



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

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEN

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : Physique Energétique et Energies Renouvelables

Par :

M^{elle} HABRI Ayatou Rahmane

Sur le thème :

Effet de la couche absorbante en CIGS sur le rendement d'une cellule photovoltaïque.

Soutenu le **28 juin 2021** à Tlemcen devant le jury composé de :

M ^r N. BENMOUSSA	Professeur	Université de Tlemcen	Président
M ^{me} S. BENSMAINE	MCA	Université de Tlemcen	Encadrante
M ^r N. BIBI TRIKI	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur

Année Universitaire : 2020-2021

Remerciements

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

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

Merci à M^r **Nasr-eddine BENMOUSSA** professeur à l'Université de Tlemcen d'avoir accepté de présider le jury.

Je tiens à remercier M^r **Nasr-eddine BIBI TRIKI** professeur à l'Université de Tlemcen d'avoir accepté d'examiner ce travail, merci encore pour sa gentillesse et sa bienveillance qu'il m'a apporté durant tout mon cycle du master.

Je n'ai pas l'intention d'oublier mon encadrante M^{me} **Souhila BENSMAINE**. Ce fut un énorme plaisir pour moi d'évoluer à ses côtés durant ces derniers quelques mois. Ce travail n'aurait pas été possible sans son soutien, sa disponibilité, sa qualité d'encadrement et sa grande rigueur scientifique telle sont les qualités qui ont mené à l'aboutissement de ce mémoire.

Le choix de ce sujet de mémoire m'a permis de rencontrer des personnes possédant de grandes qualités scientifiques et humaines.

Je tiens à remercier M^{me} **Hayet MERZOUK** enseignante et doctorante sous la direction de M^{me} S.BENSMAINE à l'Université de Tlemcen, pour son soutien, ces précieux et judicieux conseils durant toute la période de la réalisation de ce travail, et surtout pour sa joie de vivre et sa bonne ambiance.

Je tiens notamment à exprimer toute ma reconnaissance à M^{elle} **Leila GHALMI** doctorante sous la direction de M^{me} S.BENSMAINE à l'Université de Tlemcen, de m'avoir initié au logiciel SCAPS-1D également pour l'aide constante et la bienveillance qu'elle m'a apportée.

Je tiens à remercier également M^r **Azzedine BELKACEM** doctorant sous la direction de M^{me} S.BANSMAINE à l'Université de Tlemcen, pour son aide efficace.

Mes remerciements vont aussi à M^{me} **Khadidja RAHMOUN** professeur à l'Université de Tlemcen de m'avoir initié au logiciel ZOTERO qui m'a facilité énormément la gestion de la bibliographie de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent aussi à M^r **Arselan BOUDGHEN STAMBOULI** enseignant chercheur et membre à notre unité de recherches URMER de m'avoir installé, guidé et orienté dans l'utilisation du logiciel OriginPro9.0 qui m'a permis de réaliser les graphes des résultats de la simulation de ce travail.

Mes remerciements vont à l'ensemble des enseignants du primaire, du CEM, et du lycée ainsi que tous les professeurs du département de physique qui m'ont accompagné durant ces dernières cinq années.

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus profonds à l'ensemble de mes ami(e)s particulièrement à ma chère amie **Dounia**, merci pour les échanges, les blagues à mourir de rire... ou pas, merci pour les bons moments.

Je tiens à remercier particulièrement mes parents pour leurs sacrifices, leur confiance et courage tout au long de mon cursus.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

À celui qui a été toujours présent quand j'avais besoin, à mon cher Papa et je lui dis merci pour tous tu es le meilleur,

À celle qui m'a appris comment être plus forte en soignant moi-même, à ma chère Mama,

À la seul et l'unique, pour son soutien et son courage, à ma très chère sœur Tama,

Aussi je le dédie à mes deux chers et uniques frères, Abd el-Basset et Abd Samed,

Et à toutes mes amies, surtout ma meilleure et très chère amie Dounia,

À toute ma promotion de physique,

Et à toute ma famille.

Aya

Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	
Liste des abréviations	
Introduction générale.....	16

Chapitre 01 : Généralités sur les cellules photovoltaïques.

1. Introduction	23
2. Histoire de l'énergie photovoltaïque	23
3. Les cellules photovoltaïques	24
3.1 Définition	24
3.2 La structure d'une cellule photovoltaïque	25
3.3 Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque (Effet photovoltaïque).....	25
4. Paramètres caractéristiques d'une cellule solaire	26
4.1 La densité du court-circuit J_{cc}	27
4.2 La tension en circuit ouvert V_{co}	27
4.3 Le facteur de forme FF.....	27
4.4 Le rendement photovoltaïque η	28
5. Les différentes générations du photovoltaïque	28
5.1 La première génération	28
5.2 La deuxième génération	29
5.3 La troisième génération	30
5.4 Génération en développement (La filière des Pérovskites).....	32
6. Les avantages de l'énergie photovoltaïque	35
7. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque	35
8. Conclusion	35
Références bibliographiques	

Chapitre 02 : Les matériaux CIGS, CdS et ZnO : propriétés et applications.

1. Introduction	41
2. Le Sélénium de Cuivre d'Indium et de Gallium CIGS.....	41
2.1 Etat de l'art	41
2.2 Généralités sur les éléments de base du CIGS	41
2.2.1 Propriétés chimiques des éléments (Cu, In, Ga, Se)	42
2.2.2 Propriétés physiques des éléments (Cu, In, Ga, Se)	42
2.3 Propriétés du CIGS	42
2.3.1 Propriétés structurales	42
2.3.2 Propriétés électriques	44
2.3.3 Propriétés électroniques	44
2.3.4 Propriétés optiques	45
2.4 Domaines d'application du CIGS	47
2.4.1 Applications photovoltaïques	47
2.4.2 La technologie magnéto-électronique dans les dispositifs semi-conducteurs ...	47
2.4.3 Les photo-détecteurs	47
2.4.4 Le vitrage Wysips.....	47
3. Le Sulfure de Cadmium CdS	48
3.1 Propriétés du CdS	48
3.1.1 Propriétés structurales	48
3.1.2 Propriétés physiques	49
3.1.3 Propriétés électriques	49
3.1.4 Propriétés optiques	49
3.2 Domaines d'application du CdS.....	49
4. L'Oxyde de Zinc ZnO	50
4.1 Propriétés du ZnO	50
4.1.1 Propriétés structurales	50
4.1.2 Propriétés électriques	50
4.1.3 Propriétés optiques	51
4.2 Domaines d'application du ZnO	51

5.	La conception d'une cellule solaire à base de CIGS	52
5.1	Le substrat	52
4.2	Le contact arrière	53
4.3	L'absorbeur	53
4.4	La couche tampon.....	53
4.5	La couche fenêtre.....	54
4.6	Le contact avant.....	54
4.7	La couche anti-reflet	54
6.	Conclusion.....	54
	Références bibliographiques	

Chapitre 03 : Techniques d'élaboration des couches minces à base de CIGS

1.	Introduction	59
2.	Notion des couches minces	59
3.	Techniques de dépôt des couches minces à base de CIGS	60
3.1	Procédés physiques PVD	60
3.1.1	Evaporisation sous vide	60
3.1.2	Ablation Laser PLD.....	62
3.1.3	Pulvérisation cathodique.....	63
3.2	Procédés chimiques.....	64
3.2.1	Dépôt chimique en phase vapeur CVD	64
3.2.2	Sol-gel	65
3.2.3	Pyrolyse par Spray	66
3.2.4	Bain chimique CBD	66
4.	Les étapes de formation des couches minces	68
4.1	La nucléation	68
4.2	La coalescence	69
4.3	La croissance	69
5.	Nuance sur quelques domaines d'applications des couches minces	70
5.1	Couches minces dans les dispositifs électroniques.....	70
5.2	Technologies pour les capteurs	70
5.3	Couches pour l'optique	70
5.4	Couches de protection.....	70

5.5	En thermique	71
5.6	En biologie	71
5.7	En mécanique	71
5.8	En médecine	71
5.9	En décoration.....	71
6.	Conclusion.....	71
	Références bibliographiques	

Chapitre 04 : Simulation d'une cellule solaire à base de CIGS via SCAPS-1D

1.	Introduction	76
2.	Présentation du logiciel SCAPS-1D	76
3.	Présentation de la cellule étudiée	78
4.	Les paramètres d'entrée	78
5.	Caractéristiques électriques de la cellule solaire	79
6.	Résultats et discussions	80
6.1	Effet du dopage de la couche absorbante sur les paramètres de fonctionnement d'une cellule solaire.....	80
6.2	Effet de l'énergie de gap sur les paramètres de fonctionnement d'une cellule solaire 83	
6.3	Effet de l'épaisseur de la couche absorbante sur les paramètres de fonctionnement d'une cellule solaire	87
6.4	Effet de la température du milieu extérieur sur les paramètres de fonctionnement d'une cellule solaire	89
7.	Conclusion	90
	Références bibliographiques	
	Conclusion générale.....	91

Liste des figures

Chapitre 01 : Généralités sur les cellules photovoltaïques.

Figure 1.1 : Evolution de la production d'électricité (en mégawatts) PV.

Figure 1.2 : Principe de conversion dans les cellules photovoltaïques.

Figure 1.3 : La structure de la cellule photovoltaïque.

Figure 1.4 : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque.

Figure 1.5 : La caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire sous obscurité et sous éclairage.

Figure 1.6 : Cellules solaires au Silicium monocristallin.

Figure 1.7 : Cellules solaires au Silicium polycristallin.

Figure 1.8 : Cellule en Silicium amorphe.

Figure 1.9 : Cellules solaires en Tellure de Cadmium CdTe.

Figure 1.10 : Cellules solaires en CIGS.

Figure 1.11 : Cellules solaires organiques.

Figure 1.12 : La structure d'une cellule Tandem.

Figure 1.13 : Structure d'un cristal de pérovskite générique ABX_3 .

Figure 1.14 : Les records en laboratoire d'efficacité de cellules photovoltaïques selon les différentes technologies.

Chapitre 02 : Les matériaux CIGS, CdS et ZnO : propriétés et applications.

Figure 2.1 : Structure cristalline de la chalcopyrite.

Figure 2.2 : Les largeurs de bande interdite et paramètre de maille a de certaines chalcopyrites.

Figure 2.3 : Coefficient d'absorption de $CuInSe_2$ et $Cu(InGa)Se_2$ en fonction de longueur d'onde.

Figure 2.4 : L'évolution de l'indice de réfraction n et le coefficient d'extinction k du CIGS en fonction de la longueur d'onde λ .

Figure 2.5 : Schéma (à gauche) et image par microscopie électronique à balayage (MEB) (à droite) de l'architecture classique d'une cellule PV à base de CIGS. Sur l'image MEB, la cellule n'a pas de couche anti-reflet et le contact avant n'apparaît pas.

Figure 2.6 : La gamme de vitrage Wysips.

Chapitre 03 : Techniques d'élaboration des couches minces à base de CIGS.

Figure 3.1 : Classification des procédés de dépôt de couches minces.

Figure 3.2 : Bâti de dépôt par évaporation sous vide.

Figure 3.3 : Schéma du principe de l'évaporation par effet Joule.

Figure 3.4 : Schéma du principe de l'évaporation par bombardement électronique.

Figure 3.5 : Schéma conventionnel d'un système d'ablation laser.

Figure 3.6 : Schéma conventionnel d'un pulvérisateur cathodique.

Figure 3.7 : Schéma de principe de dépôt en phase vapeur chimique.

Figure 3.8 : Dispositif expérimental de dépôt par spin-coating.

Figure 3.9 : Dépôt de couches minces par dip-coating.

Figure 3.10 : L'équipement de dépôt par Spray pyrolyse.

Figure 3.11 : Schéma représentatif de la méthode de dépôt par bain chimique.

Figure 3.12 : Schéma de la nucléation des couches minces.

Figure 3.13 : Schéma de la coalescence des couches minces.

Figure 3.14 : Schéma de la croissance des couches minces.

Chapitre 04 : Simulation d'une cellule solaire à base de CIGS via SCAPS-1D

Figure 4.1 : Interface du logiciel de simulation SCAPS.

Figure 4.2 : Fenêtre du logiciel SCAPS pour introduire la cellule solaire à simuler.

Figure 4.3 : Fenêtre du logiciel SCAPS pour introduire les paramètres d'une couche.

Figure 4.4 : Structure d'une cellule solaire à base de CIGS.

Figure 4.5 : Caractéristique J(V) de la cellule solaire en CIGS.

Figure 4.6 : (a) Variation de la densité du courant de court-circuit en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS, (b) Variation de la tension en circuit ouvert en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS, (c) variation du facteur de forme en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS, (d) Variation de rendement en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS.

Figure 4.7 : (a) Variation de la densité du courant de court-circuit en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS, (b) Variation de la tension en circuit ouvert en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS, (c) variation du facteur de forme en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS, (d) Variation de rendement en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS.

Figure 4.8 : (a) Variation de la densité du courant de court-circuit en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS, (b) Variation de la tension en circuit ouvert en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS, (c) variation du facteur de forme en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS, (d) Variation de rendement en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS.

Figure 4.9 : La variation de l'énergie du gap en fonction de la concentration du Gallium.

Figure 4.10 : (a) Variation de la densité du courant de court-circuit en fonction de E_g de la couche CIGS, (b) Variation de la tension en circuit ouvert en fonction de E_g de la couche CIGS, (c) variation du facteur de forme en fonction de E_g de la couche CIGS, (d) Variation de rendement en fonction de E_g de la couche CIGS.

Figure 4.11 : (a) Variation de la densité du courant de court-circuit en fonction de l'épaisseur de la couche en CIGS, (b) Variation de la tension en circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la couche en CIGS, (c) Variation du factor de forme en fonction de l'épaisseur de la couche en CIGS, (d) Variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche en CIGS.

Figure 4.12 : (a) Variation de la densité du courant de court-circuit en fonction de la température, (b) Variation de la tension en circuit ouvert en fonction de la température, (c) Variation du factor de forme en fonction de la température, (d) Variation du rendement en fonction de la température.

Liste des tableaux

Chapitre 02 : Le matériau CIGS : propriétés et applications.

Tableau 2.1 : Classification périodique des éléments constituant la famille I-III-VI₂.

Tableau 2.2 : Propriétés chimiques des éléments (Cu, In, Ga, Se).

Tableau 2.3 : Propriétés physiques des éléments (Cu, In, Ga, Se).

Tableau 2.4 : Variation de la résistivité en fonction de la température.

Tableau 2.5 : Type de conduction dans CuInSe₂ en fonction des rapports.

Tableau 2.6 : Energies de gap des composés Cu (In,Ga)(S,Se₂).

Tableau 2.7 : Les différents substrats métalliques avec leurs rendements.

Tableau 2.8 : Les propriétés physiques et optiques de l'Oxyde de Zinc.

Chapitre 03 : Techniques d'élaboration des couches minces à base de CIGS.

Tableau 3.1 : Rendements des cellules photovoltaïques à base des couches minces différentes.

Tableau 3.2 : Tableau récapitulatif des différents avantages et inconvénients de chaque méthode de dépôt.

Chapitre 04 : simulation d'une cellule solaire à base de CIGS via SCAPS-1D

Tableau 4.1 : Paramètres de simulation d'une cellule solaire à base de CIGS.

Tableau 4.2 : Paramètres des couches à base de ZnO, CdS et CIGS.

Tableau 4.3 : Comparaison entre les performances photovoltaïques simulés et celles de la référence.

Tableau 4.4 : Les performances de la cellule solaire selon la variation de la concentration du dopage de $2 \cdot 10^{16}$ à $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

Tableau 4.5 : Les performances de la cellule solaire selon la variation de la concentration du dopage de $5 \cdot 10^{13}$ et $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Tableau 4.6 : Les performances de la cellule solaire selon la variation de la concentration du dopage de $2 \cdot 10^{17}$ et $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Tableau 4.7 : Les performances de la cellule solaire selon la variation de l'énergie du gap.

Tableau 4.8 : Les performances de la cellule solaire selon la variation de l'épaisseur.

Tableau 4.9 : La variation des performances de la cellule solaire selon la variation de la température.

Liste des symboles

$F(\lambda)$: La densité du flux incident sur unité de surface par unité du temps.

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

K : La constante de Boltzmann.

T : La température absolue.

n : Le facteur d'idéalité.

q : La constante de charge d'électron.

I_{ph} : Le photocourant.

I_s : Le courant de saturation.

V_{max} : La tension correspondante à la puissance maximale fournie.

I_{max} : Le courant correspond à la puissance maximale fournie.

I_{cc} : Le courant en court-circuit.

V_{co} : La tension en circuit ouvert.

J_{cc} : La densité de court-circuit.

P_{cell} : La puissance fournie par la cellule.

P_i : La puissance incidente.

CZ : Le processus de Czocralski.

Cu : Le Cuivre.

Ga : Le Gallium.

In : L'Indium.

Se : Le Diséléniure.

ρ : La résistivité électrique.

E_g : L'énergie de bande interdite.

E : L'énergie de l'irradiation.

λ : La longueur d'onde de la lumière.

A : Une constante de proportionnalité.

E : L'énergie de l'irradiation.

N : L'indice optique complexe.

n : L'indice de réfraction.

k : Le coefficient d'extinction du matériau.

α : Le coefficient d'absorption.

a_0, c_0 : Les Paramètres de maille.

ε : La constante diélectrique.

η : Le rendement d'une cellule photovoltaïque.

FF : Le facteur de forme d'une cellule photovoltaïque.

Liste des abréviations

IQE : le rendement quantique interne de la cellule.

Si-a : le Silicium amorphe.

CdTe : le Tellure de Cadmium.

CIGS : le Diséléniure de Cuivre d'Indium et de Gallium.

CIS : le Diséléniure de Cuivre et d'Indium.

CGS : le Diséléniure de Cuivre et de Gallium.

CdS : le Sulfure de Cadmium.

ZnO : l'Oxyde de Zinc.

MEB : le Microscope Electronique à Balayage.

SLG : Soda Lime Glass.

PVD : Physical Vapor Deposition.

CVD : Chemical Vapor Deposition.

LPCVD : Low Pressure Chemical Vapor Deposition.

CBD : Chemical Bain Deposition.

SCAPS-1D : Solar Cell Capacitance Simulator 1 Dimension.

Introduction générale

Introduction générale

La situation énergétique globale se développe à un rythme rapide, faisant des attentes à long terme pour notre future source d'énergie. La croissance rapide de la population mondiale et le développement accéléré de certains pays du monde entraîne une augmentation de l'amélioration des besoins énergétiques[1].

Actuellement, la production d'énergie est basée essentiellement sur des ressources épuisables non renouvelables appelés les combustibles fossiles comme le pétrole, le gaz naturel, le charbon... Ces combustibles peuvent produire plusieurs problèmes d'environnement comme la pollution et la production des gaz à effet de serre. Il est donc primordial de développer des nouvelles sources d'énergie alternatives qui pourront suffire à la demande, toujours croissante, tout en préservant notre environnement.

Le secteur de l'énergie non fossile bénéficie de ces mesures en favorisant le développement des énergies renouvelables afin de réduire l'utilisation du charbon et de réduire les émissions du méthane. Parmi ces énergies, il y a l'énergie solaire photovoltaïque qui représente une source propre, inépuisable, durable et relativement efficace[2].

De nos jours, les recherches et le développement dans le domaine du photovoltaïque sont basées sur deux principaux axes. Le premier axe consiste à développer de nouveaux procédés moins coûteux, de réduire les épaisseurs et d'améliorer les dispositifs. Le second axe est orienté vers l'utilisation de nouveaux semi-conducteurs en couches minces [3], parmi lesquelles on trouve le CIGS qui fait l'objet de ce mémoire.

Le CIGS est un semi-conducteur avec un gap d'environ 1.20 eV, des efforts importants ont été accomplis dans le domaine des couches minces à base de ce matériau, notamment à cause de ses propriétés électriques, électronique et optiques. On le trouve dans des domaines diversifiés tels que l'électronique, l'optoélectronique et surtout dans la conversion photovoltaïque.

Les cellules solaires en couches minces ont des applications photovoltaïques terrestres à grande échelle vu leur faible prix de fabrication. Une cellule solaire en CdS/CIGS a abouti à un rendement maximal de 25%. L'amélioration du rendement de la cellule solaire en CIGS est principalement par l'utilisation des cellules solaires double (tandem), triple ou multi-jonctions qui sont composées par des couches ayant des énergies du gap différentes afin d'exploiter les différentes régions des énergies du spectre[4].

Ce travail de recherche est présenté dans un manuscrit structuré en quatre parties comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous présenterons des généralités sur les cellules solaires photovoltaïques.
- Le deuxième chapitre sera consacré à une étude bibliographique détaillée sur les matériaux constituant une cellule solaire à base de CIGS : leurs propriétés physiques, structurales, électriques, optiques... ainsi que les différents domaines d'application.

- Le troisième chapitre sera focalisé sur la notion des couches minces et ses diverses techniques de déposition ainsi que les principales étapes de la formation des films.
- Dans le dernier chapitre, à l'aide du logiciel SCAPS nous allons faire une simulation numérique pour montrer l'effet de la couche absorbante CIGS sur le rendement d'une cellule photovoltaïque.

Références bibliographiques :

- [1] Fayçal CHOUIA, «Optimisation du processus d'élaboration de la couche absorbante des cellules solaires à base des matériaux à structure chalcopyrite», thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar, Juin 2018.
- [2] DARANFED Ouarda, «Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules solaires en couches minces à base de Cu_2ZnSnS_4 », thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2013.
- [3] KENZA KAMLI, « Elaboration et caractérisations physicochimique des couches minces de sulfure d'étain par spray ultrasonique : Effet des sources d'étain», mémoire du Magister, Université Mohamed Khider-Biskra, soutenu le : 25 / 04 / 2013.
- [4] Amar HICHEM, « Propriétés électriques de cellule solaire à base de diséléniure de Cuivre Indium Galium CIGS », mémoire du Magister, Université Mohamed Khider – Biskra, Faculté des Sciences et de la technologie, Département : Génie Electrique, 2014.

Chapitre 01
Généralités sur les cellules photovoltaïques

Chapitre 01 : Généralités sur les cellules photovoltaïques.

1. Introduction	23
2. Histoire de l'énergie photovoltaïque	23
3. Les cellules photovoltaïques	24
3.1 Définition	24
3.2 La structure d'une cellule photovoltaïque	25
3.3 Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque (Effet photovoltaïque).....	25
4. Paramètres caractéristiques d'une cellule solaire	26
4.1 La densité du court-circuit J_{cc}	27
4.2 La tension en circuit ouvert V_{co}	27
4.3 Le facteur de forme FF.....	27
4.4 Le rendement photovoltaïque η	28
5. Les différentes générations du photovoltaïque.....	28
5.1 La première génération	28
5.2 La deuxième génération	29
5.3 La troisième génération	31
5.4 Génération en développement (La filière des Pérovskites).....	33
6. Les avantages de l'énergie photovoltaïque	35
7. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque	35
8. Conclusion	35
Références bibliographiques	

Chapitre 01 : Généralités sur les cellules photovoltaïques.

1. Introduction :

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée. Elle pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie c'est pourquoi l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et disponible sur l'ensemble de la planète. Il est arrivé à ce but grâce aux cellules photovoltaïques[1].

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion d'une partie des rayons solaires en électricité grâce aux cellules photovoltaïques. Cette transformation est basée sur un phénomène physique appelé : effet photovoltaïque.

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord l'historique de la technologie du photovoltaïque, nous décrirons ensuite le fonctionnement général d'une cellule photovoltaïque. Par la suite nous allons étudier les différentes grandeurs caractéristiques d'une cellule photovoltaïque et nous terminerons par une description courte des filières technologiques existantes.

2. Histoire de l'énergie photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque a été découvert pour la première fois en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel. Il a constaté que certains matériaux pouvaient produire de petites quantités d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière[2].

En 1883, Charles Fritts met au point la première cellule fonctionnelle. Elle est à base de sélénium et d'or. Elle présente un rendement d'environ 1 %[3].

En 1954, Gerald Pearson, Daryl Chapin et Calvin Fuller créent la première cellule photovoltaïque (PV) à base de silicium avec un rendement intéressant de 6 %[4].

Dans les années 1970, les panneaux photovoltaïques se développent sur des applications terrestres et maritimes. Ils fournissent de l'énergie aux sites isolés qui ne sont pas servis par une grille d'électricité comme étiquette d'extérieur ou relais de télécommunication dans le désert.

Depuis les années 2000, la production globale d'électricité photovoltaïque a augmenté de moins de 2000 mégawatts en 2000 à près de 140000 en 2013. Par conséquent, la production a été multipliée par 70 en moins de 15 ans[5].

Malgré ce développement rapide, la part de l'électricité PV mondiale ne représente encore aujourd'hui que 0,5 % de la totalité de l'électricité mondiale[6].

Par conséquent, il est nécessaire que la recherche progresse notamment dans le domaine des matériaux pour récupérer la conversion et réduire les coûts de fabrication des cellules.

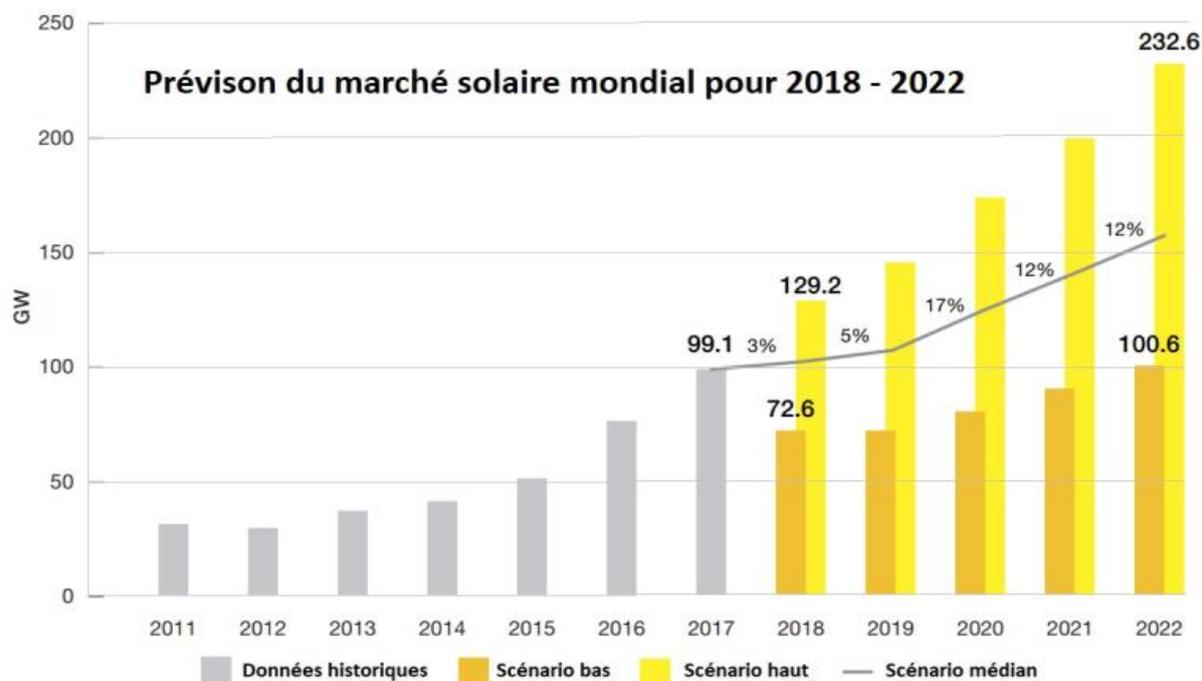


Figure 1.1 : Evolution de la production d'électricité (en mégawatts) PV [3].

3. Les cellules photovoltaïques :

3.1 Définition :

La cellule solaire photovoltaïque est un composant qui convertit la lumière accessible du soleil en électricité. Elle a également été mise en œuvre avec succès dans plusieurs petites applications terrestres [7].

Son importance n'arrête pas de grandir, en particulier parce que le monde a une preuve qu'il doit développer une autre ressource énergétique autre que les ressources classiques.

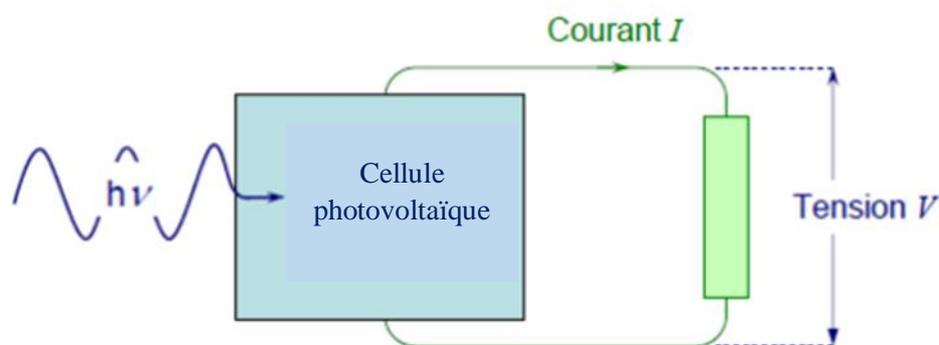


Figure 1.2 : Principe de conversion dans les cellules photovoltaïques [7].

3.2 La structure d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est composée de différents niveaux. Au centre de cette cellule, une couche avec des supports de charge négatifs libres N en contact avec un autre niveau avec des supports de charge libre positive P. Sur les deux côtés du noyau cellulaire, il y a une couche conductrice K en d'autre terme, une grille métallique. Cette couche doit être conductrice et ne pas subir de phénomènes de corrosion. Par conséquent, il existe un niveau qui agit comme une cathode (pôle +) qui recouvre la couche semi-conductrice dopée N et une couche qui exécute le rôle de l'anode (pôle -) sous la couche semi-conductrice P. Sachant que le silicium est très réflecteur, ce qui nous oblige à placer un revêtement anti-réflexion en haut de la cellule. Enfin, il y a une couche de verre qui protège la cellule. Ces couvertures protégées sont essentielles car la cellule est très fragile. L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre [8].

Enfin, les cellules sont reliées les unes aux autres et constituent donc le panneau solaire pour obtenir suffisamment d'énergie.

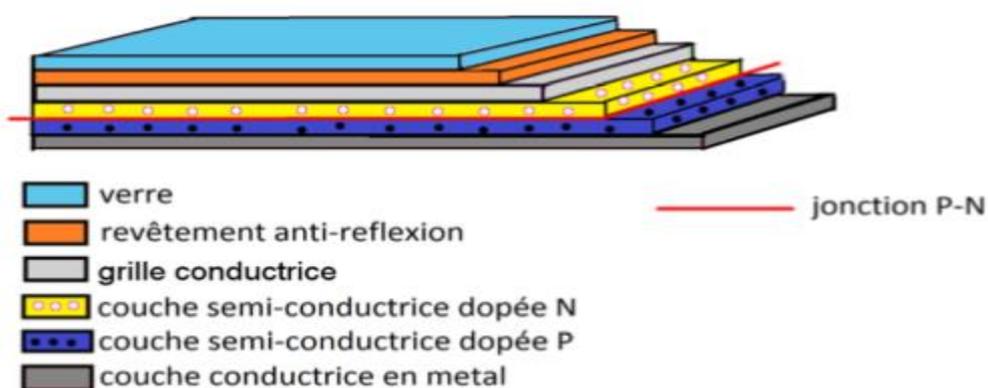


Figure 1.3 : La structure de la cellule photovoltaïque [8].

3.3 Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque (Effet photovoltaïque) :

Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les « grains de lumière ». Lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium, ils arrachent des électrons à ses atomes. Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner.

Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour les y aider, on va associer deux types de silicium. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative N, le côté avec moins d'électrons devient la borne positive P. Entre les deux il se crée un champ électrique.

Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » vont vers la zone P. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d’aller dans le circuit extérieur sous forme d’énergie électrique. Un courant continu se crée. Une couche antireflet permet d’éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface [9].

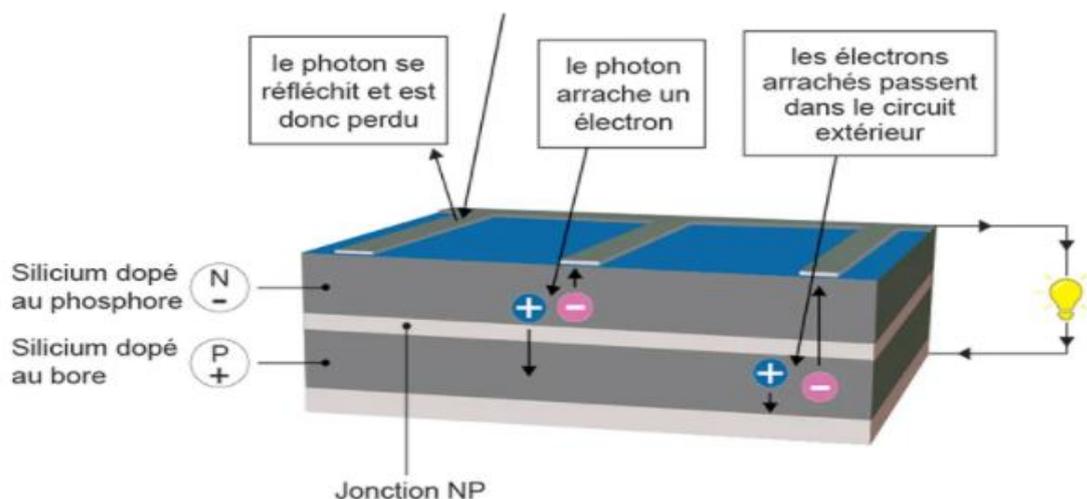


Figure 1.4 : Le principe de fonctionnement d’une cellule solaire photovoltaïque [9].

4. Paramètres caractéristiques d’une cellule solaire :

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

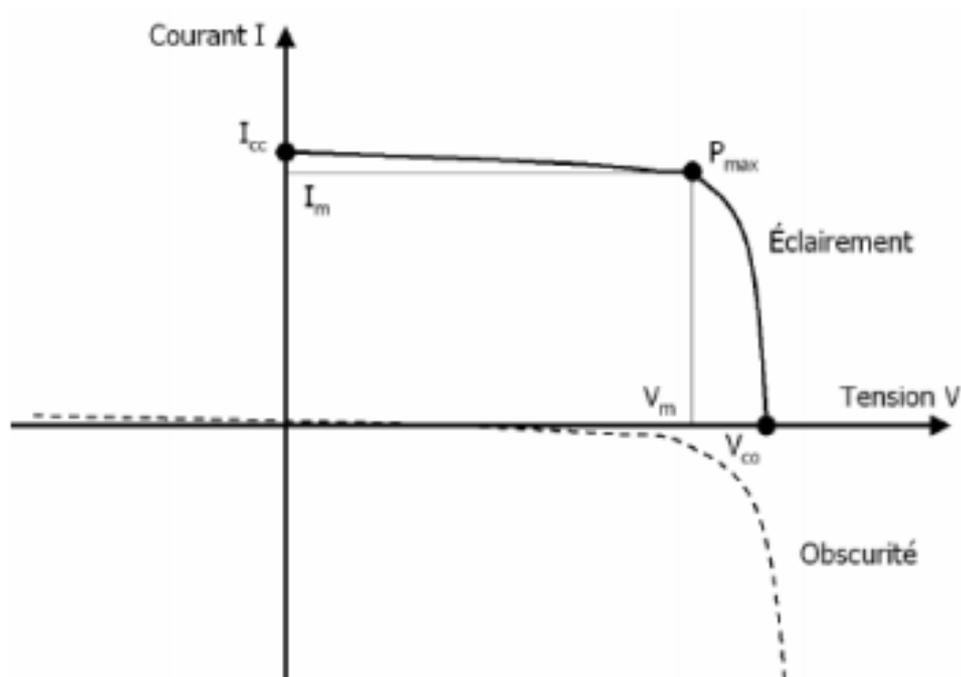


Figure 1.5 : La caractéristique $I(V)$ d’une cellule solaire sous obscurité et sous éclairement[1].

4.1 La densité du court-circuit J_{cc} :

Elle s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$). Elle croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [1] [8].

Sa valeur est déterminée par l'équation suivant :

$$J_{cc} = q \int F(\lambda) [1-R(\lambda)] IQE(\lambda) d\lambda \quad (1.1)$$

Avec : $F(\lambda)$: la densité du flux incident sur unité de surface par unité du temps.

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

IQE : le rendement quantique interne de la cellule.

4.2 La tension en circuit ouvert V_{co} :

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse[7].

Sa valeur peut être déterminée à partir de la relation suivante :

$$V_{co} = \frac{nKT}{q} \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right] \quad (1.2)$$

Avec : K : constante de Boltzmann $1,38.10^{-23}$ J/K.

T : la température absolue (K).

n : facteur d'idéalité.

q : constante de charge d'électron $1,602.10^{-19}$ C.

I_{ph} : le photocourant.

I_s : le courant de saturation.

4.3 Le facteur de forme FF :

Le facteur de forme est un paramètre qui caractérise la qualité de la cellule. Il se calcule à partir de la relation suivante :

$$FF = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (1.3)$$

Avec : V_{max} : la tension correspondante à la puissance maximale fournie.

I_{max} : le courant correspond à la puissance maximale fournie.

I_{cc} : le courant en court-circuit.

V_{co} : la tension en circuit ouvert.

4.4 Le rendement photovoltaïque η :

Le rendement de la cellule photovoltaïque représente le paramètre le plus important puisqu'il permet d'évaluer les performances de la cellule PV. Il se calcule selon la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_{cell}}{P_{in}} \quad (1.4)$$

5. Les différentes générations du photovoltaïque :

5.1 La première génération :

Les cellules en Silicium sont des cellules de 1ère génération. Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché près de 90% [10]. Le Silicium est le plus abondant dans la croûte terrestre après l'oxygène il peut être produit à partir des ressources naturelles quasi inépuisables comme : la Silice, des sables, des grès...[11].

Le Silicium bénéficie d'une implantation importante et durable dans l'industrie de la microélectronique avec ses excellentes qualités électriques, mais sa fabrication est plus délicate car elle nécessite une dépense d'énergie considérable et coûteuse[12].

5.1.1 Le Silicium monocristallin :

La technologie monocristalline coûte cher car elle nécessite des barres de silicone pure. Son efficacité maximale est de 24,7% et l'efficacité des cellules commerciales est de 17 à 20% [13]. Le Silicium monocristallin est obtenu par croissance ou dessin d'un lingot cylindrique monocristallin selon le processus de Czochralski (CZ). Ces cellules monocristallines fonctionnent bien, mais la méthode de production est laborieuse et coûteuse.



Figure 1.6 : Cellules solaires au Silicium monocristallin[8].

5.1.2 Le Silicium polycristallin :

La technologie multi-cristal est obtenue grâce à la refonte des cristaux de silicium de l'industrie électronique et nécessite 2 à 3 fois moins d'énergie que la technologie précédente. Sa performance est un peu inférieure (12 à 14%) [10] mais son coût est plus avantageux, ce qui permet à cette technologie de dominer le marché aujourd'hui.

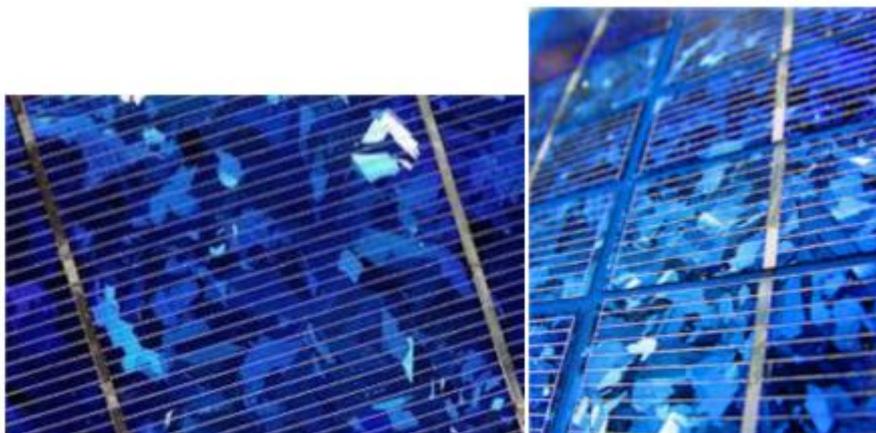


Figure 1.7 : Cellules solaires au Silicium polycristallin [8].

5.2 La deuxième génération :

Les cellules solaires de la 2^{ème} génération apparaissent à la fin des années quatre-vingts. Elles représentent des cellules à base de couches minces ayant une épaisseur inférieure à 5 μ m. leur principale objectif est de réduire les coûts de fabrication et permettre d'obtenir des meilleurs rendements[12].

Les secteurs principaux des couches minces sont le silicium amorphe (Si-a) utilisé pendant de nombreuses années, dans des montres et des calculatrices, en particulier de CdTe (le Tellure de Cadmium) et le CIGS (le Diséléniure de Cuivre d'Indium et de Gallium).

5.2.1 Le Silicium amorphe :

Le silicium amorphe est un matériau composé de silicium hydrogéné (état non-cristallin) déposé sur un substrat de verre. Il possède un rendement moins bon que le cristallin (5-10%), le silicium amorphe est souvent appliqué à des appareils de petite puissance (calculatrices, lampes...) [8].

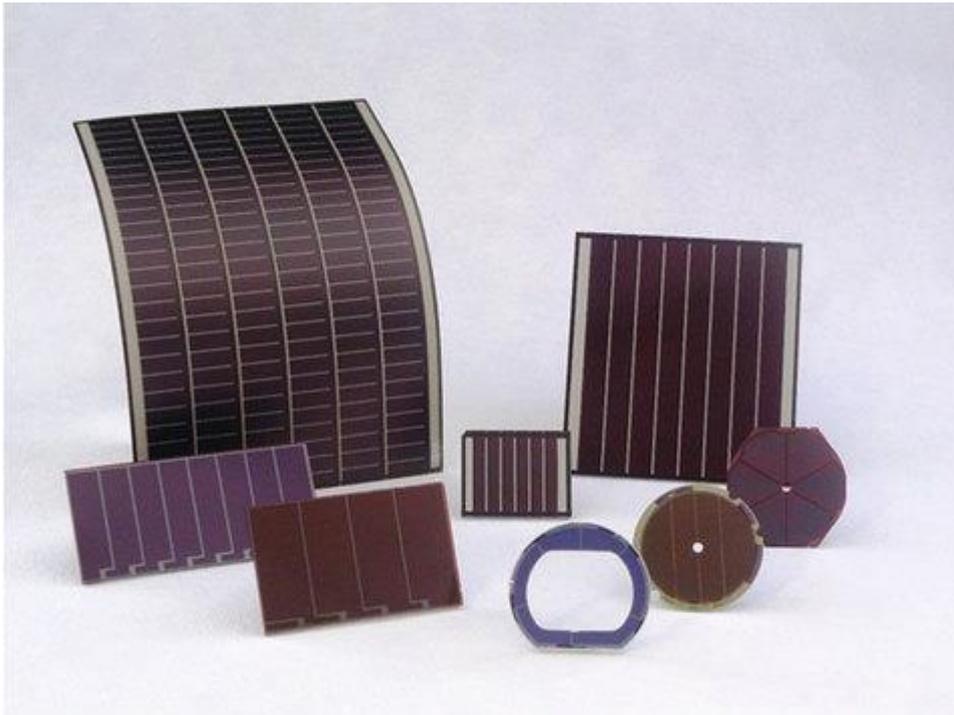


Figure 1.8 : Cellule en Silicium amorphe[14].

5.2.2 Le Tellure de Cadmium CdTe :

Elles sont aussi appelées hétéro jonction à base de Tellure de Cadmium et Sulfure de Cadmium. Ces composés polycristallins sont déposés sur un substrat en verre. Les premières cellules ont été développées en 1972. Il y a quelques années, cette technologie semblait être la plus adaptée pour les couches minces. Mais le problème de toxicité posé par le cadmium a pesé lourdement sur son développement, l'autre problème est que le tellure est un élément rare[8] Cette technologie présente un rendement de 18.7% [11].



Figure 1.9 : Cellules solaires en Tellure de Cadmium CdTe[15].

5.2.3 Le Diséléniure de Cuivre et d'Indium CIS, le Diséléniure de Cuivre et de Gallium CGS, le Diséléniure de Cuivre d'Indium et de Gallium CIGS :

Cette nouvelle technologie avec un rendement de 19,2% est basée sur l'utilisation d'un mélange semi-conducteur (cuivre, gallium, indium et sélénium) au lieu de silicium.

L'épaisseur de la couche du mélange doit être comprise entre 1 et 2,5 μm d'épaisseur étant de type P, elle doit être recouverte d'un matériau de type N [11]. Le procédé de fabrication de ces semi-conducteurs, inspiré de l'imprimerie, consiste en le dépôt sur une bande métallique souple des semi-conducteurs en quatre passages consécutifs. Cette production industrielle permet une importante diminution du coût de fabrication des cellules et des panneaux photovoltaïques [8].

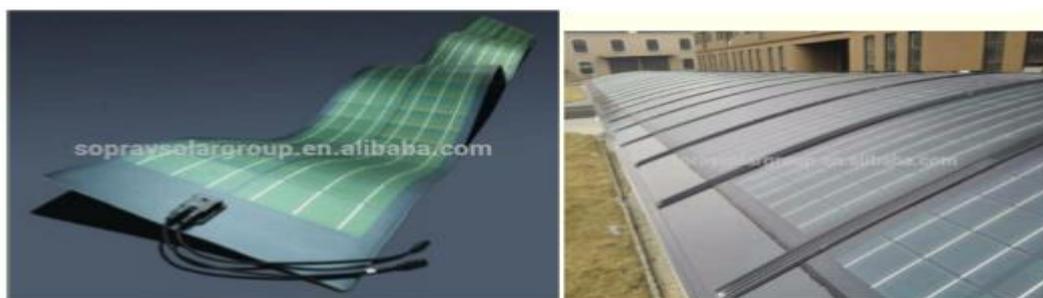


Figure 1.10 : Cellules solaires en CIGS [15].

5.3 La troisième génération :

Le développement de la 3^{ème} génération de cellule solaire est très actif et motivé par les applications spatiales vu qu'elles visent principalement à obtenir le plus haut rendement jamais obtenu auparavant, en plus à minimiser les inconvénients et les obstacles rencontrés dans les générations précédentes telles que le coût de fabrication très élevé, la disponibilité des matériaux ou bien leurs toxicités[12].

Par la suite, nous allons citer les plus intéressantes comme : les cellules organiques, les cellules Tandem.

5.3.1 Les cellules organiques :

Ce genre de cellule se compose d'une couche active, constituée à son tour de plusieurs couches de polymères très fines superposées ou bien d'un réseau interprété polymère-molécule. Cette couche active est prise en sandwich entre deux couches conductrices, généralement l'une de ces deux couches est transparente d'une épaisseur ne dépassant pas les 10nm [16].

Ce type de cellules photovoltaïques a connu le meilleur taux de croissance parmi les différentes filières photovoltaïques durant les 12 dernières années 13,2 % (taille 1,1 cm^2) [11].

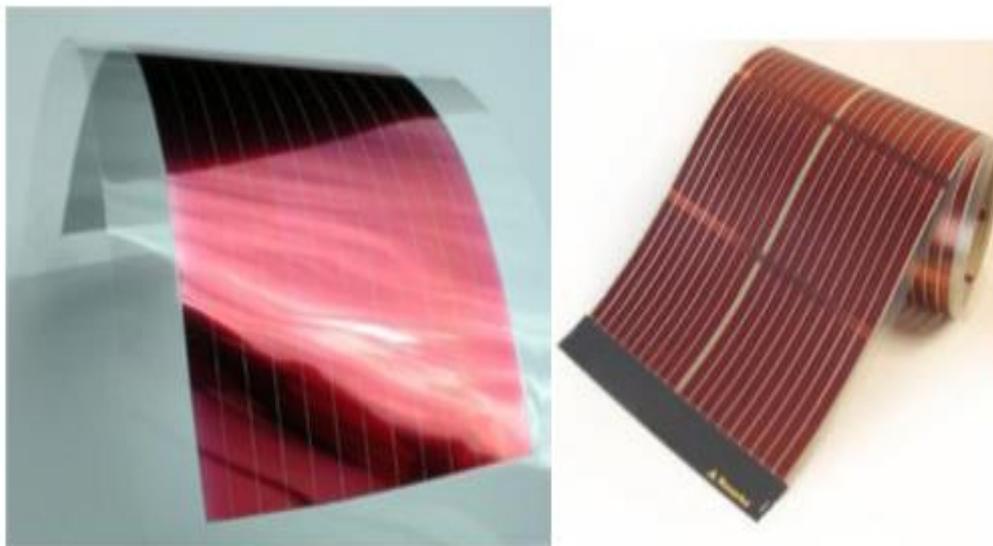


Figure 1.11 : Cellules solaires organiques [15].

5.3.2 Les cellules solaires Tandem :

La plupart des cellules Tandem ont été fabriquées en polissant d'abord la surface de Silicium pour la rendre lisse puis en ajoutant une couche de Pérovskite pour augmenter l'efficacité globale mais à des coûts supplémentaires. Les cellules solaires en Tandem ont atteint une efficacité de 25.7% comme certifié par un laboratoire externe indépendant l'Institut Fraunhofer pour l'énergie solaire à Fribourg, en Allemagne. Il s'agit de l'un des rendements les plus élevés jamais enregistrés pour ce type de conception. Ils étaient également stables, résistants à des températures allant jusqu'à 85 degrés Celsius pendant plus de 400 heures sans perte significative de performances [17].

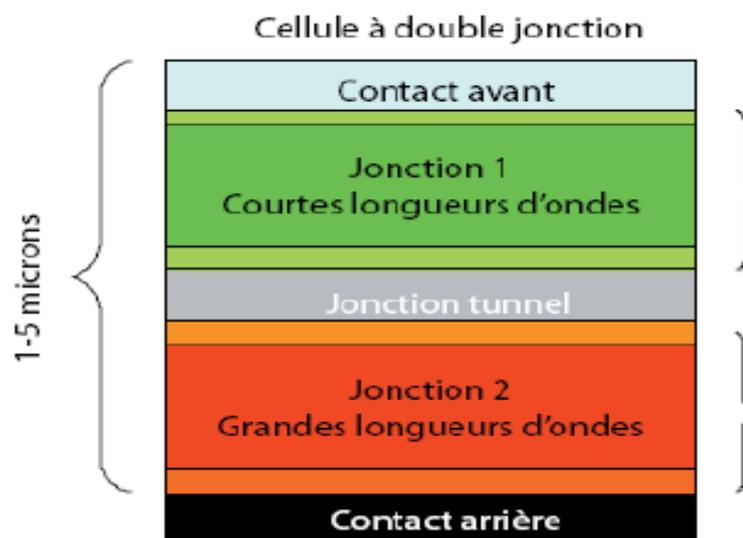


Figure 1.12 : La structure d'une cellule Tandem [18].

5.4 Génération en développement (La filière des Pérovskites) :

C'est un nouveau type des cellules photovoltaïques qui n'est pas encore sortie des laboratoires. Ses qualités photovoltaïques, la capacité d'absorption des photons 10 fois supérieure au silicium, la bonne séparation des charges électriques et leur mobilité, avec un rendement de 25.5%[11].

De nombreux composés adoptent la structure type perovskite, cette appellation provenant de celle du minerai CaTiO_3 . En 1830, le géologue Gustav Rose, qui a été le premier à étudier ce composé naturel, le nomma en l'honneur du Comte Lev Aleksevich Von Perovski, célèbre minéralogiste russe.

La perovskite idéale ABO_3 est décrite dans le groupe d'espace Pm-3m . C'est une structure tridimensionnelle dans laquelle le plus petit cation B se trouve dans un environnement octaédrique, les octaèdres étant reliés entre eux par les sommets, le cation A se trouvant au centre de polyèdres de 12 oxygènes, reliés entre eux par des faces carrées[19].

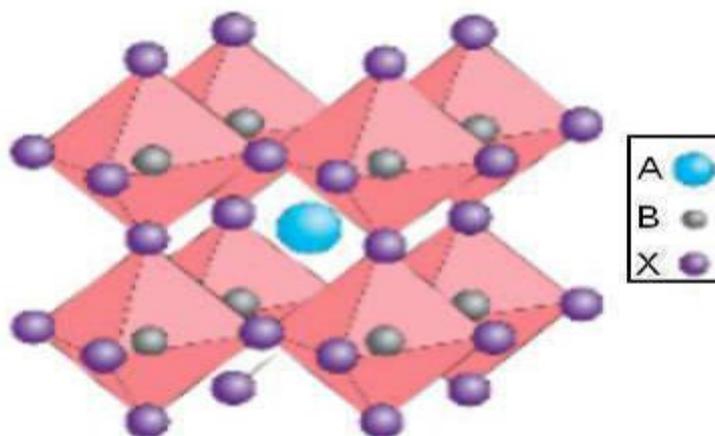


Figure 1.13 : Structure d'un cristal de pérovskite générique ABX_3 [11].

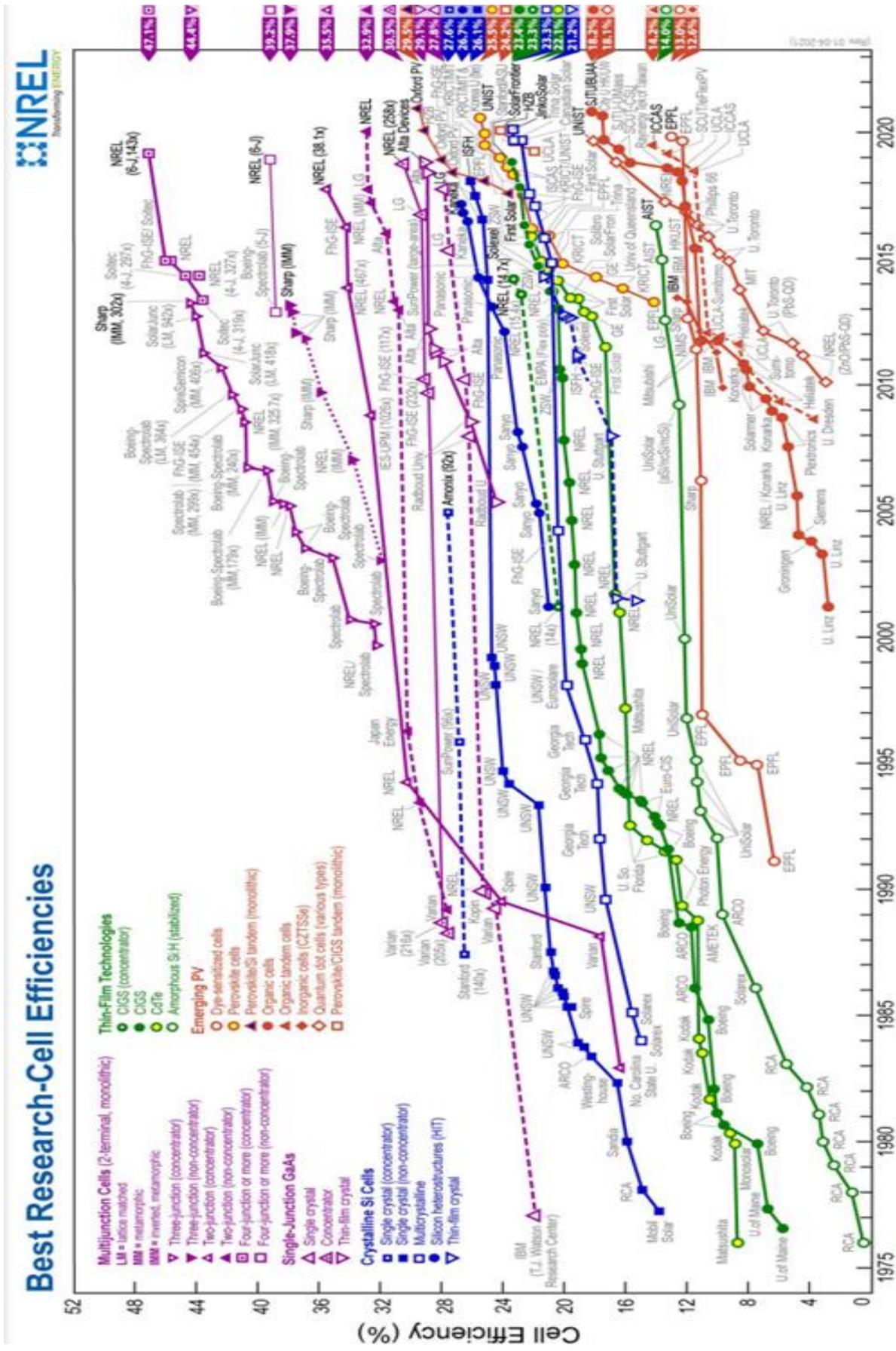


Figure 1.14 : Les records en laboratoire d'efficacité de cellules photovoltaïques selon les différentes technologies[18]

6. Les avantages de l'énergie photovoltaïque :

- C'est une énergie provenant d'une source gratuite.
- Elle n'est pas polluante.
- Elle possède un potentiel illimité.
- Son installation ne produit aucun bruit.
- Elle a une structure dure.

7. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

- Son installation coûte très cher.
- Le rendement de l'effet photovoltaïque est relativement bas.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Elle nécessite un stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) pour une installation autonome.
- La fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement.

8. Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur les cellules photovoltaïques. Nous avons donné brièvement l'historique de la technologie photovoltaïque. Nous avons décrit aussi la structure des cellules photovoltaïques, par la suite nous avons expliqué le principe de fonctionnement des cellules solaires ainsi que leurs principales caractéristiques. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons présenté les différentes filières photovoltaïques existantes, ainsi que les avantages et les inconvénients du photovoltaïque.

Références bibliographiques :

- [1] BOUGHANEM djamaia, « Influence des propriétés du silicium amorphe hydrogéné sur la performance d'une Cellule solaire HIT », mémoire de Master, Université Abd Hamid Ben Badis Mostaganem, p. 60, juin 2018.
- [2] D. M. Chapin, C. S. Fuller, et G. L. Pearson, « A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power », *J. Appl. Phys.*, vol. 25, n° 5, p. 676-677, mai 1954, doi: 10.1063/1.1721711.
- [3] Vincent FONCROSE, « Nanocristaux, films et cellules photovoltaïques de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}(\text{Se})_4$ par impression d'encre » l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier) , p. 144, nov. 2015.
- [4] Fritts, « On a New Form of Selenium Photocell », *Am. J Sci.*, vol. 26, p. 465, 1883.
- [5] Sinead Orlandi, Manoël Reking « Global market Outlook For Photovoltaics » inter Solar European photovoltaic industry association 2014-2018
- [6] ABBÉ PIERRE, « Le magazine du développement durable. La production électrique mondiale en chiffres », Emmaüs International compte 425 associations membres dans 41 pays d'Afrique, Amérique, Asie et Europe. 2016.
- [7] OUSSIDHOUM Samira « Etude comparative des performances des cellules solaires à jonctions simple et multiple », Mémoire du Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, le 08/07/2015.
- [8] D. Chaimaa, « Optimisation du rendement de conversion photovoltaïque des cellules solaires à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium "CIGS". », Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri, 2017.
- [9] Gilles Corman, Jean-François Minster, Manoelle Lepoutre, « La cellule photovoltaïque : comment ça marche ? Planete énergies. Le 02 Avr. 2019.
- [10] Faithpraise, Fina, Basse, Donatus, Charles, Mfon, Osahon, Okoro, Udoh, Monday, Chatwin, Chris, « Experimental Design and Construction of an Enhanced Solar Battery Charger », Electronics and Computer Technology Unit, Department of Physics University of Calabar, 54000, Nigeria (Computer Science Department, University of Calabar, Calabar –Nigeria) (School of Engineering and Informatics, Department of Engineering and Design, University of Sussex, Brighton. United Kingdom.
- [11] Z. E. Jouad, « Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques », Thèse de Doctorat, Université d'Angers, p. 213, 23 Jan 2017.
- [12] Mohamed MIMOUNE, « Étude des capteurs photovoltaïques basés sur les nanotechnologies », thèse de Doctorat, Université du Québec, Mars 2016.
- [13] NAIM Houcine « Etude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôles et régulation de l'énergie électrique », thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2015-2016.
- [14] Amorton-amorphous silicon solar cells | Panasonic, <https://www.panasonic-electric-works.com/fr/telechargements.htm>, 2019.
- [15] K. Kurokawa et Institute of Electrical and Electronics Engineers, Éd., *Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion : joint conference of 13th PV Science & Engineering Conference : 30th IEEE PV Specialists Conference : 18th European PV Solar Energy Conference : Osaka International Congress Center « Grand Cube »*, Osaka, Japan, 11-18 May, 2003.
- [16] L. Bailly, « Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface », Université Bordeaux, Ecole doctorales des sciences chimiques, p.175, sept.2010.

- [17] André Joffre et Erkan Aydin (KAUST), Yi Hou et Michele De Bastiani (KAUST), « Les cellules solaires tandem TecSol », Université de Toronto, 30 mars 2020.
- [18] « Solaire Photovoltaïque » <https://docplayer.fr/11057651-Solaire-photovoltaïque.html>.
- [19] H. Liu *et al.* « A facile method to improve the stability and efficiency of CsPbI₂Br perovskite solar cells prepared at low temperature », *Sol. Energy*, vol. 195, p. 544-551, janv. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2019.11.047.

Chapitre 02

Les matériaux CIGS, CdS et ZnO : propriétés et applications

Chapitre 02 : Les matériaux CIGS, CdS et ZnO : propriétés et applications

1.	Introduction	41
2.	Le Sélénium de Cuivre d'Indium et de Gallium CIGS.....	41
2.1	Etat de l'art	41
2.2	Généralités sur les éléments de base du CIGS	41
2.2.1	Propriétés chimiques des éléments (Cu, In, Ga, Se)	42
2.2.2	Propriétés physiques des éléments (Cu, In, Ga, Se)	42
2.3	Propriétés du CIGS	42
2.3.1	Propriétés structurales	42
2.3.2	Propriétés électriques	44
2.3.3	Propriétés électroniques	44
2.3.4	Propriétés optiques	45
2.4	Domaines d'application du CIGS	47
2.4.1	Applications photovoltaïques	47
2.4.2	La technologie magnéto-électronique dans les dispositifs semi-conducteurs ...	47
2.4.3	Les photo-détecteurs	47
2.4.4	Le vitrage Wysips.....	47
3.	Le Sulfure de Cadmium CdS	48
3.1	Propriétés du CdS	48
3.1.1	Propriétés structurales	48
3.1.2	Propriétés physiques	49
3.1.3	Propriétés électriques	49
3.1.4	Propriétés optiques	49
3.2	Domaines d'application du CdS	49
4.	L'Oxyde de Zinc ZnO	50
4.1	Propriétés du ZnO	50
4.1.1	Propriétés structurales	50
4.1.2	Propriétés électriques	50
4.1.3	Propriétés optiques	51
4.2	Domaines d'application du ZnO	51

5.	La conception d'une cellule solaire à base de CIGS	52
5.1	Le substrat	52
4.2	Le contact arrière	53
4.3	L'absorbeur	53
4.4	La couche tampon.....	53
4.5	La couche fenêtre.....	54
4.6	Le contact avant.....	54
4.7	La couche anti-reflet	54
6.	Conclusion.....	54
	Références bibliographiques	

Chapitre 02 : Les matériaux CIGS, CdS et ZnO : propriétés et applications

1. Introduction :

Le marché des modules photovoltaïques est basé aujourd'hui sur d'autres matériaux que le Silicium qui peuvent atteindre un rendement de conversion de 25%. Parmi ces matériaux nous avons le CIGS qui fait l'objet de notre étude. Le CIGS est un composé qui appartient à la famille des matériaux chalcopyrites qui possèdent des propriétés électroniques, électriques et optiques très intéressantes. Sa bande interdite est de nature directe et son coefficient d'absorption est très élevé. Le composé CIGS est considéré comme matériau semi-conducteur important pour les applications optoélectroniques et photovoltaïques[1].

Dans ce deuxième chapitre, nous allons nous intéresser par l'ensemble des propriétés physiques, structurales, électriques et électroniques des semi-conducteurs constituant une cellule solaire à base de CIGS.

2. Le Sélénium de Cuivre d'Indium et de Gallium CIGS :

2.1 Etat de l'art :

Le matériau CIGS a été synthétisé pour la première fois par **Hahn** en 1953. En 1974, ce matériau a été proposé comme matériau photovoltaïque avec une efficacité de conversion de puissance de 12% pour une pile solaire monocristalline. Dans les années 1983-1984, **Boeing Corp** a obtenu des rendements au-dessus de 10% des films polycristallins minces obtenus à partir d'un processus de Co-évaporation de trois sources. En 1987 **Arco Solaire** a réalisé un rendement de 14.1%, record de longue durée (10 ans) pour une cellule en couche mince. Avant **Arco Solaire**, les industries solaires de Siemens (maintenant Shell solaire), avaient entamé l'étape de production industrielle. Les premiers modules publicitaires solaires de $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ étaient disponibles en 1998[2].

Actuellement, la technologie CIGS présente le meilleur rendement de production pour les modules en comparant avec d'autres technologies en couches minces, elle peut atteindre les 25% en laboratoire[3].

2.2 Généralités sur les éléments de base de CIGS :

Le semi-conducteur chalcopyrite CIGS est composé d'un élément de la 1ère colonne, deux éléments de la 3ème colonne et d'un élément de la 6ème colonne du tableau périodique des éléments chimiques c'est-à-dire I-III-VI₂ [4].

I	III	VI
	⁵ B 10.81	⁸ O 15.99
	¹³ Al 26.98	¹⁶ S 32.06
²⁹ Cu 63.54	³¹ Ga 69.74	³⁴ Se 78.96
	⁴⁹ In 114.82	⁵² Te 127.60

Tableau 2.1 : Classification périodique des éléments constituant la famille I-III-VI₂ [4].

2.2.1 Propriétés chimiques des éléments (Cu, In, Ga, Se) :

Le **tableau 2.2** regroupe les principaux paramètres chimiques des éléments constituant le CIGS[4] [5] :

Paramètres	Cu	Ga	In	Se
Masse atomique (g/mol)	63.546	114.82	69.74	78.96
Configuration électronique	$3d^{10}4s^1$	$3d^{10}5s^25p^1$	$3d^{10}4s^24p^1$	$3d^{10}4s^24p^4$
Masse volumique (g/cm ³)	8.96	7.31	5.1	4.79
Température de fusion (°C)	1083	156	29.78	217
Température d'ébullition (°C)	2595	2000	2403	688

Tableau 2.2 : Propriétés chimiques des éléments (Cu, In, Ga, Se).

2.2.2 Propriétés physiques des éléments (Cu, In, Ga, Se) :

Le **tableau 2.3** regroupe les principaux paramètres physiques des éléments constituant le CIGS[4] :

Paramètres	Cu	Ga	In	Se
Conductivité électronique (10 ⁶ /cm.Ω)	0.596	0.116	0.0678	10 ⁻¹²
Conductivité thermiques (W/cm.K)	4.01	0.816	0.0678	0.0204
Potentiel d'ionisation (eV)	7.726	7.786	5.999	9.752
Electronégativité de Pauling	1.9	2	1.81	2.4
Rayon atomique (nm)	0.128	0.162	0.161	0.14

Tableau 2.3 : Propriétés physiques des éléments (Cu, In, Ga, Se).

2.3 Propriétés du CIGS :

Les performances d'une cellule solaire à base de CIGS dépendent fortement de l'ensemble des propriétés structurales, électriques, électroniques et optiques du matériau absorbant. Par conséquent, pour optimiser un dispositif à base de CIGS, nous sommes obligés de bien comprendre la structure de ce matériau.

2.3.1 Propriétés structurales :

Le CuInSe₂ et le CuGaSe₂ sont des matériaux qui forment l'alliage de Cu(In,Ga)Se₂, appartiennent à la famille I-III-VI₂ qui possède une structure tétragonale de chalcopyrite. Les chalcopyrites basés sur le CuInSe₂ ont une structure cubique zinc blende[6].

Chaque atome de Sélénium (Se) est lié tétraédriquement à deux atomes de Cuivre (Cu) et deux atomes d'Indium (In), chacun d'entre eux étant entouré de quatre atomes de Sélénium (Se). La longueur de la liaison Cu-Se est de 2.43Å et celle d'In-Se est de 2.57Å[4].

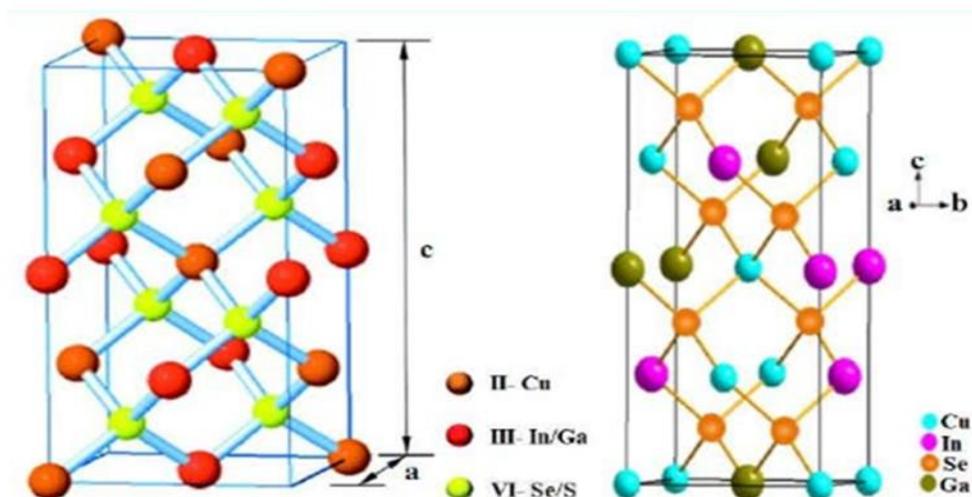


Figure 2.1 : Structure cristalline de la chalcopyrite[7].

Les propriétés du CIGS ainsi que les conditions dans lesquelles le substrat est élaboré influent fortement sur l'orientation cristalline du matériau.

La plupart des études montrent que l'orientation (220/204) permet d'obtenir de meilleures performances photovoltaïques[8]. Cette orientation permet aux atomes de Cd de mieux diffuser dans le CIGS lors du dépôt de la couche de CdS, elle permet aussi la formation d'une interface CdS/CIGS avec moins de défauts[9] [10].

La **figure 2.2** représente un diagramme qui montre la variation de la valeur de la bande interdite en fonction de la valeur du paramètre de maille a , pour des différentes chalcopyrites (CuInSe_2 et CuGaSe_2). On peut dire alors que pour les atomes les plus lourds, les bandes de valence/conduction s'élargissent et la valeur de la bande interdite (varie entre 1eV pour CuInSe_2 et 2.4 eV pour CuGaSe_2) diminue[7].

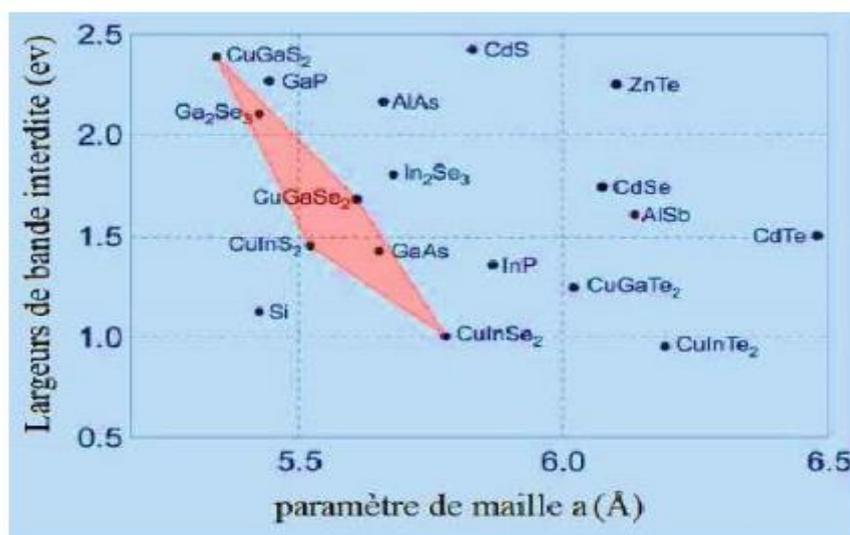


Figure 2.2 : Les largeurs de bande interdite et paramètre de maille a de certaines chalcopyrites[7].

2.3.2 Propriétés électriques :

Les propriétés électriques (mobilité, conductivité, résistivité...etc.) des matériaux semi-conducteurs utilisés dans les cellules solaires sont en relation avec leurs performances photovoltaïques[4].

Le **tableau 2.4** montre que la résistivité dépend de la température dans laquelle le matériau CIGS est élaboré, plus la température est élevée, plus la résistivité du CIGS augmente[7].

La température T (°C)	La résistivité ρ (Ω.cm)
260	0.438
320	7.56
380	8.23

Tableau 2.4 : Variation de la résistivité en fonction de la température.

Le matériau CIGS peut être rendu riche en Cuivre (Cu-riche) ou riche en Indium (In-riche).

- Le matériau Cu-riche est fortement un conducteur de type P.
- Le matériau In-riche présente une conductivité de type N.

Le **tableau 2.5** rassemble les différents types de conductivité en fonction des rapports Cu/In et Se/ (Cu+In) :

$\frac{Se}{Cu+In} > 1$		$\frac{Se}{Cu+In} < 1$	
$\frac{Cu}{In} > 1$	$\frac{Cu}{In} < 1$	$\frac{Cu}{In} > 1$	$\frac{Cu}{In} < 1$
Type P avec une faible résistivité.	Type P avec une résistivité moyenne. Ou type N avec une forte résistivité.	Type P avec une faible résistivité.	Type P avec une forte résistivité ou type N avec une faible résistivité.

Tableau 2.5 : Type de conduction dans CuInSe₂ en fonction des rapports[4].

2.3.3 Propriétés électroniques :

Le CuInSe₂ et le CuGaSe₂ sont des matériaux semi-conducteurs possédant respectivement des gaps directs de 1.035eV et 1.68eV. Cette différence est majoritairement liée à une différence de minimum de la bande de conduction [11].

La largeur de la bande interdite du CIGS varie en fonction de x entre les valeurs du pur CIS (x=0) et du pur CGS (x=1), suivant la loi empirique suivante[8] :

$$E_g = 1.035 + 0.65 x - 0.264 x (1 - x) \quad (2.1)$$

Où x représente le teneur en Gallium du CIGS. Avec : $x = [Ga] / [Ga+In]$.

Le CIGS est donc un matériau dont l'énergie du gap (E_g) peut être ajustée entre 1.035eV et 1.68eV en fonction du taux de gallium. La plupart des résultats expérimentaux publiés dans le domaine des cellules CIGS montrent que les meilleurs rendements sont obtenus avec un gap d'environ 1.2eV[8].

L'énergie de la bande interdite dépend de la longueur d'onde du photon, elle est exprimée par la relation suivante [12] :

$$E_g = \frac{1.24}{\lambda} \quad (2.2)$$

Avec : E_g : l'énergie de la bande interdite (eV).

λ : la longueur d'onde de la lumière (μm).

Dans la littérature, on retrouve les valeurs des différentes énergies de gap pour les composés Cu (In,Ga)(S,Se₂) qui sont résumées dans le **tableau 2.6** [13] :

Le composé	Energie de gap (eV)
CuInSe ₂	1.04
CuGaSe ₂	1.68
CuInS ₂	1.53
CuGaS ₂	2.76
CuGa _x In _{1-x} Se ₂	1.0-1.7

Tableau 2.6 : Energies de gap des composés Cu (In,Ga)(S,Se₂).

2.3.4 Propriétés optiques :

Le rendement des cellules solaires dépend principalement de la lumière absorbée par la couche absorbante. Du point de vue technologique, la couche absorbante doit avoir un gap optimal pour absorber la plus large gamme des longueurs d'ondes du spectre solaire avec un coefficient d'absorption élevé[14]. Le coefficient d'absorption de CuInGaSe₂, CuInSe₂ est très élevé et supérieur à 10^5 cm^{-1} dans le domaine du visible et le proche infrarouge comme le montre la **figure 2.2** :

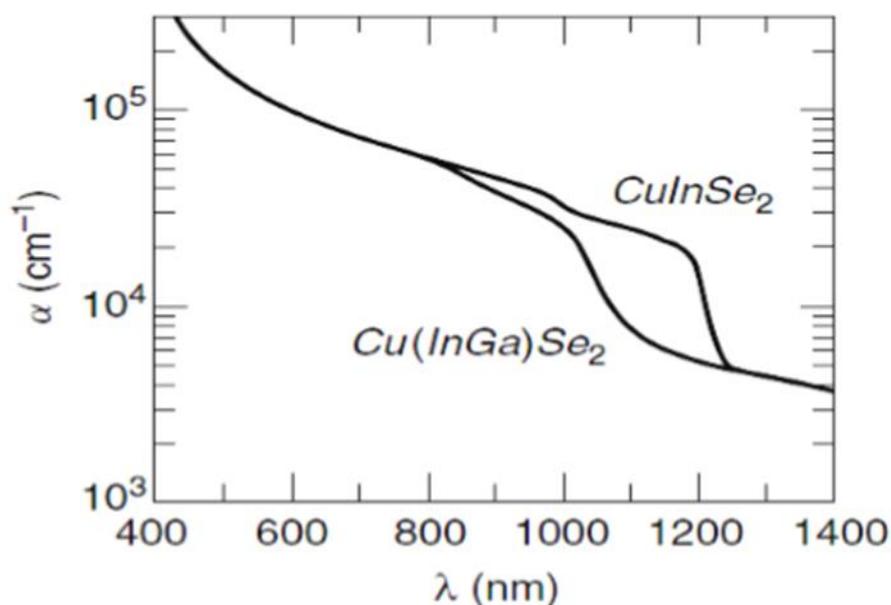


Figure 2.3 : Coefficient d'absorption de CuInSe₂ et Cu(InGa)Se₂ en fonction de la longueur d'onde λ [4].

Il a été démontré que le coefficient d'absorption α en fonction du gap optique E_g est décrit par la relation suivante[7] :

$$\alpha = \frac{A(E-E_g)^{1/2}}{E} \quad (2.3)$$

Avec :

A : une constante de proportionnalité qui dépend des densités des états liés à l'absorption de photon.

E : l'énergie de l'irradiation.

E_g : l'énergie de la bande interdite.

Généralement les propriétés optiques dépendent considérablement de l'indice de réfraction complexe, ce dernier est déterminé par la relation suivante[7] :

$$N = n + ik \quad (2.4)$$

Avec :

N : indice optique complexe.

n : indice de réfraction.

k : le coefficient d'extinction du matériau traduisant l'absorption du rayonnement par le matériau. Il est lié au coefficient d'absorption α et la longueur d'onde λ par la relation suivante[15] :

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2.5)$$

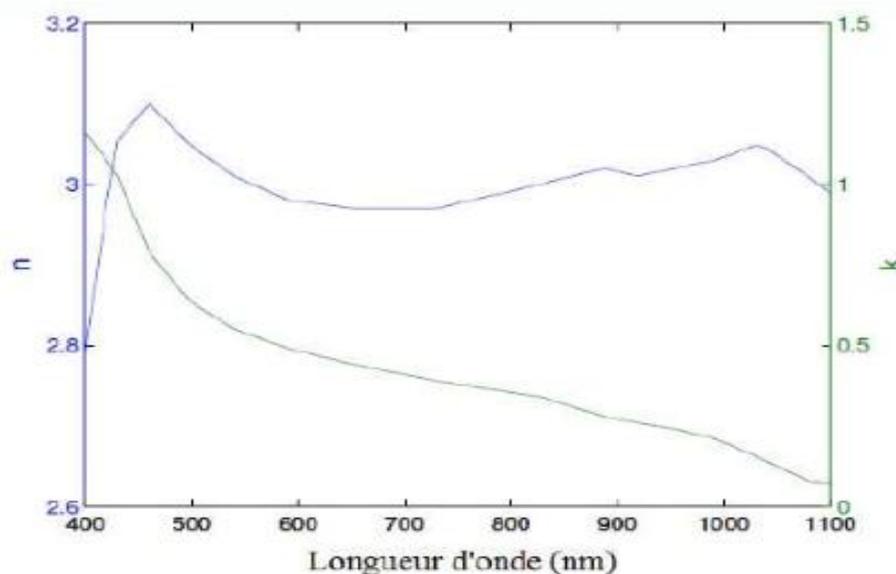


Figure 2.4 : L'évolution de l'indice de réfraction n et le coefficient d'extinction k du CIGS en fonction de la longueur d'onde λ [7].

2.4 Domaines d'application du CIGS :

2.4.1 Applications photovoltaïques :

L'une des applications principales du matériau CIGS est la production d'absorbeurs pour les cellules photovoltaïques, Car, il présente une très forte absorption de lumière et une couche de seulement 1 à 2 micromètres (μm) suffit à absorber la majeure partie de la lumière solaire[16].

Dans l'industrie photovoltaïque, les cellules solaires CIGS sont devenues aussi efficaces que les cellules de silicium multi cristallin, le type de cellules solaires le plus courant. CIGS et CdTe-PV restent les deux seules technologies à couches minces commercialement performantes sur un marché mondial en croissance rapide[17].

La technologie CIGS s'est révélée être une technologie solaire à couche mince stable et à haute efficacité et produite dans le monde entier à une échelle de plusieurs gigawatts. La technologie CIGS est utilisée avec succès pour produire des cellules et des modules flexibles et légers hautement efficaces (un rendement de 25% au laboratoires) [3].

2.4.2 La technologie magnéto-électronique dans les dispositifs semi-conducteurs :

L'électronique de spin, ou « magnéto-électrique », est un domaine de recherche en émergence depuis la fin des années 80[18].

Le fonctionnement des structures étudiées dans ce domaine est basé principalement sur les propriétés des métaux ferromagnétiques relatives à l'orientation de spin des électrons de conduction : ils injectent et collectent préférentiellement des électrons dont l'orientation de spin est en accord avec leur moment magnétique[19]. Le matériau CIGS possède cette propriété qui le recommande fortement pour l'application dans ce domaine.

Il s'agit de multicouches (ferromagnétique/paramagnétique/ferromagnétique) dans le cas des magnétorésistances géantes, ou de structures (ferromagnétique/isolant/ferromagnétique) dans le cas des jonctions tunnel magnétiques. Ces structures sont utilisées en tant que capteurs de champ magnétique ou pour l'enregistrement d'informations binaires. Elles semblent appelées à un développement industriel rapide[19].

2.4.3 Les photo-détecteurs :

Dites aussi détecteurs photosensibles, sont des dispositifs permettent la transformation de la lumière absorbée en une grandeur mesurable généralement en tension électrique ou bien en un courant électrique.

2.4.4 Le vitrage Wysips :

Le vitrage Wysips en anglais « What you see is photovoltaic surface », c'est une technologie qui utilise un type de cellule photovoltaïque couche mince et hautes performances CIGS. Elle a été brevetée par l'entreprise Française **Sunpartner** en 2017.

La gamme de vitrage solaire photovoltaïque comprend six produits. Certaines technologies brevetées par Sunpartner ont déjà trouvé des applications dans des produits de grande consommation, par exemple une vitre tactile photovoltaïque pour smartphone ou un verre photovoltaïque pour montre connectée, permettant de recharger ces appareils lors de leur utilisation à l'extérieur[20].

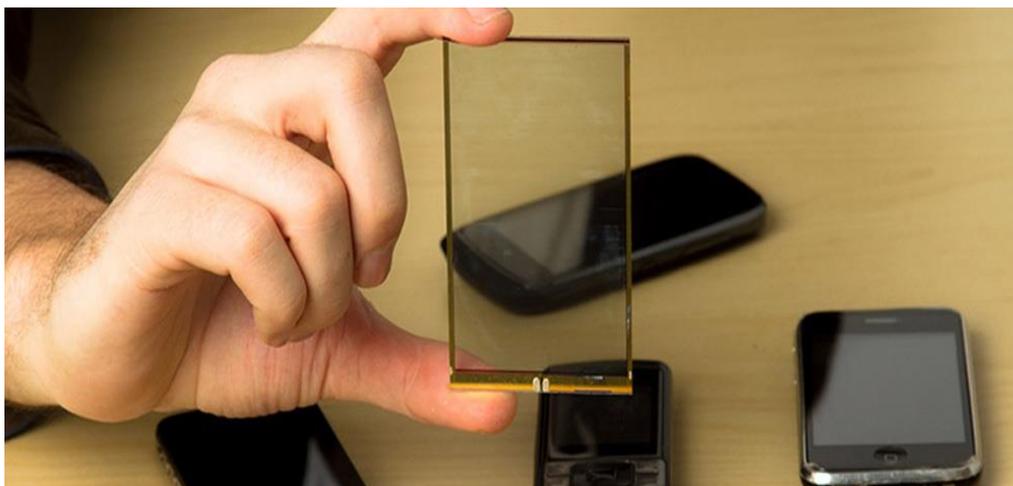


Figure 2.5 : La gamme de vitrage Wysips[20].

3. Le Sulfure de Cadmium CdS :

3.1 Propriétés du CdS :

3.1.1 Propriétés structurales :

Le Sulfure de Cadmium CdS est un semi-conducteur II-VI constitué par l'association des atomes de la colonne II (Cd) avec ceux de la colonne VI (S) du tableau périodique des éléments chimiques. Le CdS possède deux types de structures [21] :

La structure cubique zinc blende de la Sphalérite à face centrée représentée dans la figure 2.6(a) ou la structure hexagonale de la Wurtzite représentée dans la **figure 2.6(b)** :

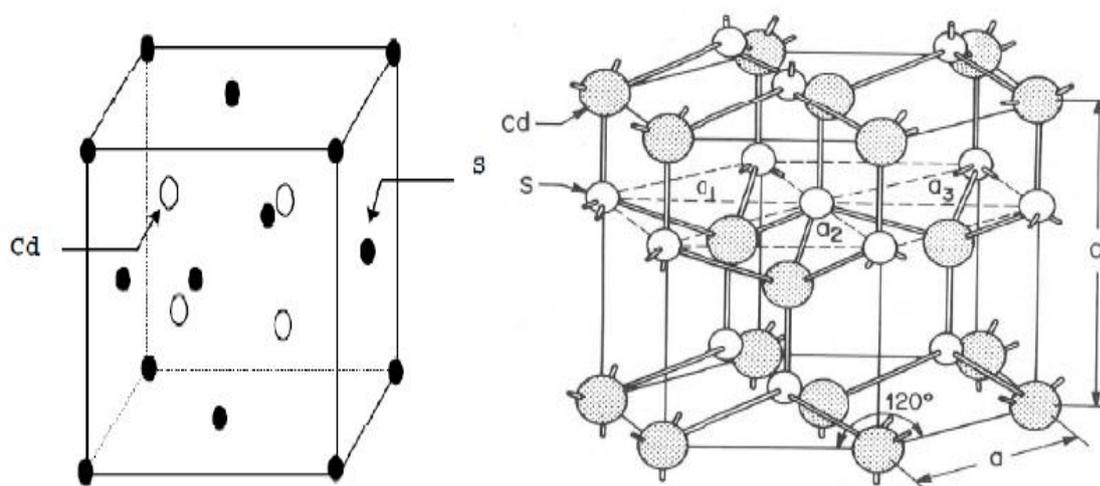


Figure 2.6 : (a) Structure zinc blende du CdS, (b) Structure Wurtzite du CdS [22].

3.1.2 Propriétés physiques du CdS :

Le **tableau 2.7** regroupe les différentes propriétés physiques du matériau de Sulfure de Cadmium CdS :

Propriétés	Structure de CdS	
	Zinc-blende	Wurtzite
Paramètres de maille (nm)	$a_0 = 0.582$	$a_0 = 0.4135$ $c_0 = 0.664$
Masse volumique (g.cm^{-3})		4.82
Energie du gap E_g (eV)		2.50
Point de fusion ($^{\circ}\text{C}$)		1750
Indice de réfraction		2.506, 2.529
Constante diélectrique statique	9.3	
Constante diélectrique optique	6.3	
Masse effective de l'électron	$0.19 m_0$	
Masse effective du trou	$0.8 m_0$	
Rayon de Bohr (nm)	3	

Tableau 2.7 : Propriétés physiques de Sulfure de Cadmium à $T=300^{\circ}\text{K}$ [22].

3.1.3 Propriétés électriques :

Les propriétés électriques des couches minces de CdS sont liées aux paramètres d'élaboration. Le Sulfure de Cadmium est un semi-conducteur de type n. La résistivité convenable pour un usage photovoltaïque (entre 1 et $100 \Omega \cdot \text{cm}$) pour des couches minces de CdS d'épaisseur variant entre 1 et $4 \mu\text{m}$ ne peut être obtenue qu'après dopage ou un recuit thermique adéquat. La résistivité électrique est généralement très grande à cause de la très faible épaisseur des couches élaborées, elle peut atteindre des valeurs dépassant $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ et chute à 10^3 et $10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$ après traitement thermique [22].

3.1.4 Propriétés optiques :

Les films en CdS ont un taux de transmission compris entre 50 et 70 % dans les régions visibles (520-850) nm qui permettent de les utiliser comme des couches fenêtres dans les cellules solaires. Le CdS en couche mince est un matériau à gap optique direct, sa valeur varie entre 2.33 et 2.56 eV [23]. L'indice de réfraction de couche mince en CdS est 2.5 [24].

3.2 Domaines d'application du CdS :

Les films du CdS très minces sont utilisés comme des couches tampons de type n dans les cellules solaires en couches minces basées sur les hétérojonctions (CuInSe_2 , CuInGaSe_2) ou CdTe. Plusieurs groupes de recherches ont effectués des travaux fondamentaux sur les hétérojonctions CdS en utilisant le CIX (CuInSe_2 , CuInS_2) ou le CdTe dans leurs procédés, le CdS agissant en tant qu'interface [25].

Nous trouvons aussi le CdS dans des différentes utilisations comme : la galvanoplastie, les accumulateurs alcalins, l'industrie nucléaire et la fabrication des composés chimiques.

4. L'Oxyde de Zinc ZnO :

4.1 Propriétés du ZnO :

4.1.1 Propriétés structurales :

L'oxyde de zinc ZnO est un semi-conducteur binaire de type II-VI non toxique en comparaison avec le CdS[22]. Sa cristallisation se fait selon le système hexagonal structure Wurtzite. Comme il est représenté dans la **figure 2.7** : on a quatre atomes d'oxygène placés au sommet d'un tétraèdre et entourent chaque atome de zinc et vice versa.

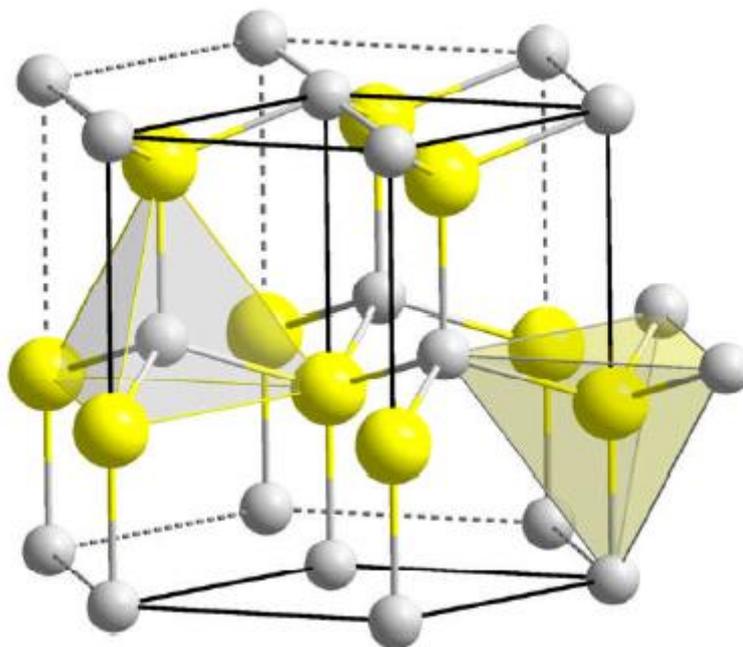


Figure 2.7 : Structure cristalline du ZnO : Zn (en jaune) O (en gris) [22].

4.1.2 Propriétés électriques :

Le semi-conducteur ZnO est à gap direct. La largeur de la bande interdite varie suivant le mode de préparation et le taux de dopage. Elle est située entre 3.3 et 3.4 eV[22].

Le **tableau 2.8** regroupe les différentes propriétés électriques de ZnO :

Nature de la bande interdite	directe
Langueur de la bande interdite à 300°K	3.4
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 10 ¹⁸ cm ⁻³
Densité d'états dans BV	1.16 10 ¹⁹ cm ⁻³
Résistivité maximale	10 ⁶ Ω.cm
Résistivité minimale	10 ⁻¹ Ω.cm

Tableau 2.8 : Quelques propriétés électriques du ZnO [26].

4.1.3 Propriétés optiques :

Dans le domaine visible, le ZnO est un matériau transparent. Il présente un intérêt considérable qui réside dans ses propriétés remarquables telles que la largeur de sa bande interdite qui permet d'émettre du visible à l'ultraviolet[22].

Le **tableau 2.9** nous présente quelques propriétés optiques de l'Oxyde de Zinc ZnO :

Coefficient d'absorption α (cm^{-1})	10^4
Indice de réfraction n à 560 nm	1.8 -1.9
Constante diélectrique ϵ	8.7
Transmittance T (visible)	80% - 90%

Tableau 2.9 : Quelques propriétés optiques du ZnO [27].

4.2 Domaines d'application du ZnO :

Les films minces du ZnO sont utilisés comme contact électrique transparent pour les cellules solaires en couches minces. De plus, ils sont utilisés dans les dispositifs électroniques tels que les redresseurs et les filtres. Ils sont également utilisés en télécommunications dans les résonateurs, (pour les communications radio), et dans les traitements d'images ainsi que dans les dispositifs à onde acoustique de surface. nous les trouvons aussi dans les systèmes lasers et les diodes électroluminescentes [26].

5. La conception d'une cellule solaire à base de CIGS :

Une cellule solaire en CIGS est constituée par la déposition successive de plusieurs matériaux en couches minces sur un support. La **figure 2.4** représente sa structure standard avec ses principaux éléments :

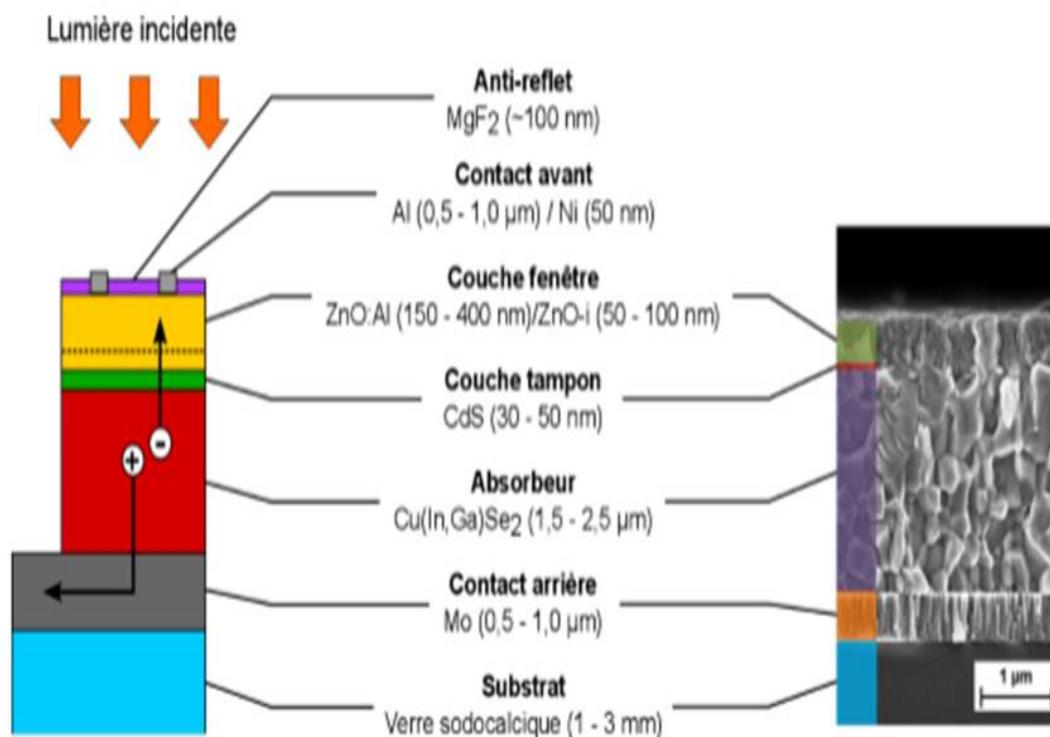


Figure 2.8 : Schéma (à droite) et image par microscopie électronique à balayage (MEB) (à gauche) de l'architecture classique d'une cellule PV à base de CIGS. Sur l'image MEB, la cellule n'a pas de couche anti-reflet et le contact avant n'apparaît pas [28].

5.1 Le substrat :

Le substrat est le support qui permet la tenue mécanique des différentes couches, il est généralement en verre Sodacalcique (Soda Lime Glass SLG) pour assurer la rigidité des cellules CIGS en raison de ses propriétés particulièrement adaptées tels que [14] :

- C'est un isolant électrique, nous permet d'éviter le court-circuit entre la cellule et le contact arrière.
- Possède une transparence élevée.
- Améliore les performances des cellules grâce au sodium contenu dans le verre.
- Présente une bonne tenue mécanique aux températures élevées.
- Possède une rugosité de surface très faible de l'ordre de nanomètre.
- Favorise la croissance de couche denses et des interfaces de qualité.
- Son coefficient de dilatation thermique vaut $9.10^{-6}K^{-1}$.

Bien que le verre soit le substrat le plus généralement utilisé, récemment un certain effort a été fait pour développer les piles solaires flexibles sur les substrats métalliques. Ils ont l'avantage de bien résister aux températures rencontrées lors des synthèses du CIGS, sont plus légers que les verres [14].

Parmi les substrats métalliques utilisés :

Le substrat métallique	Le rendement
Acier inoxydable	17.7% [7]
Titane (Ti)	16.2% [7]
Aluminium (Al)	17.1% [7]

Tableau 2.10 : Les différents substrats métalliques avec leurs rendements.

4.2 Le contact arrière :

C'est une couche de Molybdène déposée sur le substrat généralement par pulvérisation cathodique dont le rôle est de collecter les transporteurs de l'absorbeur et les livrer à la charge externe [14]. Son épaisseur est habituellement comprise entre 0.5 et 1 μm .

Le Molybdène est souvent le matériau le plus utilisé pour ses propriétés physiques tels que :

- Un bon conducteur électrique.
- Résiste aux températures élevées (550 et 600°C).
- Ne réagit pas avec le CIGS.
- Sa capacité de produire un contact ohmique avec le CIGS.

En effet, la réaction du Molybdène (Mo) avec le Sélénium (Se) permet la formation du MoSe_2 qui va agir comme une barrière au passage des porteurs et entraîne des pertes résistives au sein de la cellule [14]. Le MoSe_2 est considéré comme un semi-conducteur avec un gap de 1.41 eV il est plus élevé que celui du CIGS et permet de diminuer les recombinaisons à l'interface de ces deux couches [29].

C'est pour ces raisons que le Molybdène a été choisi comme le matériau communément utilisé par les laboratoires de recherche et en industrie parmi plusieurs métaux étudiés comme :

Le Tungstène (W), le Chrome (Cr), le Tantale (Ta), le Vanadium (V), le Manganèse (Mn), L'Aluminium (Al), l'Or (Au), l'Argent (Ag), le Cuivre (Cu) et le Niobium (Nb) [30].

4.3 L'absorbeur :

L'absorbeur en Cu(In,Ga)Se_2 est un matériau polycristallin semi-conducteur de la famille I-III-VI₂ avec un gap compris entre 1.04 et 1.68 eV (correspondant respectivement aux gaps du CuInSe_2 et du CuGaSe_2) et un coefficient d'absorption élevé, de l'ordre de 10^4 à 10^5 cm^{-1} pour les longueurs d'ondes inférieures à 1000 nm [30]. L'absorbeur est défini comme la partie responsable de la conversion des photons en paires électrons-trous.

Pour le dépôt de la couche de CIGS, généralement deux voies sont employées :

- La co-évaporation :
- Le recuit de précurseurs métalliques en présence de Sélénium ou de H_2Se .

4.4 La couche tampon :

La couche tampon est un semi-conducteur de type N avec un gap qui doit être supérieur à celui de l'absorbeur. Cette couche est déposée sur l'absorbeur (CIGS) son épaisseur est comprise entre 30 et 50 nm [31].

La couche tampon joue le rôle d'une couche protectrice car lors du dépôt par pulvérisation cathodique de la couche de fenêtre, qui peut engendrer la formation de défauts à la surface de CIGS[14].

Elle sert également à limiter les recombinaisons des porteurs à l'interface de la couche fenêtre et le CIGS.

Le matériau CdS déposé en bain chimique représente le meilleur semi-conducteur type N pour l'application de la couche tampon car il conduit aux meilleurs rendements, mais il représente un métal lourd et très polluant donc plusieurs études sont menées pour combiner le CdS par d'autres matériaux, parmi eux on a : In_2S_3 , $\text{Zn}(\text{O},\text{OH})$, $\text{In}(\text{OH},\text{S})$, ZnS , $\text{Zn}(\text{O},\text{S})$, ZnSe [32] [13].

4.5 La couche fenêtre :

La couche fenêtre est constituée d'une fine couche isolante en ZnO sur laquelle est déposée une couche transparente conductrice pour assurer le transport latéral des charges électriques [29].

Le ZnO est souvent utilisé dans l'application des couches fenêtres pour ses effets bénéfiques tels que :

- Il permet d'éviter le court-circuit qui peut survenir entre le CIGS et la couche conductrice supérieure [34].
- Il permet de diminuer les effets liés aux variations de composition de l'absorbeur sur les performances des cellules [35].

4.6 Le contact avant :

Le contact en face avant des cellules est réalisé via des grilles métalliques généralement constituées d'une couche de Ni de quelques dizaines de nanomètres d'épaisseur déposée sur le TCO, et d'une couche d'Al de 0,5 à 1,0 μm d'épaisseur[35]. Le Ni sert à éviter l'oxydation de l'Aluminium par l'Oxygène du TCO.

4.7 La couche anti-reflet :

La couche anti-reflet est généralement en MgF_2 et a une épaisseur de l'ordre de 100 nm [28]. Le principe est de déposer un matériau d'indice de réfraction compris entre celui de l'air et celui de la couche fenêtre avec une épaisseur fixée de manière à diminuer les pertes optiques et ainsi générer un plus grand nombre de paires électrons-trous qui pourront contribuer au courant électrique[31].

6. Conclusion :

Le matériau CIGS est un semi-conducteur prometteur pour les applications photovoltaïques vu ses caractéristiques très intéressantes.

Une cellule solaire en CIGS est composée d'un dépôt successif de plusieurs matériaux en couches minces. Dans ce présent chapitre, nous avons donné une étude approfondie sur les propriétés structurales, électroniques, électriques et optiques des semi-conducteurs en CIGS, CdS et ZnO constituant une cellule solaire. La bonne compréhension des propriétés de ces matériaux est nécessaire dans le but d'optimiser un dispositif à base de CIGS.

Références bibliographiques :

- [1] D. Lincot et J.-F. Guillemoles, « Cellules solaires en couches minces à base de CuInSe_2 », *Reflète Phys.*, n° 5, p. 16-19, doi : 10.1051/refdp/2007060, juill. 2007.
- [2] MOSTEFA KARA Selma «étude et simulation de cellules photovoltaïques en couche minces à base de CIS et CIGS », Mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid Tlemcen, Juin 2012.
- [3] André Joffre et Erkan Aydin (KAUST), Yi Hou et Michele De Bastiani (KAUST), « Les cellules solaires tandem TecSol », Université de Toronto, mars 30, 2020.
- [4] E. Mourad, « Etude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS à multi-jonction par le logiciel Tcad Silvaco », thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 21/06/2018.
- [5] Linda SAAD HAMIDECHE «Etude des propriétés du matériau ternaire CuInSe_2 à base de Cu de la famille des chalcopyrites Cu-III-VI_2 », thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2012.
- [6] Y. Liu, D. Kong, J. Li, C. Zhao, C. Chen, et J. Brugger, « Preparation of Cu (In, Ga) Se_2 Thin Film by Solvothermal and Spin-coating Process », *Energy Procedia*, vol. 16, p. 217-222, 2012, doi : 10.1016/j.egypro.2012.01.036.
- [7] S. Kalache, « Etude par simulation numérique une cellule solaire en CIGS », mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, juin 2017.
- [8] D. Chaimaa, « Optimisation du rendement de conversion photovoltaïque des cellules solaires à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium "CIGS" », Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri, 2017.
- [9] J. H. Yoon, W. M. Kim, J. K. Park, Y. J. Baik, T. Y. Seong, et J. H. Jeong, « Control of the preferred orientations of Cu(In, Ga)Se_2 films and the photovoltaic conversion efficiency using a surface-functionalized molybdenum back contact », *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 22, n° 1, p. 69-76, janv. 2014, doi : 10.1002/pip.2338.
- [10] M. A. Contreras, K. M. Jones, L. Gedvilas, et R. Matson, « Preferred Orientation in Polycrystalline Cu(In, Ga)Se_2 and Its Effects on Absorber Thin-Films and Devices », p. 7.
- [11] Mohit RAGHUWANSHI « Influence de la chimie des joints de grains sur les propriétés des cellules photovoltaïques Cu(In, Ga)Se_2 », mémoire de Master, Université de Rouen, 20 Octobre 2015.
- [12] K. Fotis, « Modeling and Simulation of a Dual-Junction CIGS Solar Cell Using Silvaco ATLAS », Naval Postgraduate School Monterey, déc. 2017.
- [13] HAOUA Makhlof, « Effet des couches conductrices et transparentes sur les performances des cellules solaires Cu(In, Ga)Se_2 », mémoire de Master, Université Ferhat Abbas – Sétif- 1 – UFAS (ALGERIE) », p. 95, déc. 2016.
- [14] A. CHADEL, « optimisation et simulation numérique du profil de la couche absorbante et des différentes couches de cellules photovoltaïques à base de CIGS », thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, p. 116, 2017.
- [15] C. Hichem, « Etude d'une cellule solaire à base de CIGS (ZnS/CdS/ZnSe) », mémoire de Master, Université Saad Dahlab Blida, p. 60, 2018 2017.
- [16] D. Lincot, S. Collin, J. Even, et J.-P. Kleider, « Silicium, couches minces, pérovskites, photonique : de nouvelles avancées de la recherche sur les cellules photovoltaïques. Un bon signe pour la COP 21 », *Photoniques*, n° 78, p. 23-27, sept. 2015, doi : 10.1051/photon/20157823.
- [17] S. BOUCHEKOUF, « La cellule solaire à hétérojonction non conventionnelle en CIGS », Thèse de Doctorat, 2017. .
- [18] G. A. Prinz, « Magnetolectronics applications », *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 200, n° 1, p. 57-68, oct. 1999, doi : 10.1016/S0304-8853(99)00335-2.
- [19] A. Bournel, « Magnéto-électronique dans des dispositifs à semi-conducteurs », vol. 25, janv. 2016, doi : 10.1051/anphys : 200001001.
- [20] Luvodic Deblois, « Revêtements solaires photovoltaïques » *Ecosources* Article publié le 22 juin 2017.
- [21] I. N. Orgorodnikov, V. A. Pustovarov, V. S. Chermnykh ; *Optics and Spectroscopy* 95 2 413, 2001.

- [22] Amar Hichem, « Propriétés électriques de cellule solaire à base diséléniure de Cuivre Indium Galium CIGS », mémoire de Magister, Université Mohamed Khider Biskra Faculté des Sciences et de la technologie Département : Génie Electrique, 2014.
- [23] Li Wenyi, Cai Xun, Chen Qiulong, Zhou Zhibin, « Influence of growth process on the structural, optical and electrical properties of CBD-CdS films »- ScienceDirect.
- [24] E. Çetinörgü, C. Gümüş, et R. Esen, « Effects of deposition time and temperature on the optical properties of air-annealed chemical bath deposited CdS films », *Thin Solid Films*, vol. 515, n° 4, p. 1688-1693, doi : 10.1016/j.tsf.2006.06.004, déc. 2006,
- [25] REZKI Hourya, «Elaboration et caractérisation des couches minces CuInS₂, CdS pour la formation d'une jonction p-n ; application cellules photovoltaïques», mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2014-2015.
- [26] Chelouche Salim, « Propriétés des fenêtres optiques ZnO : Al pour cellules solaires en couches minces à base de CIGS », mémoire de magister, université de Sétif, 2012.
- [27] J. T. Chen *et al.*, « The effect of Al doping on the morphology and optical property of ZnO nanostructures prepared by hydrothermal process », *Appl. Surf. Sci.*, vol. 255, n° 7, p. 3959-3964, doi : 10.1016/j.apsusc.2008.10.086, Jan.2019
- [28] Arnaud Gerthoffer, « Propriétés mécaniques des cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats en verre ultra-fin - TEL - Thèses en ligne, 12/01/2018.
- [29] P. Jackson, R. Wuerz, D. Hariskos, E. Lotter, W. Witte, et M. Powalla, « Effects of heavy alkali elements in Cu (In, Ga) Se₂ solar cells with efficiencies up to 22.6 % », *Phys. Status Solidi RRL - Rapid Res. Lett.*, vol. 10, juill. 2016, doi: 10.1002/pssr.201600199.
- [30] M. Mostefaoui, H. Mazari, S. Khelifi, A. Bouraiou, et R. Dabou, « Simulation of High Efficiency CIGS Solar Cells with SCAPS-1D Software », *Energy Procedia*, vol. 74, 2015,
- [31] P. Jackson, R. Wurcz, U. Rau, J. Mattheus, M. Kurth, T. Schlotzerf, G. Bilger et J. H. Werner, « High quality baseline for high efficiency, Cu (In_{1-x}, Ga_x) Se₂ solar cells », *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, vol. 15, no. 6, p. 507–519, 2007.
- [32] N. Naghavi, D. Abou-Ras, N. Allsop, N. Barreau, S. Bücheler, « Electrodeposition of In₂S₃ buffer layer for Cu (In, Ga) Se₂ solar cells » - *ScienceDirect Energy Procedia Volume 10*, 2011, Pages 155-160, sept. 2010.
- [33] U. Rau et M. Schmidt, « Electronic properties of ZnO/CdS/Cu (In, Ga) Se₂ solar cells - Aspects of heterojunction formation », *Thin Solid Films*, vol. 387, p. 141-146, doi : 10.1016/S0040-6090(00)01737-5, mai 2001.
- [34] U. Rau, P. O. Grabitz, et J. H. Werner, « Resistive limitations to spatially inhomogeneous electronic losses in solar cells », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 85, n° 24, p. 6010-6012, doi : 10.1063/1.1835536, déc. 2004.
- [35] A. Romeo *et al.*, « Development of thin-film Cu (In, Ga) Se₂ and CdTe solar cells », *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 12, n° 23, p. 93-111, doi : 10.1002/pip.527, mars 2004.

Chapitre 03

Techniques d'élaboration des couches minces à base de CIGS

Chapitre 03 : Techniques d'élaboration des couches minces à base de CIGS

1. Introduction	59
2. Notion des couches minces	59
3. Techniques de dépôt des couches minces à base de CIGS	60
3.1 Procédés physiques PVD	60
3.1.1 Evaporation sous vide	60
3.1.2 Ablation Laser PLD.....	62
3.1.3 Pulvérisation cathodique.....	63
3.2 Procédés chimiques.....	64
3.2.1 Dépôt chimique en phase vapeur CVD	64
3.2.2 Sol-gel	65
3.2.3 Pyrolyse par Spray	66
3.2.4 Bain chimique CBD	66
4. Les étapes de formation des couches minces	68
4.1 La nucléation	68
4.2 La coalescence	69
4.3 La croissance	69
5. Nuance sur quelques domaines d'applications des couches minces	70
5.1 Couches minces dans les dispositifs électroniques.....	70
5.2 Technologies pour les capteurs	70
5.3 Couche pour l'optique.....	70
5.4 Couches de protection.....	70
5.5 En thermique	71
5.6 En biologie	71
5.7 En mécanique	71
5.8 En médecine	71
5.9 En décoration.....	71
6. Conclusion.....	71
Références bibliographiques.	

Chapitre 03 : Techniques d'élaboration des couches minces à base de CIGS

1. Introduction :

L'élément de base dans la conversion du rayonnement de la lumière en énergie électrique est la cellule photovoltaïque. Les cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser le meilleur rapport entre le rendement énergétique et le prix de revient[1].

Actuellement, la filière photovoltaïque basée sur les couches minces prend son envol industriel. Celui-ci est porté par des performances très élevées en matière de rendement de conversion atteignant 19.5%.

Dans ce troisième chapitre, nous nous focalisons sur la notion des couches minces à base de CIGS. Nous décrirons les diverses techniques de dépôt de couches minces physiques et chimiques, ensuite, nous allons voir quelles sont les trois principales étapes de formation des films, et nous terminerons notre chapitre en citant les différents domaines d'application des couches minces.

2. Notion des couches minces :

Par principe, une couche mince est une fine pellicule d'un matériau déposé sur un autre matériau appelé « substrat »[2].

L'épaisseur qui représente l'une des dimensions importante d'une couche mince a été fortement réduite de telle sorte qu'elle varie de quelques nanomètres "nm" à quelques micromètres "µm" (typiquement ce sont des couches de 10 ... 100 nanomètres d'épaisseur)[3] [2].

La seconde caractéristique essentielle d'une couche mince est que, quelle que soit la procédure employée pour sa fabrication, une couche mince est toujours solidaire d'un support sur lequel elle est construite, à savoir que le support influence très fortement les propriétés structurales de la couche qui y est déposée[4].

La technologie en couches minces dite de deuxième génération est développée dans le but d'augmenter les rendements tout en diminuant les coûts de fabrication.

La couche mince	L'épaisseur	Rendement en laboratoire
CIGS	1-2.5µm[5]	25% [6]
CZTS	1.5µm[7]	12.6% [7]
CdTe	3-8 µm[5]	22% [8]
Si : H amorphe	3µm[5]	14% [9]

Tableau 3.1 : Rendements des cellules photovoltaïques à base des couches minces différentes.

3. Techniques de dépôt des couches minces à base de CIGS :

Il existe deux grands procédés de dépôt des couches minces :

- Procédés physiques : « Physical Vapor Deposition » PVD généralement utilisés dans la recherche. Ils présentent beaucoup d'avantages, par exemple les films sont denses, le processus est facile à contrôler et il n'y a pas de pollution[10].
- Procédés chimiques : « Chemical Vapor Deposition » CVD généralement utilisés dans l'industrie vu sa qualité des films et son rendement obtenus.

La classification des procédés de dépôt des couches minces est représentée sur la **figure 3.1** :

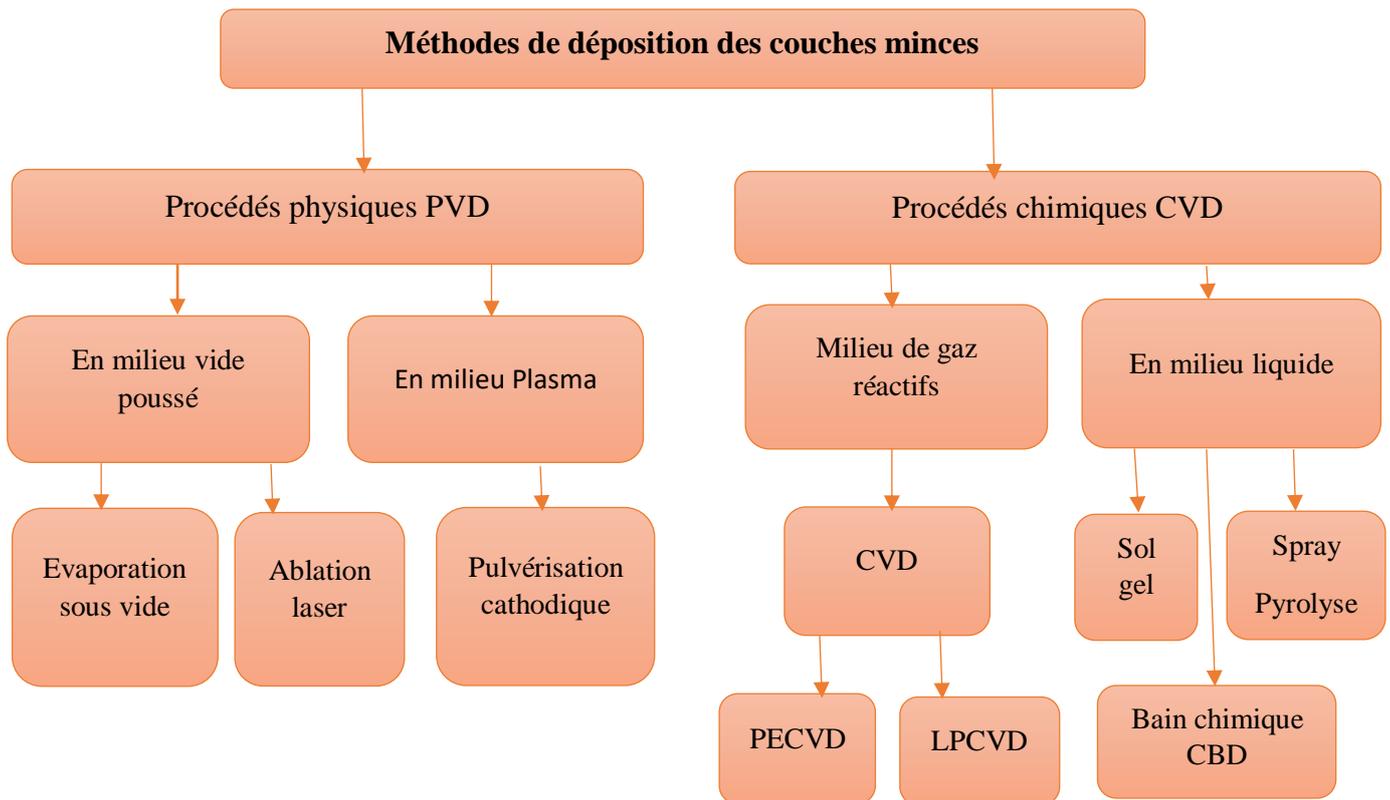


Figure 3.1 : Classification des procédés de dépôt de couches minces.

3.1 Procédés physiques PVD :

3.1.1 Evaporation sous vide :

Le principe de la technique d'évaporation est assez simple, elle consiste à évaporer ou bien à chauffer le matériau qui va être déposé dans un creuset (généralement on utilise le tungstène). L'évaporation est effectuée sous un vide poussé avec une pression comprise entre 10^{-3} et 10^{-4} Pa et à haute température. Cette dernière doit être inférieure à celle de la fusion du creuset[2] [3].

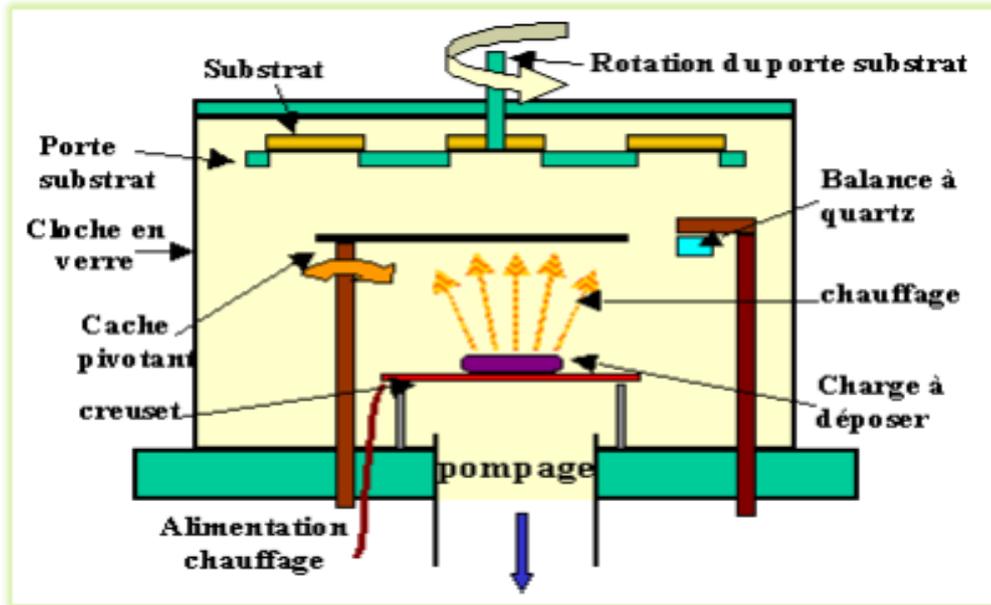


Figure 3.2 : Bâti de dépôt par évaporation sous vide[11].

Il existe des méthodes pour chauffer le matériau, nous citons :

- **Par Effet de Joule** : Ce type d'évaporation consiste à déposer le matériau désiré par évaporation par un filament, nacelle ou creuset, généralement fabriqué à base de métaux réfractaires (tungstène, tantale, molybdène, ou en alumine) dans une chambre sous vide de l'ordre 10^{-6} à 10^{-7} Torr[12].

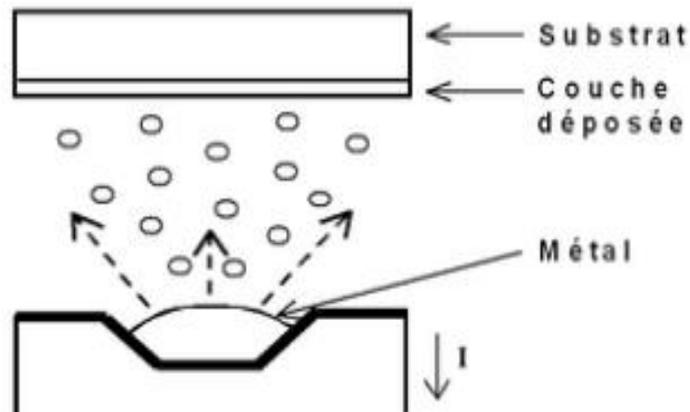


Figure 3.3 : Schéma du principe de l'évaporation par Effet de Joule[3].

- **Par bombardement électronique :** Cette technique consiste à porter un filament généralement en tungstène, à une haute tension négative pour l'accélération des électrons, et les focaliser par voie électromagnétique ou électrostatique vers la cible à évaporer. Ainsi l'énergie cinétique des électrons est convertie en énergie thermique pour évaporer le matériau[12].

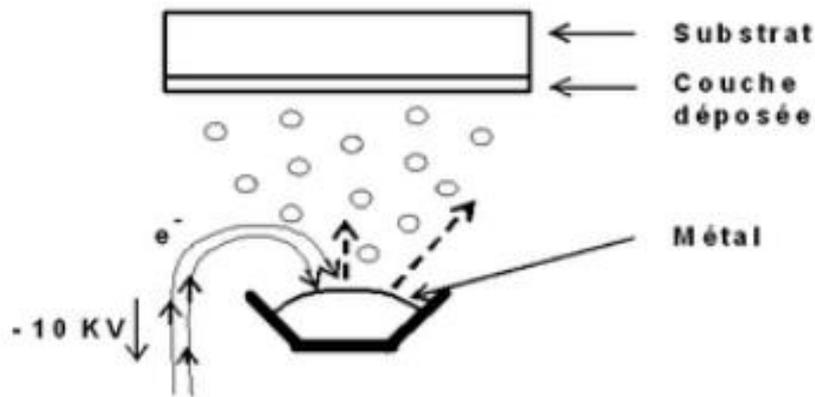


Figure 3.4 : Schéma du principe de l'évaporation par bombardement électronique[3].

3.1.2 Ablation Laser PLD :

Cette technique a été proposée par l'équipe de **Bell Core** et rapidement appliquée par d'autres groupes[2]. L'ablation par laser pulsé (Pulsed Laser Deposition) consiste à focaliser un laser sur une cible fixée de quelques centimètres du substrat. Il s'agit d'une technique polyvalente qui permet d'élaborer des matériaux d'une grande pureté [10]. En fait, le processus d'ablation-dépôt est plus complexe, puisqu'il se forme localement une plume de plasma et que les particules éjectées ne sont pas en équilibre thermodynamique. Son avantage principal se réalise dans sa capacité de déposer des couches avec une stœchiométrie contrôlée. Cette méthode présente également l'avantage de ne nécessiter aucune source thermique polluante à l'intérieur de l'enceinte[13].

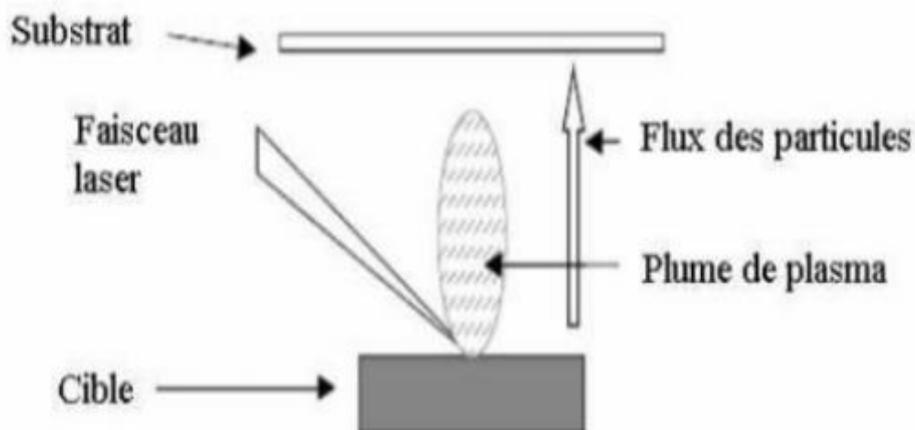


Figure 3.5 : Schéma conventionnel d'un système d'ablation Laser[3].

3.1.3 Pulvérisation cathodique :

La pulvérisation cathodique a été mise en évidence par Grove en 1852[14]. Le principe de base de la pulvérisation cathodique est de bombarder une cible (cathode) à l'aide d'un gaz neutre (en général l'argon) afin de pulvériser les atomes constituant la cible. Sous l'effet de différence de potentiel, les ions argon attirés par la cathode, bombardent la cible de pulvérisation. Des atomes de la cible sont alors éjectés et vont se déposer sur les substrats qui jouent le rôle d'anode[13] [14].

Lorsque l'ion attiré par le champ électrique vient alors bombarder la cathode soit :

- Il sera réfléchi.
- Il va rencontrer un électron donc il devient neutre.
- Il peut causer l'éjection d'un électron.
- Il va arracher un atome de la cible.

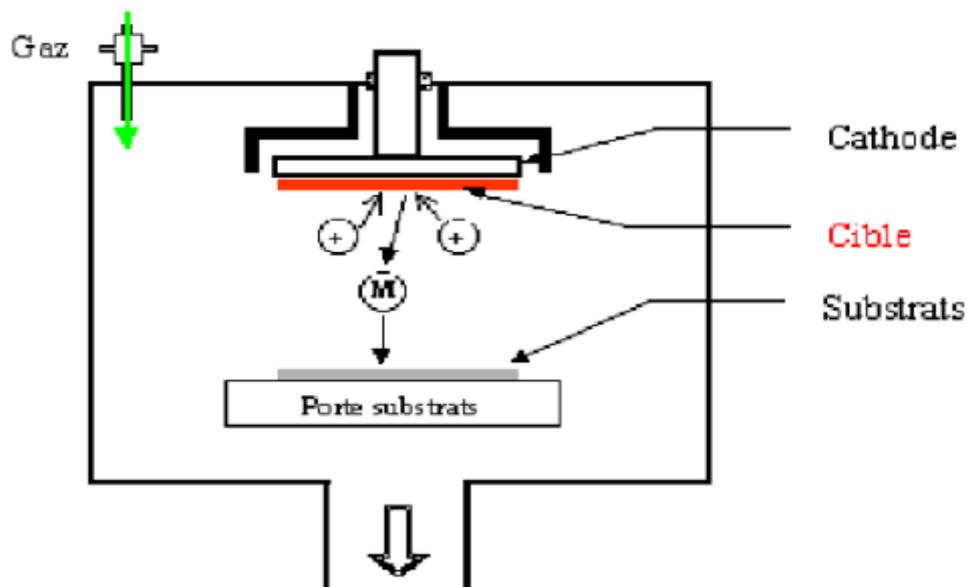


Figure 3.6 : Schéma conventionnel d'un pulvérisateur cathodique[3].

Dans la pulvérisation cathodique nous distinguons la pulvérisation simple et la pulvérisation réactive et il existe différents types de systèmes de pulvérisation cathodique, suivant le mode de création du plasma où la nature de la cible [21].

3.2 Procédés chimiques :

3.2.1 Dépôt chimique en phase vapeur CVD :

Le dépôt en phase vapeur chimique CVD (Chemical Vapor Deposition) est une méthode dans laquelle le ou les constituants d'une phase gazeuse réagissent pour former un film solide déposé sur un substrat[15].

Les réactions chimiques nécessitent souvent une température très élevée, de l'ordre de 800°C-1000°C pour qu'elles soient provoquées. Elles peuvent être activées de différentes manières :

- Thermiquement : (chauffage par effet de Joule, induction,...)[15].
- Par impact électronique PECVD : permet de localiser sur les pièces différentes zones le recours aux composés organométalliques OMCVD abaissant considérablement les températures d'obtention du dépôt[16].
- Par des photons LPCVD : la basse pression donne des dépôts uniformes sur des objets de formes diverses LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition); c'est le cas de réacteur à paroi chaude qu'il est chauffé directement[16].

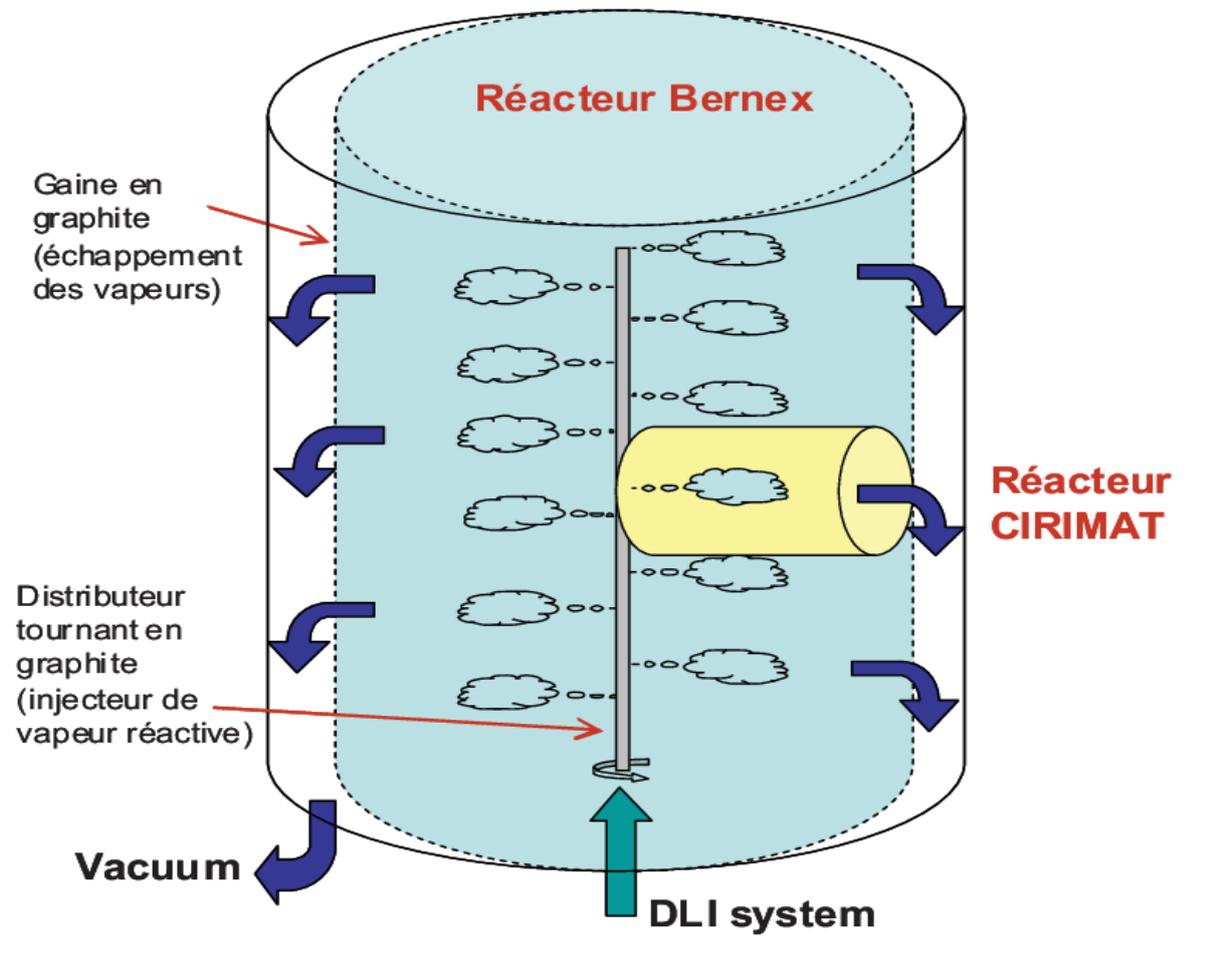


Figure 3.7 : Schéma de principe de dépôt en phase vapeur chimique[17].

3.2.2 Sol-gel :

Sol- gel correspond à l'abréviation de « solution gélification »[3], le principe de base de ce procédé est le suivant : une solution à base de précurseurs en phase liquide, se transforme en un solide par un ensemble de réactions chimiques de type polymérisation à température ambiante[18].

Le dépôt par Sol-gel peut être réalisé de deux manières différentes :

- **Le spin-coating** : ou centrifugation consiste à verser le sol ou le gel sur un substrat mis en rotation par une tournette. Le liquide en excès est éjecté sous l'action de la force centrifuge, et l'épaisseur du dépôt est alors fonction de la vitesse de rotation du substrat et du temps de dépôt[19].

L'avantage de cette méthode de mise en œuvre est l'obtention de films homogènes déposés sur différents types de substrats plats : verre, silicium, ...[20].

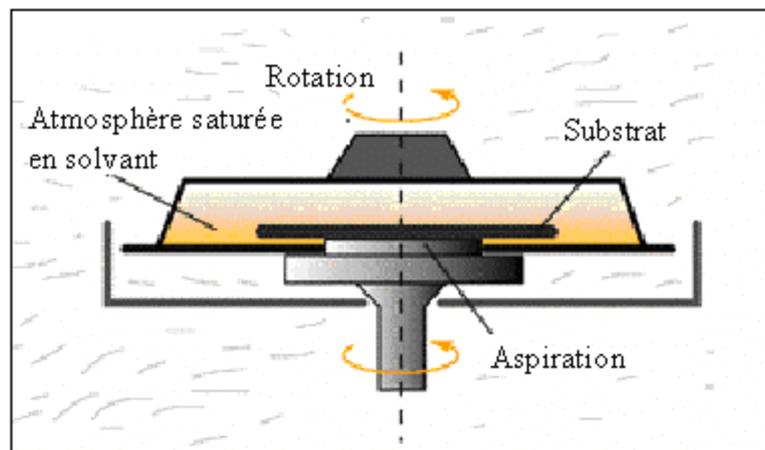


Figure 3.8 : Dispositif expérimental de dépôt par spin-coating[21].

- **Le dip-coating** : ou trempé, c'est le procédé qui consiste à tremper le substrat dans la solution à déposer et à le retirer ensuite avec une vitesse constante qui conditionne l'épaisseur du dépôt[19].

L'avantage de cette méthode est la possibilité d'obtenir de différentes épaisseurs et son faible coût d'investissement et de production.

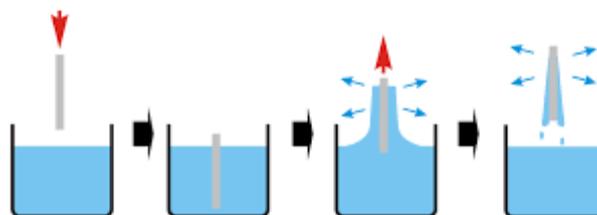


Figure 3.9 : Dépôt de couches minces par dip-coating[21].

3.2.3 Pyrolyse par Spray :

Le spray pyrolyse est une technique de dépôt utilisée pour préparer les films minces et épais. Les revêtements en céramique et les poudres. À la différence de beaucoup d'autres techniques de dépôt de film, le spray pyrolyse représente une méthode très simple et relativement rentable[17].

Cette technique de dépôt repose sur le fait qu'une solution de différents composés réactifs est vaporisée puis projetée, à l'aide d'un atomiseur, sur un substrat chauffé. La température du substrat permet l'activation de réaction chimique entre les différents composés, dits précurseurs[3].

L'expérience peut être réalisée à l'air, et peut être préparée dans une enceinte ou bien dans une chambre de réaction sous un vide, environ de 50 Torr[22].

La formation des films par la technique de Spray Pyrolyse peut être résumée comme suit :

- Formation des gouttelettes à la sortie du bec de la sonde.
- Décomposition de la solution des précurseurs sur la surface du substrat chauffé par réaction de Pyrolyse.

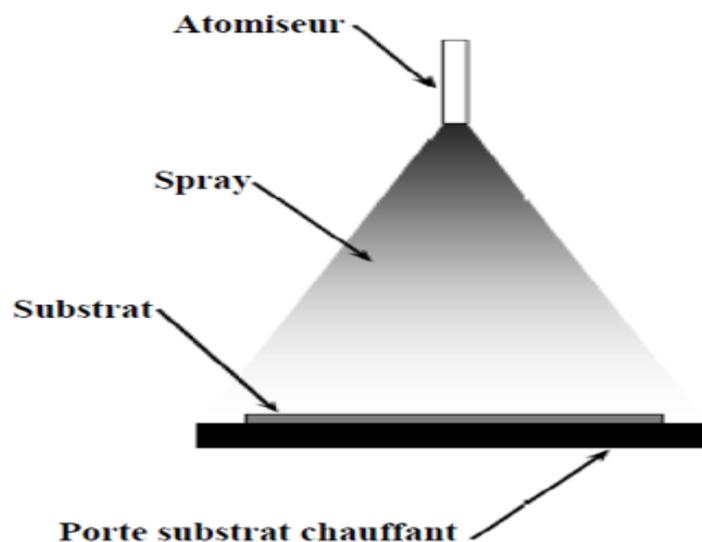


Figure 3.10 : L'équipement de dépôt par Spray Pyrolyse[19].

3.2.4 Bain chimique CBD :

Le dépôt des films par bain chimique est une technique très ancienne, nommée également technique de croissance en solution (solution growth)[15]. Actuellement, elle connaît un développement très important pour la préparation de couches minces.

Le dépôt chimique des films sur un substrat solide est dû à des réactions qui se produisent dans une solution aqueuse (bain chimique). Alors, le CBD est une technique dans laquelle les couches minces sont déposées sur des substrats immergés dans des solutions diluées contenant des ions métalliques et une source de chalcogénure[23].

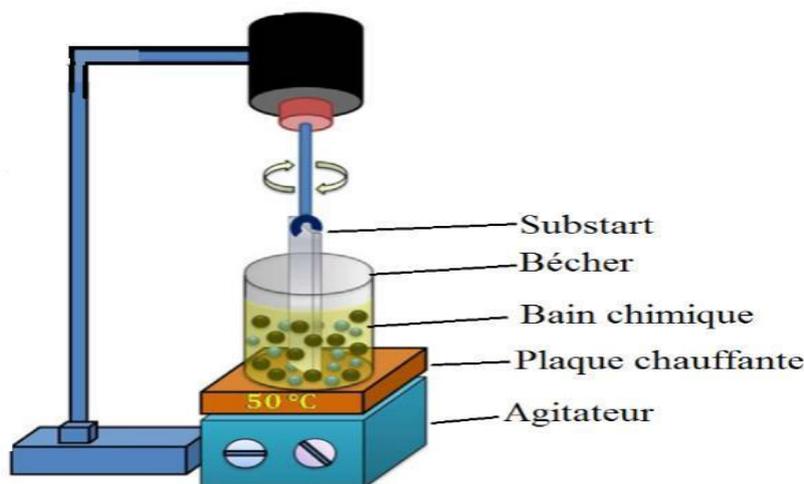


Figure 3.11 : Schéma représentatif de la méthode de dépôt par bain chimique[24].

Le **tableau 3.2**, résume les différents avantages et inconvénients de chaque technique de dépôt :

La technique	Avantages	Inconvénients
Evaporation sous vide	<ul style="list-style-type: none"> -Permet d'obtenir des couches minces de l'ordre de ηm. -Une méthode assez peu coûteuse. -Assure la pureté des du dépôt. 	<ul style="list-style-type: none"> -Ne permet pas la déposition de tous les matériaux.
Ablation Laser	<ul style="list-style-type: none"> -Réduction des risques de contamination des échantillons[25]. -Confinement de l'ablation sur une très petite surface[25]. 	<ul style="list-style-type: none"> -Fractionnement : enrichissement de la phase vapeur en éléments plus volatiles[25]. -Variation de la quantité de masse ablatée d'un cratère à l'autre, d'une région de la surface à l'autre, ou d'un échantillon à l'autre[25].
Pulvérisation cathodique	<ul style="list-style-type: none"> -Méthode assez simple. -Applicable pour tous les types des matériaux. 	<ul style="list-style-type: none"> -Coût d'installation est trop élevé. -La vitesse de dépôt est relativement faible.
Sol-Gel	<ul style="list-style-type: none"> -Elaboration des matériaux à basse température. -Contrôle possibles des cinétiques de la réaction. -Matériaux de grande pureté. -Homogénéité des produits finaux. 	<ul style="list-style-type: none"> -Coût élevé. -Temps de procédé est très long. -La production est volatile.

Spray pyrolyse	-Possibilité de déposer plus qu'un seul matériau. -Méthode assez simple. -Haute vitesse de croissance.	-Une évaporation trop rapide ou trop lente entraîne une réaction des précurseurs non désirée influant sur les propriétés du dépôt[25].
Bain chimique	-Méthode simple avec un faible cout. -Elle produit des dépôts de bonne qualité. -Ne nécessite pas de hautes températures. -La forme du substrat n'est pas importante.	-Une méthode très lente. -Le gaspillage de la solution après chaque dépôt.

Tableau 3.2 : Tableau récapitulatif des différents avantages et inconvénients de chaque méthode de dépôt.

4. Les étapes de formation des couches minces :

La croissance des films élaborés est faite en trois parties principales :

4.1 La nucléation :

C'est le phénomène qui accompagne les changements d'état du matériau et constitué de l'apparence, dans un environnement donné, de points de transformation dont une nouvelle structure physique ou chimique est développée.

Les espèces pulvérisées arrivant sur le substrat perdent leurs composantes normales au substrat de leur vitesse et sont physiquement adsorbées par la surface du substrat. Ces espèces ne sont pas thermodynamiquement en équilibre avec le substrat et se déplacent sur toute la surface de celui-ci. Dans cet état, elles interagissent entre elles et forment ce que l'on appelle de "clusters". Ces "clusters" appelés également nuclei, sont instables et tendent à se désorber. Sous certaines conditions de dépôt, ils entrent en collision avec d'autres espèces adsorbées et commencent à croître. Après avoir atteint une taille critique, ces clusters deviennent thermodynamiquement stables et la barrière de nucléation est franchie[17].

La **figure 3.12**, représente l'étape de la nucléation des couches minces :

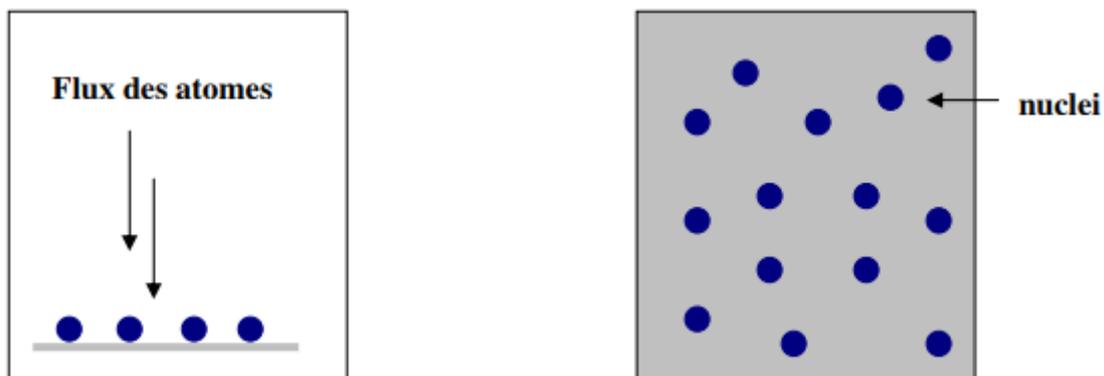


Figure 3.12 : Schéma de la nucléation des couches minces[17].

4.2 La coalescence :

Les noyaux croissent en taille mais aussi en nombre jusqu'à atteindre une densité maximale de nucléation. Celle-ci ainsi que la taille moyenne de ces noyaux aussi appelés îlots dépendent d'un certain nombre de paramètres tels que [17] :

- L'énergie des espèces pulvérisées,
- le taux de pulvérisation,
- l'énergie d'activation,
- de la diffusion thermique,
- de la température du substrat,
- de la topographie et de la nature chimique des substrats.

Un noyau peut croître à la fois parallèlement au substrat par un phénomène de diffusion surfacique des espèces pulvérisées. Il peut également croître perpendiculairement au substrat par apport d'espèces pulvérisées. En général la croissance latérale dans cette étape est beaucoup plus importante que la croissance perpendiculaire [16].

La phase de la coalescence est représentée sur la **figure 3.13** :

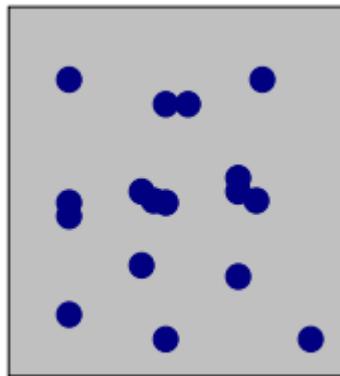


Figure 3.13 : Schéma de la coalescence des couches minces [16].

4.3 La croissance :

La dernière étape dans le procédé de fabrication du film est le regroupement des îlots. Cette tendance à former des îlots plus grands est améliorée par la croissance de la mobilité de surface des espèces adsorbées. Cette amélioration est obtenue en augmentant la température du substrat. Ces plus grands îlots croissent encore, en laissant des canaux et des trous sur le substrat. La structure du film dans cette étape change passant d'un type d'îlots discontinus en un type de réseaux poreux. Un film continu est formé en remplissant les canaux et les trous [16] [26].

La croissance des couches minces est représentée sur la **figure 3.14** :

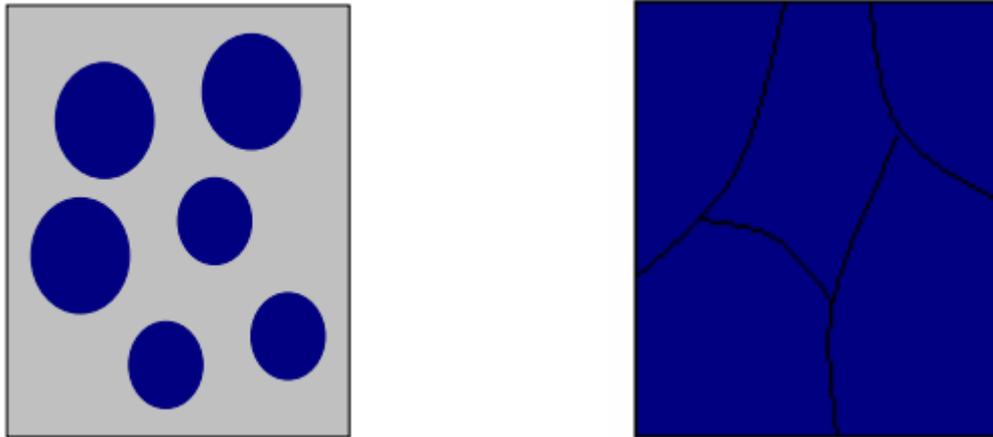


Figure 3.14 : Schéma de la croissance des couches minces[16].

5. Nuance sur quelques domaines d'applications des couches minces :

Les couches minces sont une des technologies de l'avenir pour plusieurs domaines surtout en micro et nanoélectronique. Leurs avantages sont entre autres un coût de fabrication moindre et des possibilités de dépôt sur différents type de substrat (rigide, flexible...)[27].

5.1 Couches minces dans les dispositifs électroniques :

Depuis le début du développement des composants semi-conducteurs intégrés, les technologies subtiles de la couche se sont révélées être un intérêt fondamental pour garantir les interconnexions entre des éléments distants de la même puce.

Les couches minces servent aussi beaucoup à la réalisation de dispositifs techniques très employés telles les têtes de lecture des disques durs (couches magnétiques) de nos ordinateurs, mais aussi les têtes d'impression de nos imprimantes à jet d'encre et bien entendu les cellules solaires[4].

5.2 Technologies pour les capteurs :

L'exploitation des technologies couches minces pour la réalisation de capteurs physiques ou chimiques est très importante. On peut distinguer les applications impliquant des substrats métalliques, ou des substrats de silicium, ou de céramique[4].

5.3 Couche pour l'optique :

En optique la technologie couche mince est principalement exploitée pour deux types d'application, d'une part les couches réfléchissantes et, d'autre part, les couches au contraire antireflet[28].

5.4 Couches de protection :

Les dépôts en couche mince peuvent aussi être employés, lorsqu'il s'agit de matériaux inaltérables pour protéger ou renforcer une surface métallique[4].

- Couches anti-corrosion
- Surfaces dures
- Surfaces de frottement

5.5 En thermique :

L'utilisation d'une couche barrière thermique diminue par exemple la température de surface du métal des ailettes des réacteurs permettant ainsi d'améliorer les performances des réacteurs (augmentation de la température interne)[4].

5.6 En biologie :

Micro capteurs biologiques, bio puces, matériaux biocompatibles ...[28].

5.7 En mécanique :

Réduction des frictions, amélioration d'adhésion, résistance mécanique[29].

5.8 En médecine :

Capteurs neurologiques, revêtement d'implant[29].

5.9 En décoration :

Revêtement des montres, lunettes, bijoux, équipements de maison[29].

6. Conclusion :

Ce chapitre avait pour but de faire un tour d'horizon des principaux procédés d'élaboration de couches minces. Dans un second temps, nous avons fait une présentation de principales étapes permettant la formation des couches minces. Enfin, nous avons appris que la couche mince, de l'ordre du nanomètre, est partout et améliore le fonctionnement de certains appareils dans le but d'œuvrer pour un développement durable.

Références bibliographiques :

- [1] S. Kalache, « Etude par simulation numérique une cellule solaire en CIGS », mémoire du Master, Université Mohamed Khider Biskra, juin 2017.
- [2] DARANFED Ouarda, « Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules solaires en couches minces à base de $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ », thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine1, 2013.
- [3] BOUCHOUAREB Khair-Eddine, « Elaboration et caractérisation des couches minces CuInS_2 », mémoire de Magister, Université d'Oran des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf, 2015.
- [4] Kenza KAMLI, « Elaboration et caractérisations physicochimique des couches minces de sulfure d'étain par spray ultrasonique : Effet des sources d'étain », mémoire de Magister, Université Mohamed Khider-Biskra, 25 / 04 / 2013.
- [5] JOLY Jean-Pierre, « Solaire photovoltaïque : les technologies et leurs trajectoires », Encyclopédie de l'énergie », mars 01, 2019.
- [6] C. Solaire, et P. C. Minces, « Actu, cellule solaire, Europe, Laboratoire, PV couches minces », L'Echo du Solaire, mars 03, 2020.
- [7] Q. M. Futura, « CZTS, une cellule solaire sans élément rare », Futura.
- [8] K. B. E. Amin, « Les technologies photovoltaïques : Entre la recherche scientifique et la réalité économique Division Energie Solaire Photovoltaïque - CDER », p. 2.
- [9] Benjamin WILKIN, Christophe Haveaux, « Photovoltaïque : deux innovations qui pourraient tout changer », Renouvelle, oct. 11, 2019.
- [10] Ahmed Abderrahim BENSEKHRIA, « Élaboration des couches minces de ZnO : V transparentes conductrices à basse pression et à pression atmosphérique pour applications photovoltaïques », thèse de Doctorat, Université du Québec Institut national de la recherche scientifique Centre Énergie Matériaux et Télécommunications, 13 Septembre 2020.
- [11] A. DERBALI, « l'effet de la distance du Bec et la température du substrat sur les propriétés des couche minces d'oxyde de zinc (ZnO) », Masters, Université Mohamed Khider-Biskra, 2011.
- [12] A. Richardt et I. Richardt, « Les évaporations sous vide : théorie et pratique » Edition INFINE Paris 2000. Paris : Ed. In Fine, 2000.
- [13] Stéphane ANDRIEU, « Introduction aux couches minces et réseaux », Laboratoire de Physique des Matériaux - UMR7556 CNRS - Université H. Poincaré, BP239 54506 Vandœuvre France,
- [14] Sonia Kartout, « Propriétés physiques des composés ternaires élaborés par dépôts séquentiels des éléments (Cu/Ga/Se) », Université 20 Aout 1955 Skikda, 22/10/2008.
- [15] SANA HARIECH, « Elaboration et caractérisation des couches minces de sulfure de cadmium (CdS) préparées par bain chimique (CBD) », Université Mentouri Constantine, 2016.
- [16] DARANFAD Ouarda, « Elaboration et caractérisation des couches minces de Sulfure de Zinc préparées par spray ultrasonique », Université Mentouri Constantine, 2010.
- [17] BOUCHOUACHI Badr Eddine ET LARBI Abdelhalim, « Élaboration et caractérisation des couches minces de SnO_2 dopées Nickel déposées par la technique spray pyrolyse », Université Mohamed Boudiaf Msila, 2018 /2019.

- [18] M. Faivre, Ann. Chem, « The electrochemistry of oxides of silver a short review ScienceDirect 19 (11) (1944) 58 »,
- [19] Adel TAABOUCHE, « Contribution à l'étude structurale et microstructurale de films ZnO obtenus par ablation laser », Magister, Université Mentouri Constantine Algérie, 2010.
- [20] H. Liu *et al.* « A facile method to improve the stability and efficiency of CsPbI₂Br perovskite solar cells prepared at low temperature », Sol. Energy, vol. 195, p. 544-551, doi : 10.1016/j.solener.2019.11.047, janv. 2020.
- [21] I. Wuled Lengooro, Yun Chan Kang, Takafumi Komiya, Kikuo Okuyama and Noboru Tohge, «Effects of laser irradiation on properties thin titanium oxyde films obtained by the sol-gel method L 288–L 290»,
- [22] Y. Larbah, «Elaboration et caractérisation des couches minces conductrices et transparentes pour les cellules solaire de type TCO/ZnS/CIS », Mémoire de magister, USTO-MB, p-35, 2011.
- [23] R. Zhai, S. Wang, H. Xu, H. Wang, et H. Yan, « Rapid Formation of CdS, ZnS Thin Films by Microwave-Assisted Chemical Bath Deposition », Mater. Lett., vol. 59, p. 1497-1501, doi : 10.1016/j.matlet.2005.01.008, mai 2005.
- [24] KENZA KAML, « Etude et élaboration des composés binaires et ternaires destinés à des applications photovoltaïques», Université Badji Mokhtar Annaba, 08/06/2017.
- [25] F. Bensmain, « Etude théorique sur les applications actuelles du ZnO et les dopages possibles sur ce matériau », mémoire du Master, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, p. 96, 25 Juin 2015.
- [26] CEFI, Centre D'études Sur Les Formations Et L'emploi D'ingénieurs.
- [27] Z. HadeF, «Etude de l'adhérence dans les couches minces», Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2010.
- [28] ULRIKE luders, « Introduction aux couches minces», Université Caen Normandie, 20-04-2018.
- [29] J.F. Pierson, « Les couches minces multiplient leurs applications Organisé par la Société française du vide, le colloque sur l'innovation dans les couches minces portait notamment sur les couches dures et le développement des nanotechnologies», 18-20 novembre.

Chapitre 04

Simulation d'une cellule solaire à base de CIGS via SCAPS-1D

Chapitre 04 : Simulation d'une cellule solaire à base de CIGS via SCAPS-1D

1. Introduction	74
2. Présentation du logiciel SCAPS	74
3. Présentation de la cellule étudiée	76
4. Les paramètres d'entrée	76
5. Caractéristiques électriques de la cellule solaire	77
6. Résultats et discussions	78
6.1 Effet du dopage de la couche absorbante sur les paramètres de fonctionnement d'une cellule solaire	78
6.2 Effet de l'énergie de gap sur les paramètres de fonctionnement d'une cellule solaire ..	82
6.3 Effet de l'épaisseur de la couche absorbante sur les paramètres de fonctionnement d'une cellule solaire	85
6.4 Effet de la température du milieu extérieur sur les paramètres de fonctionnement d'une cellule solaire	87
7. Conclusion	88
Références bibliographiques	

Chapitre 04 : Simulation d'une cellule solaire à base de CIGS via SCAPS-1D

1. Introduction :

Les cellules solaires en couches minces à base de CIGS ont des applications photovoltaïques terrestres à grande échelle vu leur faible prix de fabrication. Elles présentent une excellente stabilité et une grande résistance aux rayonnements[1].

La simulation des cellules en couches minces est devenue de plus en plus utilisée ces dernières années du coup, plusieurs logiciels de calcul et de simulation ont été développés. On peut citer : AMPS-1D, PC-1D, ASA, SCAPS-1D, SILVACO[2].

Dans ce dernier chapitre, et en utilisant l'outil SCAPS nous allons présenter les résultats de la simulation numérique d'une cellule solaire à base de CIGS ainsi que leurs interprétations.

Au début, nous allons présenter la structure de la cellule solaire et les différents paramètres physiques employés dans la simulation numérique. Après cela, nous allons étudier l'influence de la couche CIGS (épaisseur, dopage, énergie de gap) sur les paramètres photovoltaïques (V_{oc} , J_{cc} , FF, η) de la cellule solaire. Nous allons étudier en même temps l'effet de la température du milieu extérieur sur ces caractéristiques photovoltaïques.

2. Présentation du logiciel SCAPS-1D :

SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) est un logiciel de simulation des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électronique et informatique (ELIS) de l'Université de Gent, Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué à son développement : Marc Burgenland, Koen Decock, Johan Verschraegen, Alex Niemegeers, Stefaan Degraeve[3].

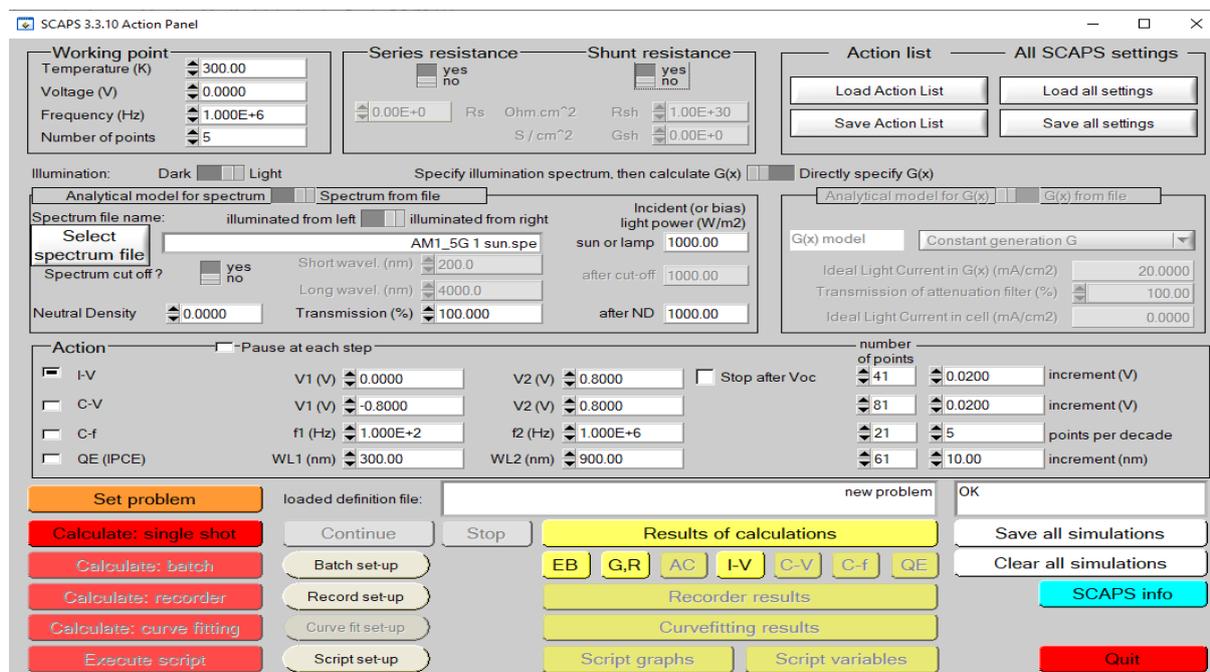


Figure 4.1 : Interface du logiciel de simulation SCAPS-1D.

L'utilisation du SCAPS-1D est très pratique, il permet de simuler n'importe quelle structure photovoltaïque, selon les matériaux disponibles en fichiers data, en jouant sur les paramètres variables (largeur, surface, dopage, etc...)[2].

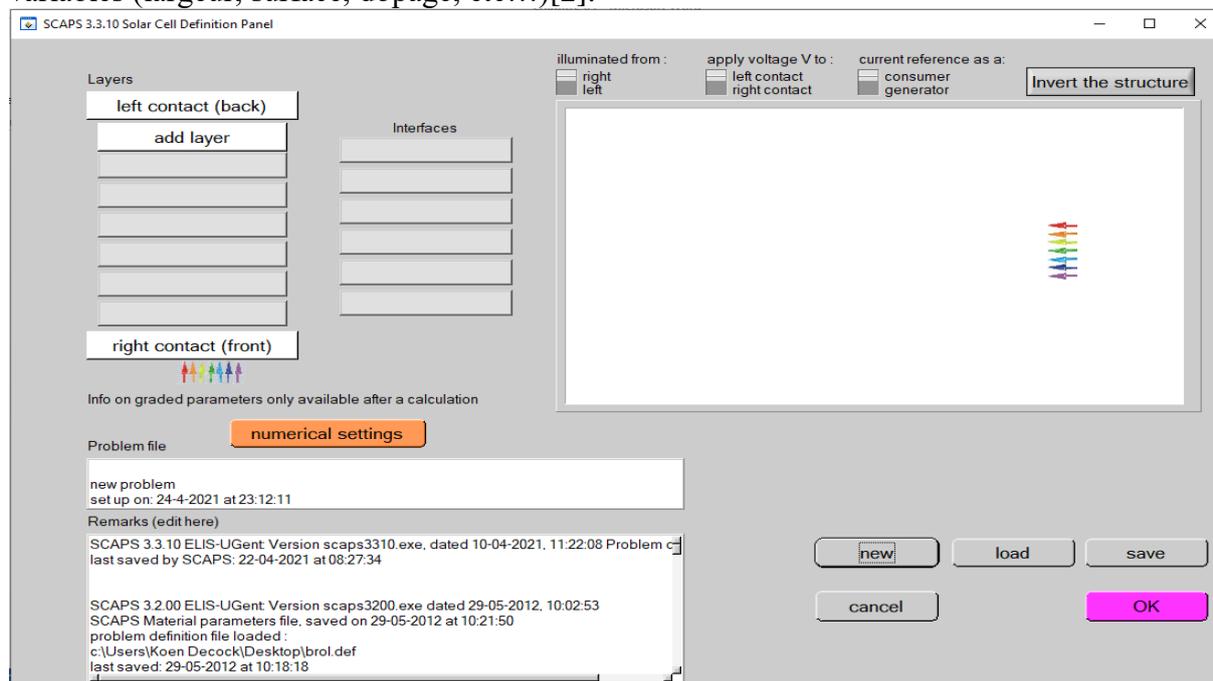


Figure 4.2 : Fenêtre du logiciel SCAPS-1D pour introduire la cellule solaire à simuler.

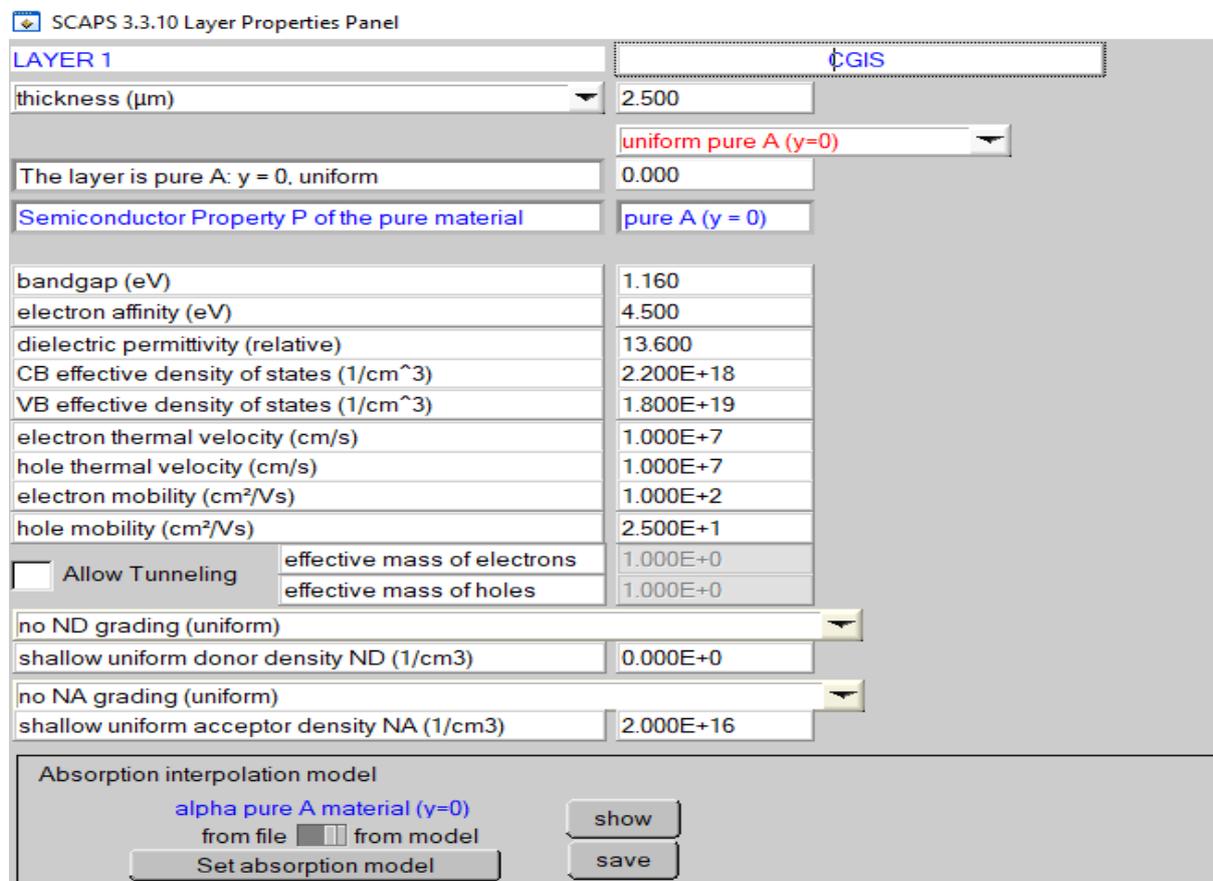


Figure 4.3 : Fenêtre du logiciel SCAPS pour introduire les paramètres d'une couche.

3. Présentation de la cellule étudiée :

La **figure 4.4**, représente le schéma de la structure a étudiée d'une cellule solaire à base de CIGS qui est composée d'une couche fenêtre à base de ZnO dopé type N, une couche tampon à base de CdS dopé type N, d'un absorbeur en CIGS dopé type P, et un substrat de base en verre.

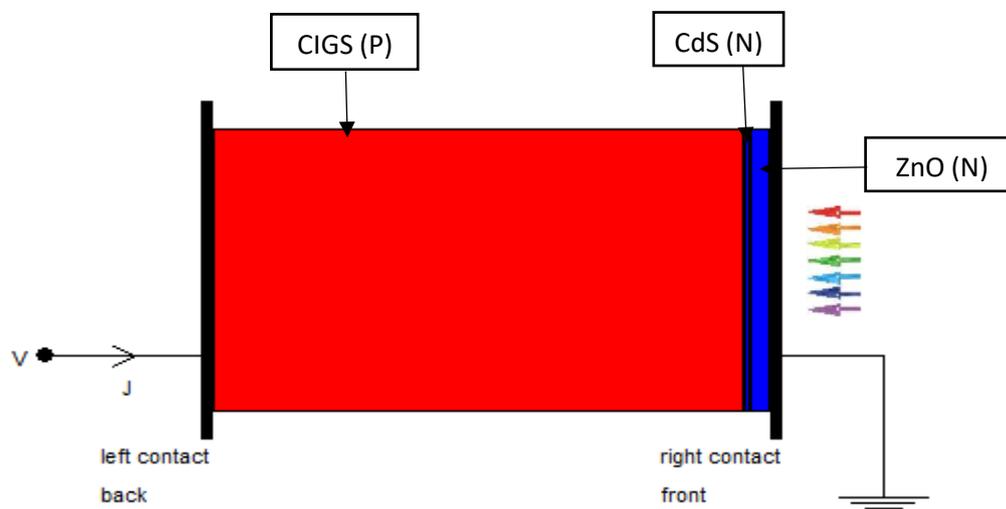


Figure 4.4 : Structure d'une cellule solaire à base de CIGS.

4. Les paramètres d'entrée :

Le **tableau 4.1**, regroupe les différents paramètres électroniques et optiques qui définissent les matériaux constituant d'une cellule solaire à base de CIGS. Ces paramètres sont reportés de la littérature[4] :

La couche	ZnO	CdS	CIGS
Les paramètres			
Épaisseur (μm)	0.05	0.03	variable
Energie de gap (eV)	3.3	2.4	variable
N_c (cm^{-3})	$2.2 * 10^{18}$	$2.2 * 10^{18}$	$2.2 * 10^{18}$
N_v (cm^{-3})	$1.8 * 10^{19}$	$1.8 * 10^{19}$	$1.8 * 10^{19}$
Mobilité des électrons ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	25	25	25
Mobilité des trous ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	100	140	140
permittivité	9	10	13.6
Affinité électronique	4.45	4.2	4.5
Densité des porteurs (cm^{-3})	10^{18}	10^{18}	variable

Tableau 4.1 : Paramètres de simulation d'une cellule solaire à base de CIGS[4].

Le **tableau 4.2**, regroupe les valeurs des paramètres de la densité de défauts où $N_{DG(AG)}$ est la densité des états accepteurs (donneurs) de formes gaussiennes. $E_{A(D)}$ est l'énergie du pic de la gaussienne, W_G la largeur de la distribution et $\delta_{(N,P)}$ la section de capture. Les valeurs de ces paramètres sont extraites de la référence[4] :

	ZnO	CdS	CIGS
$N_{DG}, N_{AG} (cm^{-3})$	D : 10^{17}	A : 10^{15}	D : 10^{15}
$E_A, E_D (eV)$	Milieu du gap	Milieu du gap	Milieu du gap
$W_G (eV)$	0.1	0.1	0.1
$\delta_N (cm^2)$	10^{-12}	10^{-17}	2.10^{-16}
$\delta_P (cm^2)$	10^{-15}	10^{-13}	2.10^{-15}

Tableau 4.2 : Paramètres des couches à base de ZnO, CdS et CIGS[4].

5. Caractéristiques électriques de la cellule solaire :

La **figure 4.4**, représente la caractéristique $J(V)$ de notre cellule en couches minces de type ZnO (N)/CdS(N)/CIGS (P), sous éclairement par le spectre solaire AM 1.5 et de densité de puissance 100 mW/cm^2 . On fixe l'épaisseur de la couche absorbante à $3\mu\text{m}$, son dopage à 2.10^{16}cm^{-3} et son énergie de gap à 1.20eV .

Après avoir effectué une simulation de la cellule solaire en utilisant les paramètres précédents, nous avons obtenu une densité du courant de court-circuit qui vaut $J_{cc} = 36.298109 \text{ mA/cm}^2$, une tension en circuit ouvert égale à $V_{co} = 0.7721\text{V}$, un facteur de forme $FF = 84.71\%$ et un rendement de conversion $\eta = 23.74\%$.

Ces résultats simulation sont en très accord avec ceux trouvés dans la littérature [4].

	$J_{cc} (mA/cm^2)$	$V_{co} (V)$	FF(%)	$\eta(\%)$
Cellule simulée	36.2	0.772	84.71	23.74
Cellule dans la littérature [4]	34.3	0.803	82.08	22.60
Cellule réalisée expérimentalement [4]	37.8	0.741	80.60	22.60

Tableau 4.3 : comparaison entre les performances photovoltaïques simulés et celles de la référence [4].

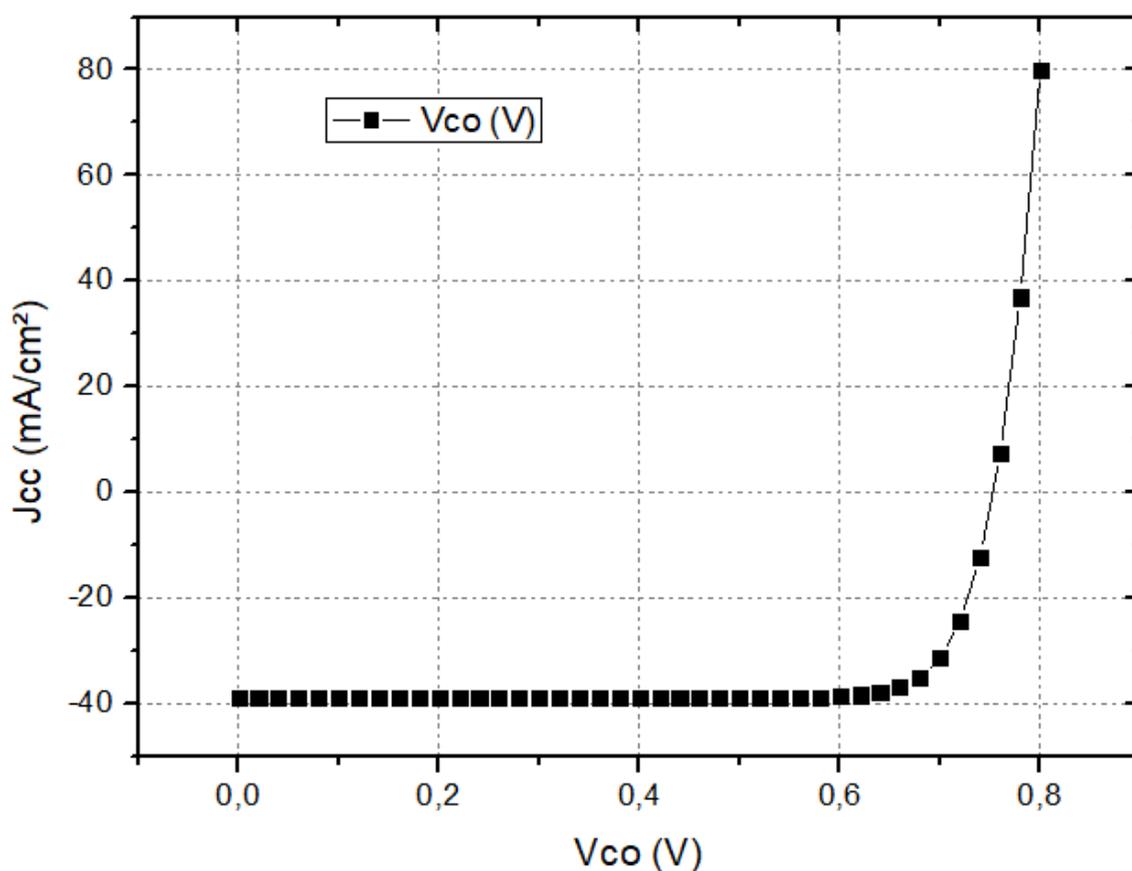


Figure 4.5 : Caractéristique J(V) de la cellule solaire en CIGS.

6. Résultats et discussions :

6.1 Effet du dopage de la couche absorbante sur les paramètres de fonctionnement d'une cellule solaire :

En premier temps, nous gardons l'épaisseur de la couche absorbante constante à 3 μ m et l'énergie du gap à 1.15eV [2] puis, en faisant varier la valeur du coefficient de la concentration du dopage de 2.10^{16} à 5.10^{16} cm⁻³ avec un pas de 1 pour déterminer la valeur optimale qui nous permet d'obtenir de bons résultats. Le **tableau 4.4** regroupe les différents résultats obtenus :

Concentration du dopage (cm ⁻³)	J_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	FF(%)	η (%)
2.10^{16}	41.4786	0.6755	83.46	23.39
3.10^{16}	41.3609	0.6862	83.52	23.71
4.10^{16}	41.2646	0.6937	83.61	23.94
5.10^{16}	41.2048	0.7001	83.84	24.18

Tableau 4.4 : Les performances de la cellule solaire selon la variation de la concentration du dopage de 2.10^{16} à 5.10^{16} cm⁻³.

D'après les résultats trouvés, la valeur optimale du dopage qui nous donne de bonnes performances d'une cellule solaire en CIGS est de 5.10^{16}cm^{-3} .

Les **figures 4.6 (a, b, c, d)**, illustrent l'influence de la concentration du dopage de la couche absorbante sur les performances photovoltaïques d'une cellule solaire à base de CIGS :

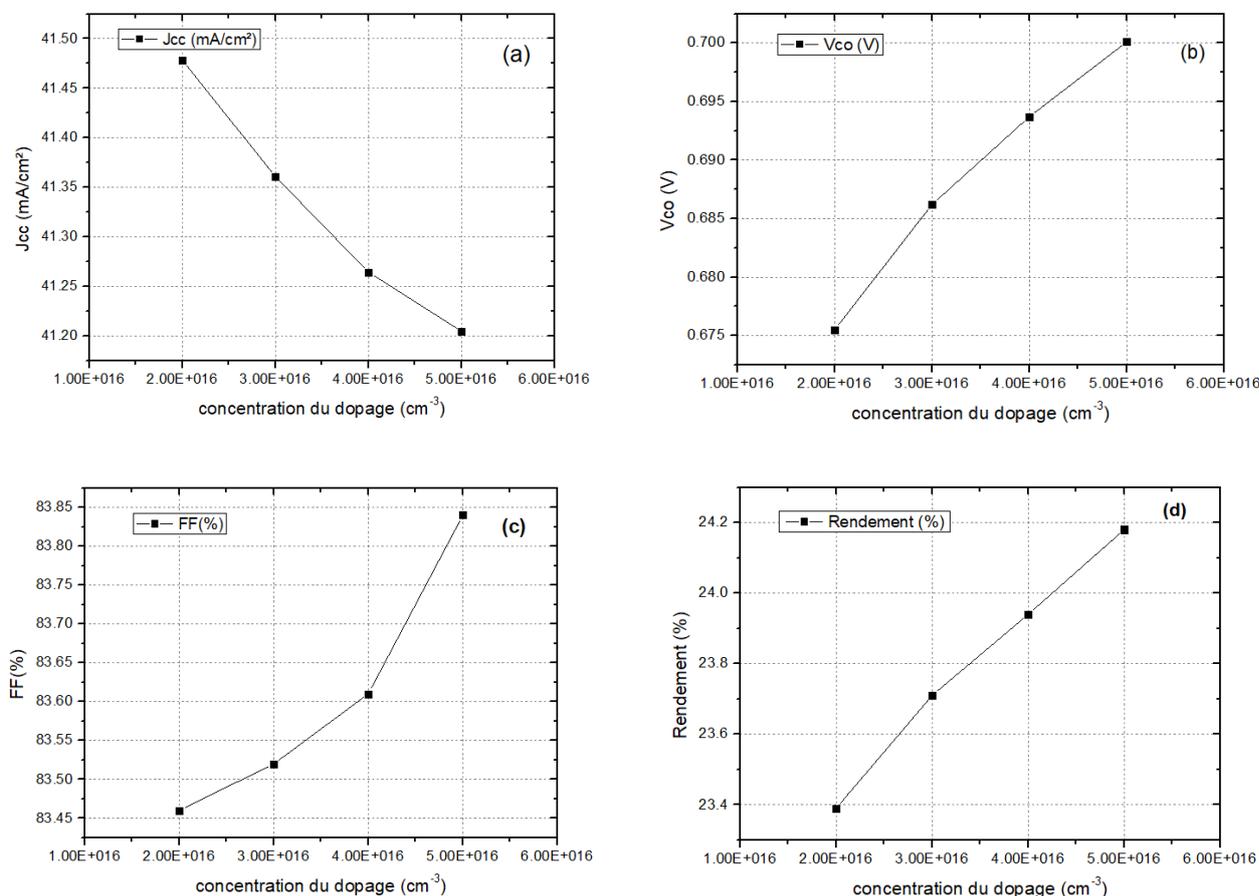


Figure 4.6 : (a) Variation de la densité du courant de court-circuit en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS, (b) Variation de la tension en circuit ouvert en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS, (c) variation du facteur de forme en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS, (d) Variation de rendement en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS.

Maintenant, nous allons étudier l'effet du dopage sur les caractéristiques photovoltaïques pour des valeurs dans la gamme entre 5.10^{13} et 5.10^{17}cm^{-3} en gardant la même valeur de l'épaisseur et de l'énergie de gap $3 \mu\text{m}$ et 1.15eV respectivement. Les résultats obtenus sont regroupés dans le **tableau 4.5** :

Concentration du dopage (cm^{-3})	J_{cc} (mA/cm^2)	V_{co} (V)	FF(%)	η (%)
5.10^{13}	41.3971	0.5043	77.93	16.66
5.10^{14}	40.9312	0.7236	84.33	24.98
5.10^{15}	40.7229	0.7418	84.78	25.61
5.10^{16}	40.5942	0.7519	84.96	25.93
5.10^{17}	40.5120	0.7599	85.24	26.24

Tableau 4.5 : Les performances de la cellule solaire selon la variation de la concentration du dopage de 5.10^{13} et 5.10^{17}cm^{-3} .

On remarque que les bons résultats sont obtenus pour une concentration du dopage de : 5.10^{17}cm^{-3} .

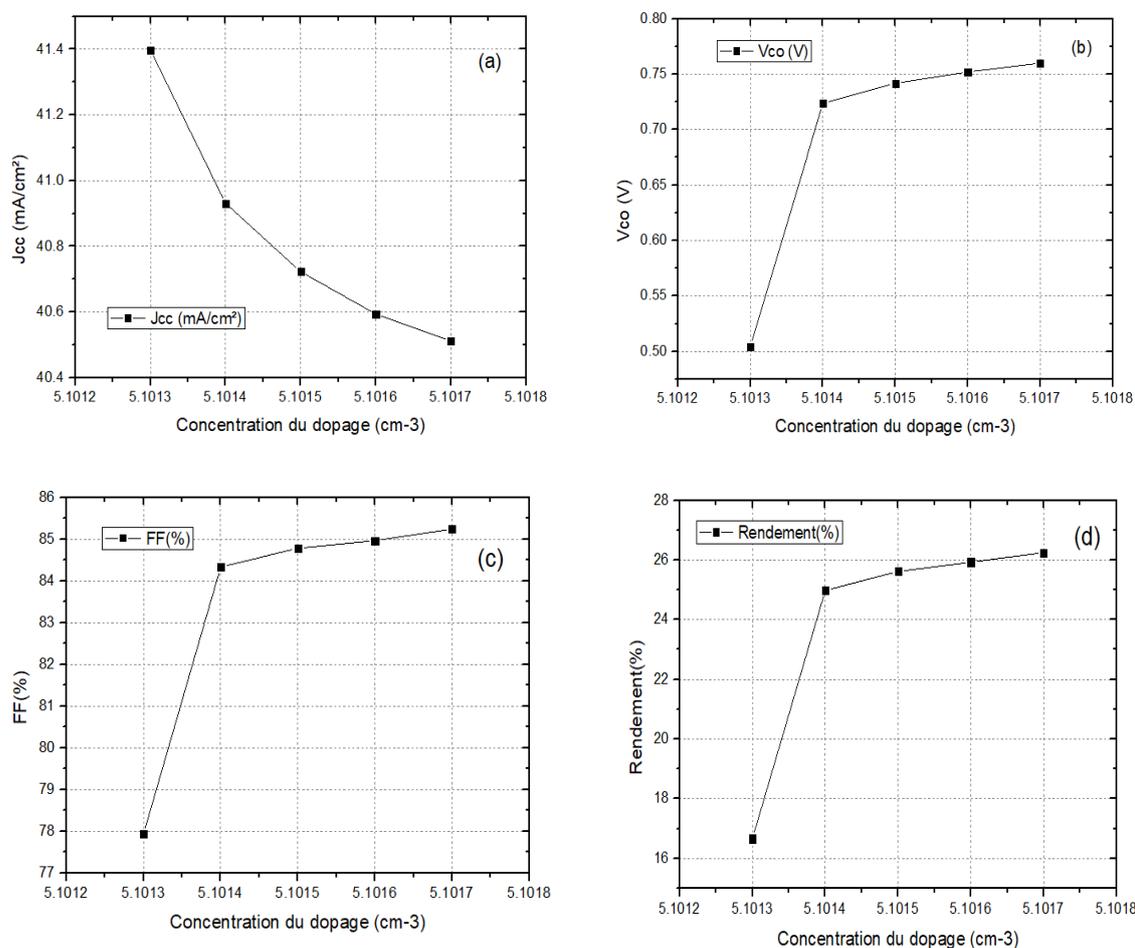


Figure 4.7 : (a) Variation de la densité du courant de court-circuit en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS, (b) Variation de la tension en circuit ouvert en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS, (c) variation du facteur de forme en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS, (d) Variation de rendement en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS.

Dans cette partie, nous allons faire varier le coefficient de la concentration du dopage de 2.10^{17} à 5.10^{17}cm^{-3} avec un pas de 1, le **tableau 4.6** regroupe les différents résultats obtenus :

Concentration du dopage (cm^{-3})	J_{cc} (mA/cm^2)	V_{co} (V)	FF(%)	η (%)
2.10^{17}	40.7909	0.7358	84.73	25.43
3.10^{17}	40.6612	0.7462	84.87	25.75
4.10^{17}	40.5743	0.7537	84.99	25.99
5.10^{17}	40.5120	0.7599	85.24	26.24

Tableau 4.6 : Les performances de la cellule solaire selon la variation de la concentration du dopage de 2.10^{17} et 5.10^{17}cm^{-3} .

En se basant sur les résultats de simulation obtenus, nous constatons que la concentration du dopage de l'ordre de 5.10^{17}cm^{-3} la meilleure. Cet effet du dopage a été également trouvé dans [4] et [5]. Donc nos résultats et ceux trouvés en littérature sont similaires.

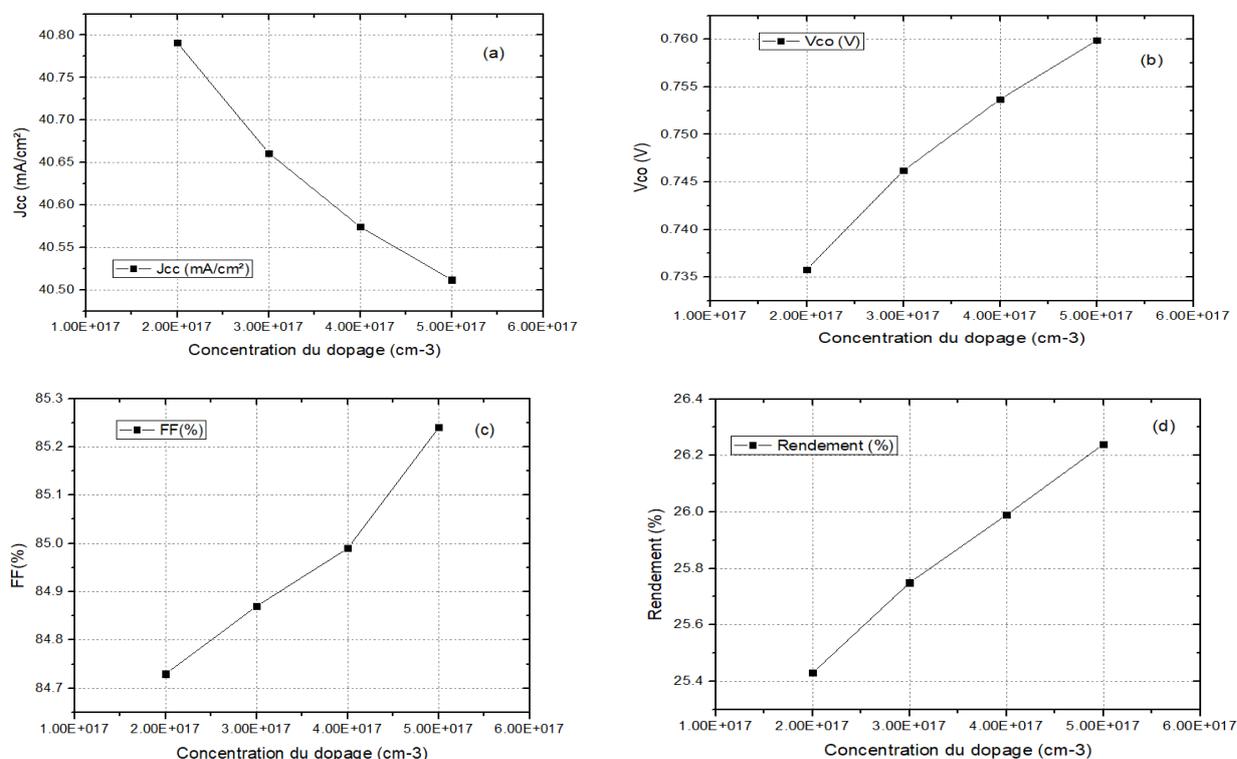


Figure 4.8 : (a) Variation de la densité du courant de court-circuit en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS, (b) Variation de la tension en circuit ouvert en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS, (c) variation du facteur de forme en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS, (d) Variation de rendement en fonction de la concentration du dopage de la couche CIGS.

Les **figures 4.6 4.7 4.8 (a, b, c, d)** illustrent l'effet du dopage de la couche absorbante CIGS sur les caractéristiques photovoltaïques.

Nous observons que la concentration du dopage influe systématiquement sur la densité du courant J_{cc} , la tension V_{co} , le facteur de forme FF et le rendement.

Un maximum du rendement $\eta=26.24\%$, du facteur de forme $FF=85.24\%$ et de la tension en circuit ouvert $V_{co}=0.7599\text{ V}$ ont été évalués pour une concentration du dopage de l'ordre de 5.10^{17}cm^{-3} . On peut conclure alors que ces derniers paramètres subissent une augmentation lorsque la concentration du dopage augmente.

Contrairement à la densité du court-circuit, nous remarquons qu'il y a une chute rapide avec l'augmentation du dopage de la couche absorbante CIGS, ceci est dû à l'augmentation du taux de recombinaison dans la couche en CIGS avec le dopage.

Cet effet du dopage a été également trouvé dans les littératures [2] [4] [5].

6.2 Effet de l'énergie de gap sur les paramètres de fonctionnement d'une cellule solaire :

La largeur de la bande interdite (gap) varie selon la relation suivante[5] :

$$E_g(x) = 1.010 + 0.626x - 0.167x(1-x)$$

Avec x représente la fraction molaire, elle est donnée par le rapport : $X = \frac{\text{Ga}}{\text{In} + \text{Ga}}$

Dans cette partie, nous allons fixer l'épaisseur de la couche absorbante à $3\mu\text{m}$ et sa concentration du dopage à 5.10^{17}cm^{-3} en faisant varier l'énergie du gap selon la composition en Ga. Le **tableau 4.7**, représente les différents résultats obtenus :

x	Eg (eV)	J_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	FF(%)	η (%)
0	1.01	45.1083	0.6225	82.90	23.28
0.31	1.16	39.3246	0.7686	85.30	25.78
0.45	1.25	35.4353	1.0888	67.88	26.19
0.66	1.38	31.4224	/	/	25.03
1	1.63	23.0289	/	/	18.36

Tableau 4.7 : Les performances de la cellule solaire selon la variation de l'énergie du gap.

D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure que les meilleurs résultats sont obtenus pour un taux du Gallium de $x=0.31$ (31%) correspondant à une énergie du gap de l'ordre de 1.16 eV. Cette valeur est en très bon accord avec celles calculées dans [1] [5] et [6].

La **figure 4.9**, représente l'évolution de l'énergie de la bande interdite en fonction de la concentration du Gallium :

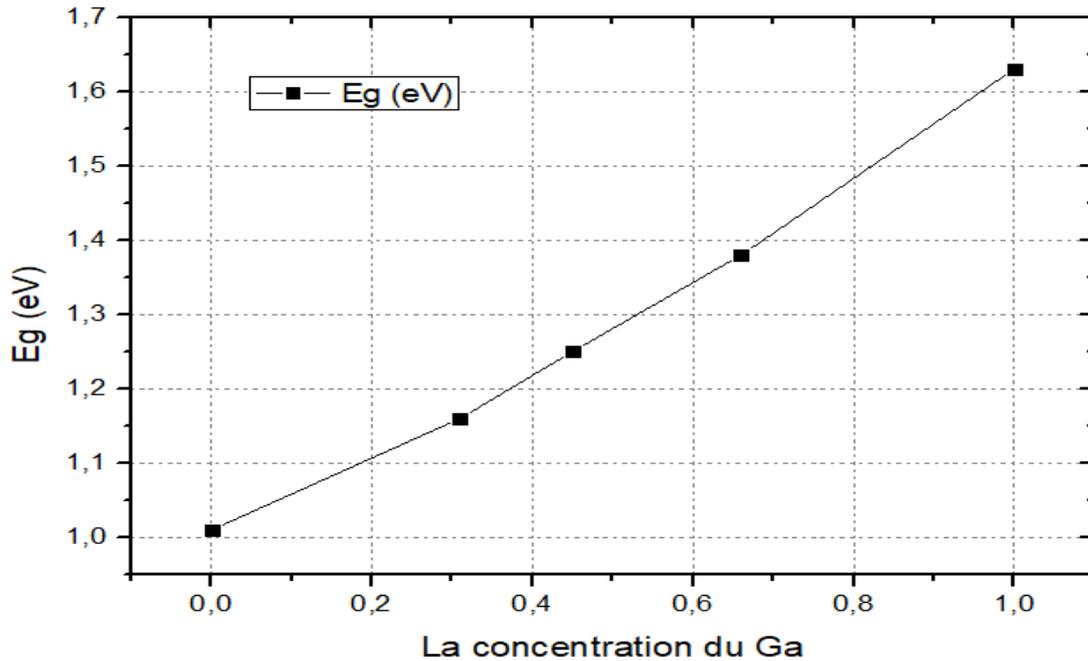


Figure 4.9 : La variation de l'énergie du gap en fonction de la concentration du Gallium.

Nous notons que la largeur de la bande interdite du CIGS en fonction de la concentration du Gallium x plus elle est grande plus l'électron de la bande de valence nécessite une grande énergie du photon pour passer à la bande de conduction et vis-versa.

Les **figures 4.9 (a, b, c, d)**, illustrent la variation des caractéristiques photovoltaïques de la cellule solaire en CIGS en fonction de l'énergie du gap :

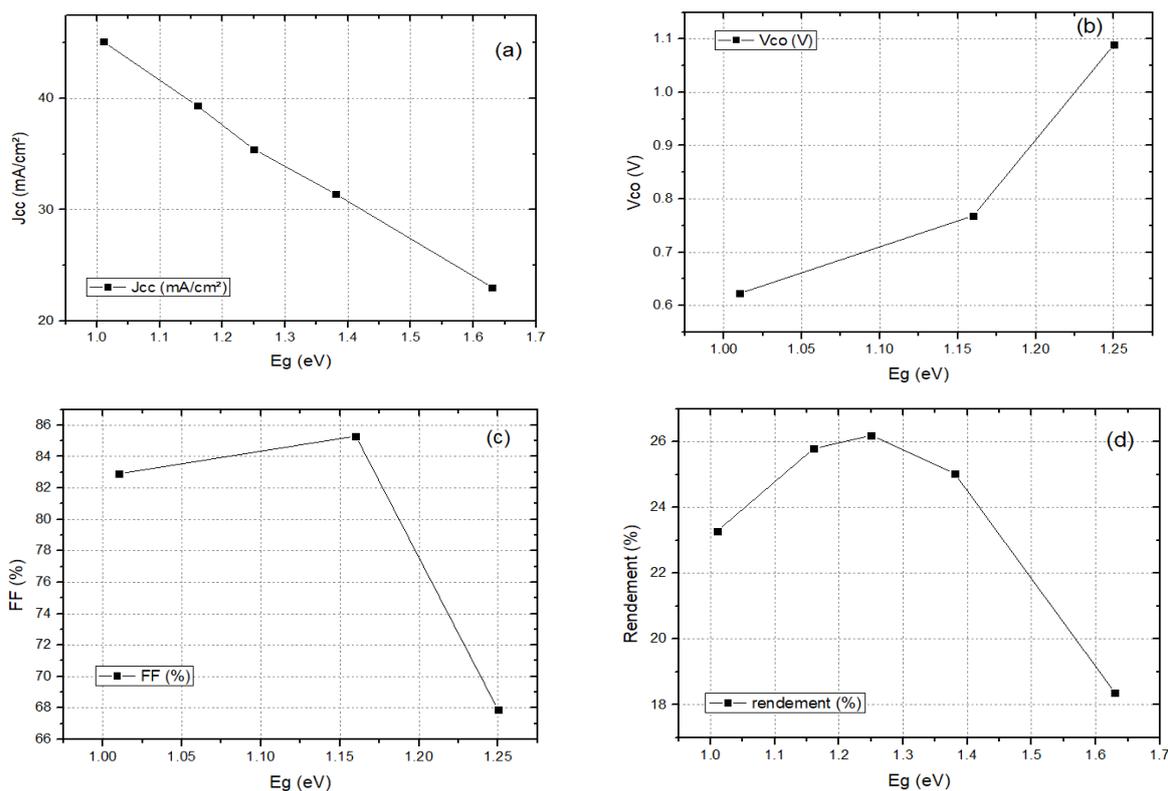


Figure 4.10 : (a) Variation de la densité du courant de court-circuit en fonction de E_g de la couche CIGS, (b) Variation de la tension en circuit ouvert en fonction de E_g de la couche CIGS, (c) variation du facteur de forme en fonction de E_g de la couche CIGS, (d) Variation de rendement en fonction de E_g de la couche CIGS.

L'augmentation de l'énergie de gap a fait augmenter la tension en circuit ouvert de 0.6225V à 1.0888V, et diminuer la densité du courant de court-circuit de 45.1083 mA/cm² à 23.0289mA/cm². Cette diminution est due à la réduction du nombre de photons absorbés dans la couche absorbante[2].

Nous remarquons que l'accroissement de l'énergie du gap engendre une augmentation du facteur de forme jusqu'à ce qu'il atteigne sa meilleure valeur (85.30%) pour $E_g=1.16$ eV, puis il décroît jusqu'à ce qu'il atteigne une valeur de 67.88% pour $E_g=1.25$ eV. Alors le point seuil correspond à **FF = 85.30%** avec **$E_g = 1.16$ eV**.

Concernant le rendement nous remarquons qu'on a une augmentation de 23.28% jusqu'à 26.19% dans la plage de $E_g= [1.01-1.25]$ eV. Puis, il commence à se dégrader jusqu'à ce qu'il atteigne une valeur de 18.36 % pour $E_g= 1.63$ eV.

Dans notre étude sur l'influence de l'énergie de gap sur les caractéristiques photovoltaïques d'une cellule solaire à base de CIGS, nous nous sommes basé sur les travaux réalisés dans les littératures [2] [7].

6.3 Effet de l'épaisseur de la couche absorbante sur les paramètres de fonctionnement d'une cellule solaire :

Pour déterminer l'influence de l'épaisseur de la couche absorbante sur les caractéristiques photovoltaïques d'une cellule solaire à base de CIGS, nous allons fixer l'énergie de gap à 1.16eV et la concentration du dopage à 5.10^{17}cm^{-3} en faisant varier la valeur de l'épaisseur de 2 à 4 μm avec un pas de 0.5. Les résultats obtenus sont regroupés dans le **tableau 4.8** :

	J_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	FF(%)	η (%)
2	38.5456	0.7595	85.14	24.93
2.5	39.0001	0.7644	85.24	25.41
3	39.3246	0.7686	85.30	25.78
3.5	39.5646	0.7723	85.34	26.08
4	39.7542	0.7757	85.38	26.33

Tableau 4.8 : Les performances de la cellule solaire selon la variation de l'épaisseur.

D'après le **tableau 4.8**, nous notons que l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante engendre une augmentation de toutes les caractéristiques photovoltaïques d'une cellule solaire à base de CIGS. Ces résultats sont très en accord avec celles trouvées dans plusieurs littératures [1],[4] et [8].

Les **figures 4.11 (a, b, c, d)**, illustrent l'effet de l'épaisseur de la couche absorbante CIGS sur les caractéristiques photovoltaïques d'une cellule solaire à base de CIGS :

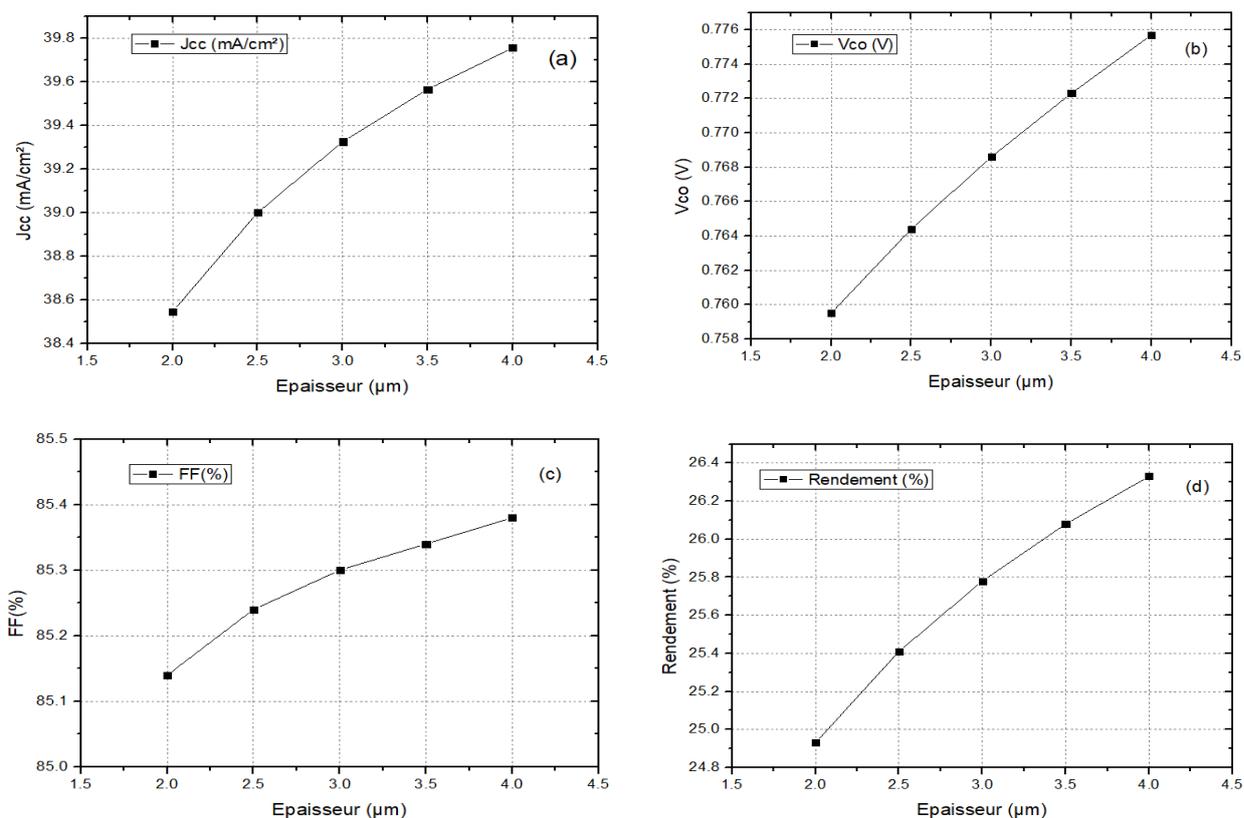


Figure 4.11 : (a) Variation de la densité du courant de court-circuit en fonction de l'épaisseur de la couche en CIGS, (b) Variation de la tension en circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la couche en CIGS, (c) Variation du factor de forme en fonction de l'épaisseur de la couche en CIGS, (d) Variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche en CIGS.

D'après les **figures 4.5 (a, b, c, d)**, nous remarquons qu'on a une augmentation de la densité du courant de court-circuit de 38.5456 à 39.7542 mA/cm^2 avec l'accroissement de la couche absorbante CIGS. Nous observons aussi que pour une valeur de 4 μm de la couche absorbante en CIGS, la valeur de la tension en circuit ouvert augmente à 0.7757V.

L'accroissement de l'épaisseur de la couche absorbante engendre une augmentation du rendement de conversion de 24.93% à 26.33% pour $e=2\mu\text{m}$ et $e=4\mu\text{m}$ respectivement. Concernant le facteur de forme la meilleure valeur obtenue est de 85.38% pour une épaisseur de 4 μm .

Pour les petites épaisseurs de la couche absorbante, le phénomène de génération de paires électrons- trous se passe près des interfaces avec le CdS et le contact arrière (forte densité de défauts donc de centres de recombinaisons) ce qui réduit le nombre de paires électrons- trous générées, donc le rendement est réduit. En revanche, Plus l'épaisseur de cette couche augmente, plus de photons ayant des longueurs d'onde plus longues peuvent être collectées dans la couche absorbante[2].

6.4 Effet de la température du milieu extérieur sur les paramètres de fonctionnement d'une cellule solaire :

Le rendement optimal était obtenu pour une épaisseur de $4\mu\text{m}$, une concentration du dopage de 5.10^{17} cm^{-3} et une énergie du gap de 1.16eV . Pour déterminer l'influence de la température du milieu extérieur, nous allons garder ces trois valeurs constantes en faisant varier la température de 300 à 350 K avec un pas de 10. Les résultats obtenus sont regroupés dans le **tableau 4.9** :

Température (K)	J_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	FF(%)	η (%)
300	39.7542	0.7757	85.38	26.33
310	39.7817	0.7599	84.95	25.68
320	39.8122	0.7434	84.36	24.97
330	39.8458	0.7270	84.74	24.26
340	39.8002	0.7090	83.74	23.44
350	39.7542	0.6925	82.40	22.73

Tableau 4.9 : La variation des performances de la cellule solaire selon la variation de la température du milieu extérieur.

D'après le **tableau 4.9**, on remarque que les meilleurs résultats sont obtenus pour une température de 300 K. Les caractéristiques de la cellule solaire en fonction de la température sont illustrés dans les **figures 4.12 (a, b, c, d)** :

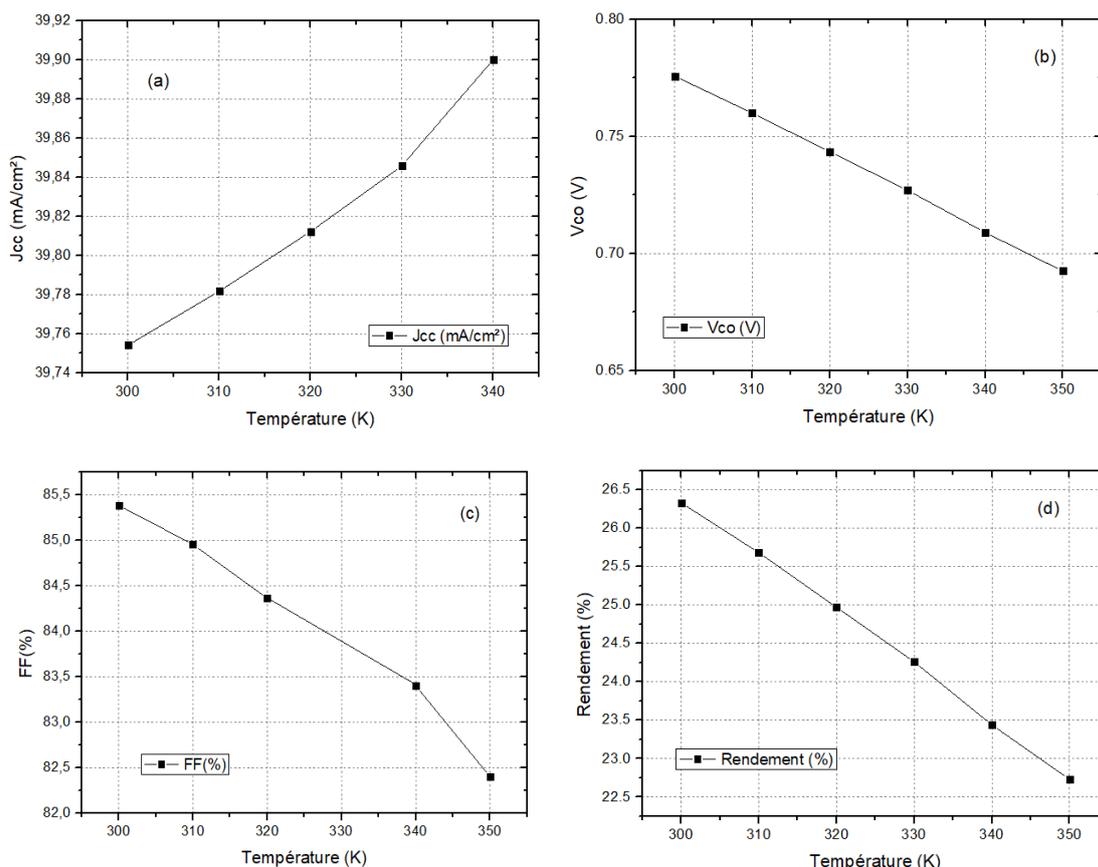


Figure 4.12 : (a) Variation de la densité du courant de court-circuit en fonction de la température, (b) Variation de la tension en circuit ouvert en fonction de la température, (c) Variation du facteur de forme en fonction de la température, (d) Variation du rendement en fonction de la température.

Nous observons une dégradation des caractéristiques électriques de la cellule (V_{co} , FF, η) avec l'augmentation de la température de 0.7757V à 0.6925V, de 85.38 à 82.40 et de 26.33% à 22.73% respectivement.

Hors que, l'augmentation de la température du milieu extérieur induit à une légère augmentation de la densité de courant J_{cc} de 39.7542 à 39.7542 (mA/cm²). Ceci est dû à l'instabilité des électrons. En effet, quand la température augmente, les électrons dans la cellule gagnent plus d'énergie et deviennent plus susceptibles à se recombiner avec les trous.

La diminution de la V_{co} lorsque la température augmente s'explique par l'augmentation de la densité du courant de saturation J_s proportionnel à n_i^2 avec l'augmentation de la température comme le montrent les équations (1), (2) et (3)[9] :

Sachant que :

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \left(\frac{J_{ph}}{J_s} \right) \quad (1)$$

Avec :

$$J_s = qn_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_d} + \frac{D_n}{L_n N_a} \right) \quad (2)$$

Et :

$$n_i^2 = AT^2 \exp \left(-\frac{E_g}{KT} \right) \quad (3)$$

A : constante spécifique du matériau et indépendante de la température.

n_i : concentration intrinsèque.

T : température en K.

7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté et discuté les résultats de la simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire en couches minces à base de CIGS qui ont été générés par le logiciel de simulation SCAPS-1D.

Les résultats obtenus nous ont permis d'identifier les paramètres de la couche absorbante en CIGS influentes sur les performances photovoltaïques d'une cellule solaire.

Nous avons constaté que les résultats optimaux de $J_{cc}=39.7592$ mA/cm², $V_{co}=0.7757$ V, FF=85.38% et $\eta=26.33\%$ ont été trouvés pour une épaisseur de 4 μ m, d'une concentration de dopage de 5.10¹⁷ cm⁻³ et d'une énergie de gap de $E_g=1.16$ eV de la couche absorbante en CIGS.

Nous avons déduit aussi que la température influe négativement sur les caractéristiques photovoltaïques d'une cellule solaire ZnO (N)/CdS(N)/CIGS (P). Son augmentation engendre une diminution de la tension en circuit ouvert, de facteur de forme et de rendement.

Références bibliographiques :

- [1] H. Amar et S.Tobbeche, « Etude des caractéristiques électriques de cellule solaire à hétérojonction CdS/CIGS (cadmium- sulfide/ cuivre- indium- gallium- sélénium) », présenté à the first international conference on solar energy (Incosole) 2015.
- [2] A. CHADEL, « optimisation et simulation numérique du profil de la couche adsorbante et des différentes couches de cellules photovoltaïques à base de CIGS », thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.
- [3] A. Khalil, « Simulation d'une cellule photovoltaïque », mémoire de Master, Faculté de technologie, département de génie électrique, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued 2018-2019.
- [4] S. Kalache, « Etude par simulation numérique une cellule solaire en CIGS », mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra », juin 2017,
- [5] H. Amar, « Propriétés électriques de cellule solaire à base de diSéléniure de Cuivre Indium Galium $\text{CuIn}_{(1-x)}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS) », mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [6] C. Hichem, « Etude d'une cellule solaire à base de CIGS (ZnS/CdS/ZnSe) », mémoire de Master, Université Saad Dahlab Blida, 2017-2018.
- [7] E. Mourad, « Etude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS à multi-jonction par le logiciel Tcad Silvaco », thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 21/06/2018.
- [8] B. A. Mourad et R. Seddik, « Simulation et Optimisation d'une Cellule Solaire à base de $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ », mémoire de Master, Université Ahmed Draia Adrar, 30/05/2018.
- [9] D. Chaimaa, « Optimisation du rendement de conversion photovoltaïque des cellules solaires à base de diSéléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium "CIGS". », Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri, 2017.

Conclusion générale

Conclusion générale

Au cours de ces dernières années, plusieurs études ont montrés que le matériau CIGS en couches minces pourrait être introduit dans des différents dispositifs photovoltaïques à rendements élevés en raison de sa stabilité à long terme ainsi que sa grande efficacité de conversion.

L'objectif de ce travail était de bien comprendre le comportement d'une cellule solaire en couches minces à base de CIGS et être capable de simuler ces performances numériquement pour cela, nous avons utilisé le logiciel SCAPS-1D.

Dans un premier temps, nous avons essayé de faire une revue assez générale sur les cellules photovoltaïques, leur principe de fonctionnement, leurs Paramètres fondamentaux de fonctionnement ainsi que les différentes filières technologiques existantes.

Dans un deuxième temps, nous avons fait une étude approfondie sur les propriétés du matériau CIGS et ces différentes applications. A la fin de ce chapitre, nous avons pu conclure que le CIGS est un semi-conducteur prometteur pour les applications photovoltaïques vu ses caractéristiques très intéressantes.

Dans un troisième temps, nous avons détaillé les principaux procédés d'élaboration de couches minces, en présentant les différentes étapes permettant la formation des couches minces.

La dernière partie de ce mémoire était consacré pour la simulation d'une cellule photovoltaïque à base de CIGS à l'aide de logiciel SCAPS-1D.

Tout d'abords, nous avons fait varier la concentration de dopage de la couche absorbante en CIGS dans la gamme entre 5.10^{13} et 5.10^{17}cm^{-3} . De bons résultats ont été obtenus pour une concentration de dopage de 5.10^{17}cm^{-3} .

Ensuite, nous avons étudié l'effet de l'énergie de gap qui varie dans l'intervalle [1.01-1.63] eV, nous avons noté des valeurs optimales ont été trouvées en $x=0.31$ correspondantes à une énergie de gap de l'ordre de 1.16 eV.

Par la suite, nous avons pu montrer que l'épaisseur de la couche absorbante influe systématiquement sur les caractéristiques photovoltaïques, son augmentation de 2 à $4\mu\text{m}$ induit également à une augmentation des performances de notre cellule solaire.

Nous avons également étudié la sensibilité des caractéristiques photovoltaïques à la température du milieu extérieur, des résultats optimaux ont été trouvés pour une température de 300°K .

A la fin de ce travail, nous avons pu aboutir à une cellule solaire optimale avec les caractéristiques suivantes :

Une densité de courant de $J_{cc}=39.7542$ (mA/cm²), une tension de $V_{co}=0.7757$ V, un facteur de forme de $FF=85.38\%$ et un rendement de $\eta=26.33\%$ pour une épaisseur de $4\mu\text{m}$, une concentration de dopage de 5.10^{17}cm^{-3} et une énergie de gap de 1.16eV.

Nous avons pu conclure aussi que la température du milieu extérieur induit à un effet notable sur les différentes performances d'une cellule photovoltaïque. L'augmentation de la température engendre une augmentation légère de la densité du courant, cette augmentation est due à l'instabilité des électrons dans la couche absorbante. D'autre part, cette augmentation influe négativement sur le reste des caractéristiques photovoltaïques.

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire était porté sur la simulation d'une cellule photovoltaïque à base de **CIGS** à l'aide de logiciel **SCAPS-1D**, nous avons pu montrer que les paramètres fondamentaux du fonctionnement (J_{cc} , V_{co} , FF , η) d'une cellule solaire sont fortement influencés par un ensemble des paramètres de la couche absorbante en CIGS tels que : son épaisseur, sa concentration de dopage (la densité des porteurs) et son énergie de gap. En prenant une structure qui combine les paramètres optimaux de la couche absorbante en CIGS, nous avons pu atteindre un rendement de conversion qui vaut **26.33%** avec un facteur de forme de **85.38%** pour une épaisseur de la couche absorbante CIGS de **4 μ m**, une concentration de dopage de **5.10¹⁷cm⁻³**, une énergie de gap de **1.16 eV** et une température de **300°K**.

Mots clés : CIGS, cellule photovoltaïque, simulation numérique, SCAPS-1D, caractéristiques photovoltaïques.

Abstract :

The work presented in this memory was focused on the simulation of a **CIGS** based photovoltaic cell using **SCAPS-1D** software, we were able to show that the fundamental operating parameters (J_{cc} , V_{co} , FF , η) of a solar cell are strongly influenced by a set of parameters of the CIGS absorbent layer such as: its thickness, its doping concentration (the density of the carriers) and its gap energy. By taking a structure that combines the optimal parameters of the CIGS absorbent layer, we were able to achieve a conversion efficiency of **26.33%** with a form factor of **85.38%** for a thickness of the CIGS absorbent layer of **4 μ m**, a concentration of doping of **5.10¹⁷cm⁻³**, a gap energy of **1.16 eV** and a temperature of **300 ° K**.

Keywords : CIGS, photovoltaic cell, numerical simulation, SCAPS-1D, photovoltaic characteristics.

ملخص :

ركز العمل المقدم في هذه الأطروحة على محاكاة الخلية الكهروضوئية المستندة على **CIGS** باستخدام برنامج **SCAPS-1D** وتمكننا من إظهار أن معاملات التشغيل الأساسية (η , FF , V_{co} , J_{cc}) للخلية الشمسية تتأثر بقوة بمجموعة من المعلمات للطبقة الماصة **CIGS** مثل: سمكها، وتركيز المنشطات (كثافة المواد الحاملة) وطاقتها الفجوة. من خلال أخذ هيكل يجمع بين المعلمات المثلى للطبقة الماصة **CIGS**، تمكنا من تحقيق كفاءة تحويل تبلغ **26.33%** مع عامل شكل **85.38%** لسمك الطبقة الماصة **CIGS** من **4 مايكرومتر**، وتركيز المنشطات **5.10¹⁷ سم⁻³**، فجوة طاقة **1.16 إلكترون فولت** ودرجة حرارة **300 درجة مئوية**.

الكلمات المفتاحية: CIGS، الخلية الضوئية، المحاكاة العددية، SCAPS-1D، الخصائص الكهروضوئية.