-PROBLEM).....	48
FIGURE III.4: LANCER LES CALCULS.....	48
FIGURE III. 5: VISUALISER LES RESULTATS.....	49
FIGURE III.6: LE POINT DE FONCTIONNEMENT.....	49
FIGURE III.7: RESISTANCE SERIE ET RESISTANCE SHUNT.....	50
FIGURE III.8: LIGHT SOURCE.....	50
FIGURE III.9: ACTION.....	51
FIGURE III. 10: PANNEAU DE DEFINITION DE LA STRUCTURE DE LA CELLULE SOLAIRE.....	51
FIGURE III.11: LA FENETRE DE DEFINITION DES PROPRIETES DES COUCHES DE LA CELLULE SOLAIRE.....	52
FIGURE III.12: FENETRE DE RESULTAT.....	52
FIGURE III.13: STRUCTURE D'UNE CELLULE PV AVEC LA COUCHE DE PEROVSKITE.....	53
FIGURE III.14 : CARACTERISTIQUES I-V SIMULE POUR CELLULE SOLAIRE EN COUCHE MINCE AVEC ET SANS LA COUCHE MAPBI ₃	54
FIGURE III.15 : RENDEMENT QUANTIQUE EN FONCTION DE LONGUEUR D'ONDE.....	55
FIGURE III.16: STRUCTURE D'UNE CELLULE PV SANS LA COUCHE DE PEROVSKITE.....	56
FIGURE III.17 : CARACTERISTIQUES I-V SIMULE POUR CELLULE SOLAIRE EN COUCHE MINCE AVEC ET SANS LA COUCHE PEROVSKITE.....	56
FIGURE III.18 : LA CARACTERISTIQUE QE DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE AVEC ET SANS PEROVSKITE.....	57
FIGURE III.19 : INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE CZTS SUR LA CARACTERISTIQUE I-V.....	58
FIGURE III.20 : INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE CZTS SUR LA CARACTERISTIQUE QE.....	58
FIGURE III.21 : VARIATION DES PARAMETRES DE LA CELLULE PV EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE CZTS.....	59
FIGURE III.22 : INFLUENCE DU DOPAGE DE LA COUCHE CZTS SUR LA CARACTERISTIQUE I-V..	61
FIGURE III.23 : INFLUENCE DU DOPAGE DE LA COUCHE CZTS SUR LA CARACTERISTIQUE QE..	61
FIGURE III.24 : VARIATION DES PARAMETRES DE LA CELLULE PV EN FONCTION DU DOPAGE DE LA COUCHE CZTS.....	62
FIGURE III.25 : IMPACT DE LA CONCENTRATION DE DEFAUT DE LA COUCHE CZTS SUR LA CARACTERISTIQUE I-V.....	63
FIGURE III.26 : IMPACT DE LA CONCENTRATION DE DEFAUT DE LA COUCHE CZTS SUR LA CARACTERISTIQUE QE.....	63
FIGURE III.27 : VARIATION DES PARAMETRES DE LA CELLULE PV EN FONCTION DE LA CONCENTRATION DE DEFAUT DANS LA COUCHE CZTS.....	64
FIGURE III.28 : INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE MAPBI ₃ SUR LA CARACTERISTIQUE I-V.....	65
FIGURE III.29 : INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE MAPBI ₃ SUR LA CARACTERISTIQUE QE.....	65
FIGURE III.30 : VARIATION DES PARAMETRES DE LA CELLULE PV EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE MAPBI ₃	66
FIGURE III.31 : IMPACT DE LA VARIATION DU DOPAGE DE LA COUCHE MAPBI ₃ SUR LA CARACTERISTIQUE I-V.....	67
FIGURE III.32 : IMPACT DE LA VARIATION DU DOPAGE DE LA COUCHE MAPBI ₃ SUR LA CARACTERISTIQUE QE.....	67
FIGURE III.33 : VARIATION DES PARAMETRES DE LA CELLULE PV EN FONCTION DU DOPAGE N _A DE LA COUCHE MAPBI ₃	68

FIGURE III.34 : INFLUENCE DE LA CONCENTRATION DE DEFAUT DE LA COUCHE MAPBI ₃ SUR LA CARACTERISTIQUE I-V.....	69
FIGURE III.35 : INFLUENCE DE LA CONCENTRATION DE DEFAUT DE LA COUCHE MAPBI ₃ SUR LA CARACTERISTIQUE QE.....	69
FIGURE III.36 : VARIATION DES PARAMETRES DE LA CELLULE PV EN FONCTION DE LA CONCENTRATION DE DEFAUT DE LA COUCHE MAPBI ₃	70
FIGURE III.37 : INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE CDS SUR LA CARACTERISTIQUE I-V.....	71
FIGURE III.38 INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE CDS SUR LA CARACTERISTIQUE QE.....	71
FIGURE III.39 : VARIATION DES PARAMETRES DE LA CELLULE PV EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE DE CDS.....	72
FIGURE III. 40 : INFLUENCE DE LA CONCENTRATION DU DOPAGE DE LA COUCHE CDS SUR LA CARACTERISTIQUE I-V.....	72
FIGURE III.41 INFLUENCE DE LA CONCENTRATION DU DOPAGE DE LA COUCHE CDS SUR LA CARACTERISTIQUE QE.....	72
FIGURE III.42 : VARIATION DES PARAMETRES DE LA CELLULE PV EN FONCTION DU DOPAGE DE LA COUCHE DE CDS.....	74
FIGURE III.43 : INFLUENCE DE LA CONCENTRATION DE DEFAUT DE LA COUCHE CDS SUR LA CARACTERISTIQUE I-V.....	74
FIGURE III.44 : INFLUENCE DE CONCENTRATION DE DEFAUT DE LA COUCHE CDS SUR LA CARACTERISTIQUE QE.....	74
FIGURE III.45 : VARIATION DES PARAMETRES DE LA CELLULE PV EN FONCTION DE LA CONCENTRATION DE DEFAUT DE LA COUCHE DE CDS.....	76
FIGURE III.46 : INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE ZNO SUR LA CARACTERISTIQUE I-V.....	77
FIGURE III.47 INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE ZNO SUR LA CARACTERISTIQUE QE.....	77
FIGURE III.49 : VARIATION DES PARAMETRES DE LA CELLULE PV EN FONCTION DE LA CONCENTRATION DE DEFAUT DE LA COUCHE DE CDS.....	78
FIGURE III.50 : INFLUENCE DE LA CONCENTRATION DU DOPAGE DE LA COUCHE ZNO SUR LA CARACTERISTIQUE I-V.....	79
FIGURE III.51 INFLUENCE DE LA CONCENTRATION DU DOPAGE DE LA COUCHE ZNO SUR LA CARACTERISTIQUE QE.....	79
FIGURE III.52 : VARIATION DES PARAMETRES DE LA CELLULE PV EN FONCTION DU DOPAGE DE LA COUCHE DE ZNO.....	80
FIGURE III.53 : INFLUENCE DE LA CONCENTRATION DE DEFAUT DE LA COUCHE ZNO SUR LA CARACTERISTIQUE I-V.....	81
FIGURE III.54 INFLUENCE DE LA CONCENTRATION DU DOPAGE DE LA COUCHE ZNO SUR LA CARACTERISTIQUE QE.....	81
FIGURE III.55 : VARIATION DES PARAMETRES DE LA CELLULE PV EN FONCTION DE LA CONCENTRATION DE DEFAUT DE LA COUCHE DE ZNO.....	82
FIGURE III.56 : IMPACT DE LA VARIATION DE LA TEMPERATURE T EN (K) SUR LA CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION.....	83
FIGURE III.57 : IMPACT DE LA VARIATION DE LA TEMPERATURE T EN (K) SUR LE CARACTERISTIQUE RENDEMENT QUANTIQUE.....	83
FIGURE III.58 : L'IMPACT DE LA VARIATION DE T(K) SUR VCO, JCC, FF, μ.....	84
FIGURE III.59 : IMPACT DE LA VARIATION DE « RS » SUR VOC, JCC, FF, μ.....	86
FIGURE III.60 : VARIATION DES PARAMETRES DE LA CELLULE PV EN FONCTION DE LA RESISTANCE PARALLELE.....	87
FIGURE III.61 : CARACTERISTIQUE I-V POUR DIFFERENTES VALEURS L' AIR MASS.....	88
FIGURE III.62 : CARACTERISTIQUE QE POUR DIFFERENTES VALEURS L' AIR MASS.....	88

Liste des tableaux

Chapitre I : Notions générales sur les cellules solaires

TABLEAU I.1 : SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE [5].	7
--	---

Chapitre II : Les cellules PV réalisées a partir des couches dites “couches minces”

TABLEAU II. 1 : ÉVOLUTION D'UNE COUCHE MINCE LORS DU DEPOT [2].	29
---	----

TABLEAU II.2: VALEURS DE PARAMETRES ELECTRIQUES DU CZTS DONNEES DANS LA LITTERATURE. [12].	37
--	----

TABLEAU II.3:ENERGIE DE GAP DU COMPOSE CZTS.	39
--	----

TABLEAU 4: PARAMETRES DU SULFURE DE CADMIUM (CDS) A 300K [17].	43
--	----

TABLEAU II.5 : QUELQUES PROPRIETES ELECTRIQUES DE ZNO [20].	44
---	----

Chapitre III : Simulation par logiciel "Solar Cell Capacitance Simulator" d'une cellule PV à base de CZTS

TABLEAU III.1 : LES PARAMETRES PHYSIQUES D'ENTREE POUR LES MATERIAUX DES COUCHES MINCES MAPBI ₃ , CDS, ZNO ET CZTS.[7].	53
--	----

TABLEAU III.2 : RESULTATS DES PARAMETRES OBTENUS POUR LA CELLULE PV EN PRESENCE ET EN ABSENCE DE PEROVSKITE.	57
--	----

TABLEAU III.3 : INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE CZTS SUR LES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DE LA CELLULE SOLAIRE.	59
--	----

TABLEAU III.4 : L'IMPACT DE LA CONCENTRATION DU DOPAGE DE LA COUCHE CZTS SUR LES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DE LA CELLULE SOLAIRE.	61
--	----

TABLEAU III.5 : ETUDE DE LA VARIATION DE LA CONCENTRATION DE DOPAGE DE LA COUCHE CZTS SUR LES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DE LA CELLULE PV	63
---	----

TABLEAU III.6 : L'IMPACT DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE MAPBI ₃ SUR LES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DE LA CELLULE PV.	65
--	----

TABLEAU III.7 : L'IMPACT DU DOPAGE DE LA COUCHE MAPBI ₃ SUR LES PERFORMANCES DE LA CELLULE PV	67
--	----

TABLEAU III.8 : L'IMPACT DE LA VARIATION DE DEFECT DE LA COUCHE MAPBI ₃ SUR LES PARAMETRES DE LA CELLULE PV	69
--	----

TABLEAU III.9 : L'IMPACT DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE CDS SUR LES PERFORMANCES DE LA CELLULE PV	71
--	----

TABLEAU III.10 : IMPACT DU DOPAGE DE LA COUCHE CDS SUR LES PARAMETRES DE LA CELLULE PV	73
--	----

TABLEAU III.11 : L'IMPACT DE LA CONCENTRATION DE DEFECT DE LA COUCHE CDS SUR LES PARAMETRES DE LA CELLULE PV	75
--	----

TABLEAU III.12 : L'IMPACT DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE ZNO SUR LES PARAMETRES DE LA CELLULE PV	77
---	----

TABLEAU III.12 : ETUDE DE L'IMPACT DU DOPAGE DE LA COUCHE ZNO SUR LES PARAMETRES DE LA CELLULE PV	80
---	----

TABLEAU III.13 : ETUDE DE L'IMPACT DE LA CONCENTRATION DE DEFECT DE LA COUCHE ZNO SUR LES PARAMETRES DE LA CELLULE SOLAIRE.	81
---	----

TABLEAU III.14 : IMPACT DE LA VARIATION DE T(K) SUR LES PERFORMANCES DE LA CELLULE PV CZTS.	84
---	----

TABLEAU III.15 : IMPACT DE LA VARIATION DE « RS » SUR LES CARACTERISTIQUES DE LA CELLULE PV CZTS.	85
---	----

TABLEAU III.16 : ETUDE DE L'IMPACT DE LA VARIATION DE LA RESISTANCE PARALLELE SUR LES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DE LA CELLULE PV	87
TABLEAU III.17 : ETUDE DES EFFETS DE L'AIR MASSE SUR LES PERFORMANCES DE LA CELLULE PV	88

Liste des symboles

Symbole	Signification	Unité
AM	Masse d'air	Watt.m ⁻²
E	Energie des photons	J
C	Vitesse de lumière [3.10 ⁸]	m.s ⁻¹
v	Fréquence de l'onde électromagnétique associée au photon	Hz
λ	Longueur d'onde électromagnétique associée au photon	m
α	Coefficient d'absorption	cm ⁻¹
I	Courant de la cellule	A
I_{cc}	Courant de court-circuit	A
J_{sc}	Densité de courant de court-circuit	mA/cm ⁻²
I_{ph}	Photo-courant	A
I_{sat}	Courant de saturation	A
I_{max}	Courant maximale	A
V_{co}	Tension de circuit ouvert	V
V_{max}	Tension maximale	V
P_{in}	Puissance incidente	Watt
P_m	Puissance maximale	Watt
K	Constante de Boltzmann [1.38.10 ⁻²³]	m ² .Kg.s ⁻² K ⁻¹
e	Charge d'électron [1.602.10 ⁻¹⁹]	C
T	Température	K
R_{se}	Résistance série	Ω
R_{sh}	Résistance parallèle	Ω
D	Rendement	%
FF	Facteur de forme	%
RS	Réponse spectrale	%
N_A	Concentration des atomes accepteurs	cm ⁻³
N_D	Concentration des atomes donneurs	cm ⁻³
N	Concentration électrons	cm ⁻³
p	Concentration trous	cm ⁻³
I_{cell}	Courant fourni par la cellule	A
A	La surface éclairée de la cellule	cm ²

Liste des acronymes

Abréviation	Signification
PV	Photovoltaïque
Eg	L'énergie de bande interdite en eV
CZTS	Cuivre, Zinc, Étain, Soufre(Cu ₂ ZnSnS ₄)
CZTSe	Cuivre, Zinc, Etain, Sélénium
CZTSSe	Cuivre, Zinc, Etain, Soufre, Sélénium (Cu ₂ ZnSn(S,Se) ₄)
CdS	Sulfure de Cadmium
CIGS	Di-sélénium de galium d'indium de cuivre (Cu (In, Ga) Se ₂)
CdTe	Tellure de Cadmium
GaAs	Arséniure de Gallium
ZnO	Oxyde de Zinc
a-Si	Silicium amorphe
CVD	Chemical VaporDeposition
PVD	PysicalVaporDeposition
ITO	Indium Tin Oxide
TCO	Transparent Conducting Oxide
Mo	Molybdénium
Ni	Nickel
Al	Aluminium
AM 1.5	Spectre de la lumière solaire
IBM	International Business Machines
SRH	Shockley-Read-Hall
UV	Ultra violet
IR	Infrarouges
Gi	Source de courant parfait
D	Diode materialisant
Si	silicium

Introduction générale

Introduction générale

Face à l'accroissement de la population mondiale et à une demande en hausse des besoins énergétique pour les consommations des individus et pour les besoins des industries et prenant en considération l'épuisement des ressources en énergie fossile qui ne renouvellent malheureusement pas, il devient plus que nécessaire de trouver des alternatives à ces énergies afin de faire face à ces besoins qui ne cessent de croître. Une des alternatives serait d'utiliser les énergies propres dites renouvelables afin de pouvoir répondre aux besoins en énergies satisfaisant la consommation des individus sur notre planète. [1]

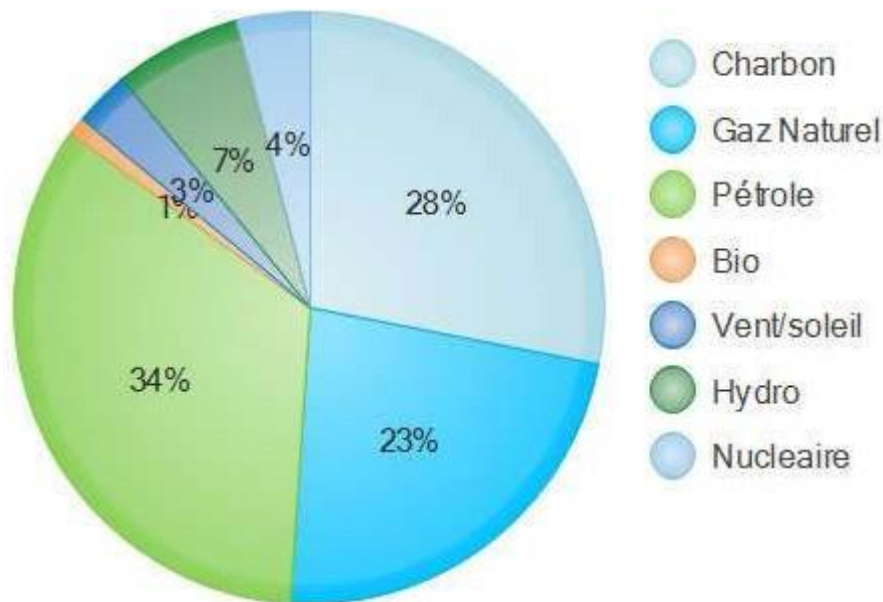


Figure 1: La consommation en énergie pour différentes sources en 2017 [3]

Selon le dernier rapport de REN21 (Réseau de politiques sur les énergies renouvelables pour le XXIème siècle - 2017), ces dernières présentent environ 15% de la consommation énergétique mondiale en énergie et de la production en électricité. [2]

Les énergies renouvelables regroupent différentes sources d'énergétiques telles que le soleil, le vent, le mouvement de l'eau, ou les réserves sont illimitées. Les technologies photovoltaïques (PV) présentent des perspectives prometteuses et sont perçues comme un avenir viable pouvant remplacer des différents systèmes de production d'électricité basés sur des ressources énergétiques, naturelles, non renouvelables. C'est justement en 1958 qu'une première utilisation du photovoltaïque a eu lieu dans le domaine satellitaire « le satellite Vanguard 1 » suivie par des applications terrestres. [3]

Les semi-conducteurs jouent un rôle incomparable dans les applications commerciales

et sont de nos jours convenablement utilisés dans la production d'électricité sous forme d'énergie solaire. Les cellules solaires ont pour rôle d'absorber le rayonnement solaire et de le convertir ensuite en énergie électrique. C'est ainsi que des efforts colossaux et des études intensives furent menées au cours de ces dernières décennies afin de concevoir différentes cellules solaires en adoptant de nouveaux matériaux permettant la conception de cellules solaire à faible coût, fiables et stables.

Il existe de nombreuses filières et technologies photovoltaïques sur le marché. La technologie du silicium Si cristallin occupe sans aucun doute la plus grande place. Dès les années 1980, de nombreuses études ont été menées dans le but principal de diminuer les coûts de production et d'obtenir un rendement élevé. L'une des solutions proposées consiste à réduire la quantité de matériaux SC qui permet de concevoir ces cellules PV et prolonger sa durée de vie. Cela a entraîné l'apparition de nouveaux procédés technologiques, permettant de réaliser des cellules PV dites deuxièmes et troisièmes générations, et reposant sur l'utilisation de couches dites minces. Les couches minces les plus utilisés jusqu'à présent sont conçues à partir de silicium amorphe, CdTe, CIGS, GaAs, etc. [4], cependant sont coûteuses et rares (tels que l'In, le Ga, le Te) et toxiques (tels que le Cd). C'est pourquoi il est essentiel d'étudier de nouveaux matériaux absorbeurs solaires composés d'éléments respectueux de l'environnement, moins coûteux et abondants sur la surface de la Terre. [5].

Parmi les différentes technologies PV solaires de troisième génération, qui furent étudiées au cours de ces deux dernières décennies, la seule technologie ayant connu une évolution marquée en termes d'efficacité de conversion énergétique est la technologie des cellules PV utilisant les matériaux structurés à base de pérovskite, comme les matériaux hybrides organiques/inorganiques.

Les cellules PV pérovskites ont connu une évolution fulgurante, ces cellules présentent un énorme potentiel avec un rendement de conversion de puissance record, rivalisant avec celui des cellules PV à base de Si cristallin sur une période très courte, avec un rendement de conversion maximal de plus de 22%. Sur une très petite surface. [3]

Dans ce contexte, notre travail consiste à contribuer à l'étude de ce type de cellules dites à couches mince et particulièrement à base de CZTS en ajoutant une couche « Back Surface Field » en matériau pérovskite. Une variation des paramètres de la structure étudiée nous ont permis d'observer l'effet de ces variations sur les performances de la cellule étudiée. Votre étude a été réalisée par le biais du logiciel SCAPS-1D. Les résultats obtenus ont été reporté sur l'outil Origin pour la représentation graphique des caractéristiques I-V et QE et les paramètres de la cellule.

Notre mémoire est structurée en trois chapitres en plus d'une introduction générale.

- Au chapitre 1, nous donnons des généralités sur les cellules solaires et l'effet photovoltaïque.
- Le chapitre 2 fut dédié à la présentation de cellules solaire à couches minces qui est l'objet de notre étude. Nous avons aussi présenté les matériaux qui entrent dans la composition de notre cellule solaire.
- Au chapitre 3, nous avons tout d'abord présenté le logiciel de simulation SCAPS, que nous avons utilisé pour cette étude, suite à quoi nous avons présenté nos résultats de simulation, obtenus après à la variation des paramètres de la cellule à base de CZTS que nous avons réalisée sous environnement SCAPS.

Nous finissons notre travail par une conclusion.

Références bibliographiques introduction générale

- [1] S. Chu and A. Majumdar, <Opportunities and challenges for a sustainable energy future, = nature, vol. 488, no. 7411, p. 294, 2012.
- [2] A.B.MORAN et A.A.GARCIA-JALON «El mercado energético y de renovables. El caso de Siemens Gamesa», Boletín Económico de ICE, 3097, 2018.
- [3] A.A.KANOON «Etude théorique et prédictive des nouveaux matériaux pour conception des cellules solaires et applications photovoltaïques », Thèse Doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen Le 06/07/2019.
- [4] N.TOUAFEK « Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ » Université Des Frères Mentouri – Constantine, 2015.
- [5] W. Wang, M. T. Winkler, O. Gunawan, T. Gokmen, T. K. Todorov, Y. Zhu, D. B. Mitzi, «Device characteristics of CZTSSe thin-film solar cells with 12.6% efficiency», Adv Energy Mater 4 (2014) 1301465.

Chapitre I : Notions générales sur les cellules solaires

I.1. Introduction

L'humanité consomme près de 10 milliards de tonnes de pétrole par an, pourtant la quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la terre) pendant une heure pourrait largement couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant une année, d'autant plus que cette énergie est, à nos jours, celle qui est la plus répandue et la plus répartie à l'échelle mondiale. [1]

Il existe deux grandes catégories d'application de l'énergie solaire à cycle court :

- L'énergie solaire thermique qui repose sur l'utilisation de la chaleur rayonnante.
- L'énergie photovoltaïque qui utilise le rayonnement pour générer de l'électricité.

Dans ce présent chapitre, nous donnons brièvement des notions générales concernant le photovoltaïque, ce qui permettra d'étudier les cellules PV à base de CZTS.

I.2. L'énergie solaire

Le Soleil produisant de la lumière ainsi que de la chaleur permet la vie sur Terre. De nos jours, l'énergie solaire rime indéniablement avec écologie. Les différentes technologies ne cessent d'évoluer et permettent de mettre à profit les rayons du soleil pour obtenir de l'énergie. Rappelons que le soleil est une source intarissable d'énergie considérée comme infinie et abondante. Cette énergie considérée comme passive est simplement captivée par des panneaux solaires thermiques ou des panneaux solaires photovoltaïques.

Ainsi, l'énergie solaire est une forme d'énergie que le soleil va envoyer et diffuser dans l'atmosphère. Celle-ci est convertie par les panneaux solaires et utilisée sous deux formes : électrique ou thermique. La production d'énergie solaire PV converti les rayons du soleil en électricité grâce aux cellules PV, alors que l'énergie thermique sera utilisé pour la production de la chaleur.

Les panneaux PV peuvent être placés partout à travers le monde où le soleil brille comme dans les pays situés à la ligne équatoriale, mais ils peuvent aussi être utilisés comme source d'énergie supplémentaire dans toutes les régions situées plus au nord ce qui est le cas de notre région. [1]. Le photovoltaïque est donc une solution envisageable pratiquement partout. Depuis des années, la Chine est bien connue comme étant le premier pays au monde qui produit, au niveau mondial, le plus d'énergie solaire thermique. En 2021, la Chine a occupé près de 73 % de production de chaleur d'origine solaire au monde.

L'énergie solaire est considérée comme étant une source d'énergie renouvelable

Importante et pouvant servir d'alternative aux énergies conventionnelles (non renouvelables) qui dépendent des combustibles fossiles et particulièrement le pétrole, le charbon et le gaz naturel et permettant de répondre aux besoins énergétiques mondiaux . Les scientifiques ont découvert que la meilleure façon d'utiliser l'énergie lumineuse du soleil (qui représente 10.000 fois l'énergie nécessaire) est de la convertir en électricité. Ainsi, le photovoltaïque utilise des panneaux solaires constitués de cellules solaires à semi-conducteurs pour convertir directement l'énergie solaire en énergie électrique par effet photovoltaïque. [2]

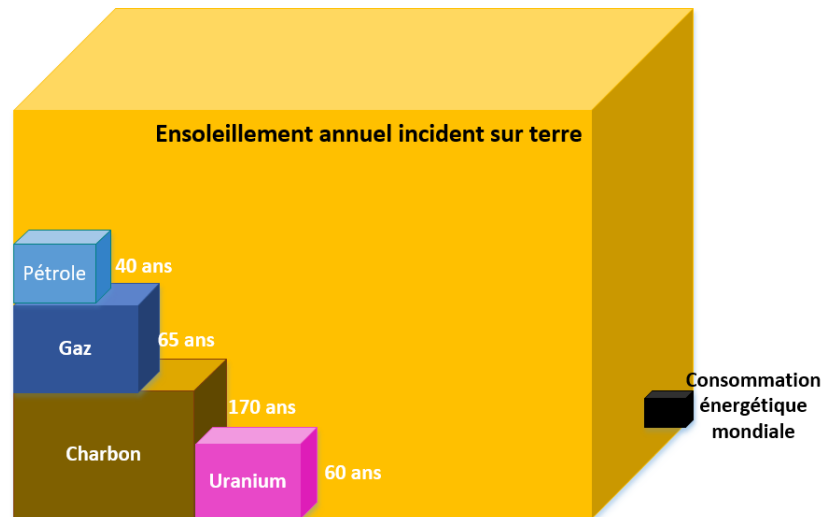


Figure I.1: Les réserves mondiales estimées en énergies fossiles. [3]

I.2.1. Le spectre solaire

Rappelons tout d'abord que la lumière est un flux de photons qui est porté par une onde électromagnétique émise par une source d'énergie comme le Soleil. Ces photons sont caractérisés par leur longueur d'onde notée λ , et qui est directement liée à leur énergie. En effet, plus λ , est courte, plus elle transporte de l'énergie.

Le spectre électromagnétique est donc la décomposition du rayonnement électromagnétique émis par le soleil en longueurs d'ondes. En effet, ce spectre est constitué de divers rayonnements de couleurs, chacun des rayonnements est caractérisé par sa gamme de longueur d'ondes. La couleur est influencée par la fréquence lumineuse. Ainsi, les photons qui sont considérés comme des grains de lumière composent ce rayonnement lumineux, transportent une énergie dépendant de la longueur d'onde.

Louis de Broglie a apporté des améliorations à cette relation en 1924 en démontrant que la lumière était à la fois corpusculaire (présence de photons) et ondulatoire, en effet, cette dernière est une onde électromagnétique qui se propage avec une fréquence de vibration et une

longueur d'onde. Le phénomène de diffraction et d'interférences qu'on observe lors de la propagation d'énergie lumineuse est une manifestation d'un comportement ondulatoire de la lumière. L'existence de photons montre que la lumière présente un aspect particulaire, n'infirmant pas l'aspect ondulatoire. En conclusion on peut affirmer que la lumière se comporte comme une onde électromagnétique, ou on peut associée à chaque radiation lumineuse une longueur d'onde λ ou une fréquence f . Autrement dit une couleur unique, sera caractérisée par une longueur d'onde unique lui correspondant. Cette dernière et la fréquence sont liées par la relation suivante :

$$E = h \nu = h c / \lambda \quad \text{I.1}$$

Où :

h est la constante de Planck,

ν La fréquence,

c La vitesse de la lumière dans le vide

Et λ la longueur d'onde. [4]

L'œil humain ne peut discerner qu'une courte partie de l'ensemble du spectre électromagnétique. En figure I.2 (étendue du spectre visible) les longueurs d'ondes sont accoiser aux radiations visibles. Les longueurs d'onde visibles sont d'environ 400 à 800 nm, soit 380 à 780 nm. En deçà d'une longueur d'onde de 400 nm. On retrouve les radiations ultra-violettes. Au-delà de 800 nm, on trouve les radiations infra-rouges. [4].

Le spectre électromagnétique du soleil s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les longueurs d'onde visibles ont la plus grande ampleur de l'irradiante solaire avec un pic dans le bleu-vert [4].

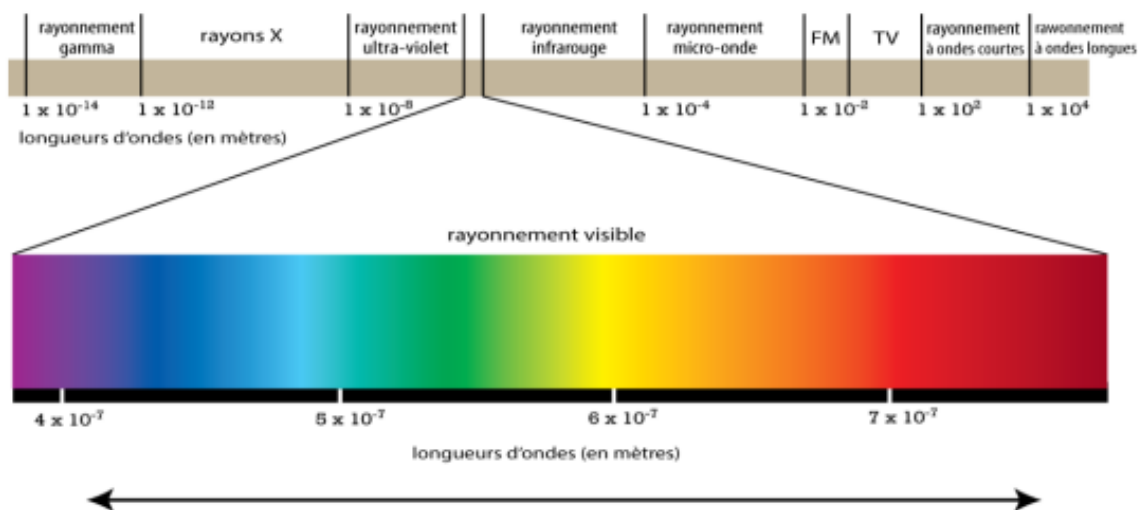


Figure I.2: spectre électromagnétique [4].

Les rayons		Gamme de longueur d'onde
Rayons X		0.01 à 1 Å
UltraViolet	UV extrême	1 à 100 Å
	UV éloigné	10 à 100 nm
	UV moyen	100 à 200 nm
	UV proche	200 à 300 nm
Rayons Gamma		300 à 400 nm
Lumière visible	Violet	400-455 nm
	Bleu	455-492 nm
	Jaune	492-577 nm
	Vert	577-597 nm
	Orange	597-622 nm
	Rouge	622-770 nm
Infrarouge	IR proche	770 à 2500 nm
	IR moyen	2,5 à 30 µm
	IR éloigné	30 à 300 µm

Tableau I.1 : Spectre électromagnétique [5].

On remarque ainsi que l'ultraviolet (UV) s'étend de 200 à 400 nm, le bleu de 400 à 500 nm, le vert de 500 à 600 nm, le rouge de 600 à 700 nm, le proche infrarouge (NIR) de 700 à

800 nm et enfin l'infrarouge (IR) de 800 à 1200 nm.

I.2.2. Notion de Masse d'Air

En météorologie ou en climatologie, une masse d'air correspondra à une étendue de l'atmosphère, plus ou moins importante, où les conditions de température, d'humidité et aussi de pression sont uniformes dans l'ensemble. Une masse d'air peut être froide ou chaude, sèche ou humide. La masse d'air est considérée comme étant une zone stable au sens des paramètres physiques mesurés en son sein.

En astronomie, la masse d'air désigne la quantité d'atmosphère terrestre traversée par la lumière pour atteindre l'observateur.

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus son rayonnement est modifié.

On peut ainsi considérer la « Masse d'Air », M , comme étant la masse d'atmosphère qui est franchie par le rayonnement solaire directe afin d'atteindre le sol (par ciel dégagé), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer (voir figure I.3).

La détermination de la masse d'air dépend de la hauteur angulaire du soleil (h). à l'aide des points M , A et O , on détermine la longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère par la relation suivante :

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \quad \text{I.2}$$

On appelle m le rapport OM / OA , soit $1/\sin h$.

Pour une pression P qui diffère de la valeur 1013 mbar et pour une altitude z donné en km, on désigne par masse atmosphérique dites aussi nombre d'air masse, le nombre M tels que [6] :

$$M = \frac{P}{1013 \sin(h)} \exp\left(-\frac{z}{7.8}\right) \quad \text{I.3}$$

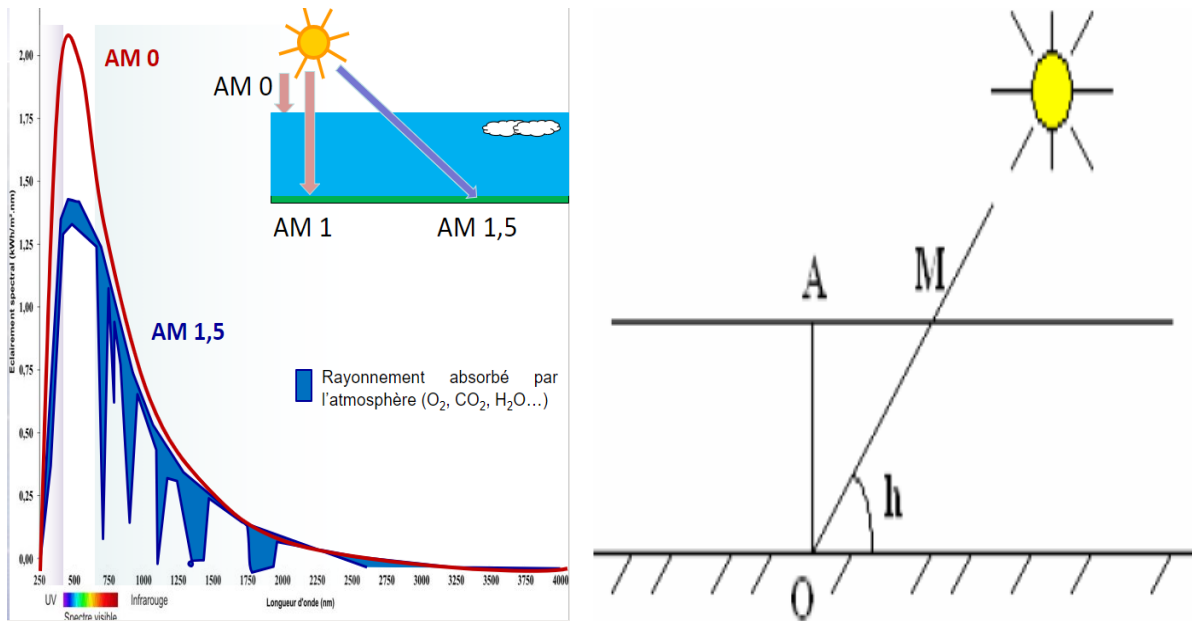


Figure I.3 : Le rayonnement solaire et le nombre d'air masse [6].

I.3 Présentation des cellules solaires (photovoltaïques : PV)

I.3.1. Définitions

La cellule photovoltaïque dite aussi cellule solaire où photopile est le plus petit constituant d'une installation solaire. La cellule solaire est conçue à partir de matériaux semi-conducteurs, d'une couche anti-reflet qui va permettre une pénétration maximale des rayons solaires, d'une grille conductrice placée au-dessus ou cathode et d'un métal conducteur en dessous ou anode, les cellules solaires conçues récemment ont même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, présentes pour améliorer le rendement des cellules.

Les cellules PV conventionnelles sont principalement constituées de silicium (Si). Elle apparaît usuellement sous la forme d'une plaque fine. Cette plaque a une largeur d'environ dix centimètres de large et est pliée entre deux contacts métalliques en sandwich son épaisseur est d'environ un millimètre. [7]

La figure qui suit représente la structure la plus simple d'une cellule PV, elle comporte une jonction entre deux zones dopées différemment p et -n d'un même matériau SC pour une homo-jonction ou entre deux matériaux de types différents pour une hétérojonction, la moins

épaisse étant soumise au flux lumineux. Ainsi chacune des régions est reliée à une électrode métallique au moyen d'un contact ohmique de faible résistance.

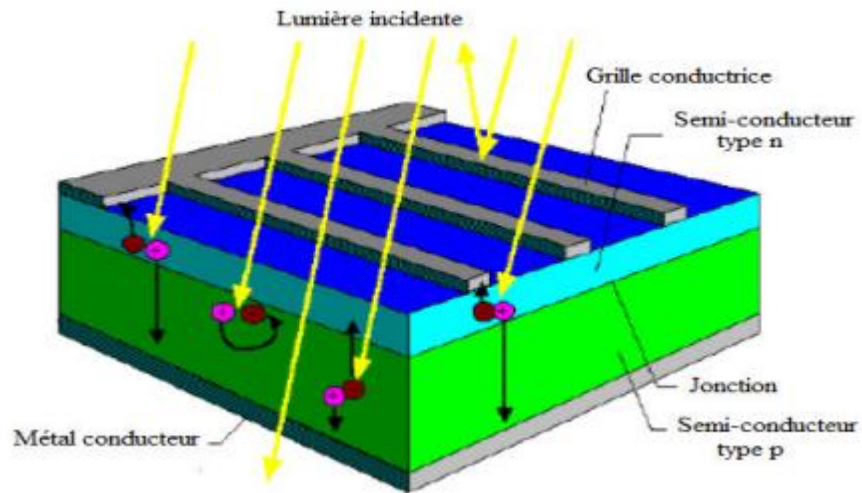


Figure I.4 : Structure basique d'une cellule photovoltaïque [9]

Les cellules solaires sont combinées dans des modules solaires PV, et donc branchées en série et/ou parallèle pour obtenir la puissance désirée.

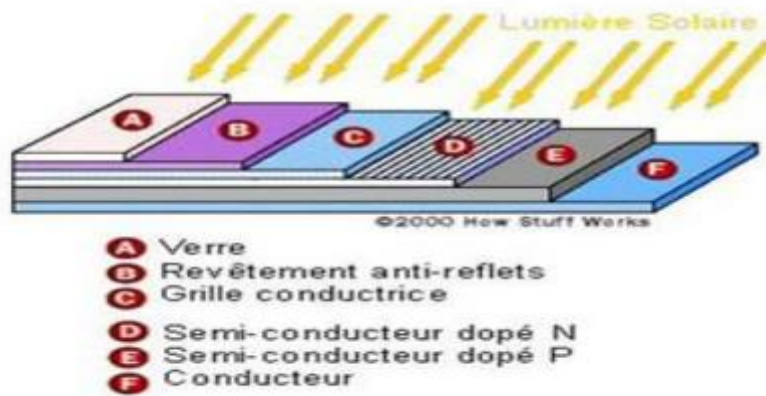


Figure I.5 : Structure basique d'une cellule photovoltaïque [10]

Les cellules solaires ont pour rôle de convertir directement l'énergie de la lumière en énergie électrique. La tension qu'elle produit par la cellule solaire dépend de la lumière incidente. Les cellules photovoltaïques produisent un courant électrique continu qui peut être transformé en courant alternatif, grâce à un onduleur solaire. [7-8]

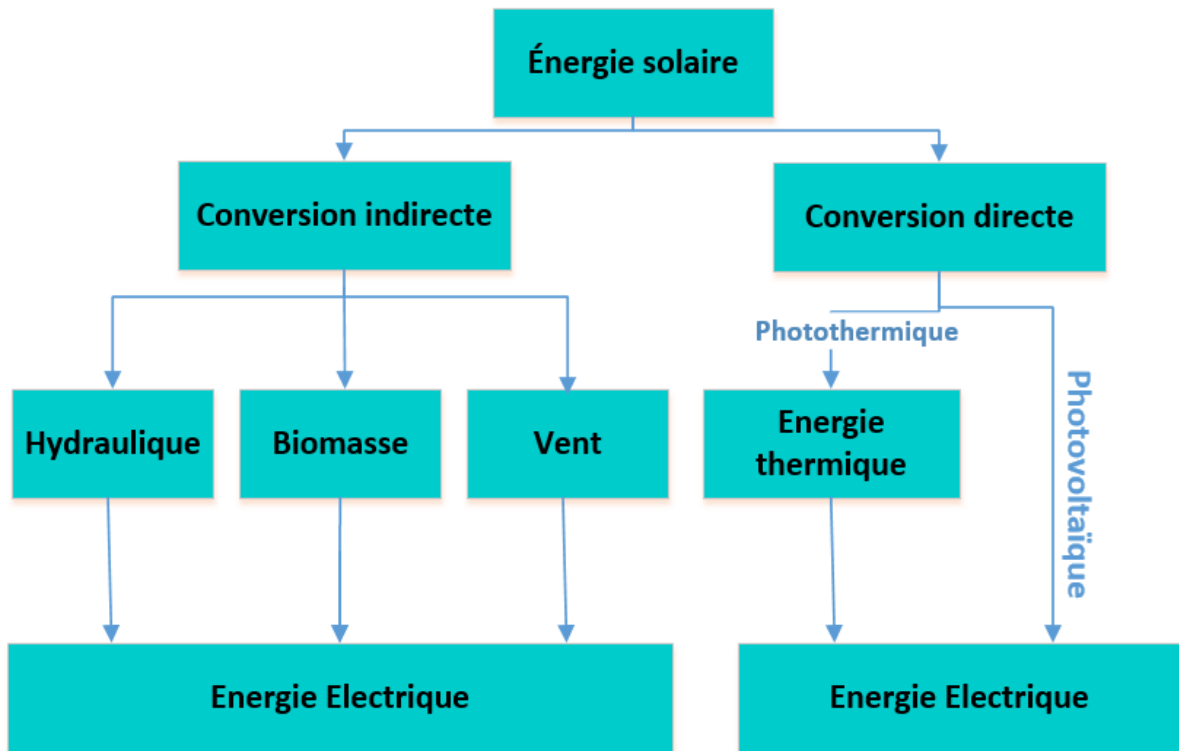


Figure I.6 : Conversion de l'énergie du soleil en énergie électrique.

I.3.2. Modélisation électrique d'une cellule PV

Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque est présenté dans la figure I.2. Il inclut une source de courant, une diode, une résistance série et une résistance shunt.

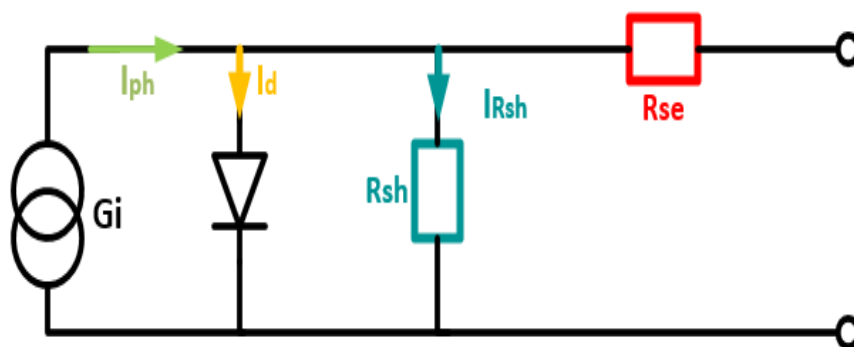


Figure I.7 : Schéma équivalent de la cellule solaire.

G_i : Source de courant parfaite.

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

R_{sh} : Résistance shunt qui modélise en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

R_{se} : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contact).

Sous éclairement, la cellule solaire conçue à partir de matériaux sensibles à la lumière, sera utilisée comme générateur d'énergie.

Notons que le modèle à quatre paramètres permettant de modéliser la cellule solaire est un modèle largement utilisé. Ce dernier a été étudié par Townsend et Beckmann. Ce dernier traite la cellule photovoltaïque comme une source de courant, dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série R_s .

Pour ce modèle, les quatre paramètres apparaissant dans l'équation de la caractéristique $I(V)$ sont le courants photonique I_{ph} , la résistance série R_s , et deux caractéristiques de la diode I_s et n . Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données des fabricants.

L'équation électrique qui définit le comportement d'une diode classique peut être utilisée pour décrire ce comportement en statique. Donc, l'équation suivante peut être utilisée pour décrire le régime électrique statique d'une cellule photovoltaïque composée d'une jonction PN en silicium : [9]

$$I_{cell} = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{V_{cell} + (I_{cell} \cdot R_{se})}{nVt} \right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + (I_{cell} \cdot R_{se})}{R_{sh}} \quad \text{I.4}$$

Où, $Vt = \frac{K.T}{e}$: le potentiel thermodynamique,

I_{sat} : est le courant de saturation de la jonction,

K : est la constante de Boltzman ($1.381 \cdot 10^{-23}$ Joules/Kelvin),

T : est la température de la cellule en Kelvin,

e : est la charge d'un électron,

n : est le facteur de non idéalité de la jonction,

I_{cell} : est le courant qui est fourni par la cellule,

V_{cell} : est la tension recueillie aux bornes de la cellule,

I_{cc} : est le courant produit par la cellule lorsqu'elle est court-circuitée,

R_{sh} : est la résistance qui modélise les courants de fuites de la jonction,

R_{se} : est la résistance série qui caractérise les diverses résistances de contacts et de connexions.

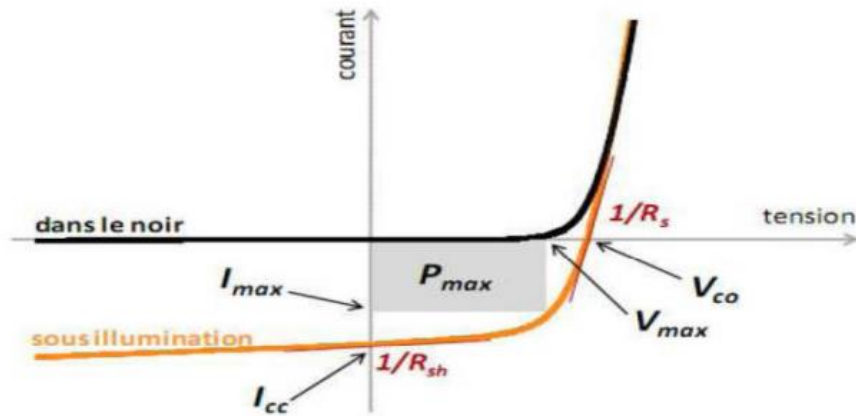


Figure I.8 : caractéristique d'une cellule PV

I.3.3. Structure physique

La cellule PV est constituée d'une jonction p-n. Généralement, l'assemblage de plusieurs couches de matériaux semi-conducteurs de compositions différentes, forme une jonction. Une cellule solaire photovoltaïque est composée d'une jonction p-n, la couche supérieure étant un matériau de type n (semi-conducteur dopé avec des pentavalents) et la couche inférieure de type p (semi-conducteur dopé avec des trivalentes). Pour fabriquer ces jonctions, on effectue un traitement de surface pour déposer un semi-conducteur de type n sur la surface externe d'un matériau de type p.

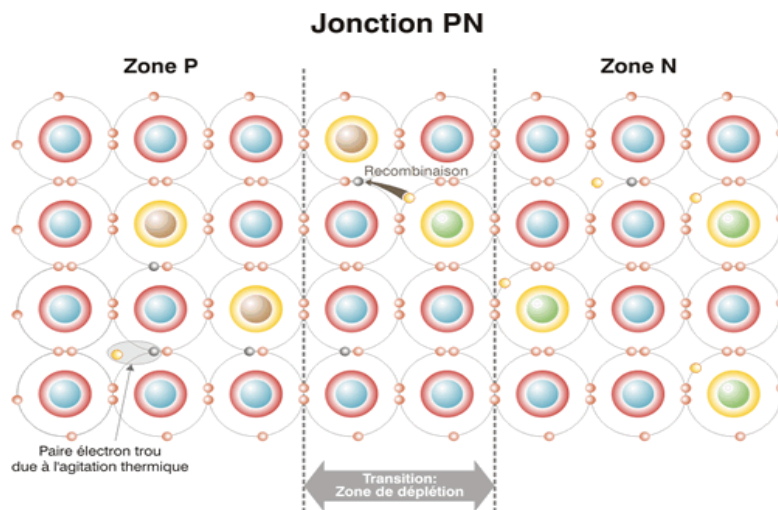


Figure I.9 : La jonction PN [10]

L'assemblage de ces deux semi-conducteurs dopé différemment génère une barrière de potentiel à la base du champ électrique permanent appelée zone de déplétion, qui se forme par recombinaison du surplus de trous et d'électrons des zones p et n remise en contact.

Le schéma qui suit représente les niveaux énergétiques au voisinage de la jonction.

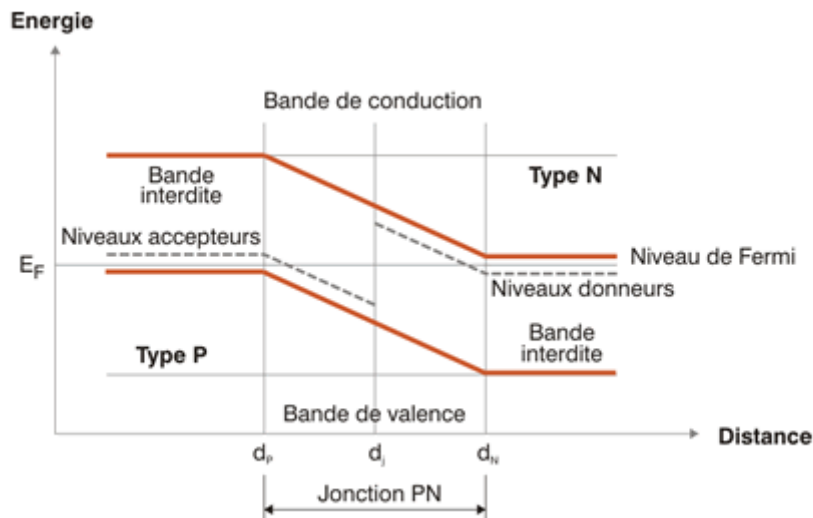


Figure I.10 : Mise en évidence des niveaux d'énergie au voisinage de la jonction. PN [11]

Lorsqu'un photon traverse la jonction, il dépose son énergie et provoque un transfert d'électrons de la zone n, vers la zone p. En raccordant chacune des deux faces de la jonction à un fil conducteur, on obtient un courant électrique. Le champ électrique généré au niveau de la jonction obtenue suite à mise en contact de ces deux zones dopées différemment permettra de séparer les charges électriques photo-produites par la lumière solaire (paires électron-trou) et assurera leur évacuation du cristal. [12]

I.3.3.1. Couche semi conductrice dopé p (collecteur)

Les atomes externes du matériau semi-conducteur ont une quantité inférieure d'électrons libres. Les couches semi-conductrices à conduction de type p (base) sont utilisées pour piéger les porteurs minoritaires et produisent un surplus positif de charges (trous d'électrons) dans le matériau semi-conducteur. [12]

I.3.3.2. Couche semi conductrice dopé n (émetteur)

Le matériau SC contient des atomes externes qui ont une grande quantité d'électrons libres, ce qui entraîne un excès négatif de porteurs de charges (électrons). Nous appelons ces couches des couches semi-conductrices à conduction de type n (émetteur). [12]

I.3.3.3. Doigts de contact et contact métallique de la face arrière

Les doigts de contact sont connectés aux barres avec le contact métallique de la face arrière. Ils collecteront le courant produit et l'envoieront à la barre. [12]

I.3.3.4. Couche anti-réflexion

La couche anti-réflexion (CAIR) protège la cellule photovoltaïque en réduisant les réflexions à sa surface. En photovoltaïque, divers CAIR sont utilisés tels que le titane, le silicium, le zinc, le magnésium ferrique, le silicium nickelé, etc. [12]

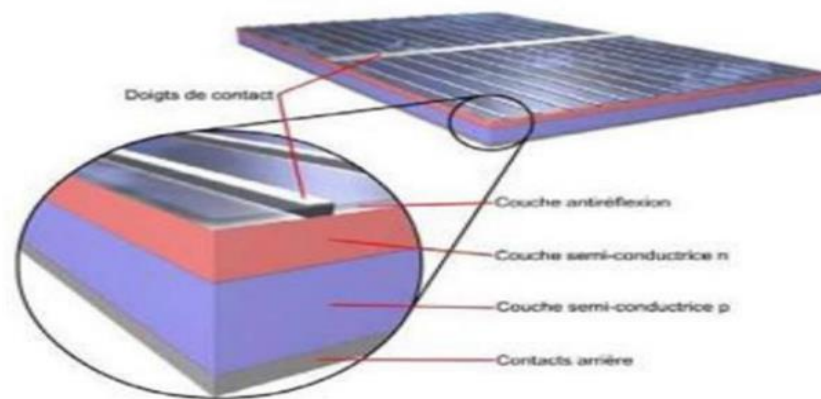


Figure I.11 : structure physique d'une cellule photovoltaïque. [12]

I.3.4. Définition de l'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est le phénomène qui se produit lorsque les mécanismes d'absorption des radiations solaires sont combinés à l'action d'un champ électrique qui crée une barrière de potentiel dans une jonction. Ce domaine est chargé de séparer les porteurs générés avant qu'ils ne se recombinent. [13]

Le type de technologie solaire détermine le processus photovoltaïque utilisé, Cependant, quelques étapes sont communes aux cellules solaires photovoltaïques. [13]

- La cellule photovoltaïque absorbe la lumière et libère les électrons :

Tout d'abord, une cellule PV est atteinte par la lumière ainsi les photons sont absorbés par le matériau SC, généralement du silicium. La libération d'électrons dans le matériau est provoquée par cette énergie lumineuse entrante, qui deviendra ensuite l'électricité. [13]

- Les électrons commenceront à circuler, par conséquent un courant électrique sera créé :

Les cellules PV utilisent deux couches de matériau qui ont chacune été traitées spécifiquement (appelée « dopage ») pour générer un champ électrique, ce qui signifie qu'un côté est chargé positivement et l'autre négativement. Ce champ électrique crée un courant électrique qui fera circuler des charges négatives libres dans une direction à travers la cellule solaire. [13]

- Le courant électrique est capté et combinée à d'autres cellules solaires.

I.4. Historique concernant les cellules PV

Le terme « photovoltaïque » tire son origine du mot grec ancien « photo » et est nommé en l'honneur du physicien italien “**Alessandro Volta**“. Ce dernier a inventé la batterie en 1800 et l'a nommée en l'honneur de l'unité de mesure de tension volt. [7]

En 1839, le physicien français “**Alexandre Edmond Becquerel**“ a remarqué pour la toute première fois l'effet photovoltaïque et ceci en observant la tension produite par la lumière du soleil. [7]

Smith et Adams ont déposé les premiers rapports sur la photoconductivité en travaillant sur du silicium en 1873 et 1876. [12]

Pochettinon a observé la photoconductivité dans l'anthracène en 1906, Albert Einstein a expliqué en 1912 le phénomène photovoltaïque, et l'utilisation potentielle de matières organiques comme photorécepteurs de systèmes d'imagerie a été reconnue dans la fin des années 1950. [7][12]

Les laboratoires Bell en 1954, ont développés la première cellule solaire inorganique. L'intérêt scientifique ainsi que le potentiel commercial de la recherche en photoconductivité ont augmenté car elles étaient basées sur le Si et avait un rendement de 6 %. [12]

En 1958, le satellite artificiel III, également connu sous le nom de satellite Van Guard des États-Unis, est utilisé pour la première fois pour des fins spatiales. Il est équipé de cellules photovoltaïques. [7]

Cependant, l'utilisation des cellules solaires dans les satellites artificiels n'a commencé qu'au milieu des années 1970. A partir des années 1980 et suite à une deuxième crise pétrolière, l'intérêt a utilisé des cellules PV a augmenté considérablement à l'échelle mondiale. [7]

En 2001, Shmidt-Mende a créé une cellule PV autonome fabriquée à partir de cristaux liquides d'hexabenzocoronène et de pérylène. Quelques années postérieurement, les progrès scientifiques et technologiques ont continué. En 2008, Fujikura, une entreprise spécialisée dans la fabrication de composés électroniques, a réussi à faire fonctionner une cellule PV organique de type DSSC (Dye-Sensitized Solar Cell ou cellule Gratzel) en continu pendant 1000 heures à une température de 300°C et un taux d'humidité de 85 %. [12]

Le marché du photovoltaïque a connu une croissance significative ces dernières années grâce à une amélioration du rendement de conversion et à une réduction des coûts de production. Les matériaux organiques sont considérés comme une alternative prometteuse pour diverses raisons, notamment un faible coût, une matière première illimitée, une facilité de mise

en œuvre, une technologie de basse température, de grandes surfaces et des dispositifs souples.
[12]

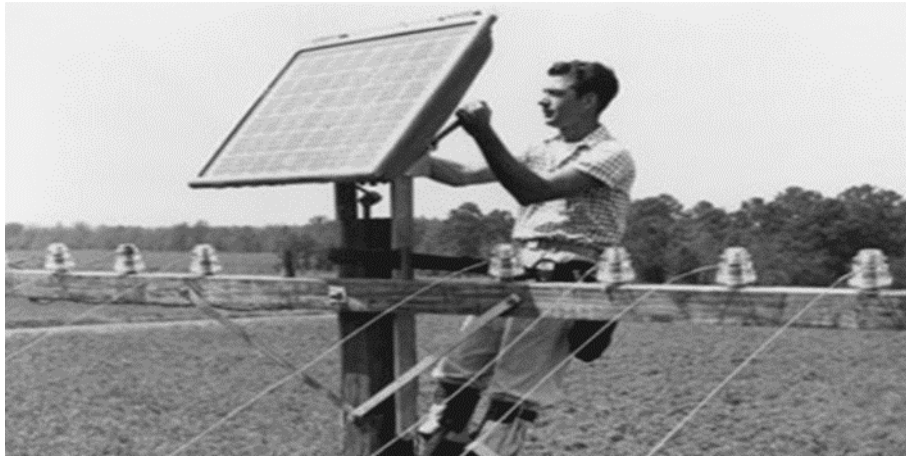


Figure I.12 : Charles Fritts 27 février 1850 mort en 1903. [14]

I.5. Principe de fonctionnement d'une cellule PV

Le principe de fonctionnement d'une cellule PV est basé sur l'effet photovoltaïque, l'interaction entre le rayonnement électromagnétique du soleil et les semi-conducteurs de type n et p pour produire de la tension et du courant électrique [15].

Un électron peut être arraché de la matrice d'un SC lorsqu'il est exposé à la lumière, ce qui provoque un « trou ». En l'absence de dispositif supplémentaire, l'électron trouve rapidement un trou pour se recombiner, dissipant ainsi l'énergie du photon. Une cellule photovoltaïque fonctionne en forçant les électrons et les trous à se diriger vers la face opposée du matériau plutôt que de se recombiner en volume. Cela crée une différence de potentiel et une tension entre les deux faces, similaire à une pile. L'une des méthodes couramment utilisées pour atteindre cet objectif est de générer un champ électrique via une jonction P-N, c'est-à-dire entre deux couches dopées P et N [7].

Lorsque la cellule solaire traditionnelle est éclairée, trois processus physiques se produisent : [15]

- ✓ Création de paires électrons-trous et absorption des photons du rayonnement incident par le matériau semi-conducteur.

- ✓ Un champ électrique généré par la jonction p-n entre les deux semi-conducteurs sépare les porteurs de charge.
- ✓ Les porteurs sont transportés et collectés aux électrodes de sortie.

Les capacités des matériaux semi-conducteurs à absorber la lumière sont essentielles à la production d'énergie photovoltaïque. Cependant, la lumière que nous voyons tous les jours n'est qu'une partie du rayonnement solaire total qui se produit sur Terre.

Les cellules solaires cristallines à base de silicium sont basées sur une jonction p-n. Le semi-conducteur de type p est le silicium dopé au bore. La partie n'est obtenue en diffusant du phosphore à sa surface. [15]

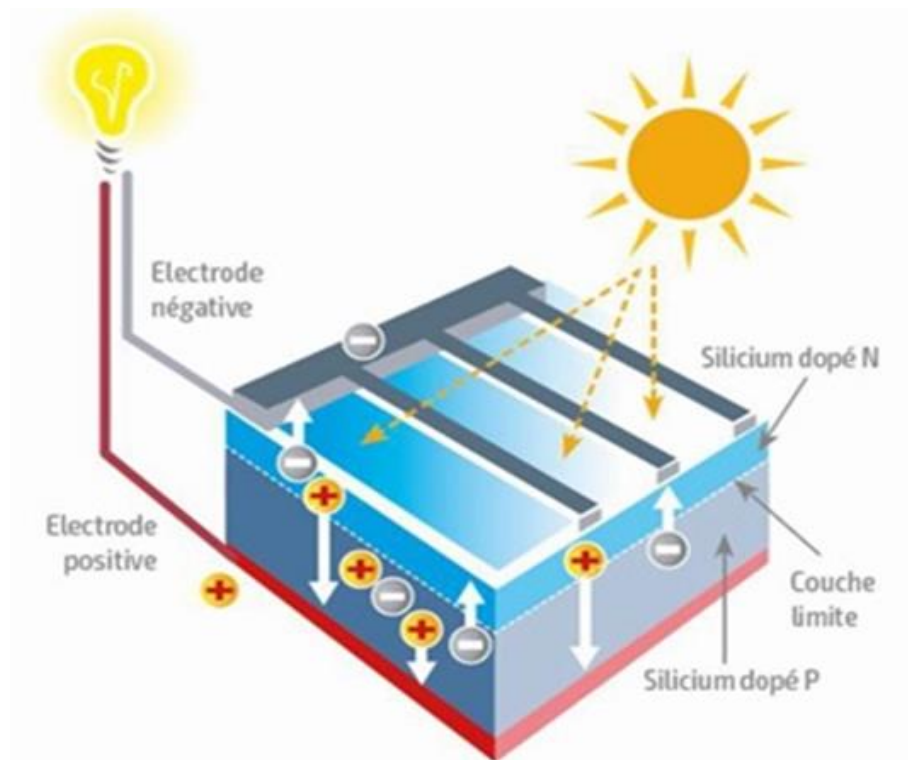


Figure I.13 : Schéma représentant le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. [7]

I.6. Types des cellules solaires

I.6.1. 1er Génération (filière du silicium)

Les modules photovoltaïques en silicium ont pris le contrôle du marché depuis plusieurs décennies, représentant plus de 90% des ventes de ce type de modules. Les cellules au silicium sont classées en deux catégories : celles à base de silicium monocristallin et celles à base de silicium poly-cristallin. [12]

I.6.1.1. Cellule à base de Silicium monocristallin

Le procédé Czochralski (CZ) croissant ou tire un lingot cylindrique d'un monocristal « souche » pour obtenir du silicium monocristallin. Les cellules monocristallines de Si ont pu atteindre un rendement de 18 % sur le marché et de 26,7 % en laboratoire. La production de ce type de cellule est toutefois pénible et coûteuse. [16]

I.6.1.2. Cellule à base de silicium poly-cristallin

Ce type de cellule est fabriqué à partir d'un agglomérat de cristaux qui subit un refroidissement lent qui dure quelques dizaines d'heures. Sa présentation nécessite moins d'énergie. Le silicium multi-cristallin est moins pur que le silicium monocristallin. Il a été découvert que la cellule de ce dernier a un rendement de conversion légèrement supérieur à celui du multi-cristallin de 22,3% en laboratoire, mais le premier coûte plus cher que le second et le multi-cristallin Si est le plus utilisé [12].

I.6.2. 2ème Génération (filière des couches minces)

Les films minces, également appelés "thin films", représentent la deuxième génération de technologie photovoltaïque. Le silicium amorphe (a-Si), le di sélénium de cuivre indium (CIS) et le tellure de cadmium (CdTe) sont des éléments clés de cette génération. Pour les couches minces, on dépose directement la couche de semi-conducteur sur un substrat, comme le verre. La fabrication de ces cellules est plus abordable que celle de la première génération car elle utilise moins de matériau semi-conducteur et ne requiert pas de procéder à la transformation du silicium [17].

I.6.2.1. Silicium Amorphe

Une cellule solaire à base de silicium hydrogéné (état non-cristallin) est fabriquée en déplaçant une ou plusieurs couches fines sur un substrat de verre. Cela entraîne un rendement

faible en raison de la faible mobilité des porteurs de charge .En 1976, le silicium amorphe a été utilisé pour fabriquer des cellules solaires. Le silicium amorphe est fréquemment employé dans des appareils de petite puissance comme les calculatrices, les lampes ou les horodateurs. Cependant, des entreprises telles que Solems, Solarex, Phototronix, Canon ou Fortum proposent des modules de taille similaire à celle des modules cristallins. [16]

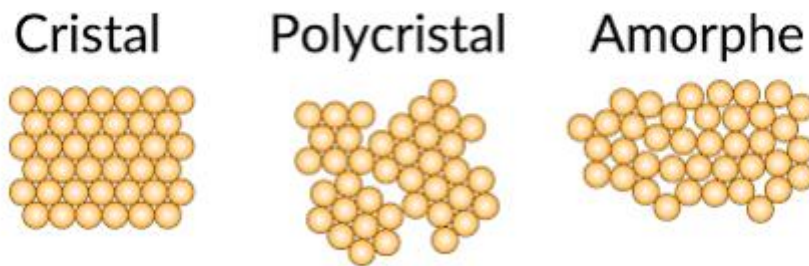


Figure I.14 : comparaison des ions entre le silicium amorphe, poly-c et cristallin. [13]

I.6.2.2. Tellure de Cadmium CdTe

La technologie à base de CdTe, connue aussi sous le nom de tellure de Cadmium CdTe, présente un rendement inférieur à celui du silicium cristallin, allant de 9 à 17 % (module 13 % à 18,2%), et bénéficie d'un coût de production bien plus bas. Cette La technologie est presque complètement compatible avec le spectre solaire grâce à sa capacité d'absorption de la lumière et à son coefficient thermique favorable. Son principal inconvénient réside dans la limitation naturelle de la quantité de tellure sur terre, ce qui oblige la recherche à réduire son épaisseur, qui est actuellement d'environ 3 μm . Malgré la toxicité du cadmium, il faut préciser que ce n'est qu'à la fabrication qu'il est dangereux et qu'un module PV ne contient que très peu de cadmium : Un module CdTe de 60W (~12 kg) contient environ 2 g de Cd. [16]

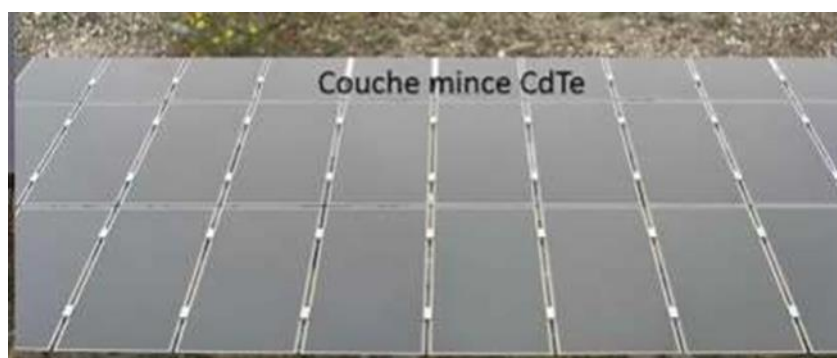


Figure I.15 : Cellule solaire au tellure de cadmium en couche mince. [16]

I.6.2.3. Di sélénure de Cuivre Indium CIS, Disélénure de Cuivre et de Gallium CGS, Diselenuire de Cuivre et d'Indium et de Gallium CIGS

Le développement de la filière CIGS comprenant les cellules à base de CIS et CGS a permis la conception de cellules à couche minces dites de dernière génération. Cette filière très prometteuse a permis la conception de cellules avec un rendement pouvant atteindre une valeur de 20% (rendement en laboratoire). Toutefois, les matériaux requis pour la production de ce genre de cellules ne sont pas facilement accessibles en grande quantités. [14]

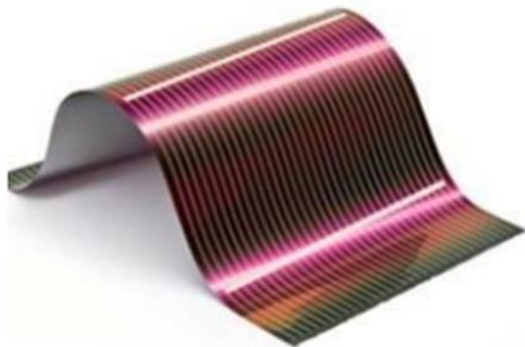


Figure I.16 : cellule en CIGS



Figure I.17 : cellule en CIS

I.6.3. 3^{ème} Génération

La conception de cellules de 3^{ème} génération a permis la réduction des dépenses de production et d'optimiser le rendement. Différentes composantes ont été créées afin d'atteindre cet objectif, telles que les cellules organiques, les cellules multicouches comme les Tandems et les cellules Pérovskites. [12]

I.6.3.1. Filière des cellules organiques

Des cellules souples peuvent être conçues à base de « sandwichs » de semi-conducteurs en polymère organique (des macromolécules naturelles). Elles fonctionnent sur le même principe que toutes les cellules solaires : un photon traversant une jonction entre zones de densités électriques différentes, entraînera un courant électrique.

Les cellules organiques sont souples et légères, elles peuvent être déposées sur des surfaces souples et déformables (comme les plastiques, les tissus) afin de répondre à certaines applications spécifiques, mais leur rendement est plus faible que celui des homojonctions et hétérojonctions.

La filière des cellules organiques est intéressante, elle met l'accent sur les caractéristiques physiques, notamment optiques des cellules PV. Une ou plusieurs couches actives sont entourées par des électrodes dans ce type de cellules. Tous les éléments de l'empilement doivent respecter certains critères. [12]

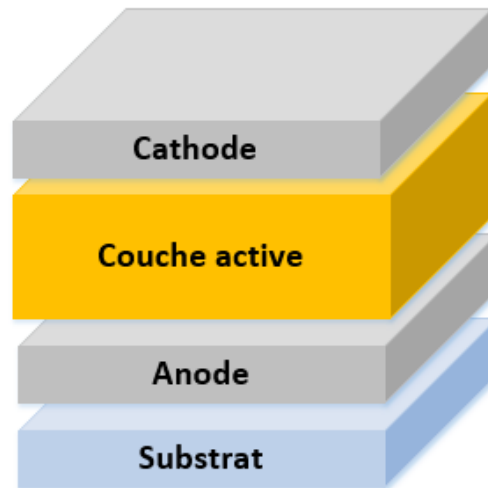


Figure I.18 : Structure générale d'une cellule photovoltaïque organique.

I.6.3.2. Filière Tandem

La filière des Tandems consiste en plusieurs cellules simples empilées les unes sur les autres en associant deux cellules (comme une couche mince de silicium amorphe sur un silicium cristallin par exemple). Elle absorbe une grande partie du spectre tout en diminuant les pertes par thermalisation. Ce type de cellules présente un rendement intéressant (allant de 12 % à 18 %), cependant, leur fabrication complexe est coûteuse à réaliser. [12]



Figure I.19 : Plaque Tandems. [12]

I.6.3.3. Filière Pérovskite

La filière des Pérovskites, à laquelle nous nous intéressons dans ce travail, est une technologie en constante évolution. De nos jours, les cellules photovoltaïques à pérovskite font l'objet d'un intérêt croissant vu que ces cellules peuvent être combinées aux cellules silicium existantes dans des architectures tandem, L'objectif final, concernant ce type de cellules est de parvenir à 30 % d'efficacité produite par les cellules photovoltaïques et 25 ans de durée de vie une fois intégrées en module. Si les cellules aux structures pérovskites hybrides semblent très prometteuses pour le photovoltaïque, elles souffrent malheureusement encore d'instabilité : malgré leur rendement important, elles sont encore très sensibles à la chaleur, aux UV ou à l'humidité.

Notons tout d'abord que la pérovskite désigne un groupe d'espèces minérales. Ces espèces partagent une même structure cristalline. La Pérovskite possède un haut potentiel en tant que SC : en effet, la pérovskite a la possibilité d'absorber la lumière, mais dans une autre bande de longueur d'onde différente de celle de silicium. Par ailleurs, le nom Pérovskite désigne un ensemble d'espèces minérales qui partage une même structure cristalline appelée structure pérovskite.

La filière des Pérovskites implique un élément chimique qui a la structure de la pérovskite, généralement c'est un hybride « organique-inorganique » de plomb ou d'un halogénure d'étain dans sa couche dite active. [12]

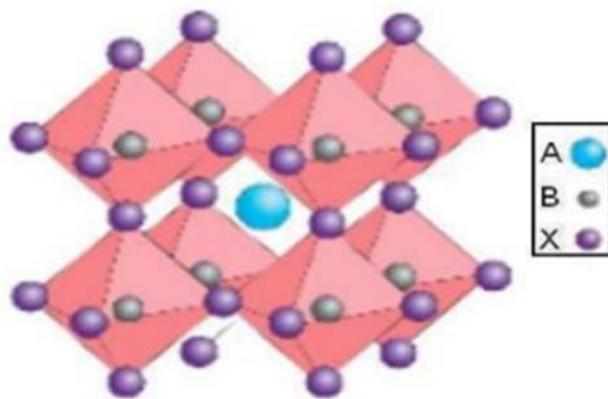


Figure I.20 : Structure d'un cristal de pérovskite générique ABX₃. [12]

I.7. Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire

I.7.1. Courant de court-circuit I_{cc}

C'est le courant délivré par la cellule lorsque le potentiel qui lui est appliqué est nul. Courant de court-circuit est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Il dépend de : la température, la longueur d'onde, la surface active de la cellule, et de la mobilité des porteurs et enfin du rayonnement. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

$$I_{cc} = I(V = 0) \quad \text{I.5}$$

I.7.2. Tension de circuit ouvert V_{oc}

La tension de circuit ouvert V_{oc} est la tension prélevée aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Cette tension dépend singulièrement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active, et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Cette tension dépend aussi de l'éclairement de la cellule.

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad \text{I.6}$$

Avec :

$\frac{KT}{q}$: Le potentiel thermique ;

T : la température absolue ;

Q : la charge de l'électron soit $1,6 \cdot 10^{-19}$ coulomb,

K : la constante de Boltzmann soit $1,38 \cdot 10^{-23}$ eV/ °K ;

I_{ph} : le courant photonique ;

I_s : le courant de saturation.

Deux régimes peuvent être observés selon le degré d'éclairement :

- Régime des faibles flux lumineux : dans ce cas, $I_{ph} \ll I_s$, ce qui permet d'écrire :

$$\log\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) = \frac{I_{ph}}{I_s} \quad \text{I.7}$$

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \cdot \frac{I_{ph}}{I_s} \quad \text{I.8}$$

C'est la zone de comportement linéaire de la caractéristique $V_{co} - I_{ph}$. La tension V_{co} peut s'exprimer par :

$$V_{co} = R_0 \cdot I_{ph} \quad \text{I.9}$$

Avec :

$$R_0 = \frac{KT}{qI_s} \quad \text{I.10}$$

R_0 Est la résistance interne de la diode en polarisation externe nulle (circuit ouvert) et sous faible flux lumineux.

Régime des flux lumineux suffisamment intenses pour que $I_{ph} \gg I_s$. , soit $\frac{I_{ph}}{I_s} \gg 1$:

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right) \quad \text{I.11}$$

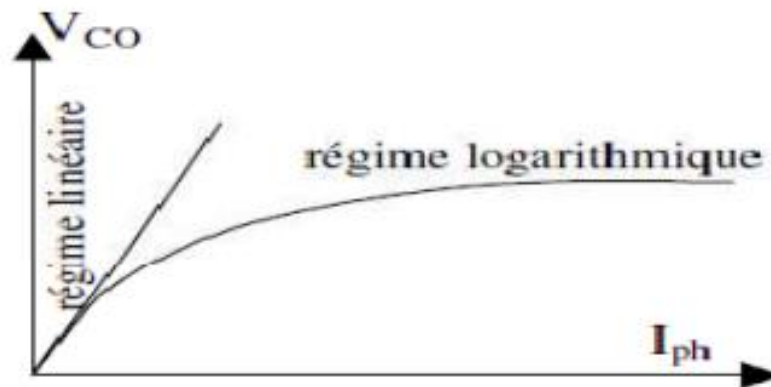


Figure I.21 : Caractéristique $V_{co}-I_{ph}$

La tension V_{co} augmente avec la grandeur $\log(I_{ph})$ donc V_{co} augmente avec le log de l'illumination, par contre cette tension décroît avec la température, ne tenant pas compte du terme $\frac{KT}{q}$. En effet, le courant de saturation I_s dépend de la surface de la diode et des caractéristiques de la jonction et varie exponentiellement avec la température. Cette dépendance en température compense ainsi amplement le terme $\frac{KT}{q}$. De ce fait, la tension de circuit ouvert V_{co} baisse avec la température.

I.7.3. Facteur de forme FF

Le facteur de forme est un paramètre important permettant de nous renseigner sur la qualité d'une cellule PV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF).

Le facteur de forme représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{co}$

La qualité de la cellule est indiquée par le facteur de forme, qui reflète l'impact des pertes

causées par les deux résistances parasites R_{se} et R_{sh} . [16]

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} V_{co}} \quad \text{I.12}$$

Plus la valeur de ce facteur n'est grande, meilleur sera la puissance exploitable.

I.7.4. Rendement de conversion η

Le rendement de conversion des cellules solaires noté η désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in} il correspond donc à la proportion de la puissance maximale qui peut être extraite par rapport à la puissance du rayonnement. [16]

$$\eta = \frac{P_{max}}{A.P_{in}} = \frac{I_{cc} V_{oc} FF}{A P_{in}} \quad \text{I.13}$$

Où :

P_{in} : est la puissance incidente du rayonnement solaire au sol. Dans les conditions standard (AM1.5G et $T = 25^\circ\text{C}$)

$P_{in} = 100 \text{ mW/cm}^2$ [7].

A : est la surface éclairée de la cellule.

I.8. Avantages et Inconvénients

I.8.1. Avantage

On donne dans ce qui suit quelques avantages apportés par l'utilisation de l'énergie solaire pour pallier à nos besoins énergétiques :

- ✓ L'approvisionnement en énergie solaire est étendu, facilement accessible et principalement infini ;
- ✓ Aucune émission, combustion ou déchets radioactifs n'ont été observés suite à l'utilisation de cette énergie ;
- ✓ L'utilisation de ce type d'énergie considérée comme renouvelable et propre ne joue pas un rôle dans le changement climatique mondial ou la pollution de l'air et de l'eau ;
- ✓ Les frais de l'utilisation des équipements relatifs à cette énergie sont bas en raison des entretiens réduits. Ces derniers ne requièrent ni carburant, ni transport, ni personnel spécialisé.
- ✓ Théoriquement une installation solaire est éternelle ;
- ✓ Les installations solaires sont largement utilisées à température ambiante et aucun souci de corrosion ou de sécurité n'est enregistré à des températures élevées ;

- ✓ Les modules solaires offrent une grande fiabilité (avec des garanties des fabricants qui dépassent 30 ans) ;
- ✓ La production annuelle est prédictible ;
- ✓ Le caractère modulaire de ces panneaux facilite leur association en les rendant adaptables à différents besoins en énergie.
- ✓ Ces systèmes sont conçus pour des puissances qui s'étendent du milliwatt au Mégawatt.
- ✓ Ces systèmes peuvent être intégrés dans des nouvelles structures ou à des structures déjà existantes.
- ✓ Ces systèmes peuvent être installés rapidement à quasiment tous les endroits d'utilisation. [16]

I.8.2 Inconvénients

- ✓ La production de panneaux photovoltaïques requiert une technologie avancée, demandant un investissement en recherche et développement, ce qui entraîne des investissements élevés.
- ✓ Les performances des panneaux solaires sont encore très limitées.
- ✓ Pour les besoins domestiques il est indispensable d'avoir un dispositif de stockage (batterie).
- ✓ Les installations photovoltaïques ont un coût d'investissement extrêmement élevé. [13]

I.9. Conclusion

Le chapitre présent fournit des notions de base concernant le photovoltaïque. Nous avons rappelé quelques notions sur les cellules solaires et l'effet photovoltaïque. Nous avons vu les différents types de cellules solaires. Par la suite, nous avons expliqué le fonctionnement de ces cellules et avons énumérés quelques avantages et inconvénients concernant l'utilisation du photovoltaïque.

Références bibliographiques chapitre I

- [1] H. ROUAB et S. BOUDJELIDA, « Etude et exploitation de l'énergie solaire dans le domaine de la production d'électricité », Thèse Doctorat, Université Ibn Khaldoun 2017.
- [2] S. BELOUI « ETUDE DES PERFORMANCES D'UN CAPTEUR SOLAIRE THERMIQUE PLAN », mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira Bejaia le 06/10/2020.
- [3] A. LAHOUEL « Influence de la température sur les caractéristiques d'une cellule solaire à base d'InGaN », mémoire de Master, Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen le 19 juin 2016.
- [4] F. MERAD « Conception d'un programme de calcul du rayonnement solaire, cas particulier de la région de Mostaganem. », mémoire de Magister, Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem le 03 /07 /2013.
- [5] I. BENRAMDANE « Conception et Simulation Numérique des cellules Solaires à base de matériaux hybrides organiques - inorganiques pérovskites. », mémoire de Master, Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen le 10 juillet 2021.
- [6] A. BOUZIANE et A. LENSARI « Cellule solaire pour un environnement clean », mémoire de master adrar 2020.
- [7] M. PETIBON Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » thèse doctorat, Université De Toulouse 2009.
- [8] D.S. BENMANSOUR « Etude sur les matériaux Bi₂S₃ et CZTS contribuant à l'obtention de meilleurs rendements photovoltaïques. », mémoire de Master, Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen le 28 juin 2021.
- [9] K. HELALI, Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative ; mémoire d'ingénieur Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'UMMTO Tizi-Ouzou .2012
- [10] M. TAHRAOUI et Y. SAHOUI « Optimisation du rendement photovoltaïque d'une cellule solaire à base d'Arséniure de Gallium « GaAs » », mémoire de Master, Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen le 30 /06 /2022.
- [11] Energie plus ,09-aout-2010.[en ligne]. Disponible sur : <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaïque6/effets-photoelectrique-et-electroluminescent/>. [Consulté le 26-mai-2024]
- [12] L'histoire du photovoltaïque, COPEE, 24-avr-2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.copee.eu/la-naissance-du-photovoltaïque/>. [Consulté le : 21-mai-2024].
- [13] Le photovoltaïque, Centrales Villageoises. [En ligne]. Disponible sur :

<https://www.centralesvillageoises.fr/le-photovoltaïque>. [Consulté le 23 avril 2024].

[14] A.A.KANOUN «Etude théorique et prédictive des nouveaux matériaux pour conception des cellules solaires et applications photovoltaïques », Thèse Doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen Le 06/07/2019.

[15] W.KHOUNI «Simulation et optimisation des structures a base des nouveaux matériaux pour le photovoltaïque», mémoire de Master, Université Saad Dahleb Blida 1 Le 21/10/2020.

[16] A.BENMIR «Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque en couche mince à hétérojonction : CdS/CIGS et CdS/CZTS», Thèse Doctorat, Kasdi Merbah Ouargla Le 27/04/2017.

Chapitre II : Les cellules PV réalisées à partir des couches dites “couches minces”

II.1. Introduction

Au cours des dernières décennies, de nombreux travaux de recherche ont été menés sur divers matériaux, dans le but de concevoir des cellules photovoltaïques offrant un rendement de conversion élevé et à des coûts abordables.

Dans ce chapitre nous commencerons dans un premier temps par donner quelques notions générales sur les couches minces, puis nous décrirons les techniques classiques utilisées pour leurs synthèses. Nous exposerons ensuite les différentes couches constituant ces cellules photovoltaïques, dont les matériaux utilisés sont le CZTS, le CdS, le ZnO et la pérovskite, et on finit le chapitre en précisant le rôle de chacun d'entre eux dans une cellule PV.

II.2. Couche mince

Une couche mince est une fine couche d'un matériau qui est déposé sur un autre matériau, appelé "substrat", dont l'épaisseur a été considérablement réduite, allant de quelques "nm" à quelques " μm ". [1]

L'étroite distance entre les deux surfaces limites provoque une altération de la plupart des propriétés physiques, très souvent un tel petit nombre de couches atomiques présente des propriétés d'un corps massif très différentes. [2]

La différence essentielle entre le matériau à l'état massif et celui en couches minces est due au fait que dans l'état massif, on néglige généralement, le rôle des limites dans les propriétés, tandis que dans une couche mince, ce sont au contraire les effets liés aux surfaces limites qui sont prépondérants. Il est assez évident que plus l'épaisseur est faible, plus cet effet de dimensionnalité ne sera important. D'autre part, si l'épaisseur d'une couche mince dépasse un seuil donné, l'effet de l'épaisseur sera minime et le matériau retrouvera les caractéristiques bien connues du matériau massif. [2]

II.2.1. Propriétés des couches minces

Les couches minces suscitent principalement l'intérêt en raison de leur utilisation économique et leurs propriétés physiques ainsi que de la simplicité des technologies utilisées pour leur fabrication (élaboration facile et peu coûteuse). [3]

L'une des dimensions géométriques d'un objet dit mince est sa très faible épaisseur. Cela souligne l'importance des interactions surfaciques dans la création des caractéristiques physiques de ces objets. C'est d'ailleurs la principale raison pour laquelle les caractéristiques physiques des couches minces sont très différentes de celles des corps massifs. Les grains cristallins ont une surface totale plus grande que les deux faces d'une couche mince. Les couches

minces couramment employées dans les applications pratiques sont généralement polycristallines, leurs états sont métastables, instable et éloigné du minimum énergétique. Au microscope, elles sont constituées de grains cristallins avec des imperfections séparées par des zones enrichies par des impuretés. Les grains cristallins ont des dimensions similaires à celles de l'épaisseur de la couche mince. [3]

Les couches minces sont très sensibles aux caractéristiques chimiques et physiques du matériau utilisé pendant leur croissance, ainsi qu'aux conditions physiques de dépôt à chaque étape de leur évolution (tableau II.1). Plus précisément, les caractéristiques des couches minces varient considérablement en fonction de la nature du substrat sur lequel elles sont élaborées. C'est pourquoi, par exemple, des couches minces d'un même matériau et d'une même épaisseur peuvent avoir des caractéristiques physiques différentes sur des substrats de nature différente [2]

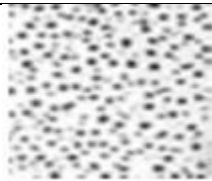
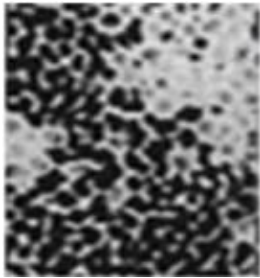
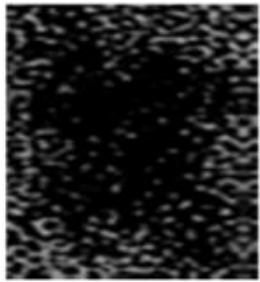
Étape	Processus	Structure	Épaisseur
Nucléation	Apparition sur la surface du substrat des petits îlots d'atomes.		<5nm
Agrégation	Croissance des îlots isolés ; formation d'un réseau macroscopique continu (percolation). Mécanisme : un atome arrive sur la surface du substrat transmet une partie de son énergie au réseau cristallin. Le reste de l'énergie incite la migration de l'atome sur la surface.		10-14 nm
Croissance	Agrandissement de l'épaisseur de la couche jusqu'à la valeur prédéterminée. La structure finale de la couche est déterminée essentiellement par le rapport entre la température de fusion du matériau à déposer.		> 20 nm

Tableau II. 1 : Évolution d'une couche mince lors du dépôt [2].

II.2.2. Application des couches minces

On utilise des couches minces depuis des centaines d'années. On les retrouve dans divers domaines d'applications tels que l'optique avec les couches réfléchissantes (miroirs) et antireflets ; l'électricité avec les couches conductrices métalliques, la mécanique avec les couches abrasives ou résistantes à l'usure et la chimie avec les couches protectrices. Au milieu du 20^{ème} siècle, les couches minces ont connu une croissance industrielle significative, principalement dans les domaines de l'optique, puis de la microélectronique [4] et récemment dans le domaine spatial tel que le nano-satellite algérien Alsat-1N lancé en 2016 et dont le but est de tester un nouveau matériau de protection des cellules solaires résistant et offrant un rapport poids / énergie plus important que les cellules solaires spatiales conventionnelles [4]

II.2.3. Techniques de dépôt des couches minces

La classification des méthodes est présentée sur le schéma suivant :

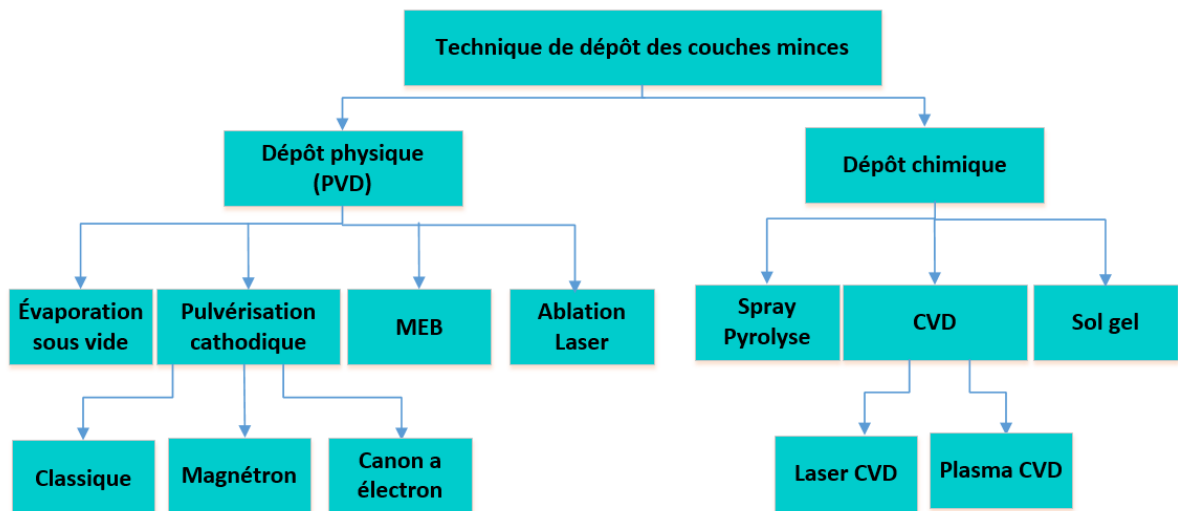


Figure II.1 : Techniques de dépôt des couches minces [2].

II.2.3.1. Méthodes chimiques

II.2.3.1.a. Dépôt Chimique en phase vapeur (CVD)

La phase vapeur du dépôt chimique implique la mise en contact d'un composé volatil du matériau à déposer avec un autre gaz proche de la surface à recouvrir ou avec la surface en question, afin de provoquer une réaction chimique qui donne naissance à un composé solide. [3]

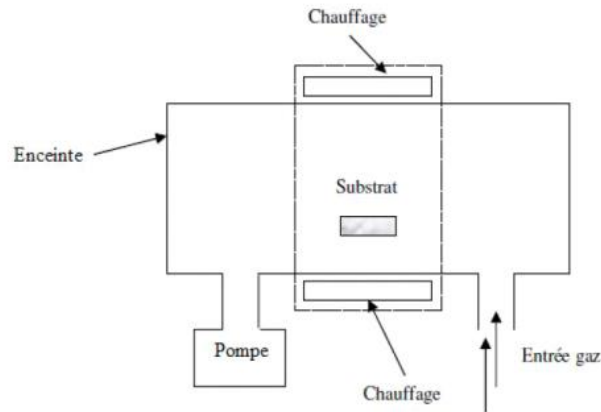


Figure II.2 : Schéma de principe de dépôt chimique en phase vapeur [5].

II.2.3.1.b. Spray pyrolyse

Une méthode de dépôt appelée spray pyrolyse est employée afin de fabriquer des films minces et épais, des revêtements en céramique et des poudres. Contrairement à de nombreuses autres méthodes de dépôt de films, le spray pyrolyse est une méthode extrêmement facile et relativement économique. Il s'agit d'une méthode très simple pour préparer des couches de toutes sortes. [5]

L'utilisation de cette technique a été réalisée pour le dépôt de films denses et la fabrication de poudres, même des dépôts multicouches peuvent être préparés de manière facile. [1]

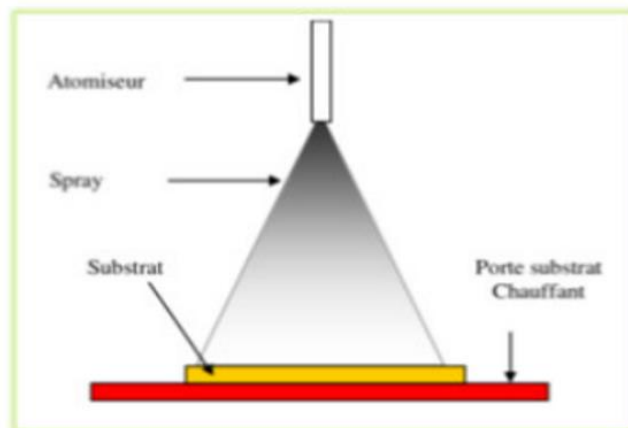


Figure II.3 : Schéma synoptique d'un équipement de dépôt par spray pyrolyse [4].

II.2.3.1.c. Méthode sol-gel

Le principe fondamental du processus sol-gel (en abrégé « solution-gélification ») est le suivant : À température ambiante, une solution contenant des précurseurs en phase liquide se métamorphose en un solide à travers un ensemble de réactions chimiques de type polymérisation. La méthode sol-gel se divise en trois étapes :

- Élaboration de la méthode de déposition.
- Création de couches minces en utilisant la technique de trempage ou la technique de tournette.
- Chauffage thermique.

II.2.3.2. Méthodes physiques

II.2.3.2.a. Dépôts physiques en phase vapeur

La phase vapeur physique (PVD) offre de nombreux bénéfices par rapport à la phase vapeur chimique. Par exemple, les films présentent une densité élevée, le processus est simple à maîtriser et il n'y a aucune pollution.

L'évaporation, la pulvérisation et l'ablation laser sont les principaux procédés par PVD.

[4]

II.2.3.2.b. Évaporation thermique

Il suffit de faire évaporer ou sublimer le matériau à déposer dans un creuset sous vide en le chauffant à une température élevée. La condensation du matériau évaporé se produit sur le substrat à recouvrir. Différentes techniques permettent de chauffer le matériau : à l'aide d'un filament réfracteur par effet Joule, par induction et à l'aide d'un faisceau d'électrons puissant et énergétique.

La méthode de l'évaporation thermique est très populaire car elle permet de produire des matériaux extrêmement purs, d'autant plus que la pression pendant le dépôt est faible. [5]

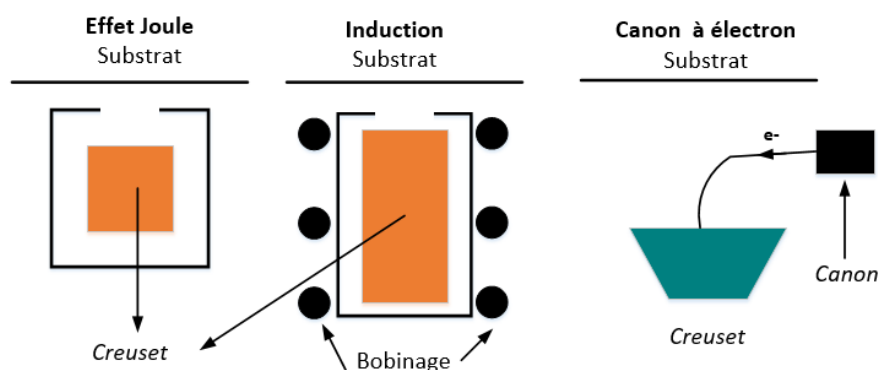


Figure II.4 : Méthodes de chauffages en évaporation thermique sous vide. [1]

II.2.3.2.c. Implantation d'ions

Il s'agit d'une méthode énergétique. Dans un champ électrique, des espèces atomiques sélectionnées sont ionisées puis accélérées à des énergies allant de 10 à 1000 KeV. Les ions pénètrent dans le matériau à une profondeur de 1 à 2 μm . [5].

Les principaux bénéfices de cette méthode incluent :

- Les températures élevées ne sont pas nécessaires, ce qui évite les distorsions thermiques.
- L'absence d'interface ne pose pas de problème de décohésion.
- Les espèces implantées sont dispersées de manière fine.
- Le suivi et le contrôle électrique peuvent être effectués tout au long du traitement. [4]

II.2.3.2.d. Ablation Laser

L'évaporation sous vide se produit lorsque l'énergie est générée par l'impact d'un faisceau laser de haute intensité sur une cible composée du matériau que l'on souhaite déposer sur le substrat. Le principal avantage réside dans la possibilité d'utiliser des cibles de très petites dimensions, l'ablation se déroulant sur une surface de quelques millimètres carrés. En réalité, l'ablation-dépôt est plus complexe, car une plume de plasma se forme localement et que les particules éjectées ne sont pas en équilibre thermodynamique.

L'avantage de cette méthode réside dans le fait qu'elle ne requiert aucune source de chaleur polluante à l'intérieur de l'enceinte, ce qui est très important pour les dépôts réalisés dans un environnement ultravide. [1]

II.2.4. Méthodes de préparation de couches minces de $\text{Cu}_2\text{-II-IV-S}_4$

Les chercheurs se sont penchés sur différentes méthodes de fabrication des semi-conducteurs quaternaires $\text{Cu}_2 - \text{II} - \text{IV} - \text{S}_4$ en couches minces, parmi lesquelles nous mentionnons les méthodes suivantes :

- **approches à base de vide :**
 - Techniques d'évaporation sous vide.
 - Pulvérisation cathodique (sputtering).
 - Salinisation ou sulfuration.
- **Les approches non-vides :**
 - L'électrodéposition.
 - Pulvérisation par pyrolyse. [1]

La figure II.5 illustre une cellule qui utilise l'encre $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) à base de nanocristaux (via une route solvothermale). Les films de CZTS sont préparés sur un revêtement d'aluminium-MO. Cependant, une cellule solaire flexible à structure Al/Mo/CZTS/ZnS/i-ZnO/ITO/AL-Ni avec une efficacité de 1.94 %, avec des matériaux abordables et non polluants, a été récemment fabriqué.

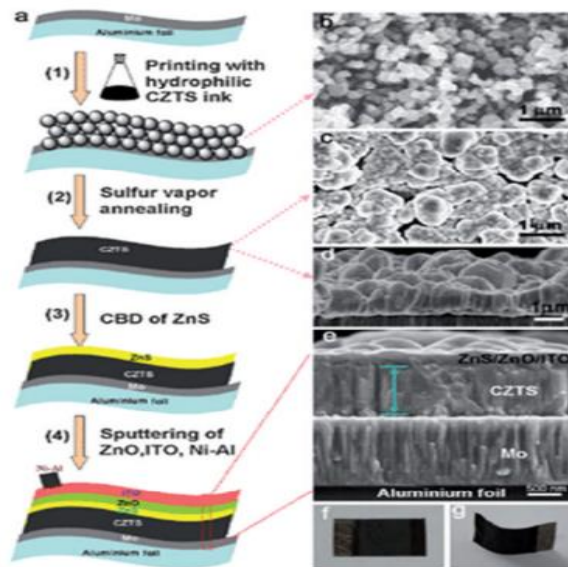


Figure II.5 : Dépôt des différentes couches d'une cellule photovoltaïque à base de CZTS et Micrographie MEB des différentes couches [1].

II.2.5. Avantages et inconvénients des couches minces

II.2.5.1 Avantages

La filière technologique des couches minces présentent de nombreux bénéfices :

- Les matériaux SC utilisés ont souvent une BI directe, ce qui entraîne des coefficients d'absorption élevés. Ainsi, elle ne requière qu'une épaisseur minimale, habituellement de quelques μm , permettant d'absorber l'intégralité de la lumière incidente sur la couche absorbante. Elle prévoit des économies considérables dans le prix des matériaux.
- Les matériaux rares et onéreux peuvent être utilisés en raison de la petite taille du matériau actif de la cellule PV.
- Différentes méthodes de dépôt sous vide relativement abordables sont utilisées pour traiter les cellules solaires à couches minces. Cela diminue les dépenses liées au traitement.
- Il est possible de déposer des films minces sur des substrats flexibles et légers, ce qui permet aux cellules de s'adapter à une plus grande diversité d'applications. [6].

II.2.5.2. Inconvénients

Les cellules à couche mince requièrent une surface plus grande afin d'obtenir les mêmes performances que les cellules épaisses. [4]

II.3. Cellule solaires à base de CZTS

II.3.1.Généralités

La combinaison du cuivre, du zinc, de l'étain, du soufre et du sélénium constitue un matériau semi-conducteur de premier ordre, car il est composé d'éléments courants et non toxiques.

De nouvelles cellules sont en cours de développement en prévention de la probable pénurie d'indium. Toutefois, comme substituée aux cellules en CIGS, les cellules en CZTS constituent un véritable défi étant donné l'efficacité de cet absorbant. [7]

Le cuivre-zinc-étain-soufre (CZTS) présente des caractéristiques photovoltaïques exceptionnelles, telles que le gap à bande directe, un coefficient d'absorption élevé, et une énergie de bande optimale de 1.4 à 1.5 eV, qui est très recherchée dans le domaine photovoltaïque. [1]

Depuis qu'il est utilisé en tant qu'absorbant dans les cellules solaires en couches minces, les performances de conversion des dispositifs dépassent 20 % en laboratoire et 13 % à l'industrie. Le domaine le plus dynamique du marché des panneaux solaires photovoltaïques est celui des cellules en couches minces, car leur production ne requiert que de petites quantités de matériaux. Les matériaux les plus prometteurs sont le silicium amorphe (a-Si), le tellure de cadmium (CdTe) ainsi que le cuivre et l'indium di séléniure. Les éléments III-V, II-VI et leurs composés tels que le cuivre, l'indium, le gallium, l'arséniure, le sélénium et le soufre. Les caractéristiques d'un tel matériau sont influencées par les paramètres de croissance expérimentaux ainsi que par l'épaisseur finale, qui peut varier de quelques nanomètres à quelques dizaines de micromètres. [5]

Grâce à leur coût de fabrication réduit et à la souplesse des paramètres pour modifier les propriétés obtenues, les couches minces rivalisent avec les cellules en Si cristallin, même si ces dernières sont plus efficaces. [4]

II.3.2 propriétés du CZTS

Un film semi-conducteur CZTS est obtenu en remplaçant une moitié des atomes d'indium dans le CuInS_2 chalcopyrite par du zinc et l'autre moitié par de l'étain, ce qui est plus approprié pour la fabrication d'une cellule solaire à bas coût. Ainsi, lorsqu'il y a une hétérojonction entre CdS et CZTS, il est nécessaire de le remplacer par du sulfure de zinc (ZnS) car le ZnS offre la bande interdite la plus élevée. [4]

Un rendement optimal est obtenu avec des cellules solaires CZTS contiennent peu de Cu

et sont riches en Zn, ce qui favorise la croissance d'autres phases lors de la formation du film. Étant donné la faible teneur en Zn et la forte teneur en Cu, la couche CZTS devient davantage un semi-conducteur de type-p. [8]

La structure du CZTS découle de la substitution de deux atomes d'In (ou de Ga, respectivement) par un atome de Zn et un atome de Sn. Par conséquent, la couche CZTS possède des caractéristiques similaires à celles de la couche CIGS. L'un des principaux atouts de ce dispositif réside dans la possibilité d'adopter la structure standard des cellules solaires. La Figure II.6 représente la structure cristalline de CZTS, également appelée structure kesterite, qui peut être extraite de la structure de sphalérite en dupliquant la cellule unitaire. La phase la plus stable de CZTS est la structure de kesterite. [9]

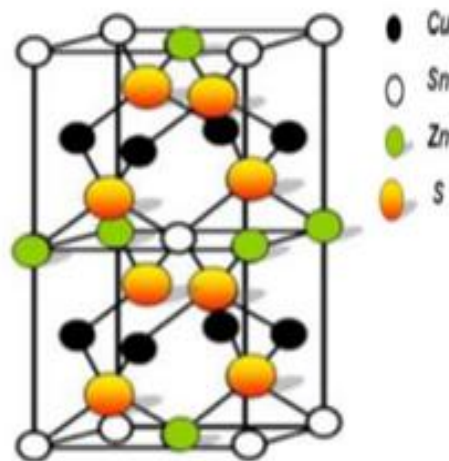


Figure II.6 : Structure Kesterite dans laquelle CZTS se cristallise. Elle est dérivée de la structure sphalérite par duplication de la cellule unitaire [10]

La relation entre le CZTS ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$) et le CIGS est étroitement liée. En général, les éléments coûteux et peu abondants d'indium et de gallium sont remplacés par une combinaison de Zn et Sn beaucoup moins coûteuse. Parallèlement, le Se est substitué par S (abondant et abordable), en raison de la largeur de bande interdite de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (1,45 eV). Le composé de sélénure correspondant présente une bande interdite plus étroite, ce qui le rapproche de la valeur optimale. [10]

II.3.2.1. Propriétés électriques

Les propriétés principales des matériaux semi-conducteurs découlent des mouvements des porteurs de charge sous l'influence d'un champ électrique, thermique ou magnétique (conductivité électrique, effet Hall, photoconductivité, etc.). Cependant, ces mouvements sont influencés par les interactions des porteurs de charge avec les ions, les impuretés ou les

imperfections du réseau cristallin. L'état structural du matériau est influencé par le libre parcours moyen, qui représente la distance moyenne parcourue par un électron entre deux chocs successifs. Les couches minces poly-cristallines des semi-conducteurs ont un comportement électrique qui est fortement influencé par les surfaces qui délimitent les grains qui composent la couche. Car, ces joints de grains sont des zones de grandes densités de défauts et d'impuretés. Ces zones forment des états énergétiques localisés, dans la bande interdite, capables de capturer et d'immobiliser les porteurs de charge. Ainsi que, l'accumulation de ces porteurs fait apparaître des barrières de potentiel au niveau des joints de grains. Cet effet devient important si la taille des grains est inférieure à un micron. [4].

L'avantage du système CZTS est qu'il permet de modifier la bande interdite directe en ajustant le rapport S : Se, allant de près de 1 eV pour le composé : sélénure pur à environ 1,5 eV pour le matériau : sulfure pur (gamme très pratique pour l'énergie solaire terrestre). Selon les calculs de structure de bande, dans CZTS, la bande de valence supérieure est constituée d'orbitales anti-liantes de Cu 3d et S (Se) 3p (4p), tandis que la bande de conduction inférieure est constituée d'orbitales anti-liantes de Sn 5s et S (Se) 3p (4p). On peut observer les caractéristiques électriques des composés CZTSSe dans le tableau II.2.

Afin de préparer des films minces de CZTS on utilise différentes méthodes, comme la pulvérisation cathodique, la Co-évaporation et le dépôt par spray ultrasonique. Ces films sont généralement fabriqués sur des substrats isolants afin d'éviter la conduction parallèle dans les mesures de Hall. [11]. Le matériau CZTS a une résistivité comprise entre $10^{-1} \Omega.cm$ et $10^{+3} \Omega.cm$. Une diminution rapide (jusqu'à $10^{-2} \Omega.cm$) de la résistivité de ce matériau a été observée quand la teneur en cuivre augmente. Une tendance similaire a également été observée récemment sur les échantillons CZTS déposés par Co-évaporation. [1]

Résistivité ρ ($\Omega.cm$)	Mobilité μ (cm^2/Vs)	Densité de porteur p (cm^{-3})
0,15	6,3	$8,2.10^{18}$
0,13	12,6	$3,8.10^{18}$
2,3	5,4	$5,0.10^{17}$
28	6,4	$3,4.10^{17}$
0,36	11,6	$4,5.10^{17}$
30,22	16,57	$1,2.10^{16}$
5,4	29,75	$3,9.10^{16}$
660,8	5,6	$4,328.10^{15}$
1313	7,2	$6,886.10^{14}$

Tableau II.2: Valeurs de paramètres électriques du CZTS données dans la littérature. [12]

II.3.2.2 propriétés optiques

Dans les semi-conducteurs, le processus d'absorption repose sur l'énergie des photons qui se présentent et la structure de bande du composé. L'absorption d'un photon d'énergie $h\nu$ et l'écllosion d'un électron d'énergie E_1 de la bande de valence vers la bande de conduction ne sont possibles qu'avec un niveau d'énergie E_2 tel que : $E_2 - E_1 = h\nu$. Le seuil d'absorption optique correspond à la valeur minimale d'énergie du photon capable de réaliser cette conversion. Toutefois, pour un semi-conducteur, il est possible de constater des transitions vers des énergies plus faibles lorsqu'il y a des états situés dans la bande interdite. Les électrons susceptibles d'intervenir dans les processus d'absorption sont :

- Les électrons qui sont étroitement liés au réseau cristallin sont les électrons des couches profondes ;
- les électrons de valence ;
- les électrons ou trous porteurs de charge libres.
- Les électrons associés aux impuretés ou aux imperfections du cristal.

Les électrons des couches profondes interagissent avec des énergies élevées. Les trois autres, en revanche, impliquent des valeurs plus basses et couvrent des longueurs d'ondes allant de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les films du CZTS présentent une faible transparence optique (figure II.7).

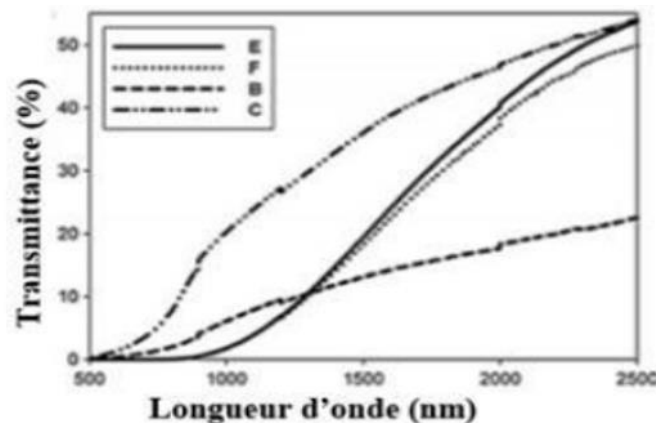


Figure II.7 : Spectre typique de transmittance d'une couche mince de CZTS

Selon le tableau, la majorité des kesterite associées ont une bande interdite directe dans la plage idéale pour la conversion de l'énergie photovoltaïque.

Composé	Eg (eV)
CZTS	1,5
CZTS	1,49
CZTS	1,46-1,51
CZTSe	1,40-1,65

Tableau II.3: énergie de gap du composé CZTS.

Il est observé que les propriétés optiques des couches minces de CZTS sont satisfaisantes, mais elles sont toujours influencées par les conditions de préparation. La valeur du gap dans les structures kesterite est influencée par la structure de la couche [1]

II.4 Cellules Photovoltaïques à base de Pérovskite

II.4.1 Pérovskite

La minérale pérovskite est constituée de calcium et de titane, qui a été découverte par le Lev Alekseevich Perovsky (1792-1856) minéralogiste russe sous la formule chimique CaTiO_3 .

La pérovskite présente une structure cubique (cubique simple) dont formule est AMX_3 (figure II.9). Les caractéristiques physiques de la pérovskite sont remarquables, son absorption de la lumière est élevée et une longueur de diffusion des charges élevée.

Les pérovskites hybrides, est particulièrement ce ayant la formule chimique $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (MAPbI_3), sont considéré comme étant des absorbants pour les cellules PV, et ces pérovskites ont montré des performances extraordinaires en peu de temps [23], elles présentent un coefficient d'absorption élevé de $1,5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ à une longueur de 550 nm. Elle se distingue par sa longueur de diffusion des électrons et des trous (plus de $1 \mu\text{m}$ et potentiellement $100 \mu\text{m}$), ainsi que par sa mobilité élevée des porteurs de charges. [13].

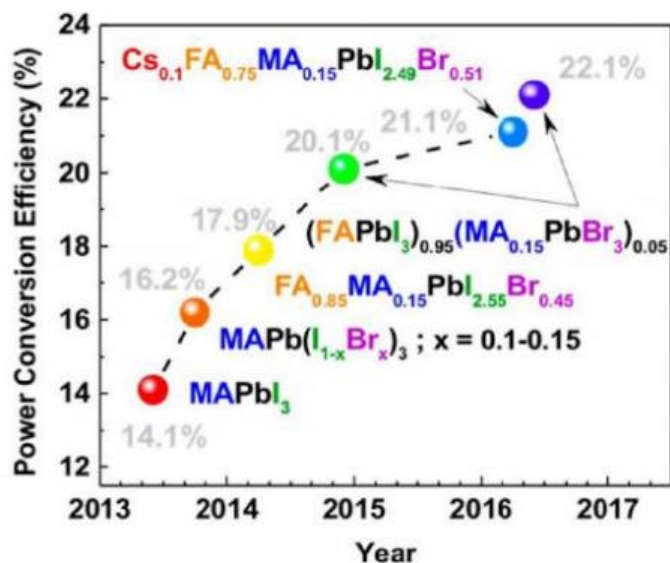


Figure II.8 : meilleurs rendements obtenus dans le domaine de recherche sur les cellules PV à pérovskite certifiés par NREL pour différentes compositions chimiques des pérovskites mixtes [24]

II.4.2 Structure de la pérovskite

Les matériaux pérovskite ont une structure de type AMX₃. En général, un ou plusieurs cations de rayon ionique élevé (Ca²⁺, Sr²⁺, Ba²⁺, Pb²⁺, Bi³⁺...) occupent le site A, tandis que celui ou ceux du type (Ti⁴⁺, Zr⁴⁺, Fe³⁺, Sc³⁺...) occupant le site M, les anions X sont l'oxygène O²⁻ ou le fluorure F⁻.

Les matériaux pérovskites se divisent en deux catégories principales :

- Les pérovskites simples, où les sites A et M sont occupés par un seul type de cation, tels que PbTiO₃, BaTiO₃, CaTiO₃.

- Les pérovskites complexes, avec au moins deux cations différents occupant les sites A et/ou M en même temps, tels que les compositions suivantes : (Na_{0.5} Bi_{0.5}) TiO₃, Pb (Mg_{1/3} Nb_{2/3}) O₃, (Ba_{1-x}Ca_x) (Ti_{1-y}Zr_y) O₃... Les solutions solides entre plusieurs composés à structure pérovskite (simples ou complexes) sont incluses dans cette catégorie.

Dans ce type de structure, il peut y avoir ou non une disposition des cations dans la structure. [13]

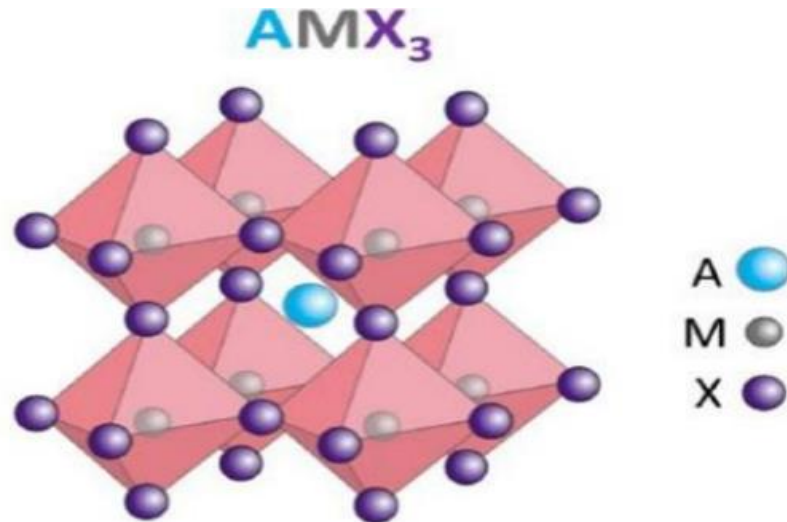


Figure II.9 : structure hybride de la pérovskite [22].

II.4.3.1. Propriétés électriques de la pérovskite

Ces propriétés des pérovskite sont intéressantes pour l'application PV , la pérovskite est supraconductrice à hauts températures , la pérovskite a l'aptitude de transformer la pression mécanique ou la chaleur en électricité par effet piézoélectrique, la pérovskite peut jouer le rôle de catalyseur (accélère les réactions chimiques) et peut changer leur résistance électrique dès qu'elles sont placées dans un champ magnétique (magnétorésistance), les différentes études électrochimiques sur des électrodes à base de ces oxydes ont été réalisées en milieu aqueux. Ces études ont permis de mettre à jours le rôle électro catalytique important de la pérovskite dans la réaction d'électrode à oxygène et ceci à température ambiante [8].

Différents travaux de recherche on permit de déterminer les différentes valeurs de BI pour les pérovskites [13]

II.4.3.2 Propriétés optiques

La fonction diélectrique $\epsilon(\omega)$ des matériaux est directement liée à l'indice d'absorption $\alpha(\omega)$, ce qui décrit leur comportement d'absorption. Le coefficient d'absorption $\alpha(\omega)$ est donc calculé en se basant sur l'expression :

$$\alpha(\omega) = 2\sqrt{\omega} \left[\sqrt{\epsilon_1^2(\omega) + \epsilon_2^2(\omega)} - \epsilon_1(\omega) \right]^{1/2} \quad \text{II.1}$$

Selon la relation de Kramer-Kronig, $\epsilon_1(\omega)$ est la partie réelle de la fonction diélectrique et $\epsilon_2(\omega)$ est la partie imaginaire de la fonction diélectrique.

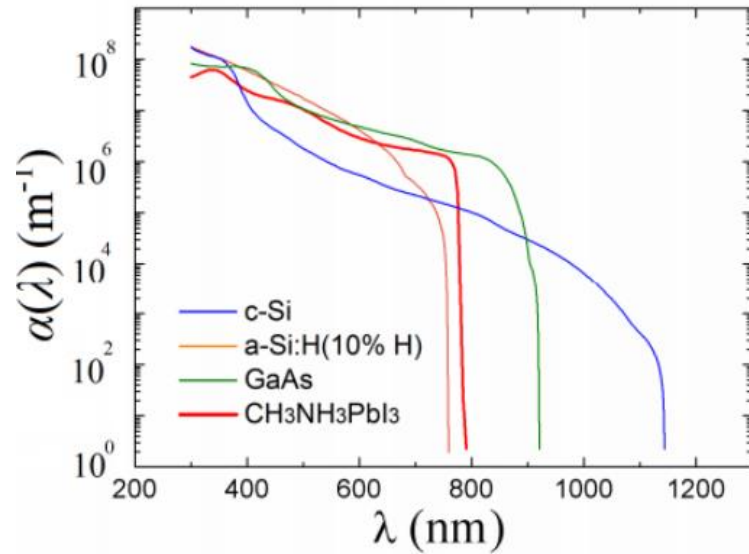


Figure II.10 : Courbe d'absorption des matériaux : (λ) de c-Si, a-Si : H (10%H), GaAs et CH₃NH₃PbI₃ [15]

II.5. Sulfure de cadmium CdS

Le (CdS) est un semi-conducteur composé des matériaux de la colonne (II-VI). En raison de ses bonnes propriétés optiques, électriques et structurelle. Les structures cristallines du CdS sont cubiques (zinc blende) et hexagonales (wurtzite), comme illustré dans la figure II.13 :

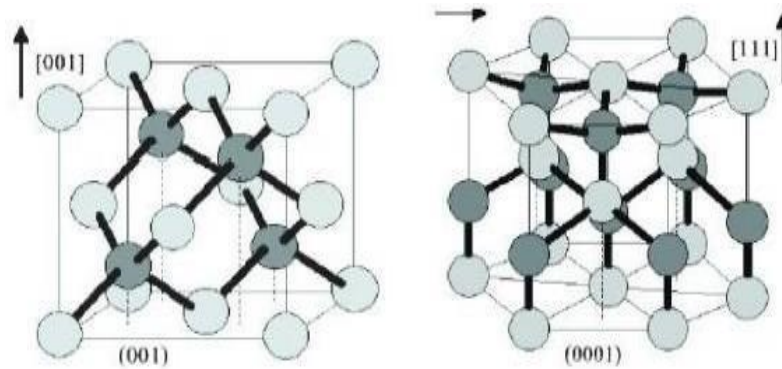


Figure II.11 : Maille de Zinc blende et Wurtzite [16].

II.5.1 Propriétés électriques

En utilisant un contact ohmique en argent et sous un fait de champ magnétique d'environ 0.54 Tesla, A. Kariper et ses collègues ont étudié les caractéristiques électriques des films minces de CdS en fonction du potentiel d'hydrogène (Ph) de la solution. Ils ont ainsi mesuré : la résistivité électrique ρ , la mobilité des porteurs μ et la concentration des porteurs n des films de CdS. Ils ont observé que les films de CdS présentent une résistivité électrique de type n, passant de $4,375 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ à $8,931 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ lorsque le pH augmente. Toutefois, la mobilité

diminue de $1,636.10^2$ à $7,5.10^{-1}$ $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ lorsque le pH et la concentration des porteurs augmentent, atteignant environ 10^{13} cm^{-3} . Le tableau ci-dessous présente certains paramètres du CdS. [17]

Paramètre	Symbole	Valeur
Bande interdite	E_g	2,42 eV
Mobilité des électrons	μ_n	$250 \text{ cm}^2 / \text{V s}$
Mobilité des trous	μ_p	$15 \text{ cm}^2 / \text{V s}$
Masse effective des électrons	m_n^*	$0,2 m_e$
Masse effective des trous	m_p^*	$0,7 m_e$
Permittivité relative	ϵ_r	8,9
Temps de vie des porteurs	$\tau_n = \tau_p$	$1 \mu\text{s}$

Tableau 4: Paramètres du sulfure de cadmium (CdS) à 300K [17].

II.5.2 propriétés optiques

La transparence optique des films CdS est extrêmement élevée (généralement comprise entre 60 et 90%) dans les zones visibles du spectre solaire (520-850) nm. En fonction de l'épaisseur, le CdS en couche mince présente un gap optique direct qui oscille entre 2,33 et 2,56 eV. Cela peut être attribué à différents éléments tels que la granulométrie, les caractéristiques structurales, la concentration des porteurs, la présence d'impuretés, le décalage de la structure du film et la réduction de la contrainte. L'indice de réfraction de la couche mince CdS est de 2,5. [16]

II.6 Oxyde de zinc

L'oxyde de zinc est un oxyde d'oxygène et de zinc du groupe II-VI qui se cristallise soit dans la structure cubique de zinc blende, soit dans l'hexagonale de Wurtzite, où chaque anion est entouré de quatre cations aux coins d'un tétraèdre, et inversement [18].

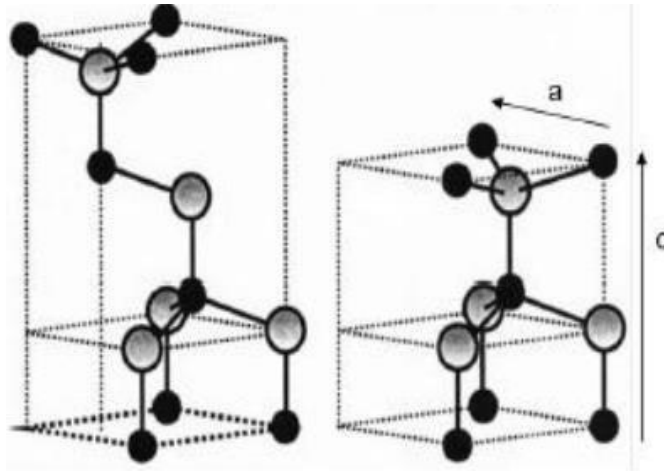


Figure II.12 : Structure cristalline de ZnO en phase à gauche : Zinc blende, à droite Wurtzite d'après Ozgur et al [18]

II.6.1. Propriétés électriques

À température ambiante, le ZnO présente une BI directe étendue de 3,37 eV. Cette énergie connue sous le nom de gap, est celle qui permet à un électron de passer de la BV à la BC [23]. Les électrons se déplacent généralement dans des couches minces de ZnO avec des mobilités de 20 à 30 cm²/V.s [24]. En ce qui concerne la résistivité électrique ρ du composé en couche mince, elle varie de 10^{-4} à 10^{12} Ω .cm, et elle est influencée par le nombre de porteurs libres et leur mobilité [19].

Nature de la bande interdite	Direct
Largeur de la bande interdite à 300K	3.4 ± 0.02 (eV)
Type de conductivité	N ou P
Masse effective des électrons	$0.28m_0$
Masse effective des trous	$0.6m_0$
Densité d'états dans BC	$3.71 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Densité d'états dans BV	$1.16 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Résistivité maximale	$10^6 \Omega \text{ cm}$
Résistivité minimale	$10^{-1} \Omega \text{ cm}$

Tableau II.5 : Quelques propriétés électriques de ZnO [20]

II.6.2 propriétés optiques

L'oxyde de zinc, est un matériau transparent qui présente un indice de réfraction de 2, une absorption et une diffusion élevées des rayonnements ultraviolets. Selon le mode de préparation et le taux de dopage, la bande interdite peut fluctuer entre 3,20eV et 3,30eV [22].

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons mené une étude bibliographique plus approfondie sur les nouveaux matériaux utilisés dans les cellules solaires et en particulier le CZTS, la pérovskite, CdS et ZnO avec une description de leurs différentes architectures et propriétés.

Références bibliographiques chapitre II

- [1] M.MELOUAH et S.BAKHTI, « Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ », mémoire de master, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, Soutenu le 31 Mai 2016.
- [2] F.BOUDJERAD « Amélioration du Rendement Énergétique de Cellules Photovoltaïques en Couches Minces à base de CZTS », mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Soutenu le 03 juillet 2013.
- [3] A.BELALEM et W.SANDALI « Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ », mémoire de master, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, Soutenu publiquement Le :06/06/2017.
- [4] CH.MELLAOUI et N.MAHMOUDI « Effet de CdS sur les cellules solaires CZTS », mémoire de master, Université Mohammed Khider Biskra, Soutenu le 03 juillet 2013.
- [5] T.NAAMA et K.DADA « Etude et simulation d'une nouvelle structure des cellules photovoltaïque à base de CZTSSe ($\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2(\text{CIGS})/\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4(\text{CZTSSe})$ CdS/ZnO par SCAPS-1D », mémoire de master, Université Amar Thelidji- Laghouat, soutenu en 2021.
- [6] Tian, Q., Xu, X., Han, L., Tang, M., Zou, R., Chen, Z & Hu, J. (2012). Hydrophilic $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ nanocrystals for printing flexible, low-cost and environmentally friendly solar cells. *CrystEng Comm*, 14(11), 3847-3850.
- [7] M.TOUATI et A.CHEHAÏMA « Optimisation des performances électriques d'une cellule en couche mince de type chalcopyrite », Mémoire de master, Université IBN-KHALDOUN DE TIARET, soutenu en 2020.
- [8] Hoffman, R. (2009). Materials for CZTS photovoltaic devices. *The NNIN REU Research Accomplishments*, 82-83.
- [9] Song, X., Ji, X., Li, M., Lin, W., Luo, X., & Zhang, H. (2014). A review on development prospect of CZTS based thin film solar cells. *International Journal of Photoenergy*, 2014.
- [10] Bernardini, G. P. ; Borrini, D. ; Caneschi, A. ; Benedetto, F. D. ; Gatteschi, D. ; Ristori, S. Romanelli, M. : EPR and SQUID. « magnetometry study of $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ (stannite) and $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (kesterite). In: *Physics and Chemistry of Minerals*». S. 453 461 (2000).
- [11] S.M. FirozHasan, M.A. Subhan, Kh.M. Mannan, "The optical and electrical properties of copper indium di-selenide thin films", *Optical Materials* 14, p. 329–336, (2000).

- [12] D.BENAIED « Etude de l'influence du contact arrière à base de Molybdène dans les cellules solaires à couches minces CZTS », mémoire de master, Université Abdelhamid Ibn Badis–Mostaganem, le 30 juin 2021.
- [13] A.A.KANOUN «Etude théorique et prédictive des nouveaux matériaux pour conception des cellules solaires et applications photovoltaïques », Thèse Doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen Le 06/07/2019.
- [14] T. Todorov, M. Kita, J. Carda, P. Escribano ", Cu₂ZnSnS₄ films déposé by a soft chemistry méthode", Thin Solid Films 517, 2541–2544, (2009).
- [15] K. Tan, et al. Contrôlable design of solid-state Pérovskite solar cells by SCAPS device simulation, Solid State Electron, 2016.
- [16] A.ZERIG et R.BENAMOR « Etude de procédé bain chimique et les réactions sament au matériau CdS en couche minces, mémoire de Master, Université Hamma Lakhdhar d'El Oued 01/06/2015.
- [17] S.HARIECH«Elaborationetcaractérisationdescouchesmincesdesulfuredcadmium (CdS) préparées par bain chimique (CBD)», mémoire de Master, Université deMentouri-Constantinele18/03/2009.
- [18] KH.HAMDI-CHERIF« Croissance de nano fibres ZnO dopé-n parla technique d'électro filage», mémoire de Master, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf Le27Janvier2016.
- [19] A.ELKAIEM « Contribution au Développement des Matériaux Nano-Compositesà Base de ZnO et Polymère Etude Structural et Optique», Mémoire de Master, Université desFrèresMentouriConstantinele27/05/2015.
- [20] A.D.ALIOUNE « Études des propriétés optiques de photo luminescence et de réflectivité de couches minces de ZnO épitaxies sous jets moléculaires et détermination à l'aide du modèle D'ISING des propriétés ferromagnétiques de nano matériaux de ZnO dopés ardes impuretés magnétiques », mémoire de Master, Université Cheikh AntaDiop de DAKar,le 6 Juillet 2017.
- [21] M.S.TOUBANE « Etudedes Propriétés Physiques des Couches Minces d'Oxyde de Zinc (ZnO) Elaborépar La Méthode Sol-Gel, Mémoire, Université M'hamed Bougara–Boumerdes2017.
- [22] M.TOUATI TLIBA « Etude des propriétés optiques et électroniques des couches minces de ZnO dopéetnon dopé : élaborationet application» Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouarg la 03/07/2019.
- [23] DIAB, Hiba. Propriétés optiques des pérovskites hybrides 3D pour le photovoltaïque. 2017. Thèse de doctorat. Université Paris-Saclay.

[24] ONO, Luis K., JUAREZ-PEREZ, Emilio J., et QI, Yabing. Progress on perovskite materials and solar cells with mixed cations and halide anions. *ACS applied materials & interfaces*, 2017, vol. 9, no 36, p. 30197-30246.

[25] BEN SAOUCCHA, Zine laabidine, et DJEHICHE, Badereddine. Simulation numérique de la cellule solaire Tandem Pérovskite/CIGS. Mémoire de master. 2019/2020. Université Mohamed Boudiaf-M'Sil.

Chapitre III :
Modélisation et Simulation
d'une Cellule Solaire à Base
de CZTS Sous
environnement SCAPS -1D

III.1. Introduction

Les coûts élevés liés à l'expérimentation, notamment pour les techniques d'élaboration et de caractérisation des cellules photovoltaïques, ont poussé les chercheurs à se tourner vers la simulation numérique comme outil d'analyse et d'optimisation [1].

La simulation permet en effet d'étudier, de prédire et de comprendre les phénomènes physiques au sein des dispositifs à semi-conducteurs, afin d'améliorer les performances des composants d'une cellule solaire [2]. Parmi les logiciels de simulation populaires, le choix s'est porté sur SCAPS-1D.

Notre travail est consacré à l'étude d'une cellule photovoltaïque en couche mince à base de CZTS avec l'ajout d'une couche BSF de type pérovskite. L'objectif est d'évaluer les paramètres optimaux pour chaque couche de la structure afin de déterminer la structure la plus prometteuse.

Dans ce chapitre, l'influence de différents paramètres (épaisseur des couches, niveau de dopage, défaut, température, résistance série et parallèle et Masse d'air) sera étudiée sur les caractéristiques électriques clés d'une cellule photovoltaïque : la tension en circuit ouvert (V_{oc}), la densité de courant de court-circuit (J_{sc}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion (η) [1].

III.2. Présentation du logiciel SCAPS-1D

SCAPS « Solar Cell Capacitance Simulator » est un programme de simulation de la capacité des cellules solaires unidimensionnelles développé par une équipe de chercheurs de l'Université de Gent en Belgique (Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen et Stefaan Degraeve)[4], afin de simuler les caractéristiques électriques des dispositifs photoniques tels que les cellules solaires à couches minces. [3]

Le logiciel SCAPS a d'abord été créé pour des structures de type $CuInSe_2$ et $CdTe$. Cependant, ses capacités ont été améliorées à travers plusieurs versions, ce qui le rend applicable aux cellules solaires cristallines (Si et GaAs) ainsi qu'aux cellules amorphes (a-Si et micro-Si). Le SCAPS permet de simuler des structures constituées d'un nombre défini de couches (jusqu'à 7 couches intermédiaires et contacts avant et arrière), avec des profils de dopage différents et des distributions énergétiques des niveaux donneurs ou accepteurs donnés dans le volume et les interfaces pour un spectre de lumière spécifique. La plupart des paramètres peuvent être modifiés graduellement (en fonction de la composition et de la profondeur de la

cellule) [5].

III.2.1. Le SCAPS offre les avantages suivants

- ✓ L'utilisateur peut accéder aux fichiers d'entrée en format texte, tels que les données spectrales et les paramètres décrivant le dispositif.
- ✓ Il est possible d'inclure des interfaces et de tenir compte de la recombinaison dans celles-ci.
- ✓ Installer des résistances en série et obtenir les caractéristiques de tension, de capacité et de fréquence.
- ✓ C'est un logiciel rapide. [5]

III.2.2. Utilisation du SCAPS et simulation

Pour simuler et contrôler tous les paramètres d'un système photovoltaïque à l'aide du logiciel SCAPS, nous devons passer par trois fenêtres principales :

- Fenêtre d'exécution de « Action panel ».
- La fenêtre de conception du dispositif et «le définition du panneau».
- Fenêtre des résultats. [5]

III.2.3 Lancer SCAPS

Après avoir cliqué sur l'icône du logiciel, apparaît Le panneau d'action.

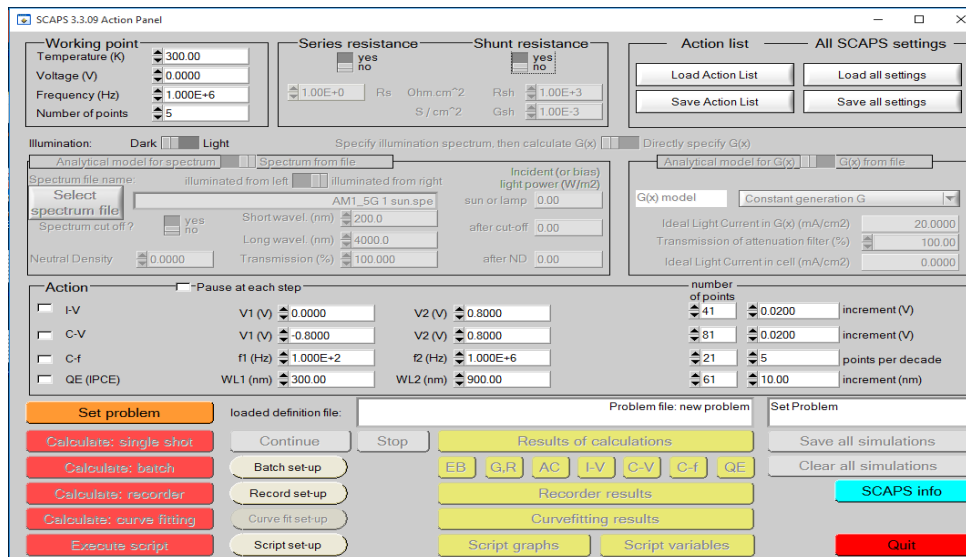


Figure III.3: La fenêtre du panneau d'action du logiciel SCAPS, le panneau principal.

Elle est composée de différents blocs :

- **1^{er} bloc** : permet de définir les conditions dans lesquelles la simulation est effectuée :

- ✓ Spécification du point de fonctionnement (température, tension, fréquence).
- ✓ Condition d'illumination.
- ✓ Résistance.
- **2eme bloc** : permet de sélectionner les grandeurs simulées :
 - ✓ la caractéristique I-V.
 - ✓ la capacité – voltage C-V.
 - ✓ la capacité-fréquence C-F.
 - ✓ la réponse spectrale QE(IPCE).

Action	Parameters		number of points	Increment
<input type="checkbox"/> I-V	V1 (V)	V2 (V)	41	0.0200 (V)
<input type="checkbox"/> C-V	V1 (V)	V2 (V)	81	0.0200 (V)
<input type="checkbox"/> C-f	f1 (Hz)	f2 (Hz)	21	5 (points per decade)
<input type="checkbox"/> QE (IPCE)	WL1 (nm)	WL2 (nm)	61	10.00 (nm)

Figure III.4: la fenêtre qui permet de sélectionner les grandeurs simulées.

- **3eme bloc** : Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les autres propriétés de la cellule solaire étudiée (**Set-problem**).

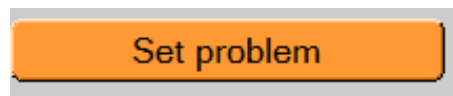


Figure III.5: Définir le problème (Set-problem).

- **4eme bloc** : Lancer les calculs.

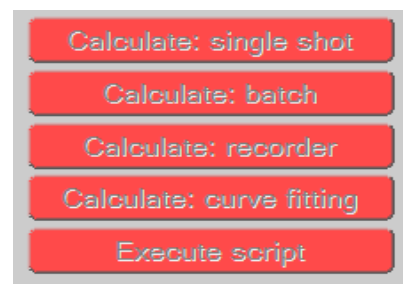


Figure III.6: Lancer les calculs.

- **5eme bloc** : visualiser les résultats (les courbes de simulation).

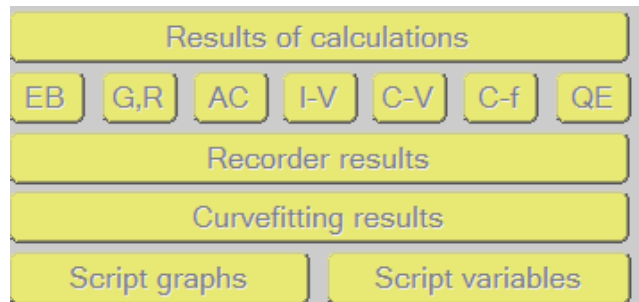


Figure III. 7: visualiser les résultats.

III.2.3.1 Définir le point de fonctionnement

Le point de fonctionnement définit les paramètres liés à l'opération de mesure et qui ne sont pas variables dans les mesures de la simulation. [6]

✓ **La température T** : Importante pour toutes les mesures. Note : dans SCAPS, il est possible de modifier manuellement les vitesses thermiques, la température de la cellule ou le dispositif photovoltaïque jusqu'à atteindre la température désirée. [6]

✓ **La tension V** : Les simulations I-V et C-V éliminent la tension V. La tension de polarisation continue est présente dans les simulations C-f et QE (λ). SCAPS débute toujours avec une tension de 0 V et passe à la tension du point de fonctionnement en un nombre de pas que vous devez indiquer (number of point). [3]

✓ **La fréquence f** : La fréquence f n'est pas applicable aux simulations I-V, QE (λ) et C-f. Il s'agit de la fréquence à laquelle on simule la caractéristique C-V. [6]

✓ **Number of points** : Le nombre de point utilisé pour tracer les courbes. [6]

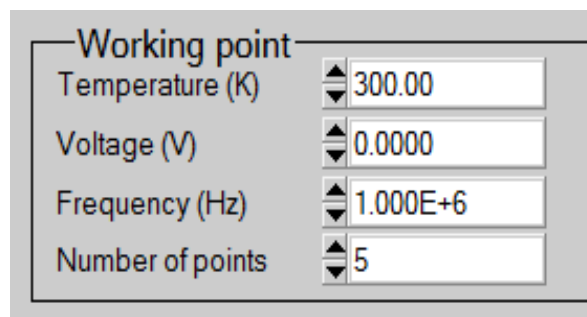


Figure III.8: le point de fonctionnement.

III.2.3.2 Résistance série et résistance parallèle

Il vous suffit de déplacer le bouton vers la case "yes" afin de mettre en marche la résistance série et la résistance shunt. On peut les augmenter et les réduire manuellement pour étudier l'influence de ces deux paramètres sur la caractéristique I-V. [6]

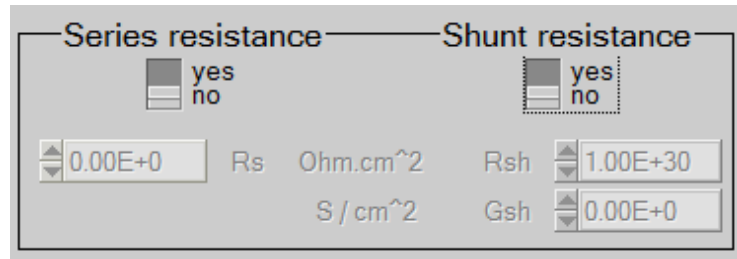


Figure III.9: Résistance série et résistance shunt.

III.2.3.3 Light source

Pour activer la source lumineuse, il vous suffit de déplacer le bouton vers "light"

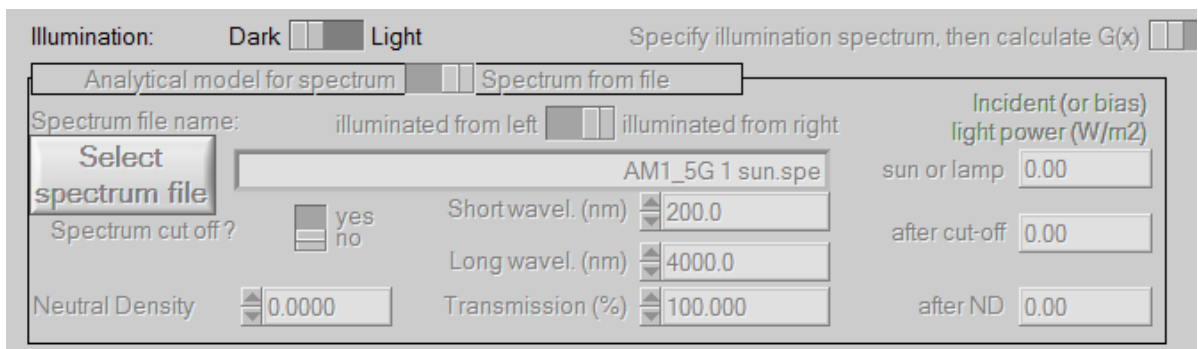


Figure III.10: Light source.

Ce bloc a pour fonction de réguler les paramètres de l'illumination en utilisant des champs spécifiques tels que l'activation de la source lumineuse, le spectre monochromatique ou polychromatique, ainsi que les longueurs d'onde telles que solaire, etc.... [6]

III.2.3.4 Action

Nous pouvons définir les grandeurs pour les simuler en utilisant ce bloc. Pour cela, il est nécessaire de cocher devant la grandeur à simuler, car cela permet d'obtenir la caractéristique I-V (courant-tension), la capacitance-tension, la capacitance-fréquence et la réponse du spectre. [6]

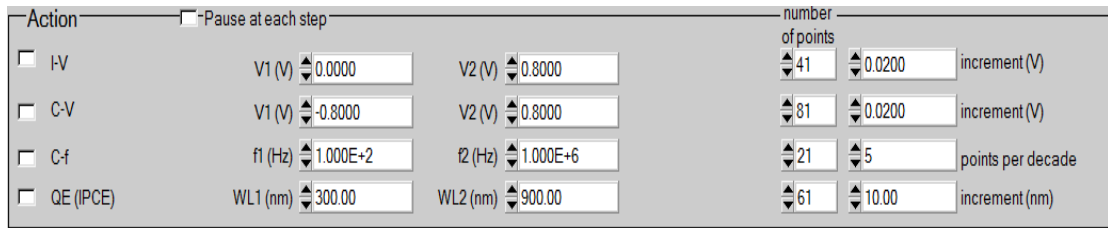


Figure III.11: Action.

III.2.3.5 Définir le problème

Lorsque vous cliquez sur le bouton «**Set-problème**» dans le panneau d'action, le panneau «**Solar Cell Definition Panel** » apparaîtra. En cliquant sur le bouton approprié, vous pouvez modifier les propriétés des couches, des contacts et de l'interface. De la même manière, des couches peuvent être ajoutées en cliquant sur « **add layer** ». [5]

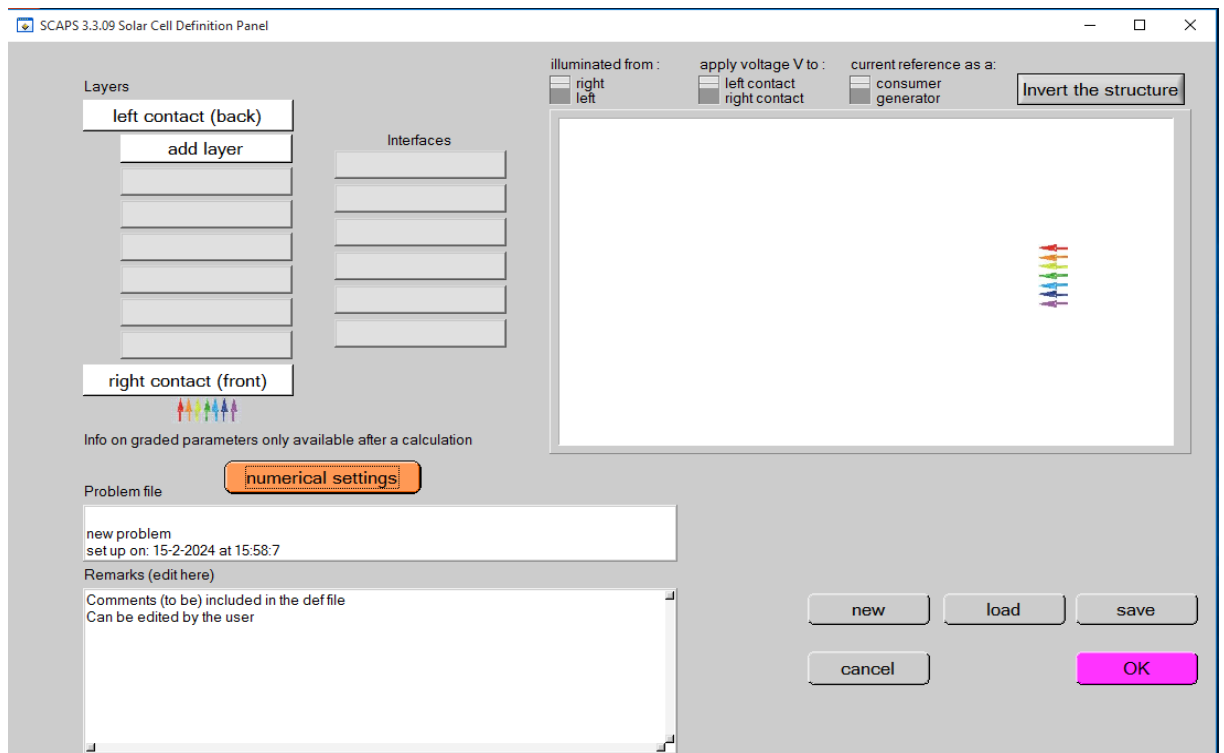


Figure III. 12: Panneau de définition de la structure de la cellule solaire.

En cliquant sur le bouton « **add-layer** », une fenêtre s'ouvre avec les divers paramètres du matériau à introduire.

Il est possible de modifier les caractéristiques des couches, de contact et d'interface en cliquant sur la case appropriée.

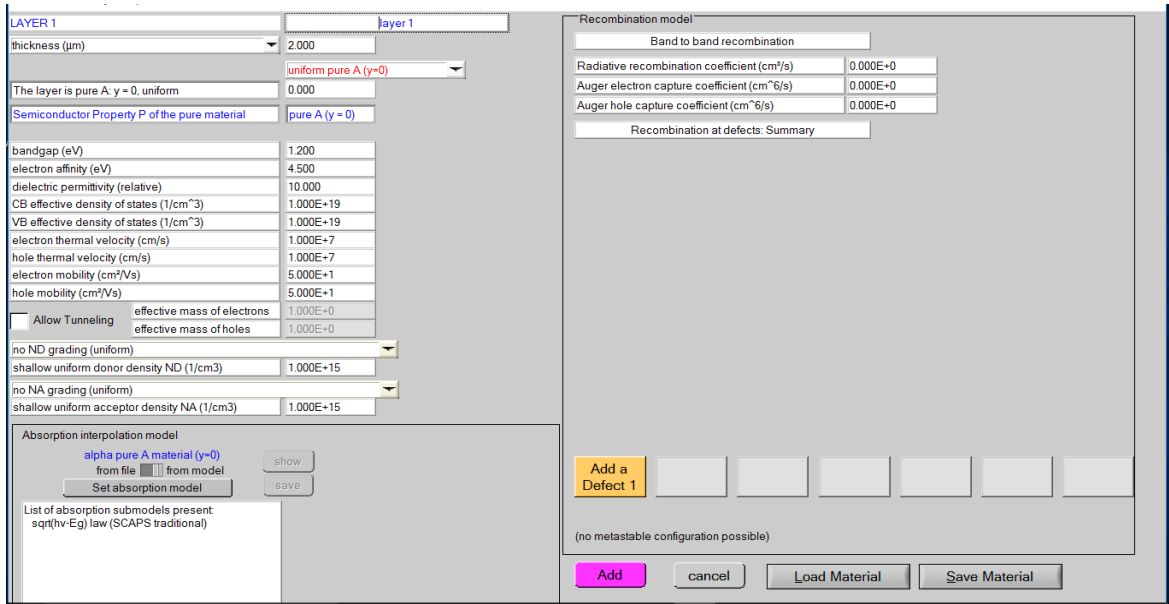


Figure III.13: La fenêtre de définition des propriétés des couches de la cellule solaire.

III.2.3.6 Fenêtre de résultat

Les résultats de la simulation sont présentés sous forme de graphe dans cette fenêtre, avec la possibilité de les sauvegarder ou d'exporter leurs valeurs. Les bandes d'énergie, les concentrations et les courants à un point de fonctionnement spécifique, les caractéristiques (I-V), les caractéristiques (C-V) et (C-f), le rendement quantique (QE), ainsi que les bandes d'énergies en régime alternatif (ac-bands) peuvent être calculés avec SCAPS. [3]

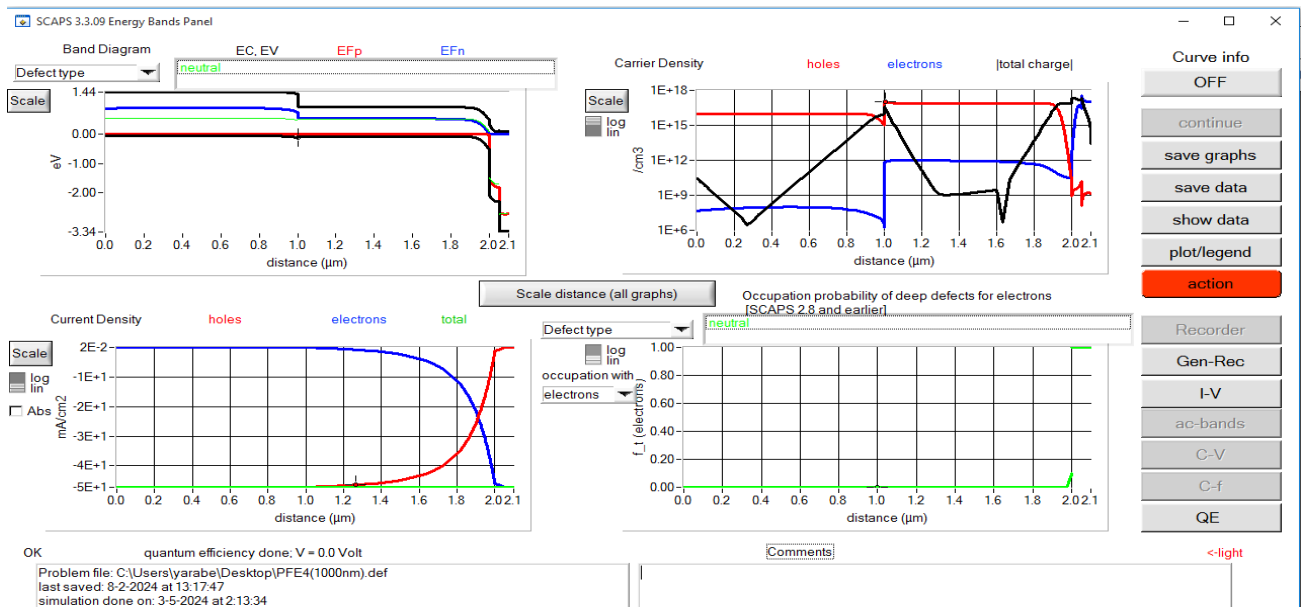


Figure III.14: Fenêtre de résultat.

III.3 Structure étudiée

Notre étude consiste à modéliser par le biais de la simulation un dispositif PV à hétérojonction ayant la structure MAPbI₃/CZTS/CdS/ZnO tel que représenté dans la figure III.13. Le MAPbI₃ est un matériau pérovskite de type CH₃NH₃PbI₃, qui sont des matériaux innovants dont la structure cristalline est similaire à celle du minéral naturel CaTiO₃ appelé Pérovskite. Les paramètres des matériaux utilisés dans la structure étudiée sont regroupés dans le tableau III.1.

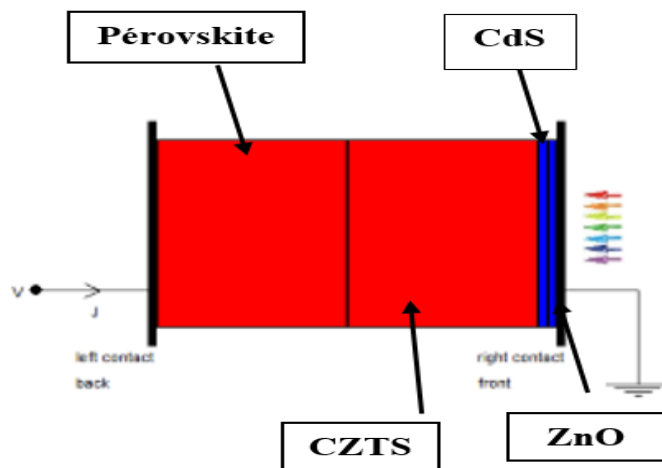


Figure III.15: structure d'une cellule PV avec la couche de pérovskite.

Layer properties	ZnO	CdS	CZTS	MAPbI ₃
Band gap E_g (eV)	3.40	2.40	1	1.5
Electron Affinity χ_e (eV)	4.55	4.50	4.35	3.9
Permittivity ϵ_r	10	10	13.60	6.5
Electron Mobility μ_n (cm ² /V.s)	50	100	100	50
Hole Mobility μ_p (cm ² /V.s)	20	25	25	50
Effective density of states at CB N_C (cm ⁻³)	4×10^{18}	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	1×10^{17}
Effective density of states at VB N_V (cm ⁻³)	9×10^{18}	1.8×10^{18}	1.8×10^{18}	1×10^{17}
Density of n-type doping N_D (cm ⁻³)	1×10^{17}	2.0×10^{17}	-	1×10^{17}
Density of p-type doping N_A (cm ⁻³)	-	-	8.0×10^{16}	1×10^{16}
Defect density	10^{14}	10^{14}	10^{14}	1×10^{14}
Thickness (μ m)	0.05	0.05	1	1

Tableau III.1 : Les paramètres physiques d'entrée pour les matériaux des couches minces MAPbI₃, CdS, ZnO et CZTS.[7]

La figure III.14 représente la caractéristique courant-tension (I-V) simulée, de notre structure

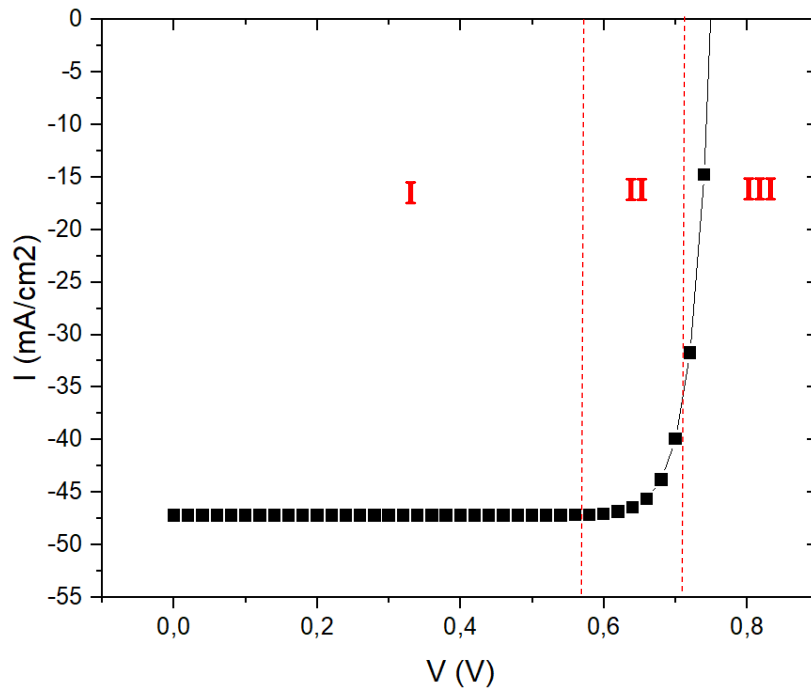


Figure III.16 : Caractéristiques I-V simulé pour cellule solaire en couche mince avec et sans la couche MAPbI₃

Dans la figure III.14, on distingue trois régions de fonctionnement :

Région I : dans cette zone le courant est quasi-constant de valeur maximale I_{CC} (courant de court-circuit), la cellule PV se comporte comme un générateur de courant.

Région II : dans cette zone le courant commence à diminuer avec de faible variation de la tension, dans cette région et a des valeurs de tension et de courent acceptable la cellule PV délivre une puissance élever.

Région III : dans cette zone, l'augmentation de la tension fait diminuer le courant de manière significatif jusqu'à s'annuler lorsque la tension atteint la tension de circuit-ouvert V_{co} . Le fonctionnement de la cellule solaire est similaire à un générateur de tension.

La caractéristique QE en fonction de la longueur d'onde est représentée dans la figure III.15.

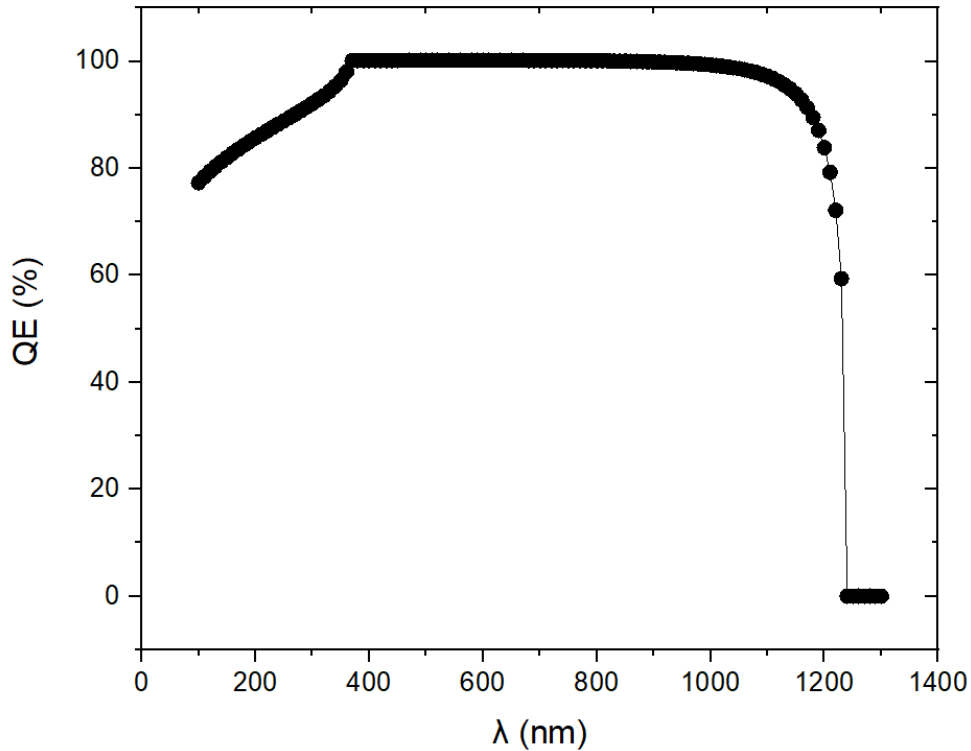


Figure III.17 : rendement quantique en fonction de longueur d'onde.

Le Rendement quantique de la cellule QE représente le rendement de conversion de la cellule PV. Il permet dans un premier temps de déterminer le rapport entre les électrons générés et les photons incidents et dans un second temps, la quantification des pertes dans la cellule solaire afin améliorer le rendement de la conversion. Telles qu'elles sont représentées en figure III.15.

Dans le but de mettre en évidence l'amélioration apportée par l'ajout de la couche BSF (back surface field) en Pérovskite à la cellule solaire, nous avons simulé la cellule solaire étudiée sans la couche BSF comme le montre la figure III.16. Les résultats de simulation sont représentées dans les figures III.17 et III.18.

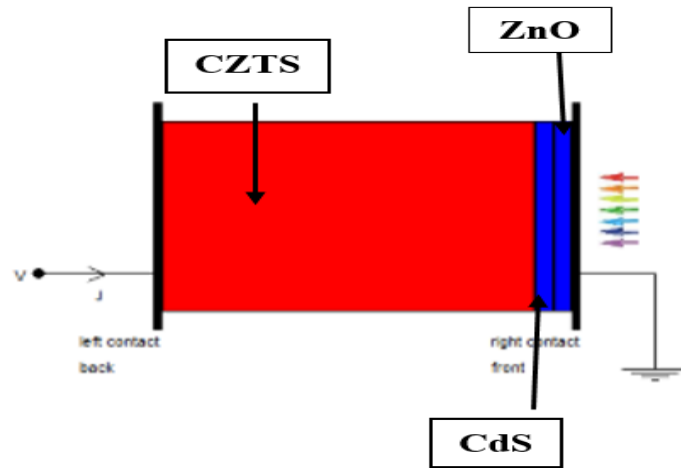


Figure III.18: structure d'une cellule PV sans la couche de pérovskite.

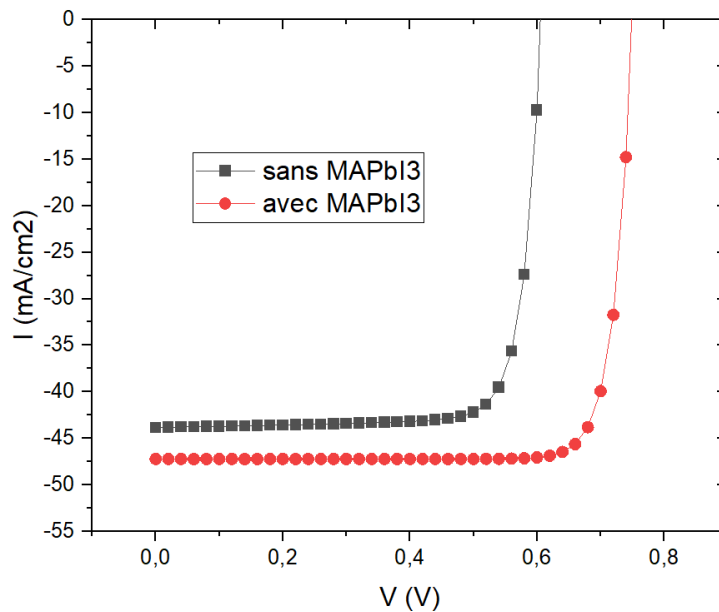


Figure III.19 : Caractéristiques I-V simulé pour cellule solaire en couche mince avec et sans la couche pérovskite.

Sur la figure III.17, on remarque que l'allure des caractéristiques courant-tension sont présentent une similarité remarquable avec une augmentation du courant I_{cc} et de la tension V_{co} , ce qui suggère que, dans les conditions de simulation spécifiques mises en œuvre, l'influence de la couche de pérovskite sur la réponse I-V du dispositif photovoltaïque est remarquable. En effet, les propriétés uniques de la structure pérovskite, telles que son coefficient d'absorption optique important, sont généralement considérées comme ayant un impact direct et significatif sur les performances des cellules solaires, en particulier sur leurs caractéristiques I-V.

La figure III.18 révèlent une augmentation du rendement quantique de 75% à 100% dans la plage de longueurs d'onde de 100 à 400 nm, tant en présence qu'en l'absence de la couche de pérovskite. La différence entre les deux courbes se manifeste principalement dans la plage de longueurs d'onde de 400 à 1200 nm où le rendement quantique a atteint les 100% sur toute la largeur de cette gamme de longueur d'onde (c-à-d de 400 à 1200 nm) avec l'ajout de la couche MAPbI₃, tandis que sans cette couche le rendement diminue progressivement, ce qui souligne l'importance de son influence sur les performances de la cellule en augmentant l'absorption et en la photo-génération .

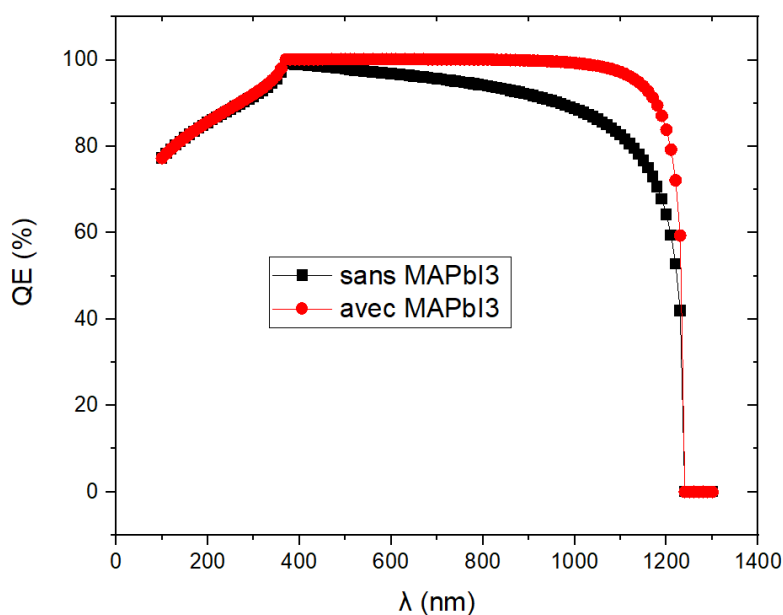


Figure III.20 : la caractéristique QE de la cellule photovoltaïque avec et sans pérovskite.

Les résultats de la simulation obtenus avant l'optimisation sont représentés sur le tableau III.2 pour la tension à circuit ouvert, le courant de court-circuit, le facteur de forme et le rendement :

Paramètres	V _{co} (v)	J _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Structures				
CZTS/CdS/ZnO	0.606	43.8490	80.98	21.53
MAPbI ₃ /CZTS/CdS/ZnO	0.750	47.2404	85.02	30.12

Tableau III.2 : résultats des paramètres obtenus pour la cellule PV en présence et en absence de pérovskite.

En comparant les résultats des deux structures obtenues par le biais de la simulation nous remarquons que la cellule PV MAPbI₃/CZTS/CdS/ZnO donne des valeurs prometteuses pour V_{co} (0,75 V) et J_{cc} (47,24 mA/cm²). De plus, cette structure possède un rendement plus élevé, atteignant 30,12 % et un facteur de forme de 85.02%. Ces résultats montrent l'importance de la

couche MAPbI₃ dans l'amélioration des performances globales de la cellule solaire en augmentant l'absorption et diminuer l'effet de recombinaison.

III.4 Résultats et discussion

En vue d'améliorer les performances de la structure à hétérojonction MAPbI₃/CZTS/CdS/ZnO, nous allons dans ce qui suit étudié l'influence de la variation de certains paramètres géométriques (épaisseur) et de compositions (dopage) sur les paramètres de notre structure et les caractéristiques I-V et QE.

III.4.1 Effet de la couche CZTS

III.4.1.1 Influence de l'épaisseur

La couche absorbante CZTS (Cu₂ZnSnS₄) présente un grand intérêt dans les cellules photovoltaïques en couches minces, Les figures suivantes représentent les caractéristique I-V (figure III.19) et QE (figure III.20) obtenue pour les différentes épaisseurs de la couche de CZTS :

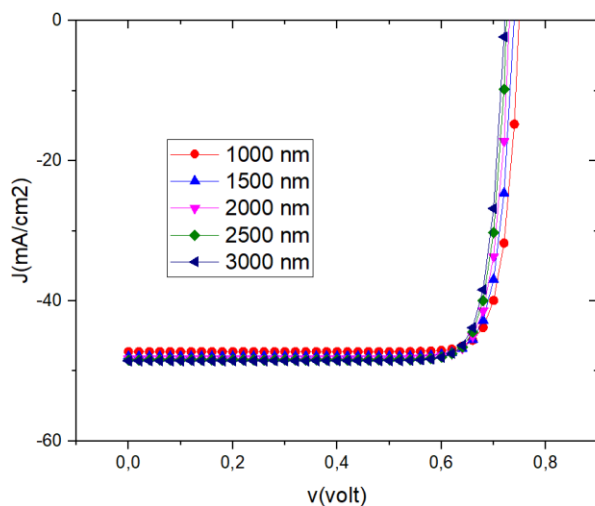


Figure III.21 : Influence de l'épaisseur de la couche CZTS sur la caractéristique I-V

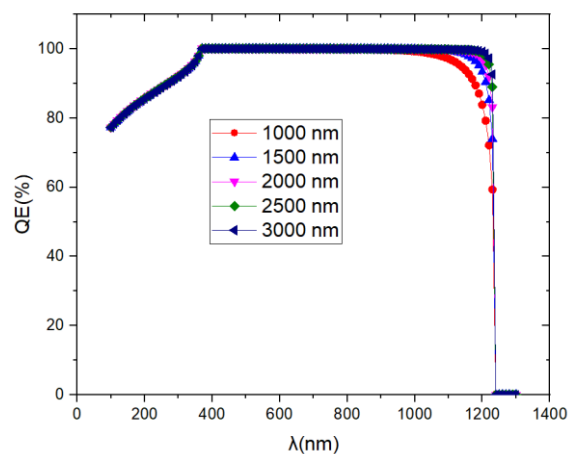


Figure III.22 : Influence de l'épaisseur de la couche CZTS sur la caractéristique QE

Sur la figure III.19 on distingue deux régions, un premier allant de 0 à 0.65V où l'augmentation de l'épaisseur de la couche CZTS fait augmenter le courant. En ce qui concerne la deuxième zone qui s'étend de 0.65 à 0.75 environ on constate une diminution de la tension V_{co}. L'influence de l'épaisseur du CZTS sur le rendement quantique (figure III.20) est visible uniquement sur la plage de longueur d'onde de 800 nm à 1250 nm où le rendement quantique augmente avec l'augmentation de l'épaisseur.

Dans notre étude on varie l'épaisseur de cette dernière de 1 à 3 μm avec un pas de 500nm, Les résultats obtenus sont présentés de manière détaillée dans le tableau et les figures ci-dessous :

Épaisseur (nm)	Vco (Volt)	Jcc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
1000	0.749	47.240	85.018	30.121
1500	0.739	47.898	84.906	30.072
2000	0.731	48.226	84.884	29.940
2500	0.725	48.429	84.808	29.804
3000	0.721	48.558	84.717	29.668

Tableau III.3 : Influence de l'épaisseur de la couche CZTS sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire.

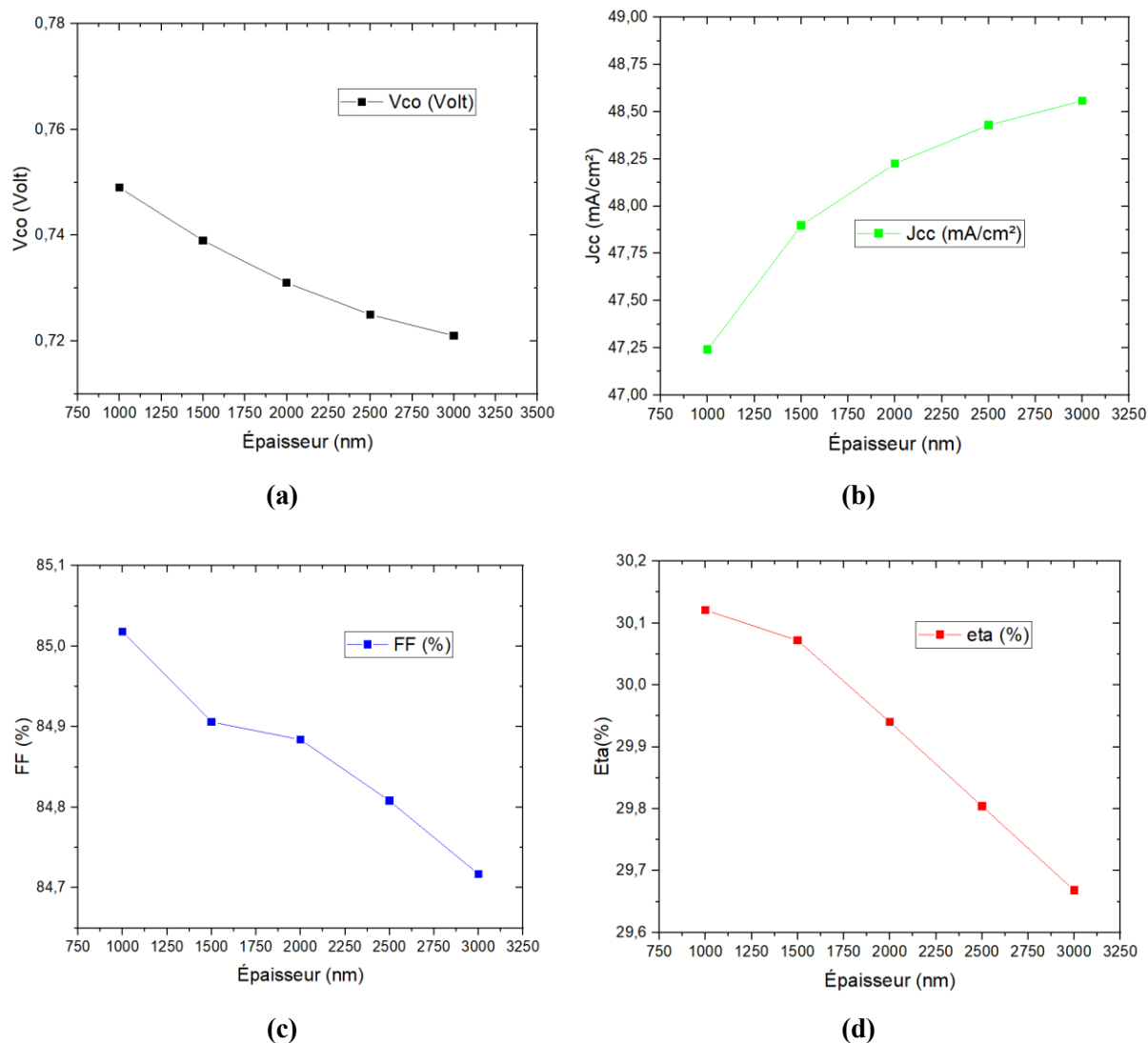


Figure III.23 : variation des paramètres de la cellule PV en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS

D'après le tableau III.6 et la figure III.21 (a), on constate une diminution de la tension V_{co} en fonction de l'épaisseur de la couche CZTS ($V_{co} = 0.721V$ à une épaisseur de $3 \mu m$). Une épaisseur optimale permet une absorption maximale de la lumière et une efficacité de conversion élevée. En revanche, une épaisseur non optimale peut engendrer des pertes et une baisse du rendement global de la cellule photovoltaïque.

L'augmentation de l'épaisseur de la couche de CZTS est associée à une augmentation de la densité de courant de court-circuit (J_{cc}) (tableau III.3 et la figure III.21 (b)). Cette augmentation de J_{cc} en fonction de l'épaisseur accrue de la couche de CZTS peut être expliquée par une amélioration de l'absorption de la lumière incidente et une augmentation de la génération de paires électron-trou, entraînant ainsi une augmentation du courant de court-circuit dans la cellule photovoltaïque.

Il est observé que le facteur de forme (FF) (figure III.21 (c)) et le rendement (η) (figure III.21 (d)) d'une cellule photovoltaïque à base de CZTS diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche de CZTS. Cette diminution peut être attribuée à l'accroissement de la recombinaison des porteurs de charge induit par l'épaississement de la couche de CZTS. Cette augmentation de la recombinaison nuit à l'efficacité de la séparation des charges, entraînant une baisse du facteur de forme et du rendement de la cellule photovoltaïque.

III.4.1.2 Influence du dopage N_A

Dans le but d'étudier l'impact de la concentration du dopage N_A de la couche CZTS sur les performances de notre cellule solaire. Nous avons fait varier la concentration de $1E13cm^{-3}$ à $1E19 cm^{-3}$. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures III.22 et III.23 illustrent les caractéristiques courant-tension (I-V) et le rendement quantique externe (QE) respectivement.

Sur la figure III.22, nous observons que dans la plage de tension 0-0.5V l'influence de la variation de la concentration du dopage n'est pas remarquable, cependant dans la plage de tension 0.5-0.9 V, l'effet de l'augmentation de la concentration du dopage est nettement visible à partir de la valeur $1E15$.

L'influence de la concentration du dopage du rendement quantique est représentée sur la figure III.23, nous observons trois zones de variation :

Zone I (100-400nm) : dans cette région l'augmentation de la concentration de N_A dans la couche CZTS fait augmenter le rendement quantique.

Zone II (400-1100nm) : dans cette plage de longueur d'onde l'augmentation de N_A n'influe pas sur le rendement quantique.

Zone III (1100-1250nm) : l'augmentation de la concentration du dopage n'influe pas sur le rendement quantique, cependant, lorsque la concentration atteint des valeurs avoisinant $1E19 \text{ cm}^{-3}$ les longueurs d'onde supérieures à 1200 nm ne sont plus considérées.

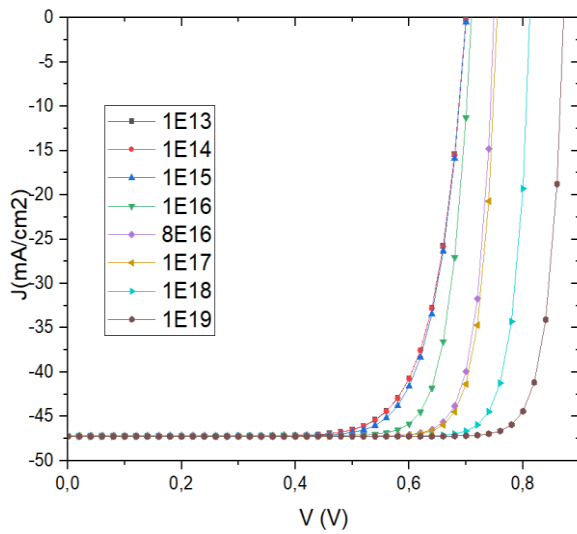


Figure III.24 : Influence du dopage de la couche CZTS sur la caractéristique I-V

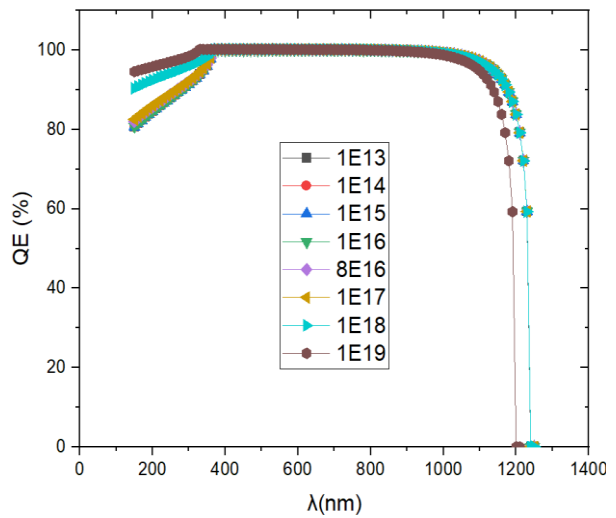


Figure III.25 : Influence du dopage de la couche CZTS sur la caractéristique QE

Dopage	Vco(V)	Jcc(mA/cm ²)	FF(%)	η(%)
1E13	0,700	47,2	75,41	24,93
1E14	0,700	47,2	75,48	24,95
1E15	0,700	47,21	75,89	25,42
1E16	0,712	47,23	82,54	27,67
8E16	0,75	47,24	85,02	30,12
1E17	0,77	47,25	85,08	30,36
1E18	0,813	47,25	86,14	33,1
1E19	0,872	47,25	86,9	35,84

Tableau III.4 : l'impact de la concentration du dopage de la couche CZTS sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire.

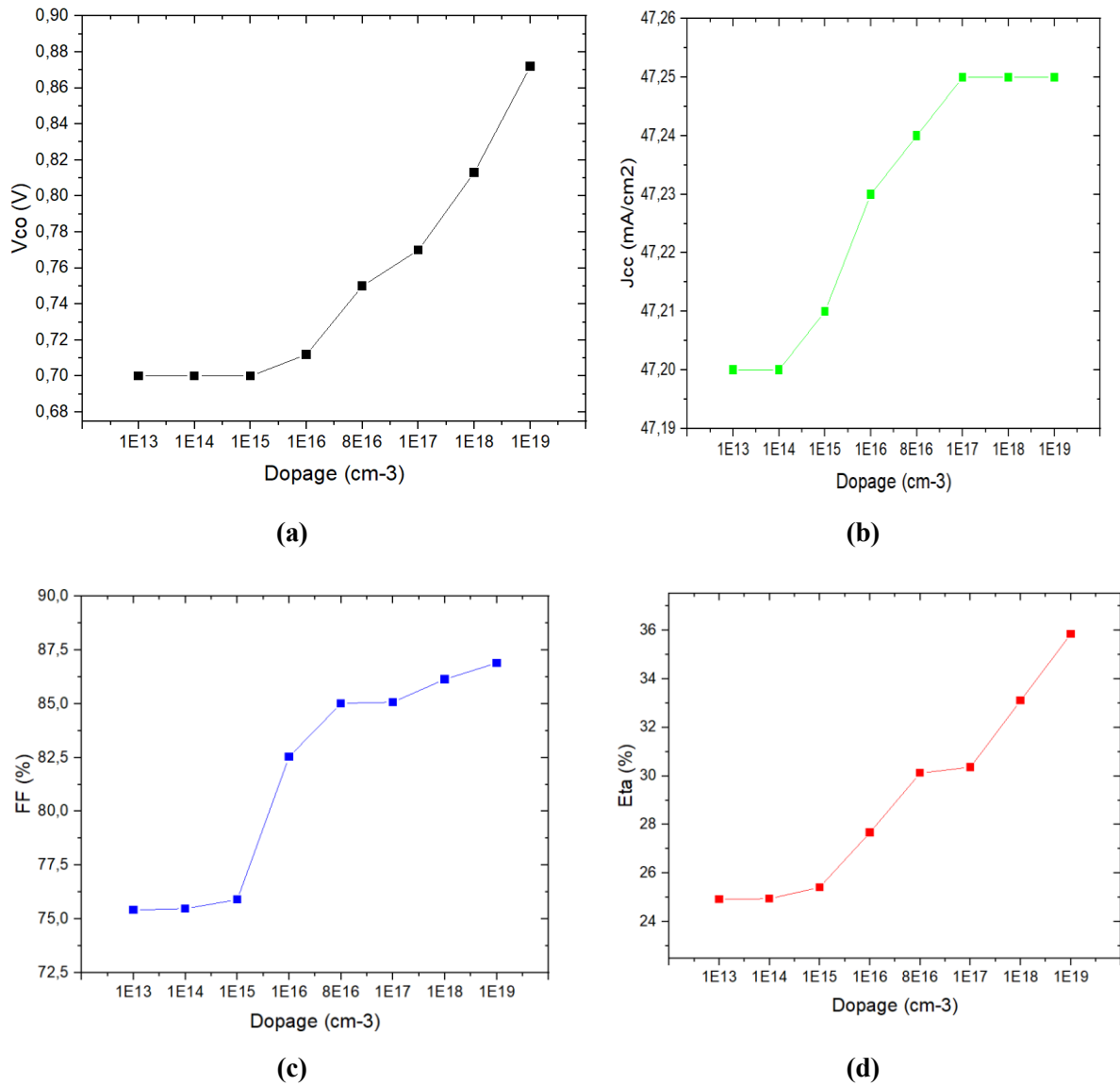


Figure III.26 : variation des paramètres de la cellule PV en fonction du dopage de la couche CZTS.

La figure III.24 montre clairement l'impact direct du dopage de la couche CZTS sur la tension V_{co} , sur J_{cc} , FF et η , l'augmentation de la concentration du dopage fait augmenter les paramètres de la cellule solaire en modifiant la collecte des porteurs de charge.

III.4.1.3 I de la concentration de défaut

L'influence de la couche absorbante sur les performances de la cellule photovoltaïque est significative. Les figures ci-après présentent les caractéristiques courant-tension (I-V) et le rendement quantique externe (QE) obtenue pour différentes concentration de défauts allant de 1^{E11} à 1^{E18} cm⁻³ dans la couche de CZTS.

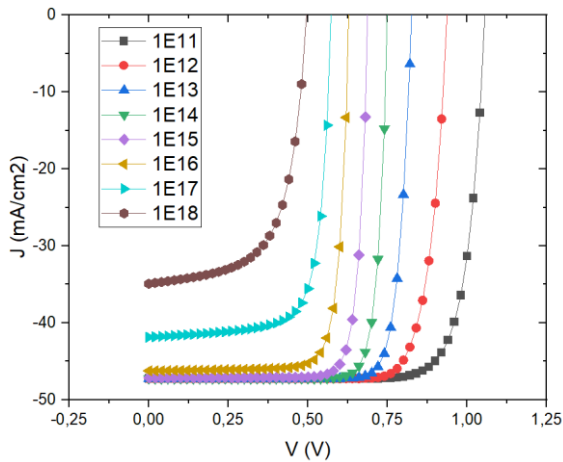


Figure III.27 : Impact de la concentration de défaut de la couche CZTS sur la caractéristique I-V

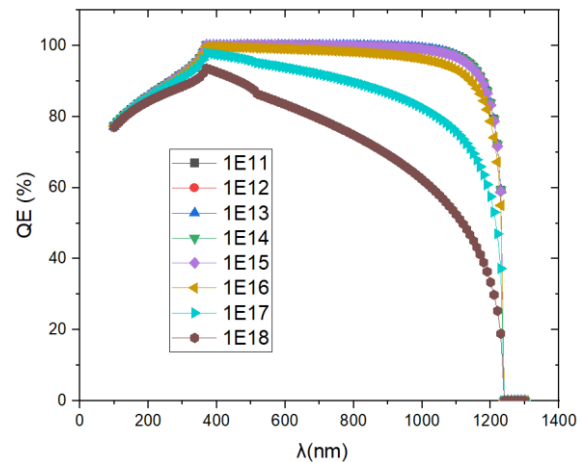


Figure III.28 : Impact de la concentration de défaut de la couche CZTS sur la caractéristique QE

Nous observons sur les figures III.25 et III.26 une dégradation des caractéristiques avec l'augmentation de la concentration de défaut. Entre 1^{E11} et 1^{E15} cm^{-3} l'augmentation de la concentration de défauts n'influe pas sur le courant mais fait diminuer V_{co} , dans cette plage le rendement quantique ne varie pas. Au delà de 1^{E16} le courant et la tension diminuent et le rendement quantique se dégrade.

Dans les semi-conducteurs les défauts sont ajoutés pour modifier les propriétés des matériaux c'est à dire soit augmenter la conductivité électrique des matériaux ou le contrôle de la durée de vie des porteurs. Cependant, à partir d'un certain seuil la quantité de défaut réduit le transport des porteurs de charges et réduit le rendement de conversion.

Défaut	V_{co}	J_{cc}	FF	η
	En volt	En mA/cm ²	En %	En %
1E11	1.056	47.251	81.12	40.48
1E12	0.937	47.251	81.14	35.92
1E13	0.825	47.250	84.34	32.91
1E14	0.750	47.240	85.02	30.12
1E15	0.688	47.140	83.98	27.25
1E16	0.628	46.240	81.52	23.70
1E17	0.573	41.867	74.83	17.96
1E18	0.495	34.917	62.96	10.90

Tableau III.5 : étude de la variation de la concentration de dopage de la couche CZTS sur les caractéristiques électriques de la cellule PV

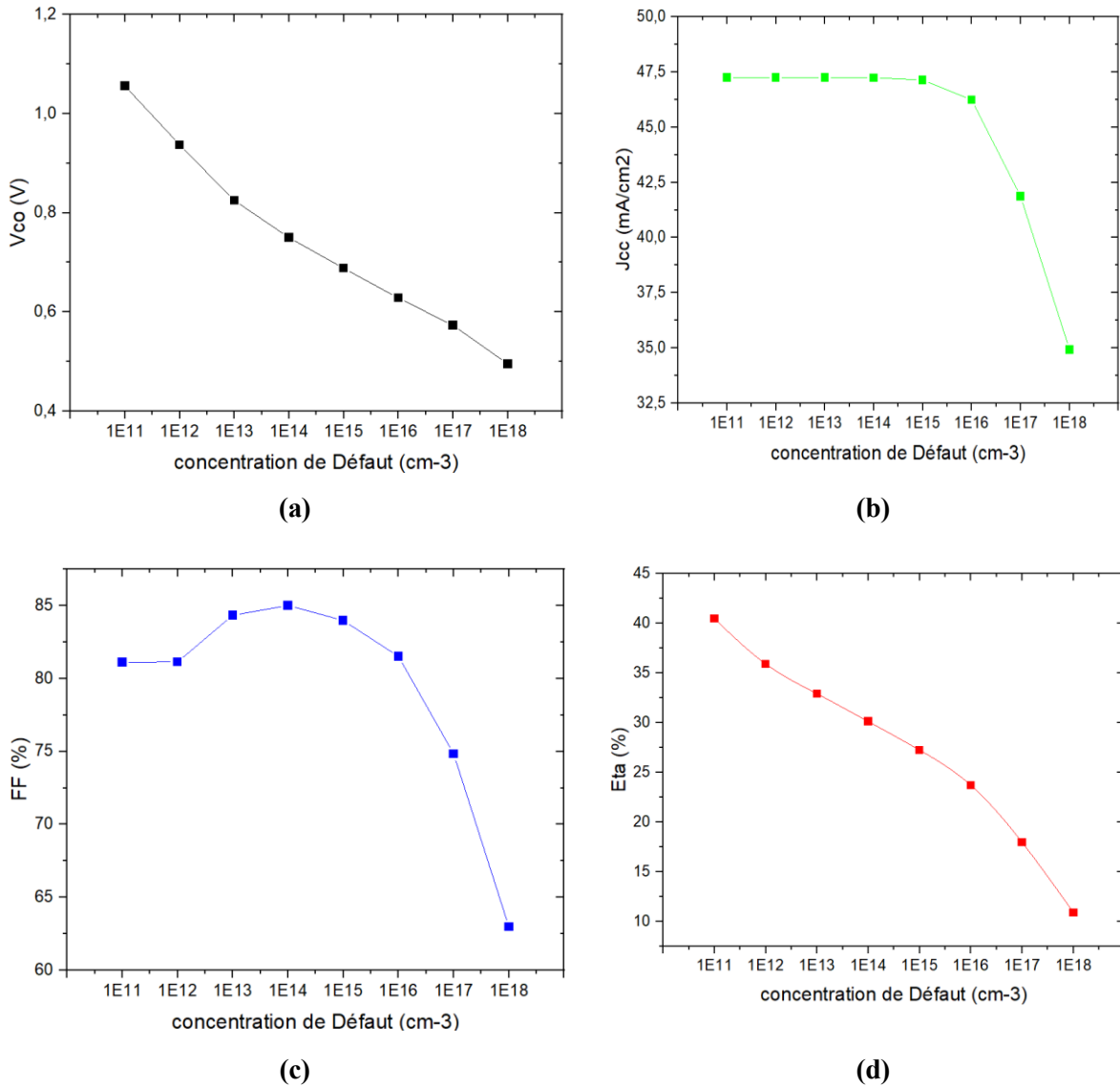


Figure III.29 : variation des paramètres de la cellule PV en fonction de la concentration de défaut dans la couche CZTS.

Il est observé dans la figure III.27 que tous les paramètres diminuent avec l'augmentation de la densité de défauts dans la couche de CZTS. Ces défauts ont un impact néfaste sur les performances de la cellule photovoltaïque en réduisant la tension V_{co} , J_{cc} , FF et μ . Les défauts dans la couche de CZTS peuvent agir comme des centres de recombinaison pour les porteurs de charge, entraînant une diminution de la tension V_{co} . De plus, les défauts peuvent piéger les porteurs de charge et réduire leur mobilité, ce qui se traduit par une baisse de la densité de courant de court-circuit J_{cc} . Par ailleurs, les défauts dans la couche de CZTS peuvent augmenter la recombinaison des porteurs de charge, nuisant ainsi à l'efficacité de la séparation des charges et impactant négativement le rendement et le facteur de forme de la cellule photovoltaïque. Une augmentation de la densité de défauts peut donc conduire à une diminution du rendement et du facteur de forme de la cellule.

III.4.2 Effet de la couche la couche BSF en Pérovskite MAPbI₃

III.4.2.1 Effet de l'épaisseur

Afin d'étudier l'impact de l'épaisseur de la couche en Pérovskite sur les propriétés de la cellule solaire, nous avons varié ce paramètre de 500 nm à 3 μm .

Les figures III.28 et III.29 représentent les caractéristique I-V et QE obtenue pour les différentes épaisseurs de la couche en pérovskite. L'allure des courbes sur ces figures montre que l'épaisseur de la couche BSF n'a pas d'impact significatif sur les caractéristiques I-V et QE de notre cellule.

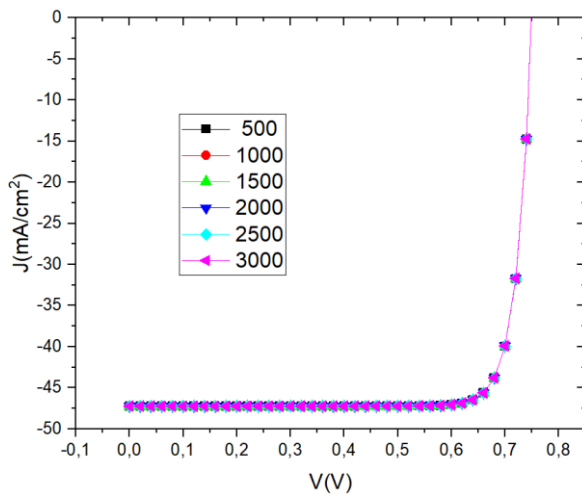


Figure III.30 : Influence de l'épaisseur de la couche MAPbI₃ sur la caractéristique I-V

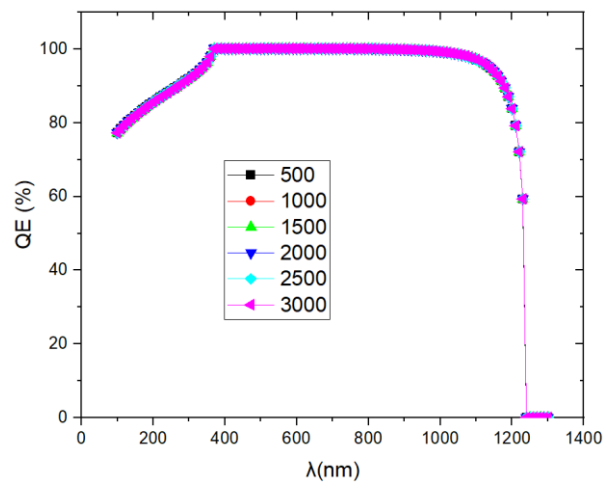


Figure III.31 : Influence de l'épaisseur de la couche MAPbI₃ sur la caractéristique QE

Le tableau suivant résume les résultats de la simulation sur l'amélioration de l'épaisseur de la couche étudiée :

Épaisseur (nm)	V _{co} (V)	J _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
500	0.749	47.239	85.022	30.122
1000	0.749	47.240	85.018	30.121
1500	0.749	47.240	85.014	30.120
2000	0.749	47.240	85.010	30.119
2500	0.749	47.241	85.006	30.117
3000	0.749	47.241	85.002	30.116

Tableau III.6 : l'impact de l'épaisseur de la couche MAPbI₃ sur les caractéristiques électriques de la cellule PV

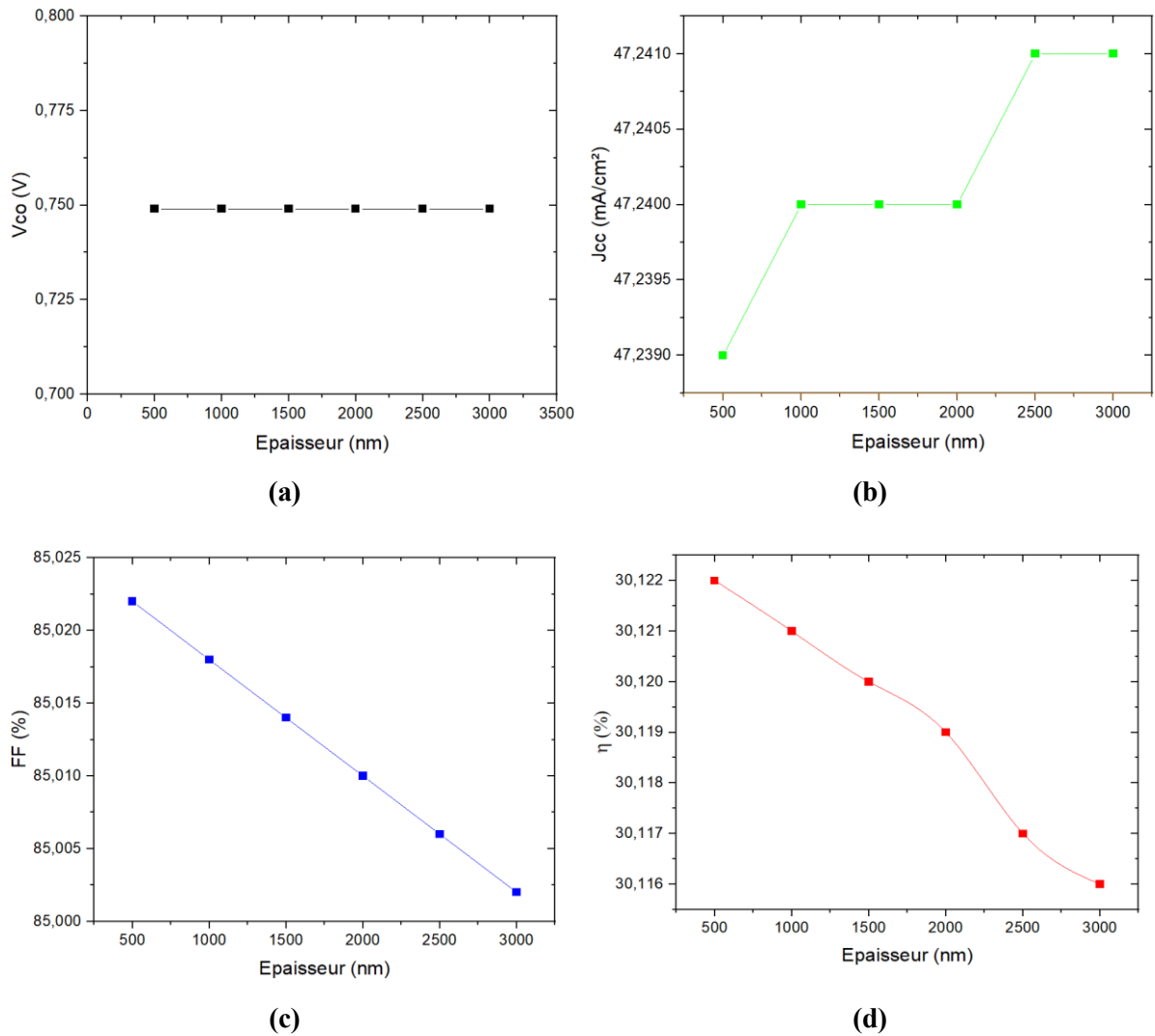


Figure III.32 : variation des paramètres de la cellule PV en fonction de l'épaisseur de la couche MAPbI3

Les représentations graphiques (figure III.30) des résultats obtenues et résumer dans le tableau III.6 montre une constance de V_{co} , une faible augmentation du courant de court-circuit J_{cc} avec l'augmentation de la couche pérovskite.

La faible diminution du facteur de forme FF et du rendement η en fonction de l'augmentation de l'épaisseur est attribuable à plusieurs facteurs, notamment l'accroissement de la recombinaison des porteurs de charge, et/ou l'absorption excessive de la lumière.

III.4.2.2 Effet du dopage N_A

La couche de Back Surface Field (BSF) exerce une influence significative sur les performances de la cellule photovoltaïque. Dans cette partie nous allons étudier l'effet de la variation du dopage de $1^{E}11$ à $1^{E}20$ cm⁻³ de cette couche sur les caractéristiques courant-tension (I-V), le rendement quantique (QE), et les paramètres de la cellule solaire.

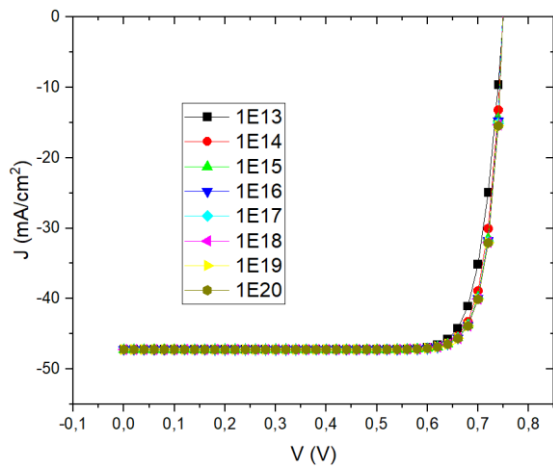


Figure III.33 : Impact de la variation du dopage de la couche MAPbI₃ sur la caractéristique I-V

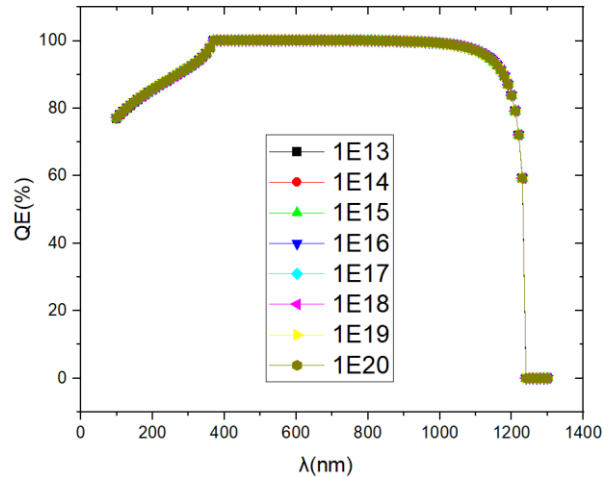


Figure III.34 : impact de la variation du dopage de la couche MAPbI₃ sur la caractéristique QE

Similairement à l'effet de la variation du dopage, et tel que représenté sur les figures III.31 et III.32, l'augmentation de la concentration du dopage n'influe pas sur les caractéristiques I-V et QE.

L'effet de la variation du dopage sur les paramètres cette variation est documentée dans les figures et le tableau associés :

N_A En cm⁻³	V_{co} En Volt	J_{cc} En mA/cm²	FF En %	η En %
1 ^E 13	0.750	47.238	82.82	29.36
1 ^E 14	0.750	47.239	84.49	29.94
1 ^E 15	0.749	47.240	84.94	30.09
1 ^E 16	0.750	47.240	85.02	30.12
1 ^E 17	0.750	47.240	85.03	30.13
1 ^E 18	0.750	47.240	85.03	30.14
1 ^E 19	0.750	47.240	85.03	30.15
1 ^E 20	0.750	47.240	85.03	30.15

Tableau III.7 : l'impact du dopage de la couche MAPbI₃ sur les performances de la cellule PV

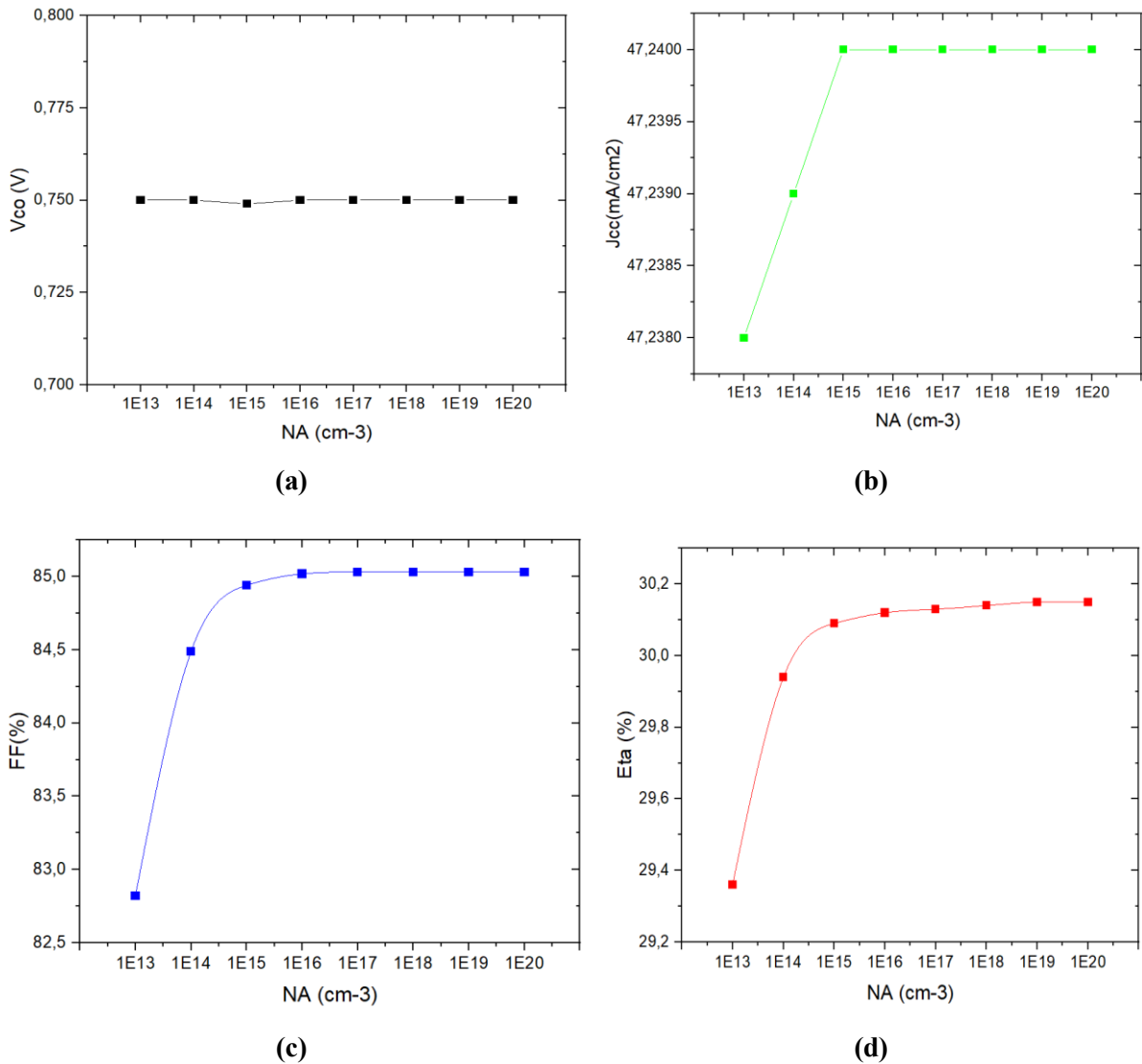


Figure III.35 : variation des paramètres de la cellule PV en fonction du dopage N_A de la couche MAPbI₃.

Il est observé sur les figures III.30 (a) et (b) une tension V_{co} de valeur constante et face à l'augmentation du dopage et une très faible augmentation de J_{cc} pour des valeurs faible de dopage puis une stabilité au-delà de 1E15 cm⁻³.

Une amélioration du facteur de forme et du rendement est à constater sur les figures III.30 (b) et (c), avec l'augmentation du dopage du 1E11 à 1E15 cm⁻³ au-delà de cette valeur on note une le facteur de forme et le rendement ne varie pas.

III.4.2.3 Effet de la concentration de défaut

La concentration de défaut dans un matériau est un paramètre à considérer lors de la simulation des cellules solaires. Dans le but de voir l'influence de ce paramètre sur le comportement de la cellule, nous allons varier la concentration de défaut de 1E11 à 1E18 cm⁻³ dans la couche BSF. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures III.34, III.35 et III.36

et regrouper dans le tableau III.8

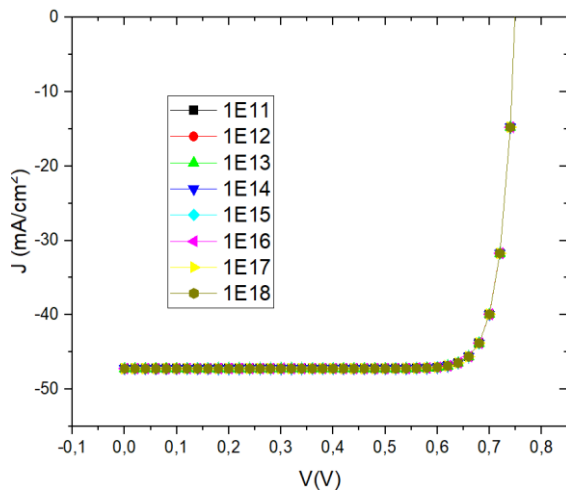


Figure III.36 : Influence de la concentration de défaut de la couche MAPbI₃ sur la caractéristique I-V

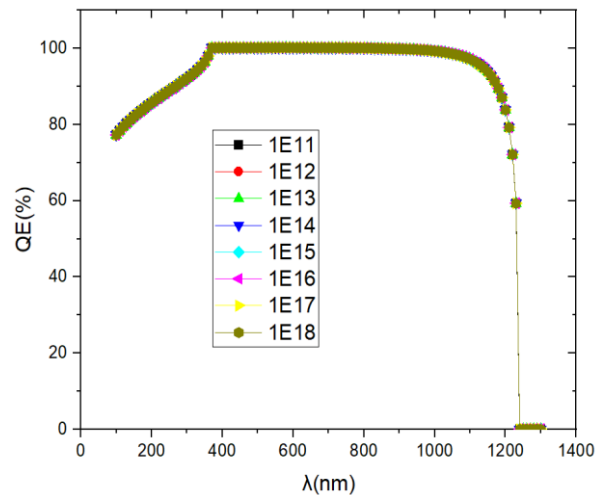


Figure III.37 : Influence de la concentration de défaut de la couche MAPbI₃ sur la caractéristique QE

Une variation de la densité de défauts de la couche pérovskite, dans une plage allant de 1E11 à 1E18 cm⁻³ ne modifie pas le comportement de la cellule solaire et n'apporte aucune variation sur les caractéristiques I-V et QE.

Défaut	Vco En Volt	Jcc En mA/cm²	FF En %	η En %
1E11	0.750	47.240	85.02	30.12
1E12	0.750	47.240	85.02	30.12
1E13	0.750	47.240	85.02	30.12
1E14	0.750	47.240	85.02	30.12
1E15	0.750	47.240	85.02	30.12
1E16	0.750	47.240	85.02	30.12
1E17	0.750	47.240	85.02	30.12
1E18	0.750	47.240	85.02	30.12

Tableau III.8 : l'impact de la variation de défaut de la couche MAPbI₃ sur les paramètres de la cellule PV

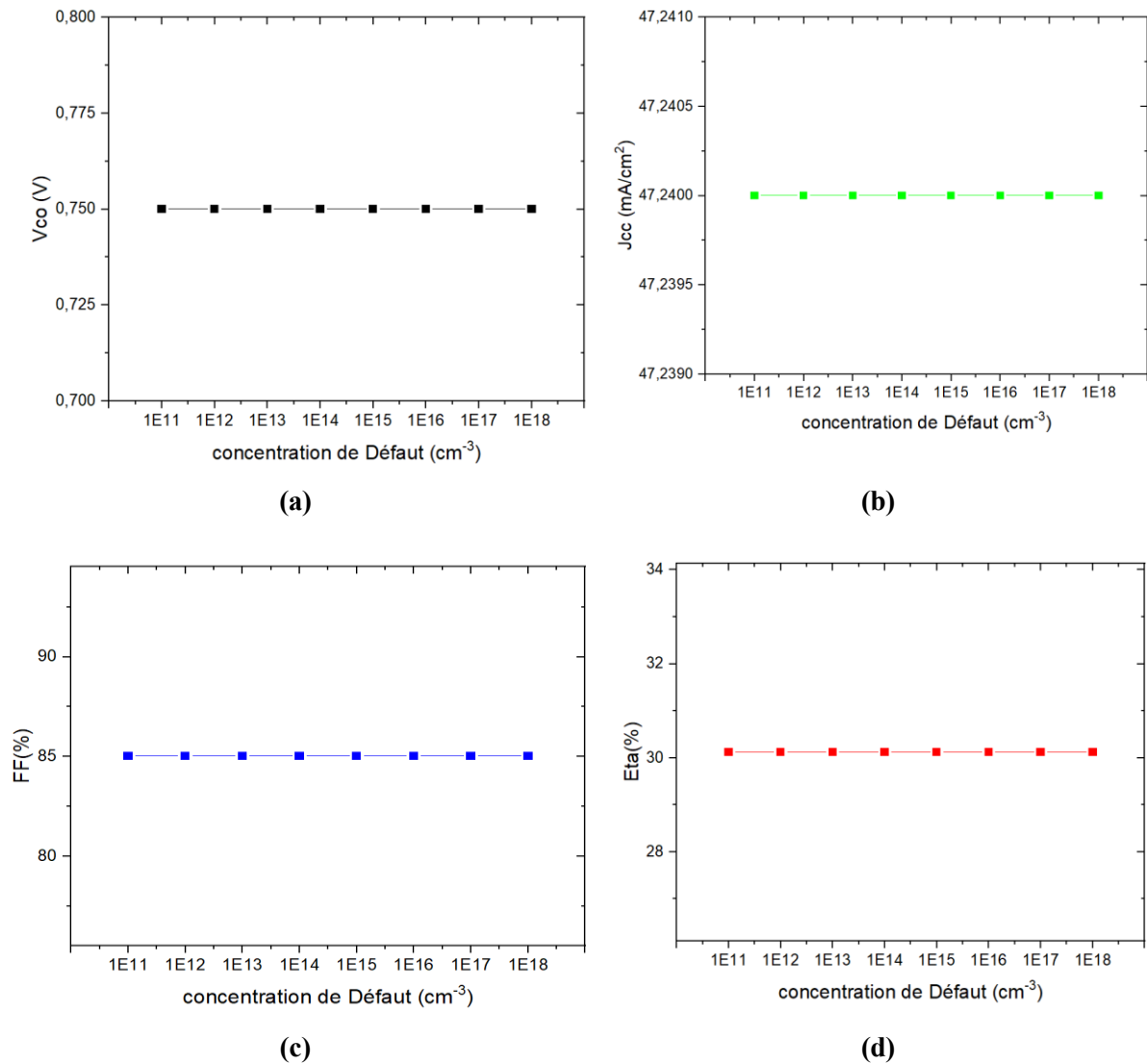


Figure III.38 : variation des paramètres de la cellule PV en fonction de la concentration de défaut de la couche MAPbI3.

Il est observé que la tension V_{co} , la densité de courant de court-circuit J_{cc} , le rendement (η) et le facteur de forme (FF) ne présentent aucune variations avec l'augmentation de la concentration de défaut de la couche Pérovskite.

III.4.3 Effet de la couche CdS

La présence de la couche de CdS (cadmium sulfide) revêt une importance capitale en tant que couche tampon dans une cellule photovoltaïque ; étant un élément clé pour favoriser la séparation efficace des porteurs de charge, renforcer la stabilité opérationnelle de la cellule et établir une jonction PN avec la couche de CZTS. Dans cette section nous allons étudier les effets de la variation de l'épaisseur, de la concentration du dopage N_D et de la concentration de défaut sur les caractéristiques I-V et QE et les paramètres de la cellule PV.

III.4.3.1 Effet de l'épaisseur

Les figures suivantes représentent les caractéristique I-V et QE obtenue pour des épaisseurs de la couche de CdS allant de 50 nm à 300 nm :

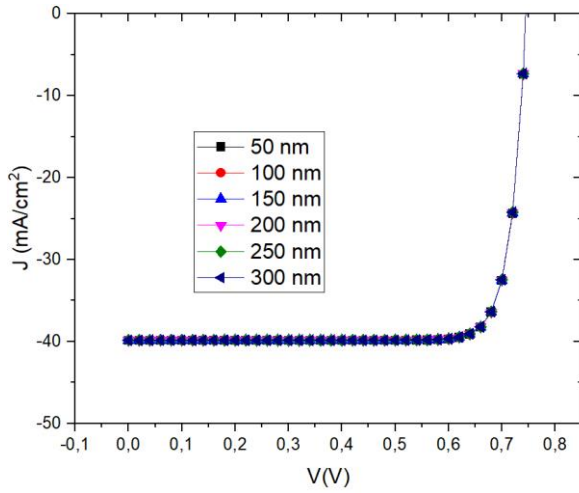


Figure III.39 : Influence de l'épaisseur de la couche CdS sur la caractéristique I-V

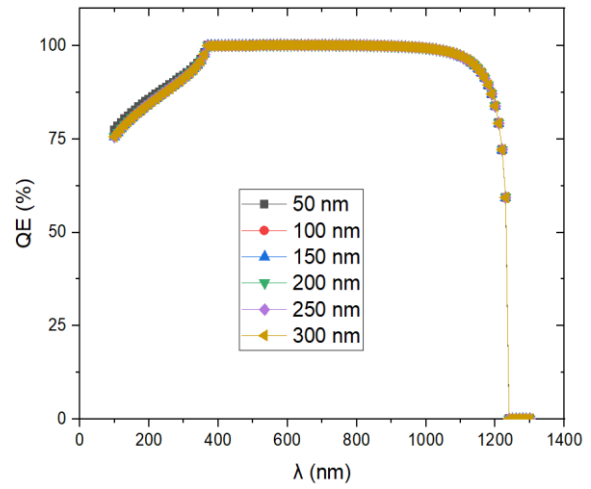
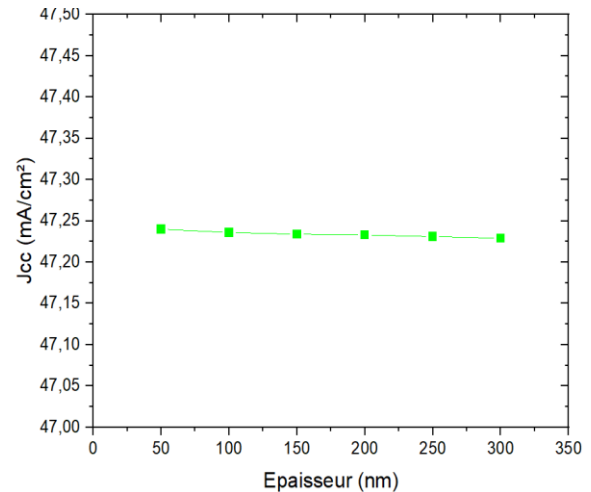
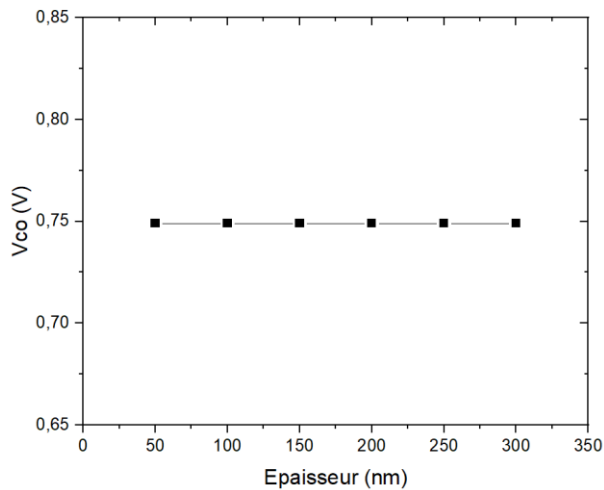


Figure III.40 Influence de l'épaisseur de la couche CdS sur la caractéristique QE

Epaisseur En nm	V _{co} En Volt	J _{cc} En mA/cm ²	FF En %	η En %
50	0.749	47.240	85.02	30.121
100	0.749	47.236	85.02	30.119
150	0.749	47.234	85.02	30.118
200	0.749	47.233	85.02	30.117
250	0.749	47.231	85.02	30.115
300	0.749	47.229	85.02	30.114

Tableau III.9 : l'impact de l'épaisseur de la couche Cds sur les performances de la cellule PV



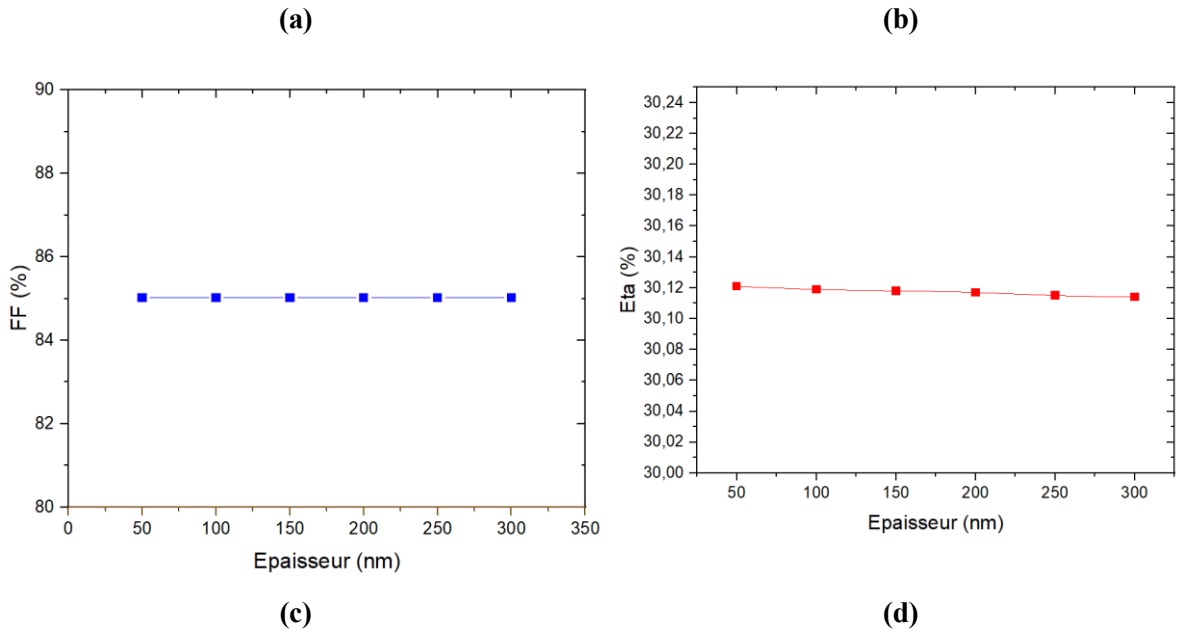


Figure III.41 : variation des paramètres de la cellule PV en fonction de l'épaisseur de la couche de CdS

L'augmentation de l'épaisseur de la couche tampon CdS ne n'influe de manière significatif ni sur les caractéristiques I-V et QE (figure III.37 et III.38) ni sur les paramètres V_{co} , J_{cc} , FF et η (figure III.39).

III.4.3.2 Effet du dopage N_D

Les figures suivantes représentent les caractéristique I-V et QE obtenue pour les différents dopages de la couche de CdS :

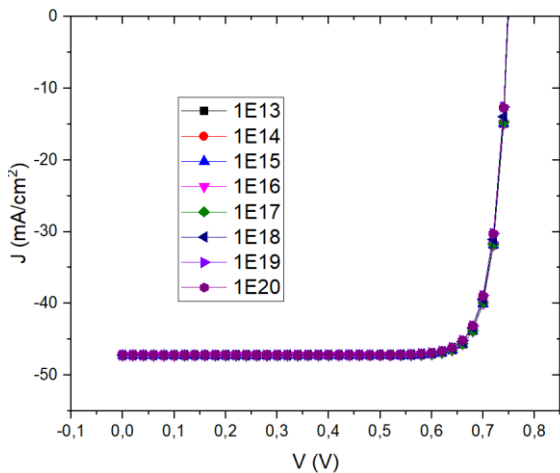


Figure III. 40 : Influence de la concentration du dopage de la couche CdS sur la caractéristique I-V

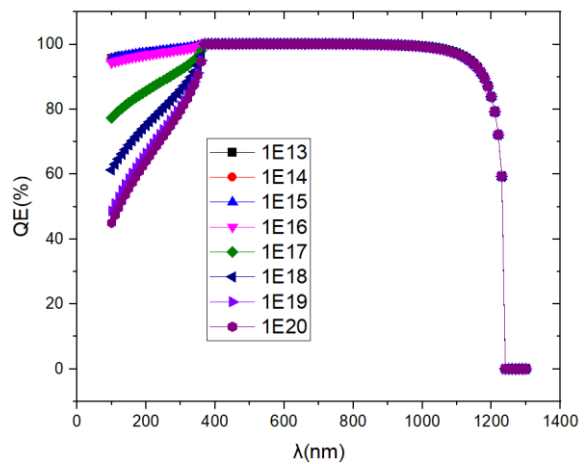


Figure III.41 Influence de la concentration du dopage de la couche CdS sur la caractéristique QE

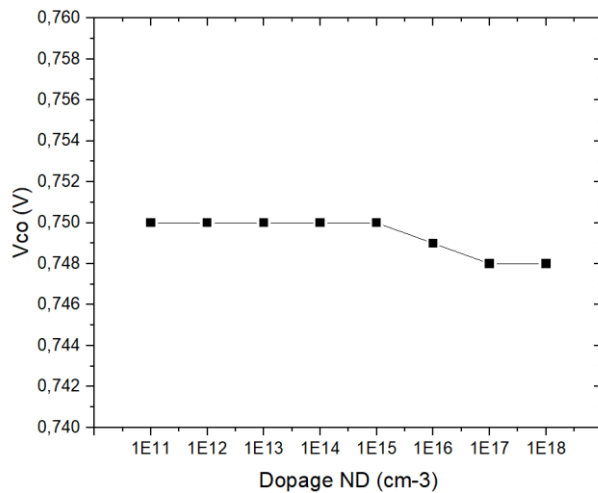
Suivant la figure III.40, la caractéristique I-V ne change pas avec l'augmentation du dopage N_D , cependant le rendement quantique diminue quand la concentration de dopage N_D

de la couche CdS augmente dans la plage des longueurs d'onde entre 100 et 400 nm ou la couche tampon joue un rôle prépondérant. Dans le domaine de longueur d'onde 400 à 1200 nm le rendement quantique ne change pas avec l'augmentation du dopage.

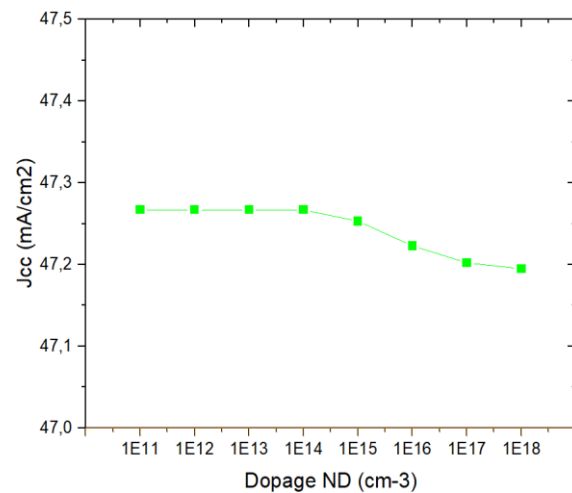
Les effets de la variation du dopage N_D sur les performances de la cellule sont regroupés dans le tableau III.10 et représentés sur la figure III.42 :

Dopage N_D En cm^{-3}	V_{oc} En Volt	J_{cc} mA/cm^2	FF En %	η En %
1E13	0.750	47.267	85.079	30.17
1E14	0.750	47.267	85.079	30.17
1E15	0.750	47.267	85.079	30.17
1E16	0.750	47.267	85.075	30.16
1E17	0.750	47.253	85.046	30.12
1E18	0.749	47.223	84.752	29.92
1E19	0.748	47.202	84.386	29.81
1E20	0.748	47.195	84.386	29.81

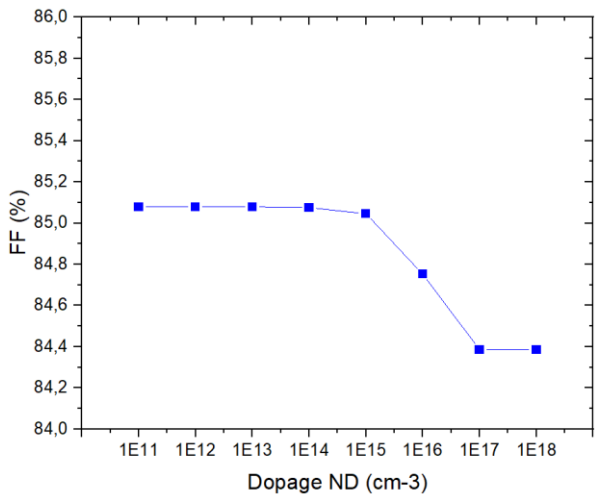
Tableau III.10 : impact du dopage de la couche CdS sur les paramètres de la cellule PV



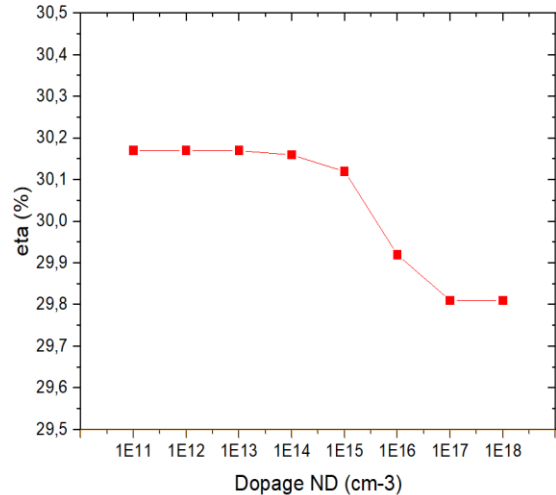
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III.42 : variation des paramètres de la cellule PV en fonction du dopage de la couche de CdS

En observant la figure III.42 nous remarquons que la tension de circuit ouvert (V_{co}), la densité de courant de court-circuit (J_{sc}), le facteur de forme FF et le rendement (η) restent constantes quand N_D varie de $1E11 \text{ cm}^{-3}$ à $1E14 \text{ cm}^{-3}$, Cependant, à mesure que le dopage de la couche de CdS augmente, les paramètres de la cellule commencent à décroître jusqu'à une valeur de dopage de $1E17 \text{ cm}^{-3}$; au-delà de $1E17 \text{ cm}^{-3}$ les paramètres deviennent constants.

III.4.3.3 Effet de la concentration de défaut

Les figures suivantes représentent les caractéristiques I-V et QE obtenues pour les différentes valeurs de la concentration de défauts de la couche de CdS :

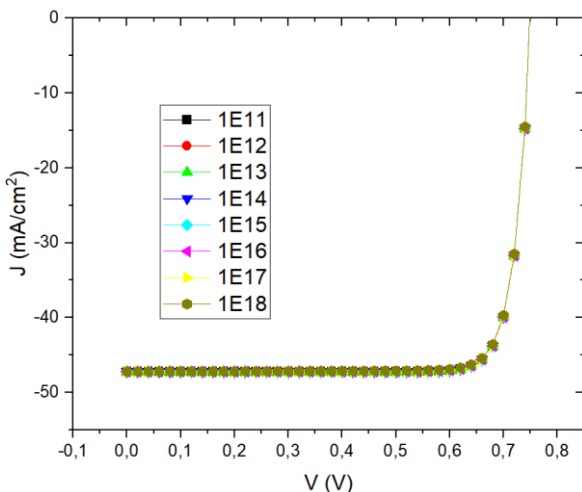


Figure III.43 : Influence de la concentration de défaut de la couche CdS sur la caractéristique I-V

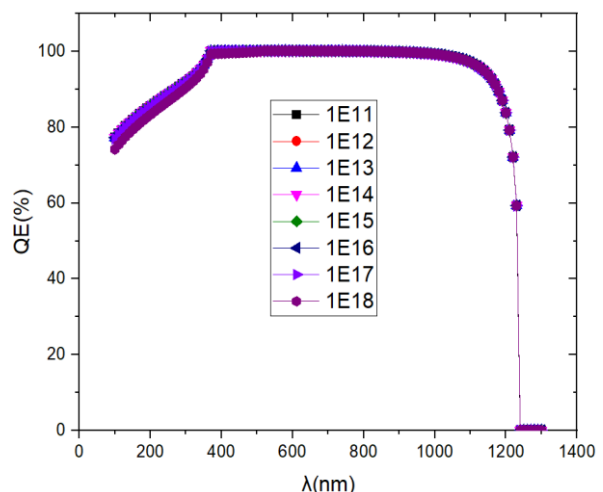
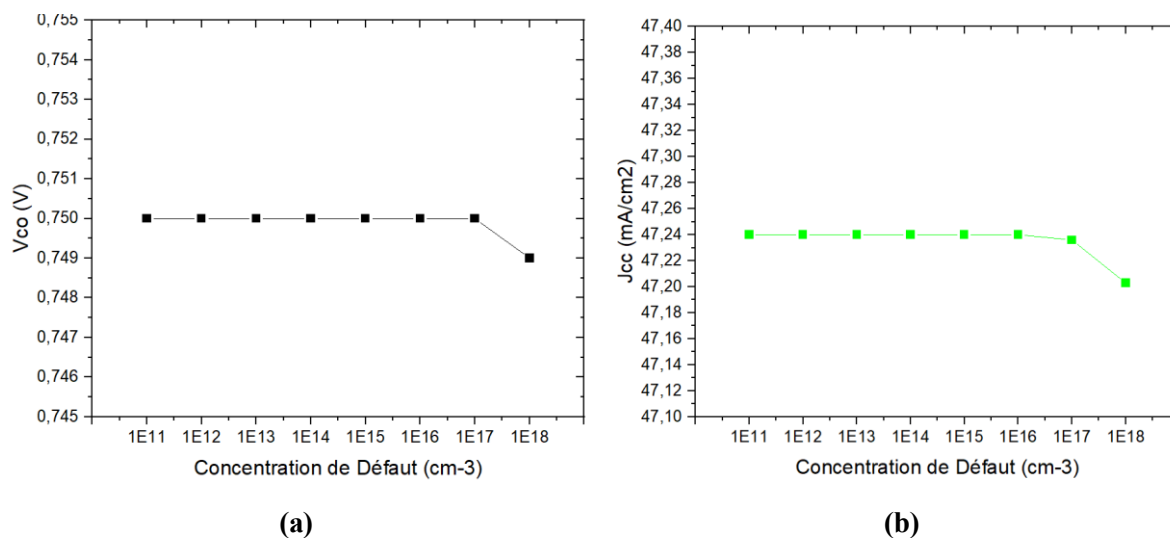


Figure III.44 : Influence de concentration de défaut de la couche CdS sur la caractéristique QE

Sur les figures III.43 et III.44, nous remarquons que les caractéristiques I-V et QE ne sont pas affecter par l'augmentation de la concentration de défaut de la couche CdS allant de 1E11 à 1E18 cm⁻³. Les effets de cette variation sur les paramètres de notre sont regroupé dans le tableau III.11 et représenter sur la figure III.45 :

Concentration de Défaut en cm ⁻³	V _{co} En V	J _{cc} En mA/cm ²	FF En %	η En %
1E11	0.750	47.240	85.02	30.12
1E12	0.750	47.240	85.02	30.12
1E13	0.750	47.240	85.02	30.12
1E14	0.750	47.240	85.02	30.12
1E15	0.750	47.240	85.02	30.12
1E16	0.750	47.240	85.01	30.12
1E17	0.750	47.236	84.98	30.11
1E18	0.749	47.203	84.74	29.99

Tableau III.11 : l'impact de la concentration de défaut de la couche CdS sur les paramètres de la cellule PV



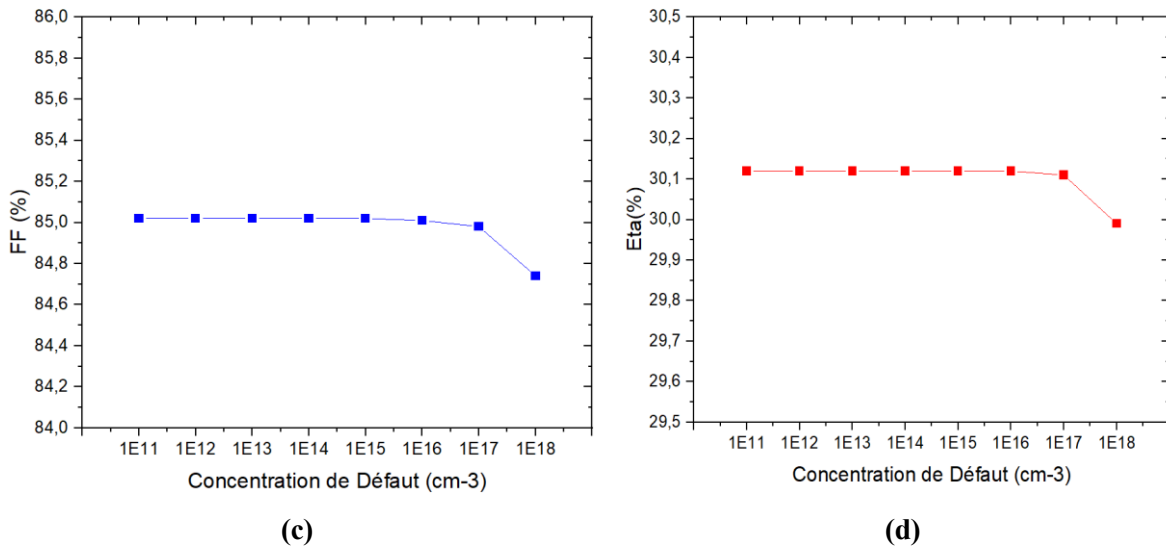


Figure III.45 : variation des paramètres de la cellule PV en fonction de la concentration de défaut de la couche de CdS.

L'augmentation de la concentration des défauts n'influe pas sur les performances de la cellule PV quand la concentration de défaut augmente de 1E11 à 1E17 cm⁻³, au-delà de cette valeur nous constatons une diminution de V_{co} , J_{cc} , FF et le rendement.

III.4.4 Effet de la couche anti-reflet ZnO

La présence de la couche de ZnO (oxyde de zinc) revêt une importance capitale en tant que couche anti-reflet dans une cellule photovoltaïque, étant un élément clé pour réduire les pertes par réflexion, augmenter l'absorption de la lumière et ainsi améliorer l'efficacité globale de la cellule photovoltaïque. Nous allons dans cette partie étudier l'impact de l'épaisseur et des concentrations de dopant et de défaut sur le comportement de la cellule.

III.4.4.1 Effet de l'épaisseur

Les figures suivantes représentent les caractéristique I-V et QE obtenue pour les différentes épaisseurs de la couche de ZnO de 50 nm à 300 nm :

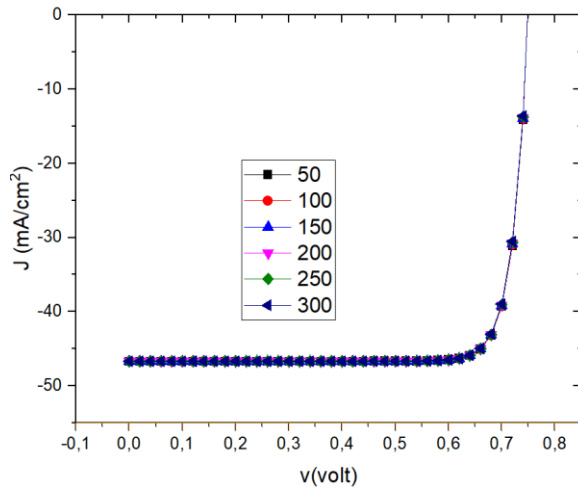


Figure III.46 : Influence de l'épaisseur de la couche ZnO sur la caractéristique I-V

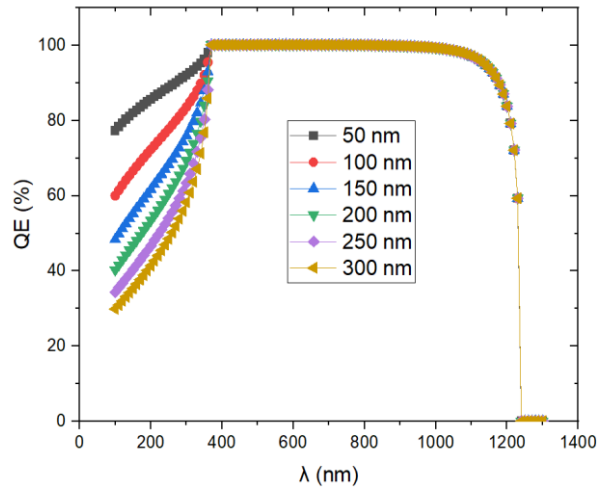


Figure III.47 Influence de l'épaisseur de la couche ZnO sur la caractéristique QE

L'épaisseur de ZnO n'a pas un impact direct sur les caractéristiques I-V (figure III.46), cependant elle influe sur le rendement quantique dans la plage de longueur d'onde de 100 à 400 nm ou l'augmentation de l'épaisseur fait diminuer le rendement jusqu'à 30% pour une épaisseur de 300 nm lorsque la longueur d'onde équivaut à 100 nm (figure III.47).

Le tableau III.12 suivant résume les résultats de la simulation obtenues pour l'impact de l'épaisseur de ZnO sur les performances de la cellule, ces résultats sont représentés graphiquement sur la figure III.49 sur l'amélioration de l'épaisseur de la couche étudiée :

Épaisseur (nm)	V _{co} (V)	J _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
50	0.749	47.240	85.018	30.121
100	0.749	47.213	85.017	30.103
150	0.749	47.188	85.016	30.078
200	0.749	47.165	85.016	30.070
250	0.749	47.143	85.016	30.056
300	0.749	47.123	85.016	30.042

Tableau III.12 : l'impact de l'épaisseur de la couche ZnO sur les paramètres de la cellule PV

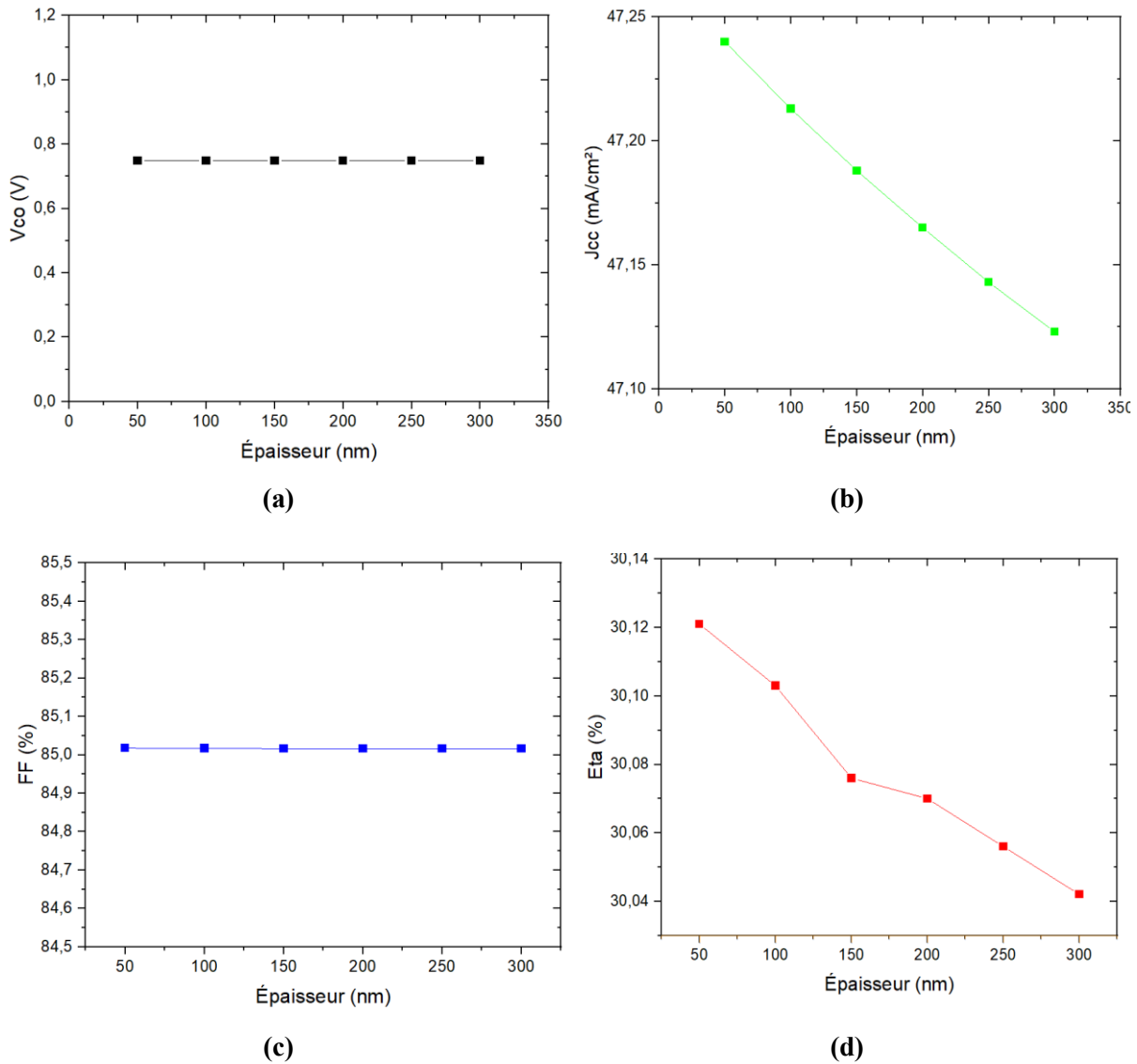


Figure III.428 : variation des paramètres de la cellule PV en fonction de la concentration de défaut de la couche de CdS.

Selon la figure III.49, Avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche anti-reflet ZnO :

- La tension de circuit ouvert (V_{co}) et le FF reste constant (Figure III.48 (a) et (c)). Cette stabilité s'explique par le fait que l'épaisseur accrue de la couche anti-reflet de ZnO n'affecte pas la génération de paires électron-trou dans la couche absorbante de la cellule photovoltaïque à base de CZTS.
- La densité de courant de court-circuit (J_{cc}) et le rendement décroît (Figure III.48 (b) et (d)). Cette diminution du J_{cc} s'explique par le fait qu'une couche de ZnO trop épaisse absorbe une partie du spectre lumineux. Cela réduit la quantité de photons atteignant la couche absorbante de CZTS, diminuant ainsi le courant collecté.

III.4.4.2 Effet du dopage N_D

Les figures suivantes représentent les caractéristique I-V et QE obtenue pour les différents dopages de la couche ZnO :

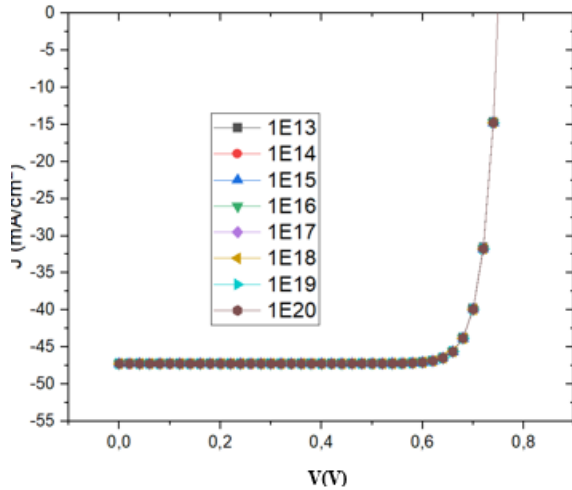


Figure III.49 : Influence de la concentration du dopage de la couche ZnO sur la caractéristique I-V

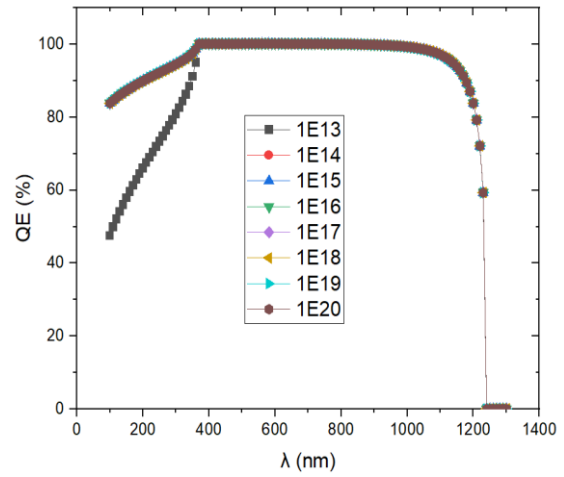


Figure III.50 : Influence de la concentration du dopage de la couche ZnO sur la caractéristique QE

L'augmentation du dopage de $1E13$ à $1E20 \text{ cm}^{-3}$ de la couche ZnO n'a aucun impact sur les caractéristiques I-V (voir figure III.49) et QE (voir figure III.50). Cependant à la valeur de dopage égale à $1E13 \text{ cm}^{-3}$ et dans l'intervalle de longueur d'onde 100 à 400 nm, le rendement quantique est faible.

Les effets de la variation de la concentration du dopage N_D sur les performances de la cellule sont regroupés dans le tableau III.12 et représentés sur la figure III.51 :

Dopage N_D (cm^{-3})	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
1E13	0.750	47.20	84.95	30.08
1E14	0.750	47.20	84.99	30.09
1E15	0.750	47.21	84.99	30.09
1E16	0.750	47.22	84.99	30.10
1E17	0.750	47.24	84.99	30.11
1E18	0.750	47.24	85.00	30.12
1E19	0.750	47.24	85.00	30.12
1E20	0.750	47.24	84.99	30.12

Tableau III.12 : étude de l'impact du dopage de la couche ZnO sur les paramètres de la cellule PV

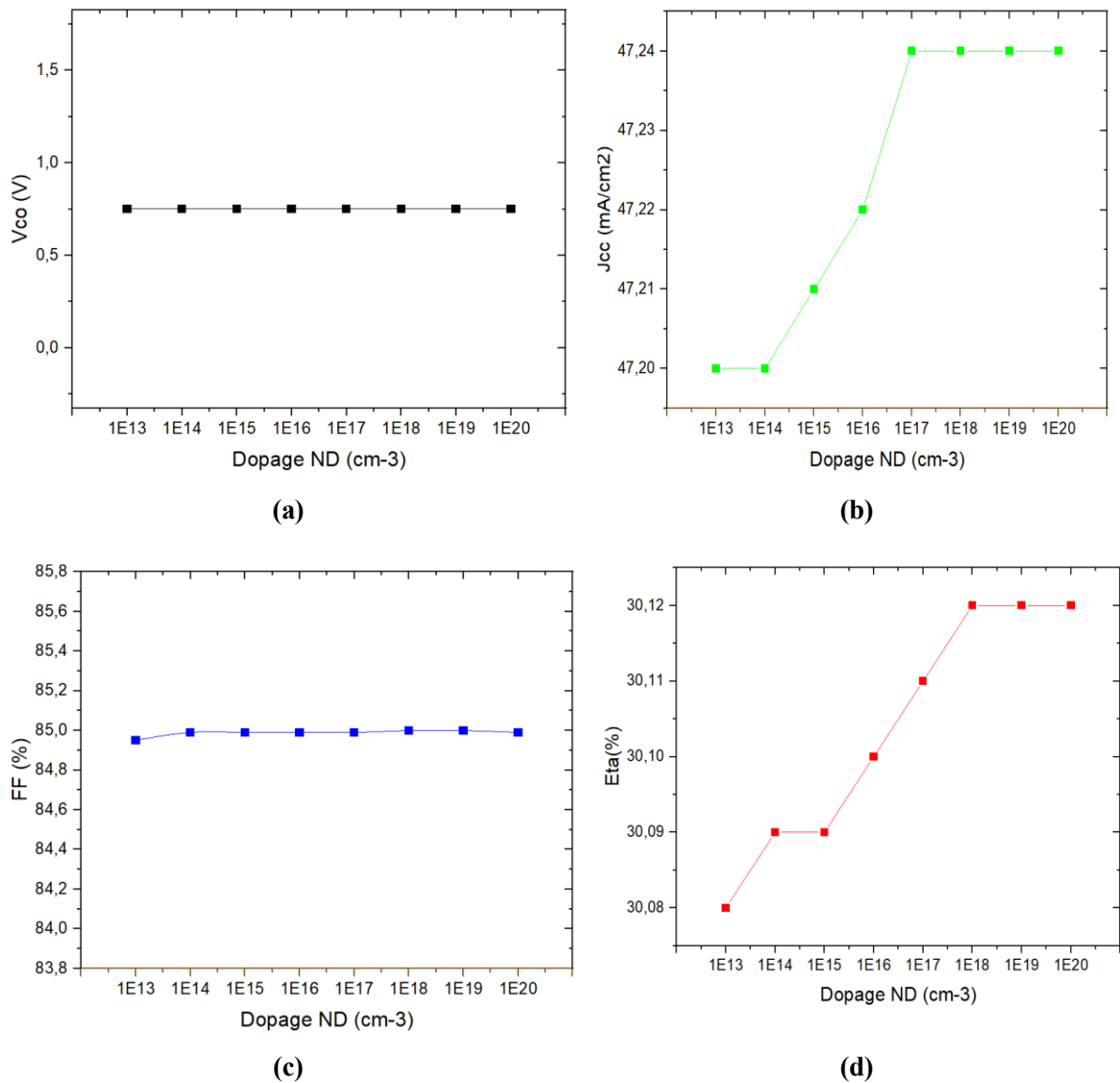


Figure III.51 : variation des paramètres de la cellule PV en fonction du dopage de la couche de ZnO

Nous remarquons sur la figure III.51 que la tension en circuit ouvert et le facteur de forme ne varie pas avec l'augmentation du dopage de la couche ZnO. Cette augmentation fait augmenter le courant de circuit-ouvert et le rendement jusqu'à un maximum au voisinage de 1E17 cm⁻³.

III.4.4.2 Effet de la concentration de défaut

Les figures suivantes représentent les caractéristique I-V et QE obtenue pour les différents défauts de la couche de ZnO :

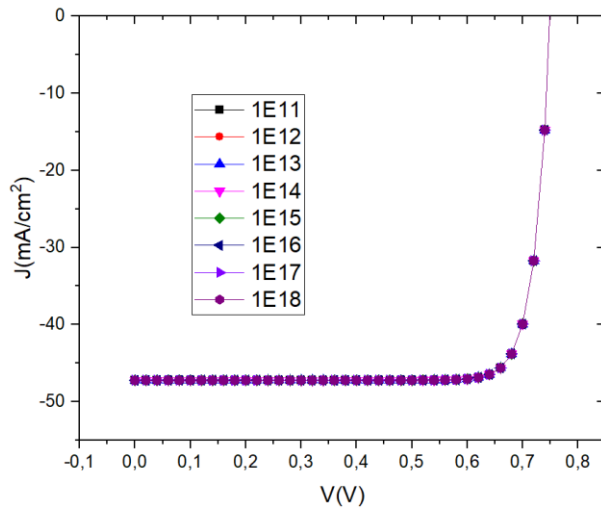


Figure III.52 : Influence de la concentration de défaut de la couche ZnO sur la caractéristique I-V

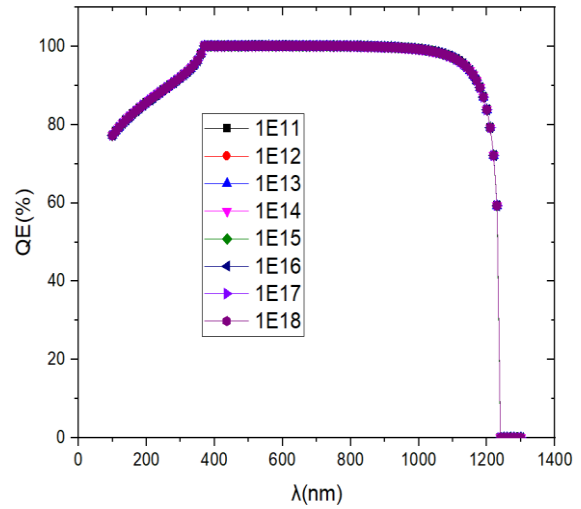
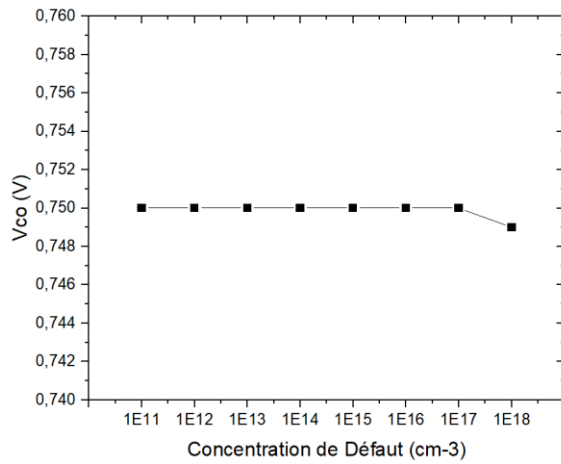


Figure III.53 : Influence de la concentration du dopage de la couche ZnO sur la caractéristique QE

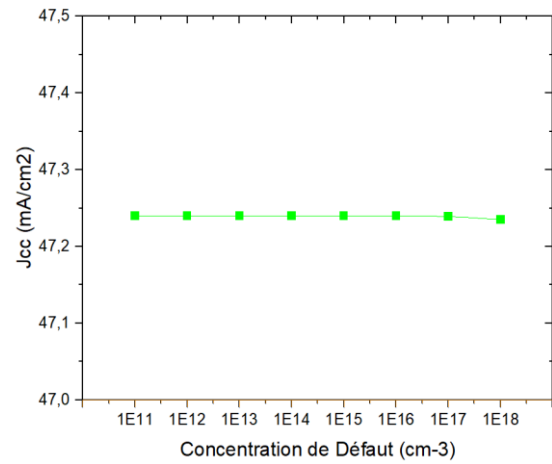
La couche anti-reflet exerce une influence sur les performances de la cellule photovoltaïque. Une variation du défaut de la couche ZnO, allant de 1E11 à 1E18 cm⁻³ a été réalisée. Les effets de cette variation sont résumer dans le tableau III.13 et tracer sur la figure III.54 :

Concentration de Défaut (cm ⁻³)	V _{co} (V)	J _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	Eta (%)
1E11	0.750	47.240	85.02	30.12
1E12	0.750	47.240	85.02	30.12
1E13	0.750	47.240	85.02	30.12
1E14	0.750	47.240	85.02	30.12
1E15	0.750	47.240	85.02	30.12
1E16	0.750	47.240	85.01	30.12
1E17	0.750	47.239	84.98	30.11
1E18	0.749	47.235	84.74	29.99

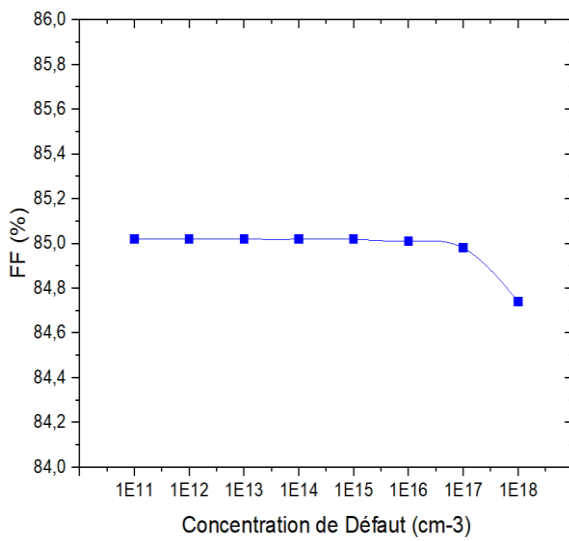
Tableau III.13 : étude de l'impact de la concentration de défaut de la couche ZnO sur les paramètres de la cellule solaire.



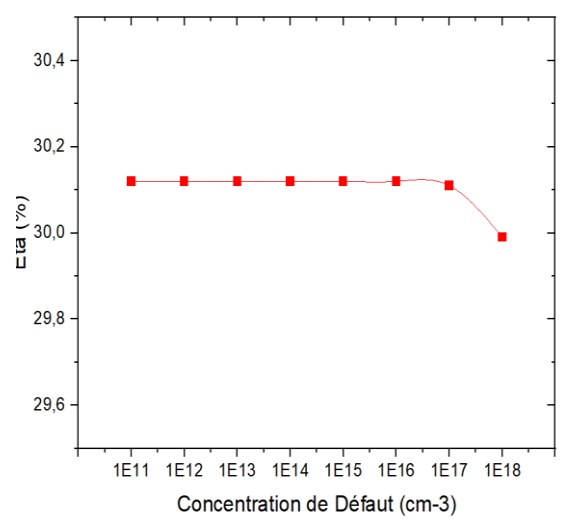
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III.54 : variation des paramètres de la cellule PV en fonction de la concentration de défaut de la couche de ZnO

Avec l'augmentation des défauts dans la couche de ZnO :

- La tension de circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (FF) diminue légèrement au-delà de la valeur 1E17 cm⁻³.
- La densité de courant de court-circuit (J_{cc}) et le rendement suivent une tendance similaire à la V_{oc},

III.4.5 Effet de la variation de la température

Les figures qui suivent représentent les caractéristiques courant-tension (I-V) et le rendement quantique (QE) pour différentes températures de la cellule photovoltaïque :

La température est un paramètre important que nous devons impérativement prendre en considération lors des études des dispositifs électronique en général et sur les cellules solaires en particulier concernant cette étude. Dans cette partie nous nous intéressons aux effets de la variation de la température sur le comportement et les caractéristiques électriques tels que le V_{co} , J_{cc} , FF ainsi que rendement de la cellule étudiée

Nous présentons alors dans ce qui suit les résultats obtenus mettant en évidence l'impact de la variation de la T (°K) sur le courant-tension (I-V) et le rendement quantique (QE):

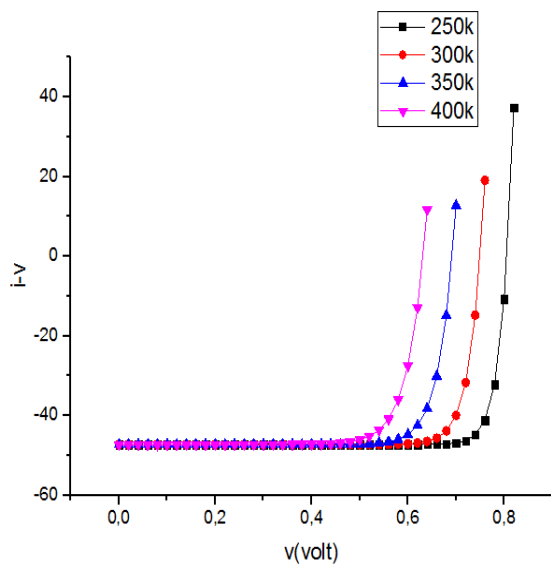


Figure III.55 : impact de la variation de la température T en (K) sur la caractéristique courant-tension

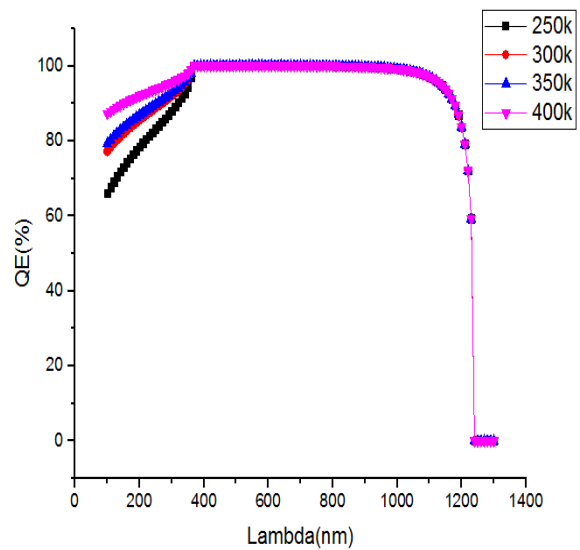


Figure III.56 : impact de la variation de la température T en (K) sur le rendement quantique

Température(K)	Vco (volt)	Jcc(mA/cm ²)	FF(%)	η(%)
250	0.805	47.226	87.65	33.34
300	0.750	47.240	85.02	30.12
350	0.691	47.244	82.14	26.85
400	0.631	47.257	78.97	23.57

Tableau III.14 : impact de la variation de T(K) sur les performances de la cellule PV CZTS

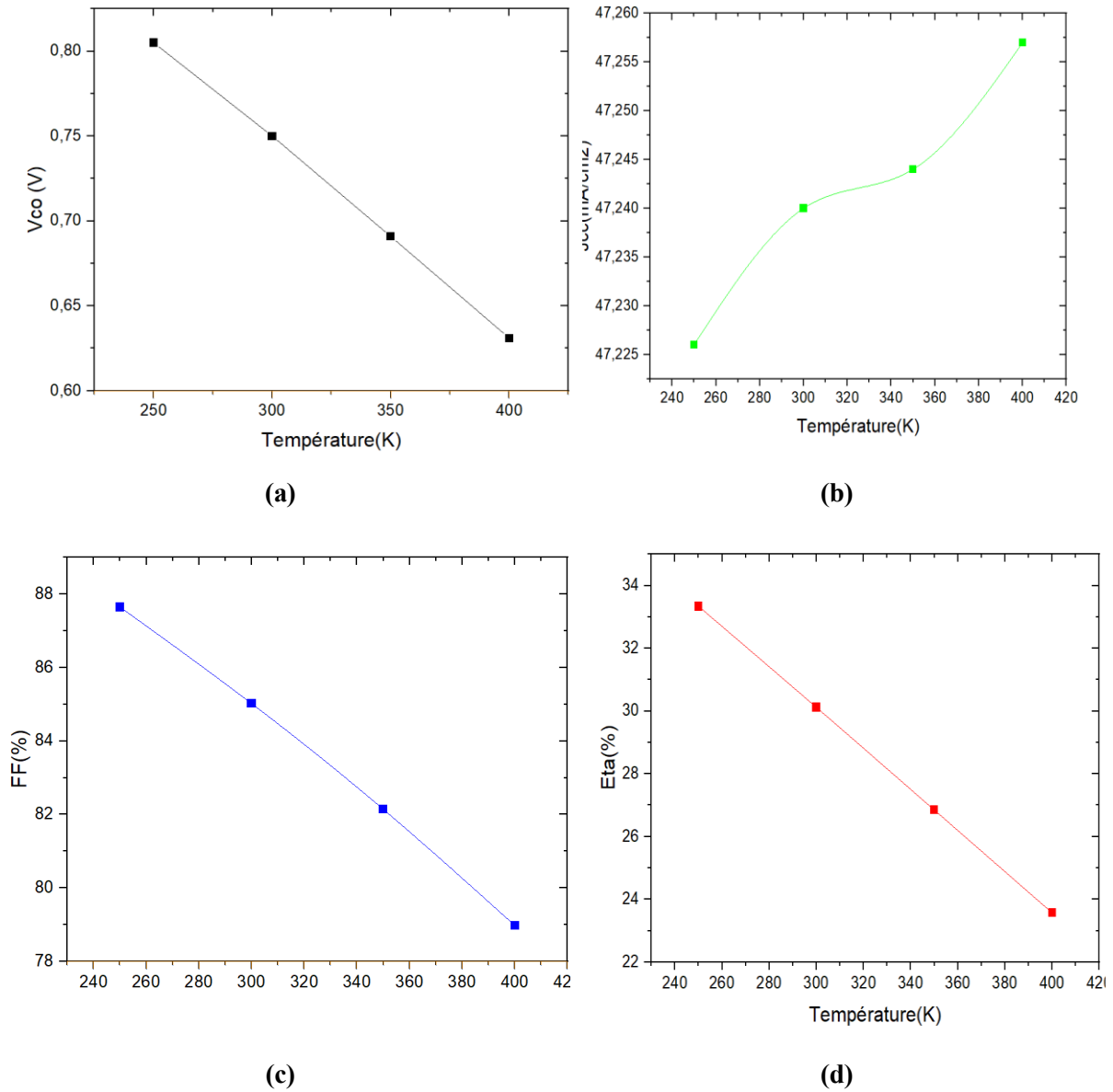


Figure III.57 : l'impact de la variation de T(K) sur Vco, Jcc, FF, η

Nous constatons que Vco, FF et η diminuent quand la température augmente ce qui n'a pas le cas pour Jcc. La température entraîne une baisse Vco, du FF et η, affectant ainsi négativement les performances globales de la cellule. La tension Vco diminue fortement

lorsque la température de la cellule augmente. Cette forte sensibilité de la V_{co} à la température est un phénomène courant dans les cellules photovoltaïques. Une élévation de la température peut conduire à une diminution du rendement de la cellule en raison de la réduction de V_{co} , ce qui peut impacter sur la puissance en sortie de la cellule PV. Le FF d'une cellule photovoltaïque, qui est lié à l'efficacité de conversion de la lumière en électricité, peut également diminuer avec l'augmentation de la température. Les pertes thermiques peuvent affecter la performance de la cellule, réduisant ainsi le facteur de forme et la qualité de la conversion.

Quand T augmente on remarque une augmentation de J_{cc} avec une réduction de l'énergie de BI (bande interdite) du matériau SC. Cette diminution favorise la génération de paires électron-trou, entraînant ainsi une augmentation du courant de court-circuit J_{cc} .

III.4.6 impact de la variation des résistances séries et parallèles

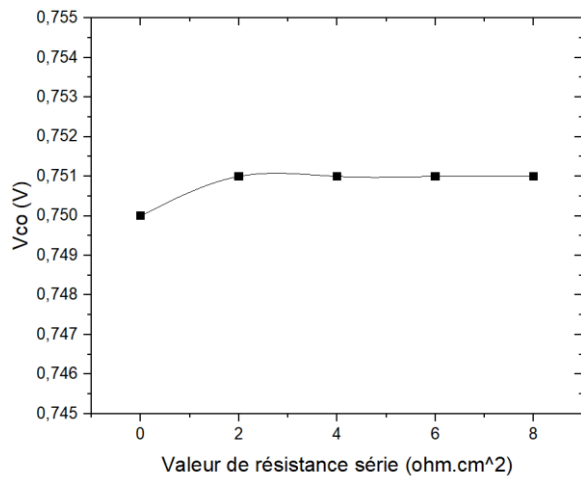
III.4.6.1 Effet de la variation des résistances séries

Le tableau suivant regroupe les résultats des simulations de l'influence de la résistance série sur les paramètres de la cellule PV :

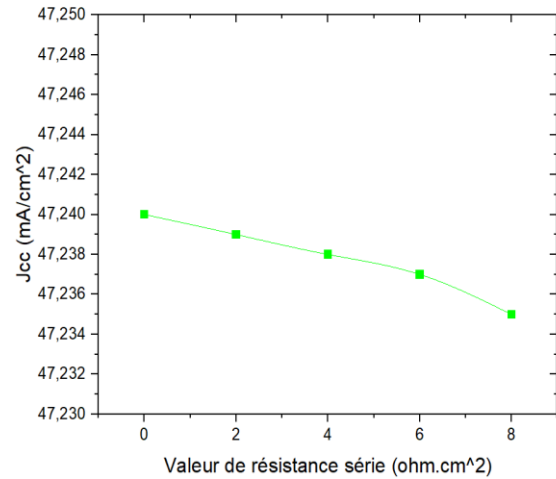
Valeur de résistance série (ohm.cm ²)	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm ²)	FF(%)	η (%)
0	0.750	47.240	85.02	30.12
2	0.751	47.239	73.43	26.06
4	0.751	47.238	62.30	22.12
6	0.751	47.237	52.21	18.54
8	0.751	47.235	42.80	15.20

Tableau III.15 : impact de la variation de « R_s » sur les caractéristiques de la cellule PV CZTS

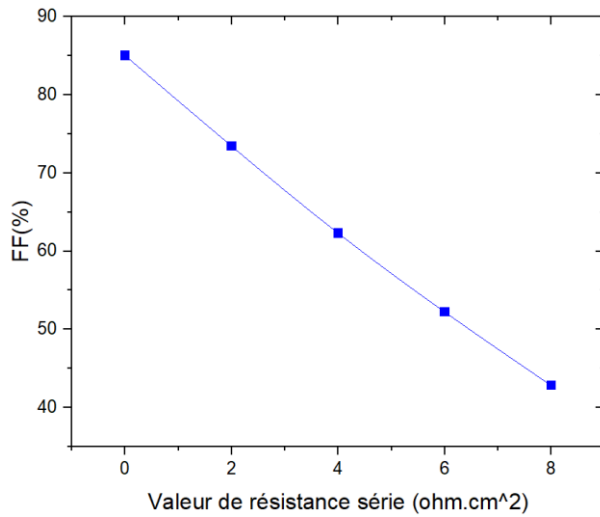
Lorsque R_s augmente, V_{co} augmente aussi. Alors que J_{cc} et FF et le rendement (η) diminuent. En conclusion une résistance série élevée restreint le courant de la cellule, réduisant ainsi la J_{cc} . En conclusion De plus, des pertes par effet Joule plus importantes avec une résistance série élevée contribuent à la dégradation du J_{cc} .



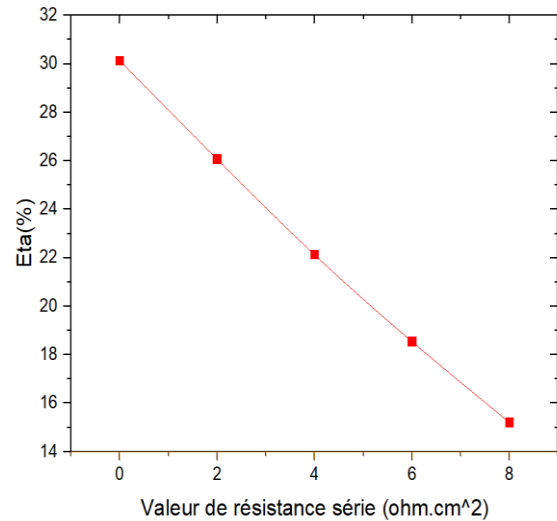
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III.58 : impact de la variation de « R_s » sur V_{oc} , J_{cc} , FF, μ

III.4.6.2 Effet de la variation des résistances parallèles

Les résistances parallèles (résistances shunt R_{sh}) dans une cellule photovoltaïque ont pour but de limiter les courants de fuite au niveau de la jonction PN. Leur rôle est donc d'optimiser les performances de la cellule en réduisant les pertes électriques.

Dans cette section nous examinons l'impact de la variation des résistances R_s et R_p . Nos différents résultats de simulation sont regroupés en figure III.59 et visibles au tableau III.16.

R_{sh} (Ohm.cm^2)	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm^2)	FF(%)	Eta(%)
1^E3	0.749	47.240	83.83	29.68
1^E4	0.749	47.240	84.90	30.08
1^E5	0.750	47.240	85.01	30.12
1^E6	0.750	47.240	85.02	30.12
1^E7	0.750	47.240	85.02	30.12

Tableau III.16 : étude de l'impact de la variation de la résistance parallèle sur les caractéristiques électriques de la cellule PV

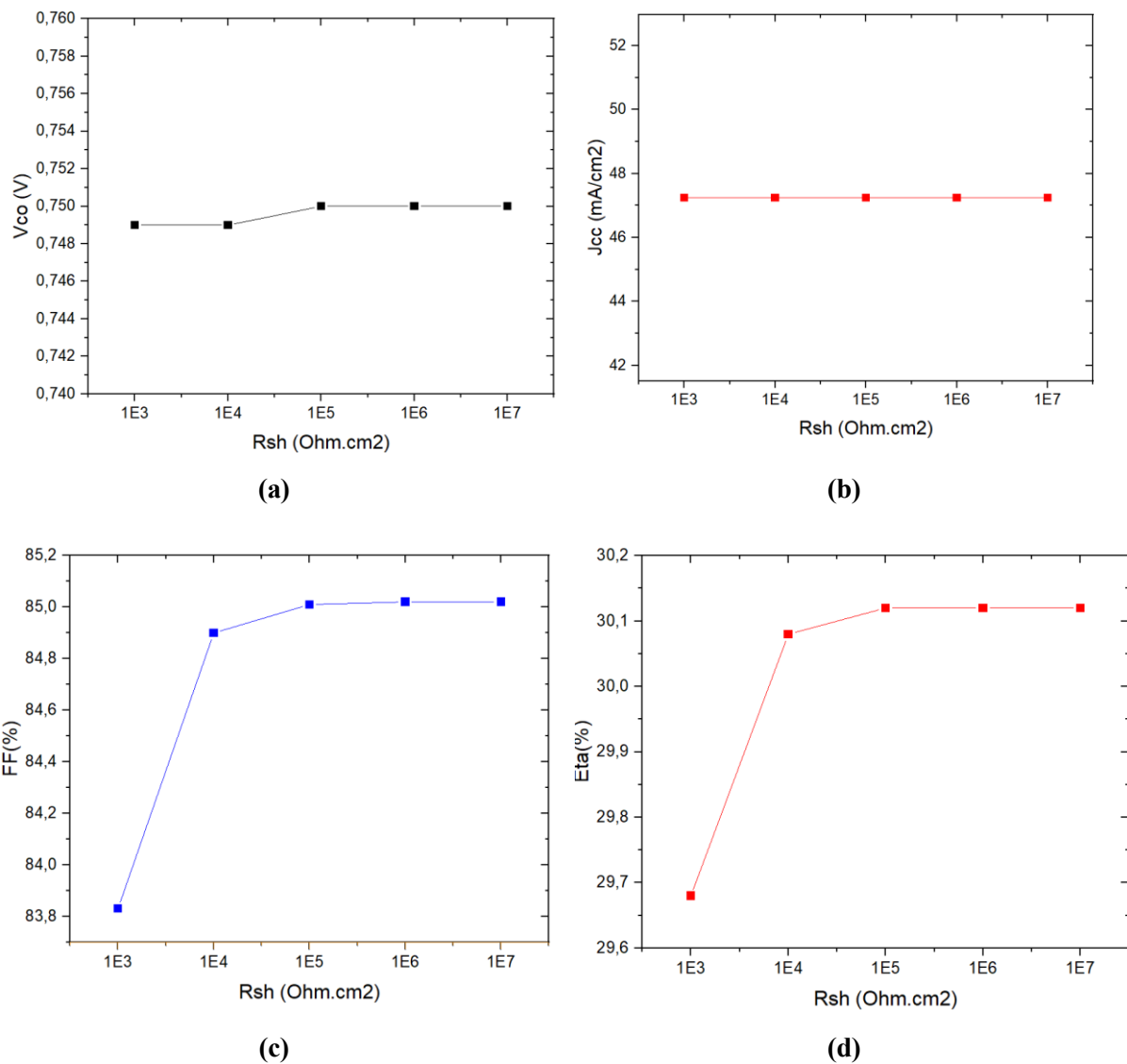


Figure III.59 : variation des paramètres de la cellule PV en fonction de la résistance parallèle.

On observe sur la figure III.59 une augmentation de la tension V_{co} , du facteur de forme (FF) et du rendement en présence d'une résistance shunt élevée. Le facteur de forme FF est influencé par le rapport V_{oc}/I_{sc} et les résistances série/parallèle. Avec une tension V_{oc} plus élevée et une faible résistance série, le FF augmente

En revanche, la densité de courant de court-circuit J_{cc} reste constante car, tant que la résistance shunt est suffisamment élevée, elle n'a pas d'influence significative sur le courant de court-circuit J_{cc} . Ce dernier dépend principalement du courant photo-généré dans la cellule. Seule une résistance shunt très faible pourrait affecter la densité de courant J_{cc} .

III.4.7 Effet de la variation de l'air masse

Les figures ci-dessous représentent les caractéristiques courant-tension (I-V) et le rendement quantique externe (QE) obtenus pour différentes valeurs de l'air masse :

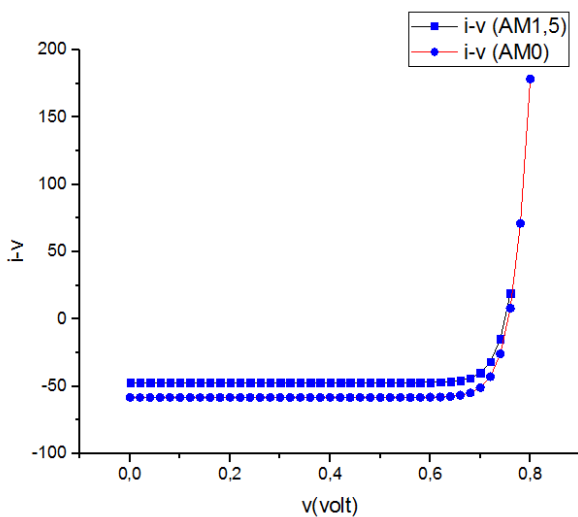


Figure III.60 : Caractéristique I-V pour différentes valeurs l'air mass.

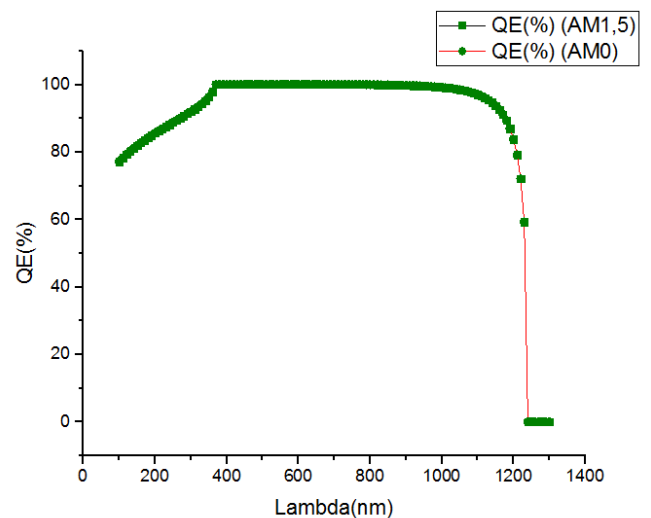


Figure III.61 : Caractéristique QE pour différentes valeurs l'air mass.

	V_{co} En volt	J_{cc} En mA/cm ²	FF en %	η en %
AM0	0.756	58.355	85.03	27.58
AM1.5	0.750	47.240	85.02	30.12

Tableau III.17 : étude des effets de l'air masse sur les performances de la cellule PV

D'après le résultat que nous résumons dans le tableau III.17, la cellule solaire que nous avons étudié offre un courant plus important hors atmosphère ce qui indique que ce type de cellule solaire pourra être utilise dans le domaine spatial.

III.8 Conclusion

Lors de la conception des cellules PV nous devons impérativement respecter certaines spécifications pour pouvoir de ce fait assurer le rendement le plus optimal possible. Dans ce chapitre résultats nous avons étudié l'impact de la variation de certains paramètres de deux structures à base de CZTS sur leurs caractéristiques électriques. Cette étude fut menée sous simulation par le logiciel solar cell capacitance SCAPS 1D. Nous avons ainsi pu examiner l'impact des variations : des dopants, des épaisseurs des couches CZTS et Pérovskite, résistances série/parallèle, et l'air masse, sur les caractéristiques de ces cellules PV. La température étant un paramètre important intervenant dans le vieillissement des dispositifs a aussi été pris en considération dans notre étude.

Références bibliographiques chapitre III

- [1] A.LAGHOUAG et H.BENCHEIKH « Etude et simulation d'une cellule solaire à base des éléments chalcogènes », mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf – Msila 2019.
- [2] M.BEN ALI et S.RAHMOUNI « simulation et optimisation d'une cellule solaire à base de Cu (In,Ga)Se₂ », mémoire de Master, Université Ahmed Draïa Adrar le 03/30/2018.
- [3] A.A.KANOUN «Etude théorique et prédictive des nouveaux matériaux pour conception des cellules solaires et applications photovoltaïques », Thèse Doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen Le 06/07/2019.
- [4] M.Burgelman,, K.Decock, A.Niemegeers,, J.Verschraegen,, S.Degrave. SCAPS manual. University de Ghent: Ghent, Belgium.2016
- [5] K.M'RABTI « Etude des performances d'une cellule solaire en couche mince à base de Cu₂ZnSn(S, Se) ₄ », mémoire de Master, Université Saad Dahlab –Blida-1 2019.
- [6] S.H.SEKRANE et M.MAROC «Effet des défauts de structure sur le rendement des cellules solaires » Thèse Doctoral dissertation, Université Ibn Khaldoun, 2018.
- [7] A-A.Kanoun1, F. Merad1, M.A.Rabah" Exploring the Performance of CZTS solar cells using BSF layers "2022.][P-P Sun, Q-S. Li, S. Feng, Z-S. Li, Phys. Chem. Chem. Phys., 18, 14408 (2016)]

Conclusion générale

Conclusion générale

La cellule PV CZTS, considérée comme étant une technologie émergente est très prometteuse, elle permettrait de concevoir des cellules solaires à couches minces à coût réduit. Dans cette étude, nous sommes intéressés à l'étude puis à la simulation sous environnement SCAPS 1D d'une cellule photovoltaïque à couche mince et à base de kesterite, une couche de pérovskite a aussi été intégrée dans notre structure afin d'améliorer ses performances. Nous avons alors déterminé les caractéristiques de cette cellule PV que nous avons réalisée en utilisant SCAPS 1D qui nous a permis de déterminer les caractéristiques I-V, QE(%), J_{sc} , V_{oc} , FF, η . L'effet de la variation des différents paramètres de notre structure à savoir les épaisseurs des couches la constituant, le dopage ect.... ont aussi été évalués afin d'optimiser ses performances.

Une seconde étape de ce travail a consisté à faire une étude comparative entre deux structures la première à base de kesterite et la seconde avec en plus une couche BSF (pérovskite de type $MAPbI_3$), nous avons alors comparé les performances des deux structures ainsi simulées et observé une amélioration significative du rendement en présence de cette couche de pérovskite, nous avons pu obtenir un rendement de 30.12% par la cellule comprenant une couche BSF

Nous avons aussi examiné la sensibilité des paramètres photométriques des cellules PV aux variations (épaisseur, défauts, dopage) des couches de CZTS, CdS, ZnO et $MAPbI_3$. La température et ses effets sur les performances de ces cellules ont aussi été examinés. En outre, nous avons étendu notre analyse en examinant l'impact des résistances parasites telles que les résistances séries, parallèles, ainsi que l'influence de l'air masse (visant une application satellitaire) sur les performances de ces cellules.

Pour conclure nous pouvons avancer que cette étude, nous a été très bénéfique, tout d'abord parce qu'elle nous a initié à la recherche et nous a ensuite permis d'aborder un domaine qui nous était jusque le inconnu nous avons aussi et par la même occasion pu apprendre à mener une étude théorique et sous le biais d'un logiciel de simulation le SCAPS 1D en même temps.

Perspectives

PERSPECTIVES

Comme perspectives à cette étude nous prévoyons :

- *D'étudier l'influence de la variation de l'énergie de gap du CZTS ;*
- *De modifier la nature des contacts ;*
- *De modifier la nature de la pérovskite utiliser en guise de couche BSF ;*
- *De modifier la nature de la couche tampon.*

Résumé

La kesterite ou CZTS, un SC dopé, composé est très abondant, peu onéreux, ne présentant aucune a la particularité d'être un SC à gap direct. Ces propriétés font du CZTS un candidat de choix par rapport aux autres SC permettant la conception de nouvelles structures de cellules solaires.

Notre contribution a consisté à étudier théoriquement puis à simuler les caractéristiques électriques d'une cellule PV à base de CZTS par le logiciel SCAPS-1D, la cellule solaire à couche mince considéré soit MAPbI₃/CZTS/CdS/ZnO comprend de la pérovskite en couche BSF. Cette étude, nous a permis d'étudier les effets de l'évolution des grandeurs de la structure étudiée sur ses performances, pour cela nous avons observé tout d'abord les conséquences de la variation de l'épaisseur de la couche CZTS puis pérovskite de notre structure, puis la concentration des dopants, les défauts, résistances série et parallèle et l'air mass. Les effets de la température sur J_{cc}, V_{CO}, FF et le rendement électrique η de la structure étudiée furent aussi examinés.

Mots clés : Cellules solaire, les kesterites, MAPbI₃/CZTS/CdS/ZnO, simulation, SCAPS-1D

Abstract

Kesterite or CZTS is a p-type SC, composed of abundant, inexpensive, non-toxic elements, and having a direct gap. These properties make CZTS a prime candidate compared to other SCs allowing the design of new solar cell structures.

Our contribution consisted of studying theoretically and then through simulation under SCAPS-1D environment, a thin film solar cell, i.e. a MAPbI₃/CZTS/CdS/ZnO structure comprising perovskite in a BSF layer. This study allowed us to study the impact of the variation of the parameters of the structure studied on its performances.

For this, we observed the effect of the variation of the thicknesses of the layers constituting the structure, the doping concentration, the defects, series and parallel resistances and the air mass of the different layers, which make up this solar cell. The impact of temperature on: the short-circuit current density J_{cc}, the open circuit voltage V_{CO}, the form factor FF and the electrical efficiency η of the studied structure.

Key words: Solar cells, kesterites, MAPbI₃/CZTS/CdS/ZnO, simulation, SCAPS-1D.

ملخص

الكيستريت أو CZTS عبارة عن SC من النوع p، يتكون من عناصر وفيرة وغير مكلفة وغير سامية، وله فجوة مباشرة. هذه الخصائص تجعل CZTS مرشحاً رئيسياً مقارنة بالخلايا الجذعية الأخرى التي تسمح بتصميم هياكل الخلايا الشمسية الجديدة. تتألف مساهمتنا من الدراسة النظرية ومن ثم من خلال المحاكاة في بيئة SCAPS-1D، وهي خلية شمسية ذات غشاء رقيق، أي بنية MAPbI₃/CZTS/CdS/ZnO تشتمل على البيروفسكايت في طبقة BSF. أتاحت لنا هذه الدراسة دراسة تأثير تباين معاملات المنشأ المدروس على أدائه، ولهذا لاحظنا تأثير تباين سماكات الطبقات المكونة للمنشأ، وتركيز التشويب، والعيوب، والتسلسلات والتسلسلات. المقاومة الموازية والكتلة الهوائية للطبقات المختلفة التي تشكل هذه الخلية الشمسية. تأثير درجة الحرارة على: كثافة تيار الدائرة القصيرة J_{cc}، جهد الدائرة المفتوحة V_{CO}، عامل الشكل FF والكفاءة الكهربائية η للهيكल المدروس. الكلمات المفتاحية: الخلايا الشمسية، الكيسترينات، SCAPS، MAPbI₃/CZTS/CdS/ZnO، D1-،