



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen
Faculté des Sciences
Département de Physique
Unité de Recherche Matériaux et Energies
Renouvelables « URMER »



Mémoire pour l'obtention de diplôme de Master 2
Spécialité : Matériaux, Systèmes et Energies Renouvelables.

Etude structurelle des cellules solaires deuxième et troisième génération

Présenté par :

M^{elle} MEDJDOUB Sarra

Soutenue publiquement le 22 juin 2016 devant le jury composé de :

Pr. K. RAHMOUN	Présidente	Professeur à l'université de Tlemcen
Dr. S. BENSMAINE	Encadreur	MCA à l'université de Tlemcen
Dr. T. BENDELHOUM	Examinatrice	MCB à l'université de Tlemcen
Dr. B. CHIKH-BLED	Examineur	MCB à l'université de Tlemcen

Année universitaire :2015/2016.

Remerciements

Ce travail a été réalisé à l'Université d'Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, faculté des sciences, département de physique, au sein de l'Unité de Recherche Matériaux et Energies renouvelables « URMER ».

Je tiens à remercier en premier lieu mon encadreur Madame **BENSMACHINE Souhila**, maitre de conférences (A) à l'université de Tlemcen de la confiance qu'elle a placée en moi tout au long de ce travail, sa bonne humeur, ses précieux conseils, son aide efficace, sa disponibilité à tout moment et son soutien qui m'a été précieux. Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

J'adresse mes sincères remerciements à Madame **K. Rahmoun**, professeur à l'université de Tlemcen, d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

Mes remerciements vont aussi à Mme **T. Bendelhoum** et Mr **B. Chikh-Bled** maitres de conférences (B) à l'université de Tlemcen qui ont accepté d'examiner mon travail.

Ma gratitude va à tous ceux qui ont contribué à ce modeste travail de près ou de loin, en particulier Mr **M. Belarbi** qui m'a aidé et soutenu tout au long de la préparation de ce mémoire.

Dédicaces

Ce travail est dédié à :

Mon père : parce qu'il a été là depuis le début. Il m'a toujours soutenue et tiré vers le haut. Je ne pourrais jamais dire à quel point cet homme est grand.

Ma mère : pour tous les sacrifices qu'elle fait pour moi, l'amour et le soutien qu'elle m'apporte chaque jour.

Mon frère et ma sœur : pour la joie de vivre que vous m'apportez et votre amour, je vous dis merci.

A mes chères copines : Nesrine, Leila et Wassilla.

A ma cousine Fatima Zohra qui a été présente tout au long de ces 5 années, sans toi ça ne serai pas été pareil.

A tous mes professeurs et collègues

Sara.

Liste des figures

Chapitre 1

- Figure I-1 : Spectre de rayonnement solaire mesuré au sommet de l'atmosphère et au niveau de la mer.....(7)
- Figure I-2 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....(10)
- Figure I-3 : Représentation conventionnelle de la courbe $I(V)$ et $P(V)$(10)
- Figure I-4 : Photo d'un substrat de silicium polycristallin (échelle : $10 \times 10 \text{ cm}^2$).....(12)
- Figure I-5 : Cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin.....(13)
- Figure I-6 : Schéma d'une structure tandem.....(15)
- Figure I-7 : Principe de la cellule à hétérojonction.....(16)
- Figure I-8 : Schéma de principe d'un concentrateur photovoltaïque.....(17)
- Figure I-9 : Schéma du principe de fonctionnement d'une CSSC.....(18)
- Figure I-10 : a) Trajectoire d'un rayon lumineux arrivant sur une surface texturée ;b) Plaque de silicium après texturation.....(20)
- Figure I-11 : Caractéristique d'un groupement de modules PV en série.....(22)
- Figure I-12 : Caractéristique d'un groupement de modules PV en parallèle.....(22)
- Figure I-13 : Caractéristique d'un groupement mixte de modules PV.....(23)
- Figure I-14 : Influence de la température sur une cellule solaire.....(24)
- Figure I-15 : Influence de l'éclairement sur la cellule solaire.....(24)

Chapitre 2

- Figure II-1 : Oxyde de Zinc (ZnO) massif sous forme naturelle (a) et (b) et provenant de synthèse hydrothermal (c). Sa couleur varie suivant les impuretés qu'il contient : sa couleur rouge par exemple, est due à la présence de manganèse au sein du matériau. A l'état pur, il est transparent.....(28)
- Figure II-2 : Structure cristalline de l'oxyde de zinc.....(29)
- Figure II-3 : Structure de bande de ZnO en utilisant le pseudo potentiel de O_{6+} . La référence de zéro correspond au maximum de bande de valence.....(30)
- Figure II-4 : Principe de fonctionnement du procédé PVD.....(33)

Figure II-5 : Schéma conventionnel d'une évaporation sous vide.....	(35)
Figure II-6 : Principe de l'ablation laser.....	(36)
Figure II-7 : Schéma de principe de la pulvérisation cathodique.....	(37)
Figure II-8 : Schéma de principe de l'épitaxie par jet moléculaire.....	(38)
Figure II-9 : Exemple de réacteur de dépôt par CVD.....	(39)
Figure II-10 : Représentation schématique d'appareillages de dépôt par dip et spin-coating.....	(40)
Figure II-11 : Dispositif de la technique spray pyrolyse.....	(41)
Figure II-12 : Influence de la rugosité de la surface de couche sur l'absorption de la lumière.....	(42)

Chapitre 3

Figure III-1 : Variation de la diffraction en fonction de l'obstacle rencontré.....	(45)
Figure III-2 : Diffractomètre Bruker D8Advanced utilisé dans un laboratoire à l'université de Lyon.....	(45)
Figure III-3 : Réflexion des rayons X par une famille de plans réticulaires espacés d'une distance d	(46)
Figure III-4 : Photo MEB d'une couche mince de ZnO Sur un substrat de Silicium réalisée par pulvérisation cathodique.....	(48)
Figure III-5 : Dispositif d'un microscope électronique à balayage HITACHI 4800...	(48)
Figure III-6 : Principe de la MEB.....	(49)
Figure III-7 : Mesure directe de l'épaisseur de la couche de ZnO à partir de l'image obtenue par MEB.....	(50)
Figure III-8 : Dispositif d'un microscope électronique à transmission utilisé à l'université de Lille 1.....	(50)
Figure III-9 : Principe de la microscopie électronique à transmission (MET).....	(51)
Figure III-10 : Image TEM d'une couche de silice (SiO_2).....	(51)
Figure III-11: Principe de fonctionnement d'un spectromètre.....	(53)
Figure III-12 : Exemple d'un spectre UV-visible.....	(53)
Figure III-13 : Schéma de principe d'un spectromètre Raman.....	(54)

Figure III-14 : Schéma de la méthode des quatre pointes.....	(56)
Figure III-15 : Photo réelle du dispositif de la méthode de quatre pointes utilisé à l'Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables (URMER) à l'université de Tlemcen.....	(56)

Chapitre 4

Figure IV-1 : Schéma équivalent d'une cellule solaire. Modèle une diode.....	(60)
Figure IV-2 : schéma équivalent d'une cellule solaire. Modèle deux diodes.....	(61)
Figure IV-3 : Caractéristique $I-V$ d'une cellule solaire.....	(62)
Figure IV-4 : Influence de la température sur la caractéristique $I-V$	(63)
Figure IV-5 : Influence de la résistance série sur la caractéristique $I-V$	(64)
Figure IV-6 : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique $I-V$	(65)
Figure IV-7 : Influence du facteur d'idéalité sur la caractéristique $I-V$	(66)
Figure IV-8 : Fenêtre d'exécution « action panel » du logiciel SCAPS.....	(67)
Figure IV-9 : Le point de fonctionnement.....	(68)
Figure IV-10 : bloc de la résistance série et shunt.....	(68)
Figure IV-11 : Bloc de l'illumination.....	(69)
Figure IV-12 : Bloc « Action ».....	(69)
Figure IV-13 : Panneau de définition d'une cellule solaire.....	(70)
Figure IV-14 : Panneau de propriétés de la couche.....	(71)
Figure IV-15 : Panneau des bandes d'énergie.....	(72)
Figure IV-16 : Schéma de la cellule solaire à simuler.....	(73)
Figure IV-17 : Caractéristique $J-V$ de la cellule ZnO/CdS/CdTe.....	(74)
Figure IV-18 : Influence de la température sur la caractéristique $J-V$	(75)
Figure IV-19 : Influence de la température sur le rendement.....	(75)

Figure IV-20 : Influence de l'épaisseur de la couche de ZnO sur la caractéristique $J-V$	(76)
Figure IV-21 : Influence de l'épaisseur de la couche de ZnO sur le rendement.....	(77)
Figure IV-22 : Influence du dopage de la couche de ZnO sur la caractéristique $J-V$	(78)
Figure IV-23 : Influence du dopage de la couche de ZnO sur le rendement.....	(78)
Figure IV-24 : Influence de la mobilité des électrons de la couche de ZnO sur la caractéristique $J-V$	(79)
Figure IV-25 : influence de la mobilité de la couche de ZnO sur le rendement.....	(80)

Liste des tableaux

Chapitre 2

Tableau 1 : Quelques propriétés optiques de ZnO.....(32)

Chapitre 4

Tableau IV-1 : paramètres de chaque couche de la cellule ZnO/CdS/CdTe.....(73)

Liste des symboles :

I_{cc}	→ courant de court-circuit	(A)
V_{co}	→ tension à circuit ouvert	(V)
I_{opt}	→ courant optimal	(A)
V_{opt}	→ tension optimale	(V)
I_{mpp}	→ courant au point de puissance maximale	(A)
k	→ constante de Boltzman = 1.38×10^{-23}	(J/K)
q	→ charge de l'électron = 1.602×10^{-19}	(C)
I_s	→ courant de saturation	(A)
P_m	→ puissance maximale	(W)
I_m	→ courant maximal	(A)
V_m	→ tension maximale	(V)
FF	→ facteur de forme	(%)
P_{in}	→ puissance incidente	(W)
η	→ rendement de la cellule	(%)
d_{CAR}	→ épaisseur de la couche antireflet	(μm)
n_{CAR}	→ indice de réfraction de la couche antireflet	
λ	→ longueur d'onde	(nm)
ε	→ constante diélectrique	
d	→ distance interréticulaire	(μm)
θ	→ angle de diffraction	(rad)
R	→ résistance	(Ω)
ρ	→ résistivité électrique	(S.m^{-1})

σ → conductivité électrique	(S)
e → épaisseur de la couche conductrice	(cm)
$R_{\text{carrée}}$ → résistance carrée	(Ω)
I_{ph} → photo-courant	(A)
R_s → résistance série	(Ω)
R_{sh} → résistance shunt (parallèle)	(Ω)
I_s → courant de saturation de la diode	(A)
A → facteur de qualité de la diode	
T → température de la cellule	(K)

Sommaire

Introduction générale.....1

Chapitre I : généralités sur le photovoltaïque.

1- Introduction.....	6
2- Energie solaire.....	6
2-1- Rayonnement solaire.....	6
2-2- Type de rayonnement solaire.....	7
3- Energie photovoltaïque.....	8
3-1- Conversion photovoltaïque.....	8
3-2- Cellule photovoltaïque.....	9
3-2-1- Principe de fonctionnement.....	9
3-2-3- Paramètres électrique d'une cellule photovoltaïques.....	10
a- Courant de court-circuit I_{cc}	11
b- Tension à circuit ouvert V_{co}	11
c- Puissance maximale P_m	11
d- Facteur de forme FF.....	11
e- Le rendement η	12
3-2-4- Types de cellules photovoltaïques.....	12
a- Cellules cristallines.....	12
b- Cellules à base de couches minces.....	13
c- Cellules à haut rendement.....	14
d- Cellules organique.....	17
e- Cellules solaires sensibilisées par colorant (CSSC).....	18
3-2-5- Architecture d'une cellule photovoltaïque.....	19
a- Texturisation de la surface.....	19
b- Les contacts face avant et face arrière.....	20
c- La couche antireflet.....	20
d- La passivation.....	21
e- Champ électrique dans la zone arrière (BSF).....	21
3-3- Association des modules photovoltaïques.....	21
3-3-1- Montage en série.....	21
3-3-2- Montage en parallèle.....	22
3-3-3- Montage mixte.....	23
3-4- Influence de quelques paramètres extérieurs sur le rendement photovoltaïque.....	23
3-4-1- Influence de la température.....	23
3-4-2- Influence du rayonnement.....	24
3-5- Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	25
4- Conclusion.....	26

Chapitre II : L'oxyde de zinc et les techniques d'élaboration d'une couche mince de ZnO.

1- Introduction.....	28
2- Oxyde de zinc.....	28
2-1- Définition.....	28
2-2- Propriétés de l'oxyde de zinc (ZnO).....	28
2-2-1- Propriétés structurales.....	28
2-2-2- Propriétés électroniques.....	29
2-2-3- Propriétés électriques.....	30
2-2-4- Propriétés optiques.....	31
2-2-5- Propriétés chimiques.....	32
2-3- Différents types de défauts dans le ZnO.....	32
3- Elaboration de couches minces de ZnO.....	33
3-1- Définition d'une couche mince.....	33
3-2- Techniques de dépôt d'une couche mince.....	33
3-2-1- Méthodes physiques.....	33
a- Dépôt physique en phase vapeur (PVD).....	33
b- Evaporation sous vide.....	34
c- Ablation laser.....	35
d- Pulvérisation cathodique.....	36
e- Epitaxie par jet moléculaire : MBE.....	37
3-2-2- Méthodes chimiques.....	38
a- Dépôt chimique en phase vapeur (CVD).....	38
b- Voie sol gel.....	39
c- Méthode spray pyrolyse.....	40
4- Le rôle de la couche mince de ZnO dans une cellule photovoltaïque.....	41
5- Conclusion.....	42

Chapitre III : Techniques de caractérisation d'une couche mince de ZnO.

1- Introduction.....	44
2- Techniques de caractérisation d'une couche mince.....	44
2-1- Caractérisation structurale.....	44
2-1-1- Diffraction des rayons X.....	44
2-2- Caractérisation morphologique.....	47
2-2-1- Microscopie électronique à balayage (MEB).....	47
2-2-2- Microscopie électronique à transmission (MET).....	50
2-3- Caractérisation optique.....	52
2-3-1- Spectroscopie UV-visible.....	52
2-3-2- Spectroscopie Raman.....	54
2-4- caractérisation électrique.....	54
2-4-1- Méthode de quatre pointes.....	54

3- Conclusion.....	57
--------------------	----

Chapitres IV : Modélisation et simulation d'une cellule solaire à base de couche mince de ZnO.

1- Introduction.....	59
2- Modélisation d'une cellule solaire.....	59
2-1- Modèle électrique d'une cellule solaire.....	59
2-1-1- Modèle à une diode.....	60
2-1-2- Modèle à deux diodes.....	61
2-2- Résultats et discussion.....	61
2-2-1- Caractéristique $I-V$	62
2-2-2- Influence de la température sur la caractéristique $I-V$	63
2-2-3- Influence de la résistance série.....	64
2-2-4- Influence de la résistance parallèle (shunt).....	65
2-2-5- Influence du facteur d'idéalité.....	66
3- Simulation avec SCAPS-1D d'une cellule solaire à base de couche mince de ZnO.....	66
3-1- Présentation du logiciel SCAPS-1D.....	67
3-2- Utilisation du logiciel.....	67
3-2-1- Panneau d'action.....	67
3-2-2- Panneau de définition de la cellule solaire.....	70
3-2-3- Panneau des bandes d'énergies (résultats).....	71
3-3- Présentation de la cellule ZnO/CdS/CdTe.....	73
3-3-1- Paramètres de la cellule.....	73
3-3-2- Résultats et discussion.....	74
a- Caractéristique $J-V$	74
b- Influence de quelques paramètres sur la caractéristique $J-V$	75
➤ Influence de la température.....	75
➤ Influence de l'épaisseur de la couche de ZnO.....	76
➤ Influence du dopage de la couche de ZnO.....	78
➤ Influence de la mobilité électronique de la couche de ZnO.....	79
4- Conclusion.....	80
Conclusion générale.....	82
Références.....	84
Annexe.....	89

De nos jours, en parallèle à la croissance du flux démographique et du secteur de l'industrie, les besoins énergétiques ont augmenté à leurs tours. Les énergies les plus utilisées jusqu'à aujourd'hui sont, dans leur plus grand nombre, polluantes et ont un impact nuisible sur l'environnement, en l'occurrence des énergies fossiles (gaz, pétrole, charbon,...) et leur épuisement est inévitable.

En effet, l'enjeu est grand et des mesures doivent être prises afin de couvrir les demandes énergétiques. Les scientifiques se sont retrouvés sous la contrainte de chercher une solution face à cette crise. C'est ce qui les a emmenés à se tourner vers des énergies renouvelables.

Cependant, les énergies renouvelables ont l'avantage d'être une source d'énergie naturelle et inépuisable sans pour autant nuire à l'environnement ; car elles n'émettent aucun déchet toxique. Le recours aux énergies renouvelables et à l'énergie photovoltaïque, en particulier, est devenu incontournable.

La filière du photovoltaïque est en développement constant. Le but est de réaliser des cellules solaires avec le plus grand rendement possible. Ces cellules solaires sont constituées d'un matériau semi-conducteur qui converti l'énergie du rayonnement solaire en électricité.

Les cellules solaires nanostructurées ont été développées pour réduire le coût du photovoltaïque et le rendre compétitif aux autres sources d'énergies. Parmi ces cellules solaires, il y a celles qui sont constituées à base d'oxyde de Zinc.

Ce dernier est un matériau semi-conducteur qui fait partie de la famille des oxydes transparents conducteurs (TCO : Transparent Conductive Oxides). C'est un matériau remarquable dans de nombreux domaines avec une large bande interdite de l'ordre de 3.3 eV, sa disponibilité, son coût et ses propriétés électroniques, électriques et optiques font de lui un candidat idéal pour des applications en optoélectronique, en photovoltaïque, capteur à gaz, réalisation de dispositifs électroluminescents (LED), fenêtres électrochromiques, ou encore en médecine [1]. Ces propriétés ont justifié notre choix du matériau.

L'oxyde de zinc en couches minces est utilisé, afin d'améliorer les performances des cellules solaires en absorption optique. Ce matériau permet un élargissement de la fenêtre de capture du spectre de lumière. Ceci va permettre un accroissement du courant de court-circuit. L'augmentation du photo-courant provient du fait que le ZnO transmet des photons dont les longueurs d'ondes comprises entre 380 et 520 nm et de plus réduit les pertes par réflexion au-delà du spectre visible [2].

Dans ce travail de recherche, nous allons présenter une étude de la structure des cellules solaires à base de couche mince de ZnO, en donnant les différentes techniques de son élaboration et la caractériser. Enfin à l'aide du logiciel Matlab nous allons donner un modèle d'une cellule solaire. Par la suite avec le logiciel SCAPS-1D nous allons simuler une cellule solaire à base de couche mince de ZnO et voir l'influence des différents paramètres sur son rendement, à savoir : la température, la résistance série et shunt, la mobilité électronique,...

Ce mémoire est composé de quatre chapitres selon la structure suivante :

Dans le premier chapitre, nous allons introduire la notion de l'énergie solaire, la conversion photovoltaïque, le fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque ses paramètres et son architecture, l'influence de quelques paramètres extérieure sur la cellule photovoltaïque et enfin les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque.

Le deuxième chapitre est consacré à introduire le matériau ZnO et ses différentes propriétés, ensuite nous allons définir la notion de la couche mince et présenté les différentes techniques de son élaboration (techniques de dépôts physiques et chimiques).

Le troisième chapitre présentera les techniques de caractérisations d'une couche mince que ça soit avec une caractérisation structurale à la diffraction des rayons X, morphologique y compris la microscopie électronique à balayage (MEB) et à transmission (MET), optique avec la spectroscopie UV-visible et spectroscopie Raman ou enfin électrique en passant par la méthode des quatre pointes.

Enfin, dans le quatrième chapitre nous allons tout d'abord faire l'étude du circuit équivalent de la cellule solaire pour un modèle à une exponentielle, et en utilisant

MATLAB on obtiendra la caractéristique (I - V), par la suite on étudiera l'influence de chaque paramètre sur cette caractéristique. Ensuite, on fera la simulation d'une cellule solaire composée de ZnO/CdS/CdTe à l'aide du logiciel SCAPS 1D, par cette simulation nous discuterons l'influence des différents paramètres sur les performances de la cellule.

1- Introduction :

De nos jours les énergies renouvelables sont devenues un enjeu incontournable pour la survie de l'humanité en raison de leur présence permanente et de leur source inépuisable. L'énergie solaire est jusqu'à aujourd'hui l'énergie renouvelable la plus explorée sous ses différentes sortes : photovoltaïque et thermique.

L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. Elle désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques. Elle résulte de la conversion directe dans un semi-conducteur (le silicium, le CdTe, l'AsGa, le CIS, etc.) d'un photon en électron.

Ce premier chapitre est consacré aux généralités sur la conversion photovoltaïque, en introduisant les notions de base ainsi que le principe de fonctionnement de la cellule solaire.

2- Energie solaire :

2-1- Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est un paquet d'ondes qui est émis par le soleil et reçu par la terre 8 minutes plus tard. Ces ondes selon leurs longueurs sont faites d'ultraviolet, visible et infrarouge.

En traversant l'atmosphère, une partie de ce rayonnement arrive à parvenir jusqu'à la terre, alors que l'autre partie est soit réfléchi ou absorbé par la couche d'atmosphère.

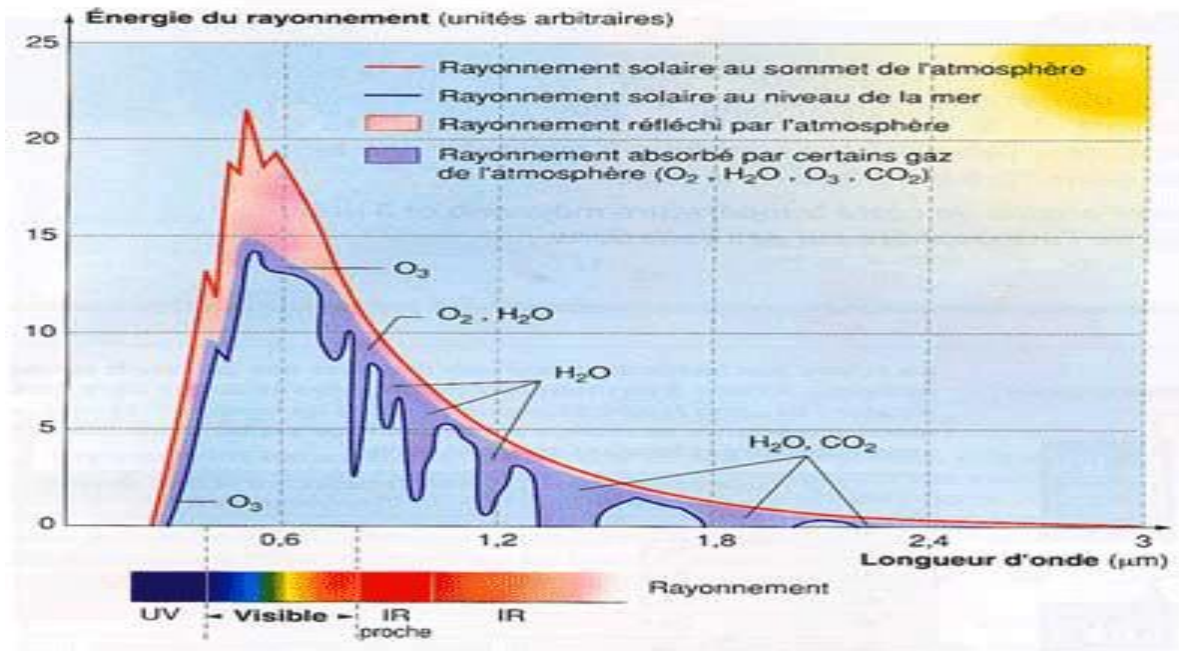


Figure I-1 : Spectre de rayonnement solaire mesuré au sommet de l'atmosphère et au niveau de la mer [3].

D'après cette figure, on peut constater que la plus grande partie du spectre solaire reçu par la terre se concentre dans la bande du visible et de l'infrarouge. Le rayonnement solaire mesuré au niveau de la mer est beaucoup moins important que celui mesuré au sommet de l'atmosphère.

2-2- Type de rayonnement solaire :

En fonction du type du rayonnement solaire et de la technique utilisée, l'énergie solaire peut permettre de produire de la chaleur ou de l'électricité.

On distingue 3 types de rayonnement solaire :

- **Rayonnement direct** : reçu directement du soleil, ce sont les rayons UV. Il a une trajectoire linéaire (il y a en effet, de légères déviations) C'est ce type de rayonnement qui est utilisé dans les systèmes à concentration.
- **Rayonnement diffus** : ce sont des rayons qui proviennent de toute la voûte céleste. Des rayons lumineux issus du soleil traversent les nuages et se diffusent sur toute la surface de la terre. Il contribue à l'éclairage mais ne peut pas être concentré à l'inverse du rayonnement direct.

- Rayonnement réfléchi : c'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- Rayonnement global : c'est l'ensemble des trois précédents rayonnements (direct, diffus et réfléchi). C'est celui-ci qui est utilisé pour faire fonctionner les panneaux solaires thermiques et photovoltaïques [3].

3- Energie photovoltaïque :

3-1- Conversion photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque est la conversion du rayonnement solaire en électricité. Photovoltaïque est un mot grec qui réunit photo qui veut dire lumière et volt qui est une unité qui mesure la tension électrique et qui tient son nom du physicien Volta.

L'histoire du PV débute en 1839 lorsque le physicien français Antoine César Becquerel découvre le principe photovoltaïque (C'est son petit-fils, Antoine Henri Becquerel qui découvrira la radioactivité). L'effet photovoltaïque en tant que tel a été découvert en 1887 par le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz. C'est Albert Einstein qui, le premier, a pu expliquer le principe photovoltaïque, avec à la clef, le prix Nobel de physique en 1921.

En 1955, des chercheurs américains (Chapin, Fuller, Pearson et Prince) travaillant pour les *laboratoires Bell Telephone* (devenus aujourd'hui *Alcatel-Lucent Bell Labs*) développent une cellule photovoltaïque à haut rendement de 6 %. Les Américains lancent en 1959 le satellite *Vanguard* qui est alimenté par des piles photovoltaïques ayant un rendement de 9%.

La première maison avec une installation photovoltaïque voit le jour en 1973 à l'université de Delaware aux Etats-Unis d'Amérique. C'est en 1983 que la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt 4000 kilomètres en Australie.

Aujourd'hui, l'énergie photovoltaïque est à la disposition des entreprises et des particuliers et les panneaux photovoltaïques ont des rendements de l'ordre de 20% [4].

3-2- Cellule photovoltaïque:

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui convertit le photon reçu en une tension électrique continue, et cela se fait à partir d'un processus nommé l'effet photo-électrique.

Elle est généralement faite de matériaux semi-conducteurs. Ces cellules réunies forment le module ou le panneau photovoltaïque.

3-2-1- Principe de fonctionnement :

Le matériau qui compose la cellule photovoltaïque comporte deux zones, une dopée de type n (Phosphore) avec un excès d'électrons et l'autre dopée de type p (Bore) avec un déficit d'électrons. Lorsque ces deux zones sont en contact les électrons en excès de la première zone (dopée n) se propagent dans la seconde zone (dopée p). La première zone devient chargée positivement et la seconde devient chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p . Une jonction (dite $p-n$) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p , une diode est obtenue.

Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie supérieure ou égale à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule, l'effet repose donc à la base sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité [5].

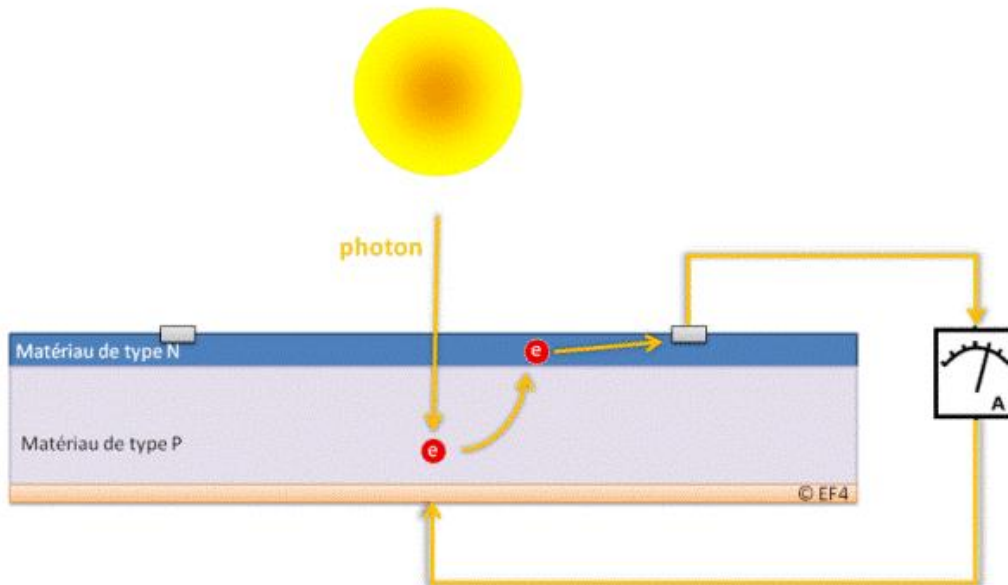


Figure I-2 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [6].

3-2-3- Paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque :

Les paramètres d'une cellule photovoltaïque sont déterminés à partir de la courbe caractéristique courant-tension ($I-V$) qui décrit le fonctionnement de la cellule.

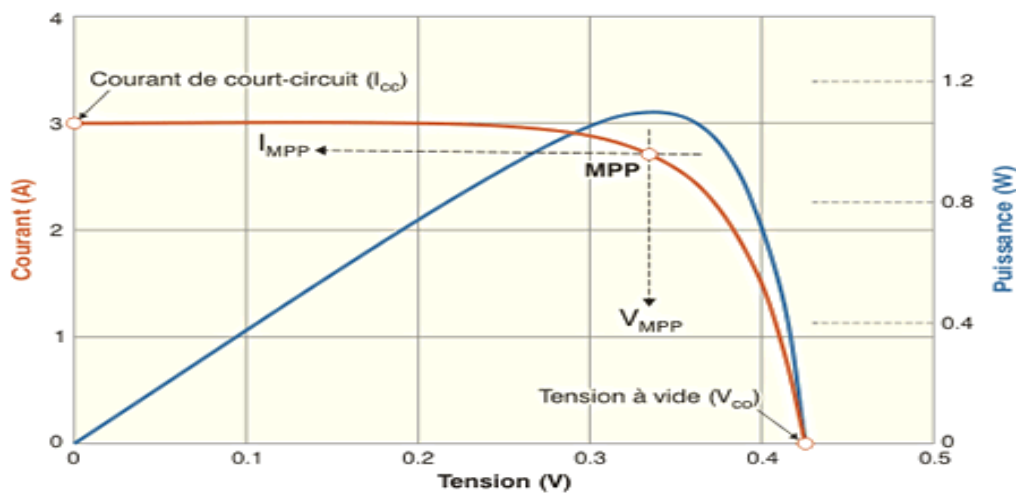


Figure I-3 : Représentation conventionnelle de la courbe $I(V)$ et $P(V)$ [7].

Les trois grandeurs physiques qui définissent cette courbe sont :

- V_{co} : Tension en circuit ouvert, cette valeur représente la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.

- I_{cc} : Courant court-circuit, cette valeur représente le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal : MPP (en anglais : *maximal power point*) obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp}) [7].

Ces paramètres sont définis par:

a- Courant de court-circuit I_{cc} :

Le courant de court-circuit est la valeur maximale du courant lorsque sa tension est égale à zéro ($V=0$). Il augmente généralement avec l'intensité d'illumination et dépend : de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement incident, de la mobilité des porteurs et de la température

b- Tension à circuit-ouvert V_{co} :

La tension à circuit-ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend du type de la cellule solaire, des matériaux de la couche active et de l'éclairement de la cellule.

V_{co} est donné par :

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

c- Puissance maximale P_m :

Le point de fonctionnement est imposé par la résistance de charge et non par la cellule elle-même. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra donc d'obtenir la puissance maximale :

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (\text{I.2})$$

d- Facteur de forme FF :

Il détermine la qualité électrique de la cellule, il est déterminé par l'équation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (I.3)$$

e- Le rendement η :

Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivré par la cellule P_m et la puissance lumineuse incidente P_{in} [8] :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (I.4)$$

3-2-4- types de cellules photovoltaïques :

a- Cellules cristallines :

Ces cellules, généralement en silicium, ne comprennent qu'une seule jonction p-n. On distingue deux types de cellules cristallines:

- Cellules en silicium polycristallin :

Les techniques de production du silicium polycristallin sont beaucoup plus simples que celles du silicium monocristallin, et donc bien moins chères à mettre en œuvre. Néanmoins, la qualité de ce matériau est moins bonne à cause de la présence de joints de grains qui introduisent des zones fortement recombinantes et un taux assez élevé des impuretés métalliques et autres. Ces joints sont constitués par les surfaces adjacentes des grains d'orientations cristallographiques différentes et contiennent beaucoup de liaisons pendantes. Ils ont pour effet de réduire la durée de vie globale des porteurs. En outre, ces joints de gains bloquent le flux de porteurs et ils constituent une voie éventuelle d'un courant de fuite à travers la jonction. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux [9].



Figure I-4 : Photo d'un substrat de silicium polycristallin (échelle : $10 \times 10 \text{ cm}^2$) [9].

- Cellules en silicium monocristallin :

Les cellules au silicium monocristallin offrent le meilleur rendement parmi les panneaux solaires disponibles dans le commerce : entre 13 à 15%. Il faudra donc moins de cellules pour atteindre la puissance désirée, mais comme le silicium monocristallin est aussi le plus cher, son seul avantage est finalement d'utiliser une surface réduite : il faut environ 7m^2 pour obtenir 1 kilo-Watt-crête (kWc).



Figure I-5 : Cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin [9].

b- Cellules à base de couches minces :

- Cellules en silicium amorphe :

Ses atomes sont donc agencés sans réelle organisation, ce qui leur permet de mieux capter la lumière (par rapport au silicium cristallin). Problème : les charges générées ont plus de difficulté pour se déplacer à cause de la désorganisation de la matière, ce qui se traduit par un mauvais coefficient de conversion. Par conséquent, leur rendement est faible. La désorganisation atomique a d'autres conséquences. Les électrons de valence des atomes de Si ne forment pas toujours des liaisons covalentes

au sein du semi-conducteur. Il apparaît alors des liaisons pendantes qui peuvent dénaturer les propriétés électroniques du matériau. Pour limiter ce phénomène, les couches de silicium sont régulièrement passivées avec de l'hydrogène (a-Si:H). Des atomes d'hydrogène établissent des liaisons avec les électrons restés libres, et réduisent ainsi le nombre de liaisons pendantes [10].

- Cellules CIGS :

Les cellules CIGS renferment un absorbant composé de cuivre, de gallium, d'indium et de sélénium. Cette couche de 1 à 2,5 μm d'épaisseur étant dopée p, elle doit être recouverte d'un matériau de type n, par exemple du sulfure de cadmium (CdS). Tiens donc, du cadmium... mais sur une épaisseur de seulement 0,04 à 0,07 μm , autant dire qu'il est présent en infime quantité. Puisqu'il y a deux semi-conducteurs différents, les cellules CIGS sont elles aussi à hétérojonction.

Comme son homologue au silicium amorphe, la cellule CIGS résiste mieux à l'échauffement que les cellules au silicium cristallin, mais moins bien que les cellules au CdTe. En plus, elle capte un peu mieux la lumière en début et en fin de journée (quelques pour cent), comme toutes les couches minces [10].

- Cellules CdTe :

Le faible rendement des cellules à base de silicium amorphe ont motivé les scientifiques à chercher des alternatives. Le matériau le plus prometteur est le tellure de cadmium (CdTe) qui offre la possibilité de produire des modules à des coûts plus faibles avec un rendement de 10%, et un avantage qui réside dans la forte absorption du tellure de cadmium. Cependant la toxicité du matériau freine le développement de cette technologie [10].

c- Cellules à haut rendement :

- Cellules à jonction :

- Cellules tandem :

Les cellules tandem sont obtenues à partir de deux cellules simples empilées l'une sur l'autre, par exemple, une couche mince de silicium amorphe empilée sur une couche silicium cristallin. Ce tandem est censée optimiser le rendement comparé à celui produit

par des cellules simples seules et ce qu'elles que soient leur caractéristiques, amorphes, cristallines ou microcristallines.

Il s'agit de l'empilement de deux cellules l'une sur l'autre. Ces deux cellules sont mises en série grâce à une couche de recombinaison des porteurs de charges.

La tension de circuit ouvert du dispositif est donc la somme des tensions de circuit ouvert des cellules si elles étaient prises seules, et le courant de court-circuit est le plus faible des deux cellules.

Cette structure offre l'avantage de pouvoir utiliser deux matériaux dont les bandes interdites (Spectres d'absorption) différent. Ce dispositif est capable d'absorber la somme des deux spectres d'absorption. Les couches actives peuvent être composées de mélanges polymère/fullerène ou de petites molécules. On peut par ailleurs utiliser différents types de matériaux dans les deux couches, ce qui donne une grande latitude quant à la fabrication de la cellule.

La première des cellules tandem était par exemple composée d'une couche de petites molécules évaporées pour la première cellule et d'une couche polymère déposée par voie humide pour la seconde. Par la suite, des cellules tandem utilisant différents matériaux ont été testées, jusqu'à atteindre des rendements de 6,7% grâce à l'utilisation d'une couche de recombinaison en TiO_x et de deux polymères dont les bandes interdites sont différentes [11].

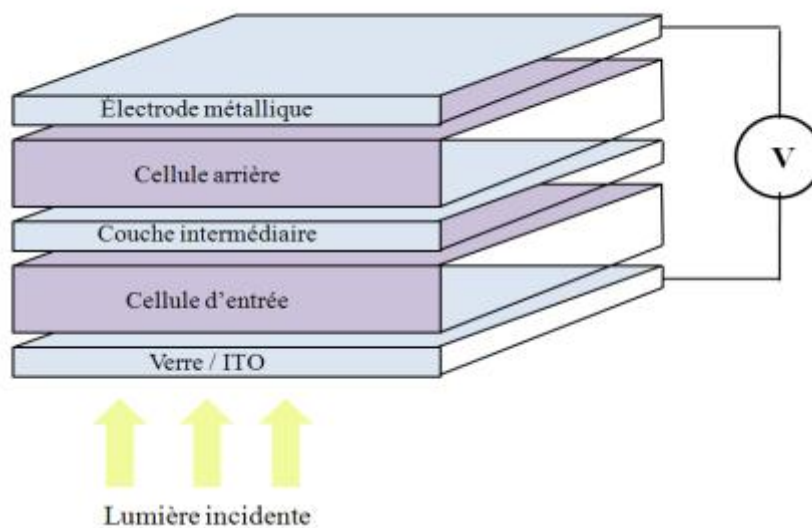


Figure I-6 : Schéma d'une structure tandem [11].

➤ Cellules multi-jonctions :

Les cellules multi-jonction sont constituées à partir de différentes couches minces, ce qui optimise le travail d'absorption des calories solaires, puisées plus largement, et ce qui permet un meilleur rendement et une plus grande production. Ce type de cellules n'est pas vendu à des fins commerciales et reste utilisée dans le domaine spatial. Et pour cause, les techniques d'exploitation sont très complexes. On parle de jet moléculaire ou d'épitaxie.

Le fonctionnement de ces cellules réside sur le même principe que celui des cellules Tandem. Les cellules multi-jonction sont composées d'un grand nombre de semi-conducteurs (GaAs, Ge, GaInP₂...) possédant chacun un spectre limité. En choisissant des matériaux dont les longueurs d'onde limites sont les plus proches possibles les unes des autres, l'ensemble des cellules absorbe un spectre, le plus complet possible donnant à l'ensemble un rendement très élevé pouvant atteindre 50%. Le gros défaut de ces cellules est leur coût de fabrication, car aucune production industrielle n'a encore pu être mise en place.

Ces cellules limitent les pertes d'énergie car il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants, (Figure 8). Ainsi il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de conversion très importants [12].

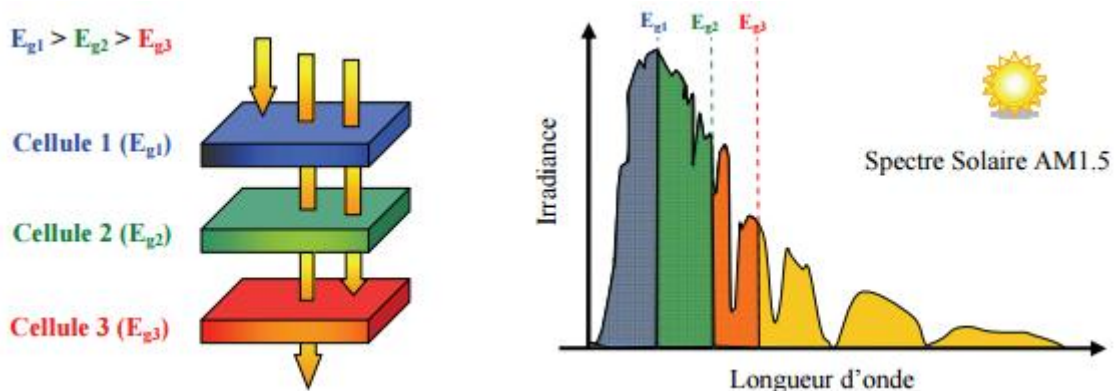


Figure I-7 : Principe de la cellule à hétérojonction [12].

En utilisant des concentrateurs solaires, certains pensent pouvoir baisser les prix (moins de surface de cellule utilisée) et prendre une place dans le marché conventionnel terrestre. Ainsi, si on compare le meilleur rendement sans concentrateur d'une triple jonction GaInP/GaAs/Ge atteignant les 32%, cette même cellule arriverait à 40.7% avec concentrateur. On peut même envisager des rendements encore plus importants avec des cellules complexes de 4 à 6 jonctions voir plus [12].

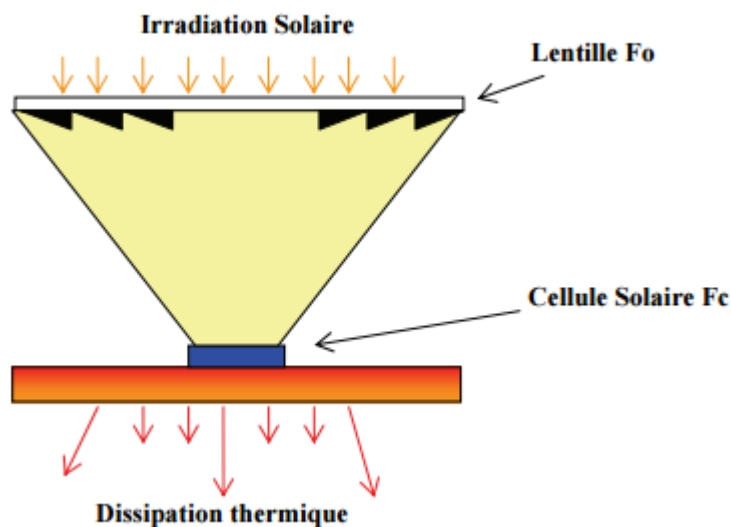


Figure I-8 : Schéma de principe d'un concentrateur photovoltaïque [12].

d- Cellules organique :

Face à la technologie utilisant les matériaux inorganiques, les cellules solaires à base de composés organiques connaissent un développement considérable. L'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent beaucoup d'avantages : la possibilité d'être déposée en grande surface, la facilité de fabrication et de manipulation, la possibilité de réaliser ces cellules sur des substrats flexibles, et grâce à des coûts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient dans l'ensemble revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes. Elles possèdent en revanche à l'heure actuelle des durées de vie jugées inférieures à celles des cellules inorganiques, et des rendements de conversion plus faibles [5].

- *Principe de fonctionnement :*

Après absorption des photons par le polymère, des paires électron-trou liées (excitons) sont générées, puis dissociées. Compte tenu des limitations propres aux matériaux organiques (durée de vie des excitons, faible mobilité des charges), seule une faible fraction des paires électron-trou générées par les photons contribue effectivement au photo-courant. L'une des idées majeures est de distribuer en volume les sites de photo-génération pour améliorer la dissociation des excitons.

Cette démarche est basée sur l'augmentation de la surface de la jonction, grâce à la mise en œuvre d'un réseau interpénétré de type donneur/accepteur (D/A) assurant le transport des trous (P+) vers l'anode (ITO) et le transport des électrons (e^-) vers la cathode métallique (en aluminium Al, par exemple). Si le rendement quantique de séparation des charges photo-induites des systèmes associant un polymère semi-conducteur à un dérivé du fullerène (PCBM) est ainsi proche de l'unité, l'enjeu est désormais de limiter les phénomènes de recombinaison et de piégeage qui limitent le transport et la collection des charges aux électrodes, afin d'augmenter l'efficacité globale des dispositifs qui demeure encore aujourd'hui faible (inférieure à 5%).

L'essor de la filière est également très fortement conditionné par la maîtrise et la compréhension des mécanismes de vieillissement des cellules mais aussi par la maîtrise des technologies en couches minces pour la protection des dispositifs vis-à-vis de l'oxygène et de la vapeur d'eau atmosphériques [13].

e- Cellules solaires sensibilisées par colorant : (CSSC)

Inspiré par la photosynthèse, l'équipe de Michael Grätzel a développé au début des années 90 des cellules solaires composées d'un électrolyte, d'un colorant et d'un oxyde semi-conducteur inorganique. Le meilleur rendement certifié est de 10,4% pour une cellule de 1 cm², réalisé par la société Sharp [14].

- **Principe de fonctionnement :**

Comme dans le cas de la photosynthèse naturelle, l'absorption d'énergie solaire met en route une pompe à électrons mue par l'énergie lumineuse absorbée, dont le principe est illustré dans la figure ci-dessous.

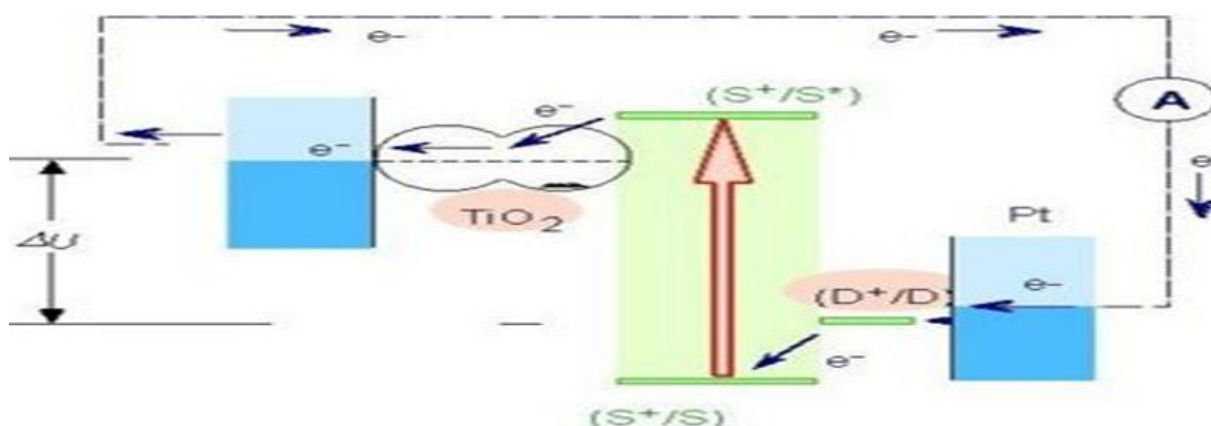


Figure I-9 : Schéma du principe de fonctionnement d'une CSSC [5].

Le sensibilisateur (S) est greffé à la surface d'un oxyde semi-conducteur sous la forme d'une couche mono moléculaire. Il absorbe les rayons solaires incidents qui le promeuvent dans un état électroniquement excité S^* , d'où il est à même d'injecter un électron dans la bande de conduction du dioxyde de titane (TiO_2).

Les électrons ainsi injectés traversent la couche et sont ensuite recueillis par un collecteur de courant qui permet de les diriger vers un circuit externe où leur passage produit de l'énergie électrique. Le retour de l'électron dans la bande de conduction sur le colorant oxydé S^+ est beaucoup plus lent que la réduction de S^+ par le médiateur (D) en solution. De ce fait la séparation de charge est efficace. Le médiateur oxydé (D^+) est réduit à la contre-électrode. La tension maximale débitée correspond à la différence entre le potentiel d'oxydoréduction du médiateur et le niveau de Fermi du semi-conducteur. La charge positive est transférée du colorant (S^+) à un médiateur (iodure) présent dans la solution qui baigne dans la cellule. Ce médiateur, alors oxydé en tri-iodure, diffuse à travers la solution. Ainsi, le cycle des réactions redox est bouclé par transformation de l'énergie solaire absorbée en un courant électrique, sans changement de la composition de quelque partie du système que ce soit [5].

3-2-5 Architectures d'une cellule photovoltaïque :

a- Texturisation de la surface :

La réflexion est à l'origine de pertes importantes pour la cellule. La texturisation est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramide. Le relief crée permet d'augmenter la surface et induit les réflexions multiples sur les

facettes des pyramides. La texturisation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité.

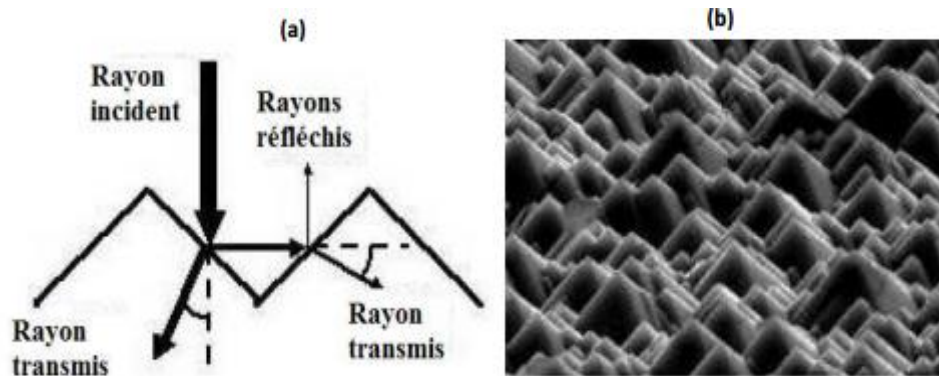


Figure I-10 : a) Trajectoire d'un rayon lumineux arrivant sur une surface texturée ;
b) Plaque de silicium après texturation [8].

b- Les contacts face avant et face arrière :

Les contacts constituent la structure de collecte qui récupère et envoie les porteurs photogénérés vers le circuit externe. Pour assurer efficacement ce rôle, les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractérisation ($I-V$) du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement.

Différents procédés sont utilisés pour la réalisation des contacts. Dans le cadre des cellules photovoltaïques industrielles en silicium multi-cristallin, les contacts sont généralement réalisés par la sérigraphie. Dans le cas des cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées.

c- La couche antireflet :

Pour minimiser la réflexion de la lumière une couche antireflet (CAR) est utilisée. L'épaisseur de la couche antireflet est égale à :

$$d_{CAR} = \frac{(2N+1)\lambda}{4n_{CAR}} \quad (I.5)$$

On obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et CAR/semi-conducteur. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double

couche antireflet est utilisée (avec deux diélectriques). Différentes CAR sont utilisées en photovoltaïque : TiO_2 , SiO_2 , ZnS , [15].

d- La passivation :

La surface des cellules est une source de recombinaison importante à cause des nombreux défauts cristallins présents liés à la discontinuité du cristal. La passivation consiste à améliorer la qualité électronique en surface et en volume du substrat, en neutralisant les sites actifs.

e- Champ électrique dans la zone arrière (BSF) :

Afin de collecter les paires électrons-trou créent par les radiations de grandes longueurs d'ondes du spectre solaire, on réalise un champ électrique par transition abrupte de dopage sur la face arrière de la cellule solaire, dans la zone même du contacte ohmique. Ce champ électrique arrière s'appelle BSF (Back Surface Field). Les porteurs excédentaires ainsi créent au voisinage de cette zone, au lieu de s'y recombinaison, sont repoussés vers la région de charge d'espace de la jonction. Ils participent à la photo courant dans la mesure où la longueur de diffusion de ses porteurs de charges est plus importante que l'épaisseur totale de la couche de base de la cellule [8].

3-3- Association des modules photovoltaïques :

Dans la pratique les cellules solaires ne sont pas utilisées seules. Regroupées et liés électriquement entre elles, elles forment un module photovoltaïque. Ce module à son tour, regrouper et lié électriquement avec d'autres modules, ils forment un générateurs photovoltaïque. Ces modules peuvent être associés d'une des manières suivantes :

3-3-1- Montage en série :

Dans un montage en série les tensions s'additionnent et le courant traversant les modules reste identique. Lorsque les panneaux sont montés en série, l'intensité traversant les panneaux sera celle du panneau le moins performant de la série. Ainsi, si une ombre apparaît sur un des panneaux, toute la série aura pour rendement celui du panneau le plus faible.

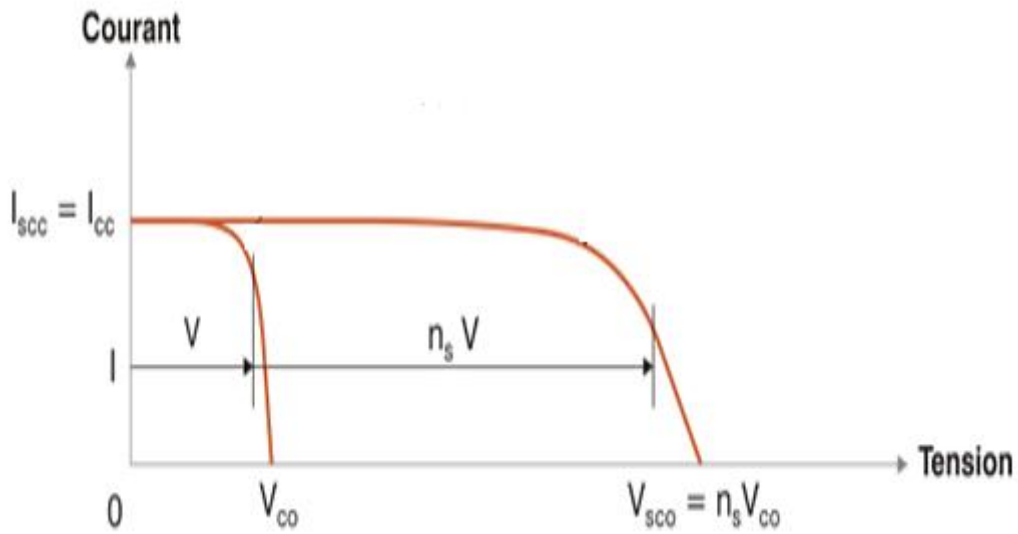


Figure I-11 : Caractéristique d'un groupement de modules PV en série [7].

3-3-2- Montage en parallèle :

Une association parallèle de n modules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur. Dans un groupement de modules identiques connectées en parallèle, les modules sont soumis à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants, figure I-12 résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de n modules [3].

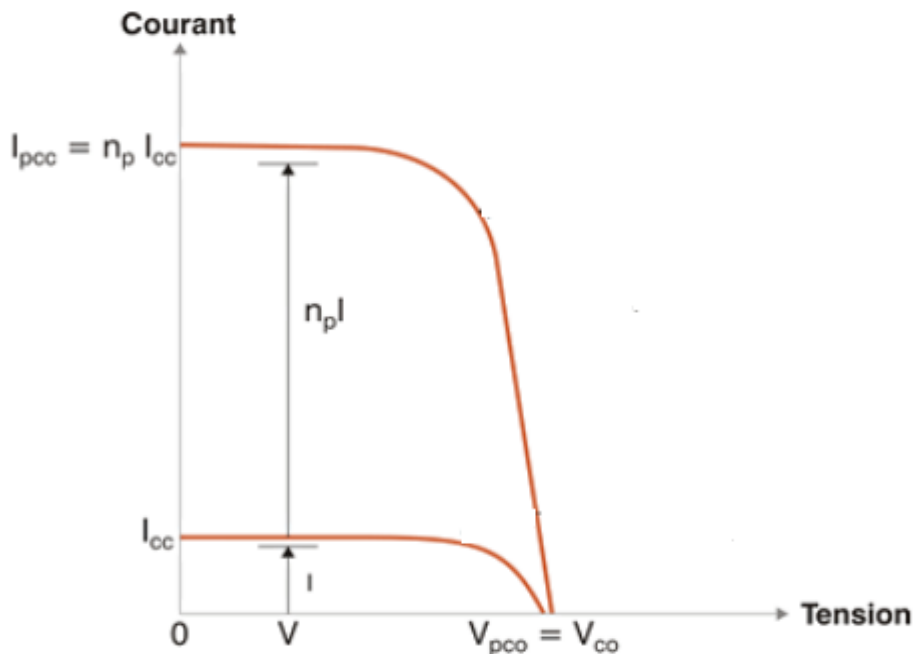


Figure I-12 : Caractéristique d'un groupement de modules PV en parallèle [7].

3-3-3- Montage mixte : (série + parallèle)

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangés de panneaux série et parallèle, afin de former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [8].

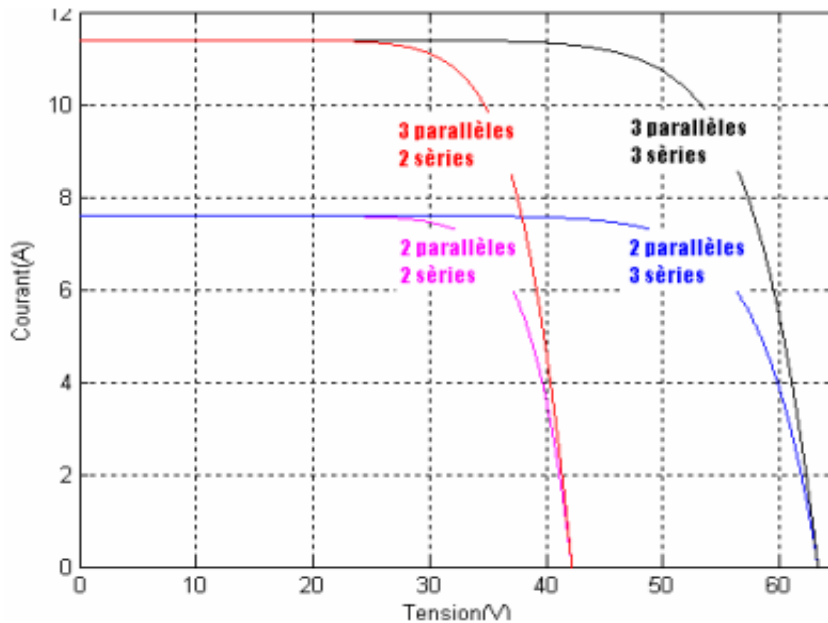


Figure I-13 : Caractéristique d'un groupement mixte de modules PV [8].

3-4- Influence de quelques paramètres extérieurs sur le rendement photovoltaïque :

3-4-1- Influence de la température :

La température a une influence considérable sur le comportement de la cellule et donc sur son rendement. Cette influence se traduit principalement par une diminution de la tension générée (et une très légère augmentation du courant).

Suivant les modèles, ce comportement induit, par degré, une perte de 0.5 % du rendement par rapport au rendement maximum de la cellule. On comprendra donc tout l'intérêt d'une ventilation correcte à l'arrière des panneaux [16].

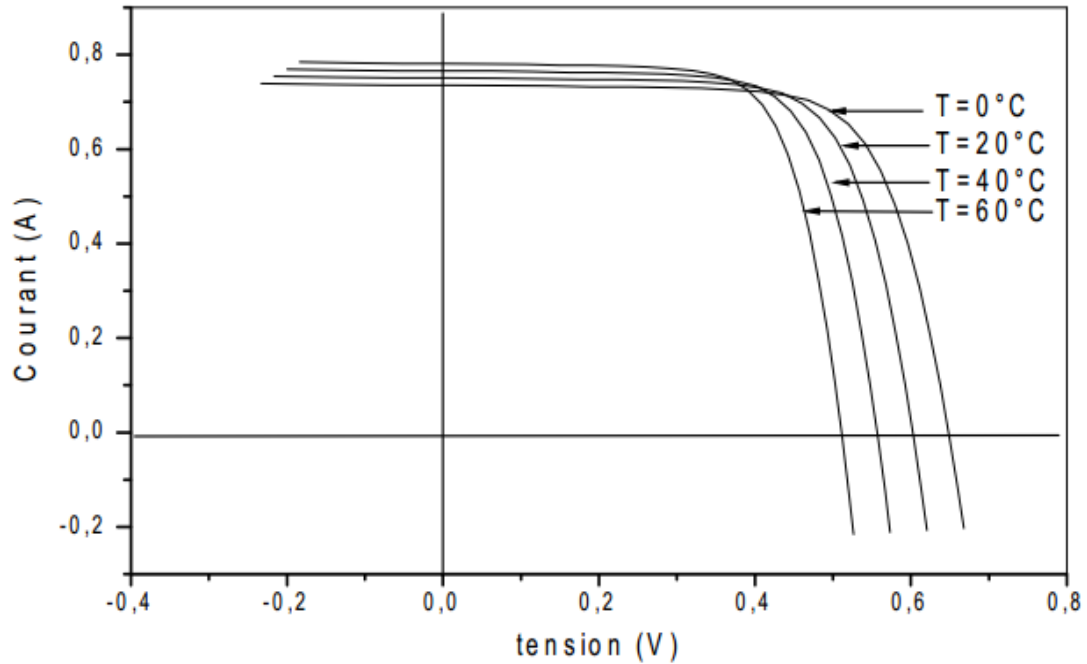


Figure I-14 : Influence de la température sur une cellule solaire [16].

3-4-2- Influence de l'éclairement :

L'éclairement correspond à l'intensité lumineuse captée par le module photovoltaïque, et se mesure en W/m^2 . La nuit, il est nul ($0 W/m^2$). Il varie au cours de la journée entre 0 et $1\ 000 W/m^2$ (valeur maximum), en fonction de la saison. L'éclairement a une nette incidence sur la valeur de I_{cc} . Lorsqu'il double, I_{cc} double aussi. L'éclairement a très peu d'incidence sur la tension à vide V_{co} [16].

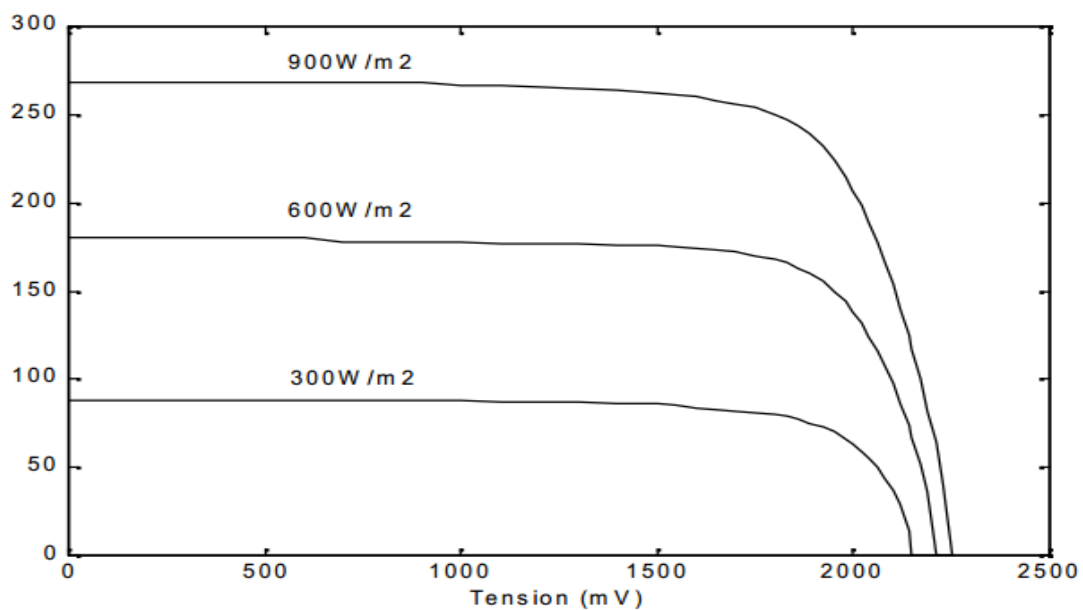


Figure I-15 : Influence de l'éclairement sur la cellule solaire [16].

3-5- Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque [17]:

3-5-1- Avantages :

Cette énergie présente de nombreux avantages, à savoir :

- Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité, peu sujettes à l'usure, elles demandent peu d'entretien.
- Le montage des installations photovoltaïques est simple et les installations sont adaptables aux besoins de chaque projet.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.
- Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement. Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes.
- Sur les sites isolés, l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité à moindre coût.
- Le contrat d'achat est conclu pour une durée assez longue.

3-5-2- Inconvénients :

- Un cycle de vie en question : la durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans.
- Le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an.
- De plus, les panneaux solaires contiennent des déchets toxiques : cuivre, chrome, silicium, cadmium et tellure.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 20 % (pour les meilleurs). L'énergie photovoltaïque convient donc mieux pour des projets à faible besoins, comme une maison unifamiliale, par exemple.

4- Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté et étudié l'énergie solaire d'une manière générale et la cellule photovoltaïque d'une manière détaillée. Nous avons présenté les enjeux et le développement actuel de la technologie. Ensuite, nous avons pu définir les paramètres et introduire les caractéristiques qui la définissent.

1- Introduction :

Dans ce chapitre nous allons d'abord introduire l'oxyde de zinc « ZnO », définir le matériau et introduire ses différentes propriétés, ensuite nous allons passer à la notion de la couche mince et les différentes techniques de son élaboration, et pour finir nous allons nous intéresser à l'application des couches minces de ZnO dans une cellule photovoltaïque.

2- Oxyde de zinc :

2-1- Définition :

L'oxyde de zinc (ZnO) est un matériau binaire de type (II-VI) non toxique avec un large gap direct (3,3eV). Il est transparent dans le visible et dans le proche infrarouge. Il présente un ensemble de propriétés qui permettent son utilisation dans un certain nombre d'applications. Il peut également trouver des applications en optoélectronique, cathodoluminescence, photoluminescence, électroluminescence, comme sonde de produit chimique dans les couches minces ou encore comme matériel piézoélectrique [18].

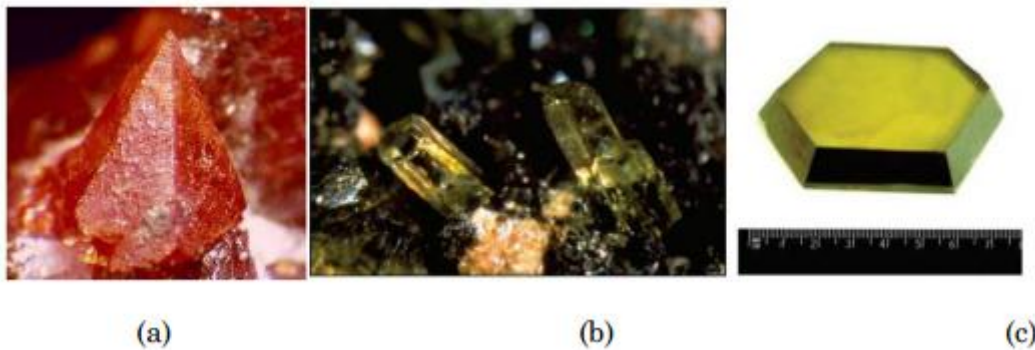


Figure II-1 : *Oxyde de Zinc (ZnO) massif sous forme naturelle (a) et (b) et provenant de synthèse hydrothermal (c). Sa couleur varie suivant les impuretés qu'il contient : sa couleur rouge par exemple, est due à la présence de manganèse au sein du matériau. A l'état pur, il est transparent [19].*

2-2- Propriétés de l'oxyde de zinc (ZnO) :

2-2-1- Propriétés structurelles :

Le ZnO est un matériau semi-conducteur (II-VI) montrant une structure en cristal appelée la structure de wurtzite. Il est constitué de couches d'atomes de zinc en alternance avec des couches d'atomes d'oxygène. Les valeurs des paramètres de la

maille dans les conditions ordinaires de pression et température (300 K) sont $a = 3.2495 \text{ \AA}$ et $c = 5.2069 \text{ \AA}$. Le rapport de c/a également 1.602. Dans la direction parallèle au c - axe, la distance de Zn-O est 0,1992 nm, et c'est 0,1973 nm dans toutes trois autres directions de l'arrangement tétraédrique des voisins les plus proches [20].

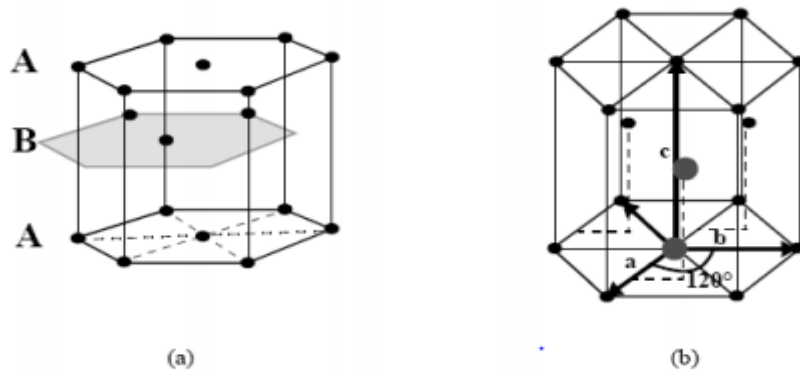


Figure II-2 : Structure cristalline de l'oxyde de zinc [21].

Chaque atome de zinc est entouré de quatre atomes d'oxygène situés aux sommets d'un tétraèdre. En fait, l'atome de zinc n'est pas exactement au centre du tétraèdre mais déplacé de $0,11 \text{ \AA}$ dans une direction parallèle à l'axe c . Les molécules d'oxyde maintiennent donc, dans une certaine mesure, leur individualité, contrairement à ce que l'on attendrait d'un cristal purement ionique. Ce phénomène est dû à l'homopolaire des liaisons Zn – O [22].

2-2-2- Propriétés électroniques :

On rappelle que les structures électroniques de l'oxygène et de zinc sont :

Zn : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2$

O : $1s^2 2s^2 2p^4$

Les états $2p$ de l'oxygène forment la bande de valence, les états $4s$ de zinc constituent la zone de conduction. La figure II-3 montre l'allure de la structure de bande de ZnO. Il existe six bandes résultantes des états $2p$ de l'oxygène, et les plus bas des bandes de conduction ont une forte contribution des états $4s$ de Zn.

La structure électronique de bandes montre que le ZnO est un semi-conducteur à gap directe, le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de

valence sont situés au point Γ . La largeur de la bande interdite est de l'ordre de 3.2eV [23].

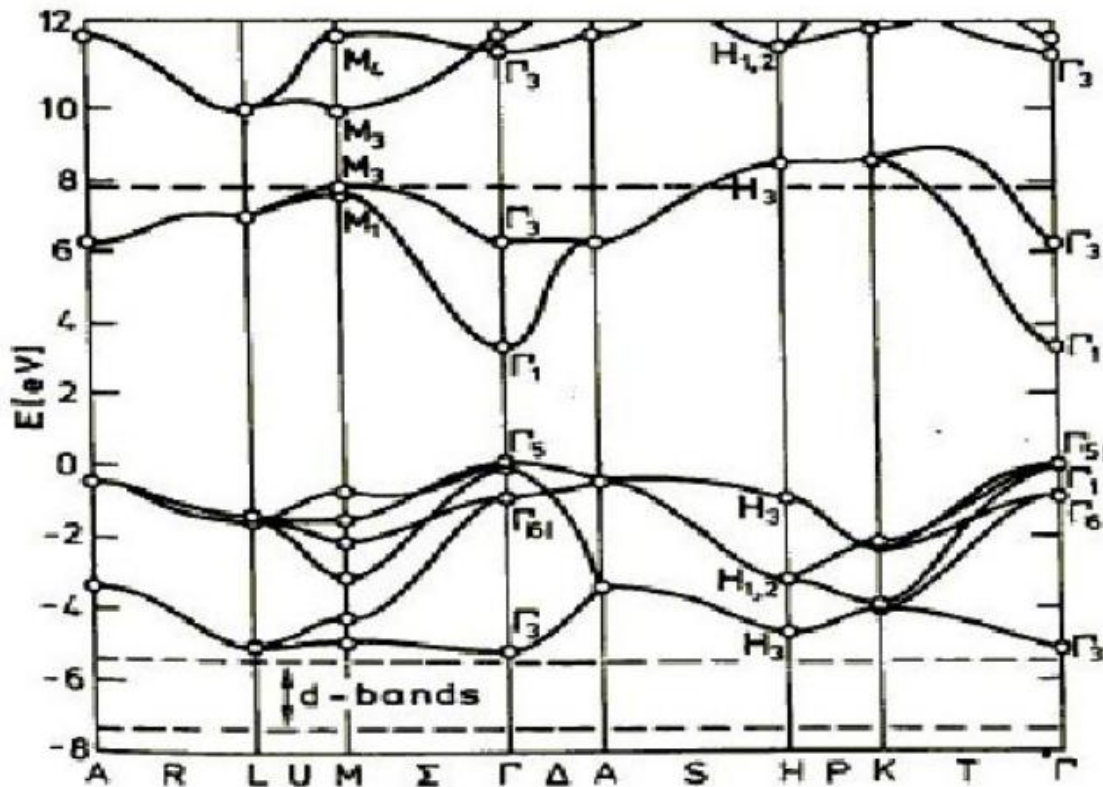


Figure II-3 : Structure de bande de ZnO en utilisant le pseudo potentiel de $O6+$. La référence de zéro correspond au maximum de bande de valence [24].

2-2-3- Propriétés électriques :

D'une manière générale, l'oxyde de zinc non dopé est considéré comme un semiconducteur de type n . Il est possible de modifier la résistivité électrique de l'oxyde de zinc par dopage, en introduisant des atomes de zinc en excès en position interstitielle, ou en créant des lacunes d'oxygène. Ces interstitiels de zinc et ces lacunes d'oxygène ainsi créés, se comportent comme des donneurs d'électrons, et conduisent à une diminution de la résistivité électrique du matériau.

La résistivité électrique dépend du nombre des porteurs libres et de leur mobilité. Selon le mode de préparation, on peut obtenir des mobilités différentes [25].

La conductivité élevée ($> 5000 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$) est possible dans le ZnO de type n , en raison des défauts intrinsèques, des dopants (Al, In, Ga, B, F) ou en combinaison. Les

mobilités rapportés des électrons dans les couches minces ZnO sont typiquement de l'ordre de 20 à 30 cm²/V.s, par contre la mobilité maximale obtenue dans les cristaux simples de ZnO est ~200 cm²/V.s [23].

2-2-4- Propriétés optiques :

L'oxyde de zinc est un matériau transparent dont l'indice de réfraction sous la forme massive est égal à 2. Par ailleurs sous forme de couche mince, son indice de réfraction et son coefficient d'absorption varient en fonction des conditions d'élaboration. L'indice de réfraction a une valeur qui varie entre 1.90 et 2.20 suivant les auteurs.

Du fait de l'anisotropie de sa structure cristalline hexagonale, la lumière se propageant dans un cristal de ZnO sera soumise au phénomène de la biréfringence optique. La propagation de la lumière aura lieu dans ce cas selon deux directions : elle se propagera ainsi suivant la première direction avec une polarisation parallèle à l'axe optique du cristal (l'axe c) et sera soumise à un indice de réfraction dit ordinaire noté n_o , et elle se propagera suivant la seconde direction avec une polarisation perpendiculairement à l'axe optique avec un indice de réfraction dit extraordinaire noté n_e [26].

Sous l'action d'un faisceau lumineux de haute énergie ($E > 3,4$ eV) ou d'un bombardement d'électrons, l'oxyde de zinc émet des photons ; ce phénomène correspond à de la luminescence. En fonction des conditions d'élaboration et des traitements ultérieurs, différentes bandes de photoluminescence ont été observées : elles vont du proche UV (350 nm), au visible (rayonnement de couleur verte de longueur d'onde proche de 550 nm). Dans les couches minces stœchiométriques de ZnO, la luminescence visible est due aux défauts qui sont liés aux émissions des niveaux profonds, tels que les interstitiels de zinc et les lacunes d'oxygène [22].

Tableau 1 : *Quelques propriétés optiques de ZnO* [20].

Constante diélectrique	$\epsilon_{//} = 8.7$ $\epsilon_{\perp} = 7.8$
Coefficient d'absorption	10^4 cm^{-1}
Indice de réfraction à 560nm	1.8 – 1.9
Indice de réfraction à 590 nm	3.13 – 2.029
Largeur de la bande d'excitonique	60 meV
Transmittance	> 90 %

2-2-5- Propriétés chimiques :

La capacité d'une substance d'être un catalyseur dans un système spécifique dépend de sa nature chimique et de ses propriétés de surface. L'efficacité de l'oxyde de zinc dépend de son mode de préparation. Elle est essentiellement due au degré de perfection du réseau cristallin, et aux propriétés semi-conductrices (lacunes, atomes en positions interstitiels,...).

L'oxyde de zinc est utilisé en tant que piège et capteur chimique de gaz (H_2S , CO_2 , H_2 , CH_4). En suspension dans l'eau, il peut jouer le rôle de catalyseur photochimique pour un certain nombre de réactions comme l'oxydation de l'oxygène en ozone, l'oxydation de l'ammoniaque en nitrate, la réduction du bleu de méthylène, la synthèse du peroxyde d'hydrogène, ou encore l'oxydation des phénols. Les couches minces de ZnO ont été aussi utilisées pour catalyser la réaction de dépôt de cuivre.

Des travaux plus récents étudient de nouvelles mises en forme de ZnO pour les applications comme catalyseurs ou capteurs avec des bonnes propriétés chimiques. Ce nouveau matériau poreux a été obtenu à basse température dans un réacteur à cavitation acoustique à partir de $\text{Zn}(\text{OH}_2)$. Le processus est basé sur le déclenchement de la réaction entre NH_3 et $\text{Zn}(\text{OH}_2)$ par activation ultrasonique en milieu aqueux [21].

2-3- Différents types de défauts dans le ZnO :

Les défauts présents dans le ZnO dépendent de la méthode de croissance et des conditions d'élaboration de ce matériau. On pourra énumérer les défauts suivants :

- ✓ défauts ponctuels (interstitiels, lacunes, atomes étrangers).
- ✓ défauts linéaires (dislocations et sous joint de grains).
- ✓ défauts plans (macles, joints de grains).

Il existe d'autres types de défauts d'ordre thermique (Phonon) ou électrique (électrons, trous, excitons,.....) [20].

3- Elaboration de couches minces de ZnO :

3-1- Définition d'une couche mince :

Une couche mince est une fine pellicule d'un matériau déposée sur un autre matériau, appelé " substrat ". Le but de la couche mince est de donner des propriétés particulières à la surface de la pièce tout en bénéficiant des propriétés massives du substrat (en général : tenue mécanique) [27].

3-2- Techniques de dépôt d'une couche mince :

Il existe plusieurs méthodes et techniques d'élaboration des couches minces, on cite :

3-2-1- Méthodes physiques :

a- Dépôt physique en phase vapeur (PVD) :

Le dépôt physique en phase vapeur «PVD» est un procédé de recouvrement de surface par des atomes ou molécules d'un matériau à déposer, qui viennent adhérer sur le substrat à recouvrir en passant par un milieu passif (vide ou atmosphère inerte) ou actif (plasma, gaz réactif). Différents mécanismes physiques permettent de générer les espèces constituant le dépôt. La figure 1 illustre le principe de ce procédé [28].

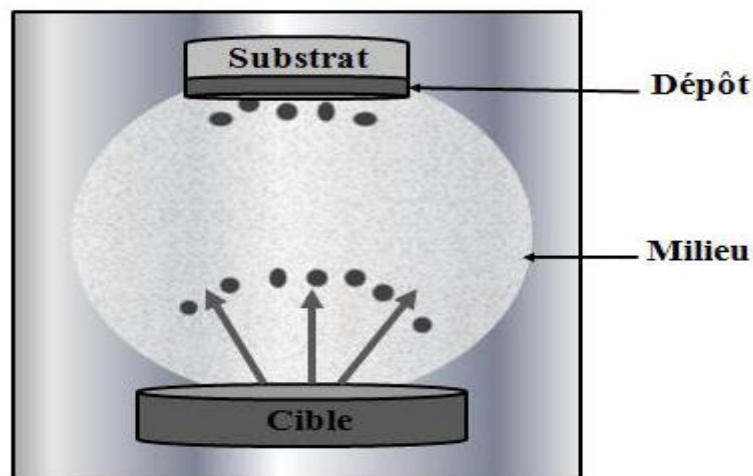


Figure II-4 : Principe de fonctionnement du procédé PVD [28].

Les procédés par PVD regroupent principalement l'évaporation, l'ablation laser et la pulvérisation sous toutes ses formes. Dans la réalisation d'une couche on peut distinguer les trois étapes suivantes :

- La création de la ou des espèces à déposer, sous forme d'atomes, de molécules ou de clusters (groupes d'atomes ou de molécules),
- Le transport de ces espèces en phase vapeur de la source vers le substrat,
- Le dépôt sur le substrat et la croissance de la couche [29].

b- Evaporation sous vide :

L'évaporation sous vide fût l'une des premières méthodes mise au point dans la catégorie des dépôts physique en phase vapeur. Elle fût élaborée dans le but d'obtenir des couches minces et représente encore actuellement l'une des méthodes les plus couramment utilisé en industrie (même si elle tend à être remplacée par d'autres procédés tels que la pulvérisation cathodique, qui permet notamment un meilleur recouvrement de la surface des pièces et une meilleure adhérence, ou certains processus de type CVD) [29].

Cette technique consiste à chauffer sous vide le matériau à déposer sous une température à laquelle il y a une pression de vapeur appréciable pour son évaporation ou sublimation. La matière ainsi éjectée perpendiculairement à la cible vient se condenser sur le substrat placé à son voisinage pour former un revêtement. Le dépôt est réalisé sous vide à une pression aux alentours de 10^{-3} - 10^{-4} Pa, de façon à limiter la collision entre les atomes évaporés et celles du gaz résiduel pour limiter la contamination des couches déposées et augmenter la vitesse de dépôt [28].

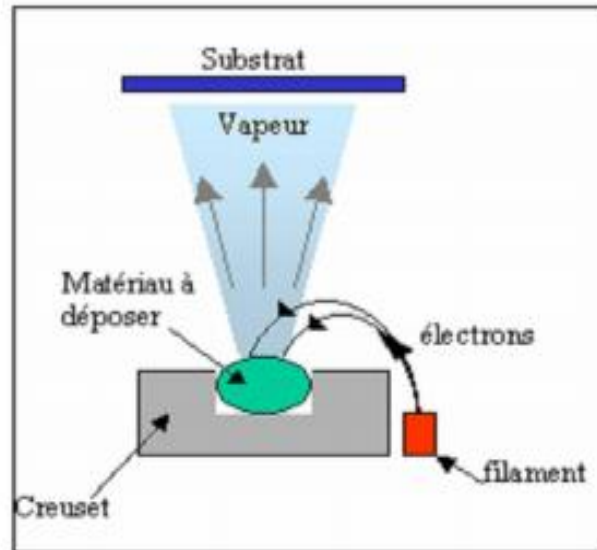


Figure II-5 : Schéma conventionnel d'une évaporation sous vide [29].

Exemples d'applications :

Utilisation dans le domaine de l'optique (filtres par exemple), pour les producteurs d'emballage plastique (métallisation de plastiques)....

c- Ablation laser :

Il s'agit d'une évaporation sous vide, l'énergie étant apportée par l'impact d'un faisceau laser de forte intensité envoyé sur une cible constituée du matériau que l'on veut déposer sur le substrat. Un avantage considérable est de pouvoir utiliser des cibles de très petites dimensions, l'ablation se produisant sur une surface de quelques millimètres carrés. 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. Cette méthode présente l'avantage de ne nécessiter aucune source thermique polluante à l'intérieur de l'enceinte, c'est un avantage très significatif pour les dépôts effectués dans un environnement ultravide [30].

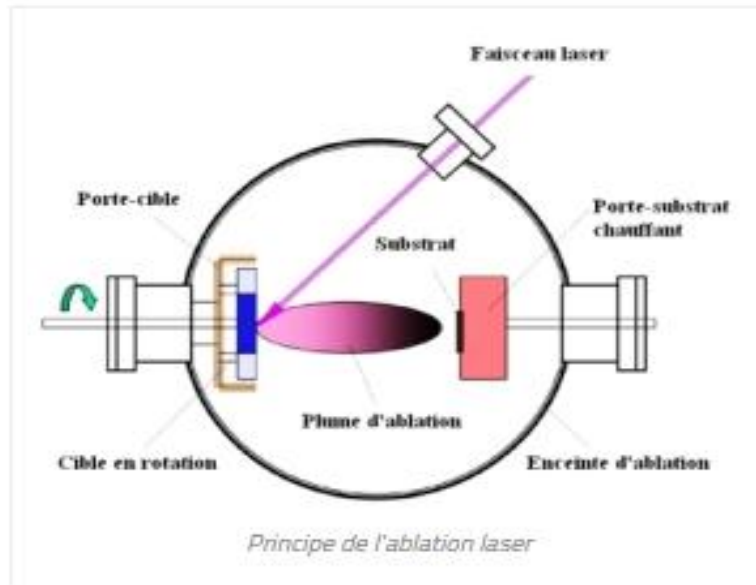


Figure II-6 : Principe de l'ablation laser [30].

d- Pulvérisation cathodique :

Le principe de cette technologie réside dans la création d'une décharge luminescente entre deux électrodes. Cette décharge, réalisée au sein d'une atmosphère raréfiée donc sous vide, permet la création d'un plasma composé de particules chargées (électrons, ions, photons) et de neutres (atomes).

Le champ électrique engendré par la différence de potentiel, induit un mouvement des particules chargées positivement qui sont attirées par la cathode (cible) et entrent en collision avec elle. Ce bombardement provoque la pulvérisation d'atomes ou d'agrégats d'atomes de la cible qui vont se condenser sur le substrat. A l'échelle macroscopique on pourrait comparer ce phénomène physique à la casse au billard.

Afin d'avoir une efficacité au niveau du taux de pulvérisation, le gaz plasmagène communément utilisé pour cette technologie est l'argon. Sa masse atomique, sa neutralité (couche de valence complète), ainsi que son coût en font le candidat idéal [31].

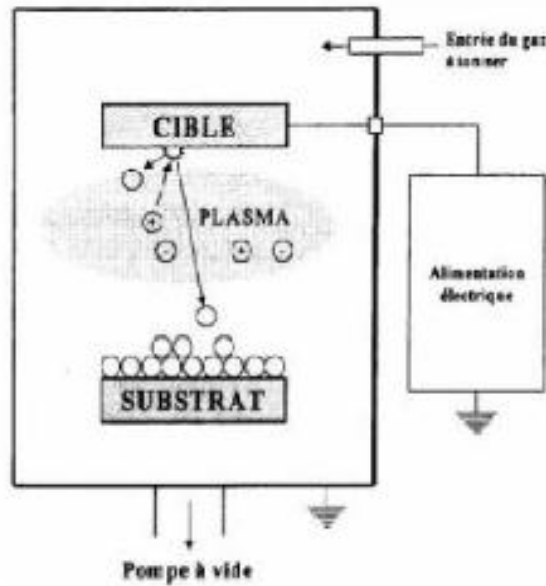


Figure II-7 : Schéma de principe de la pulvérisation cathodique [31].

e- Epitaxie par jet moléculaire : MBE

L'épitaxie est phénomène de croissance orientée, l'un par rapport à l'autre, de deux cristaux appartenant à deux espèces minérales différentes mais possédant un certain nombre d'éléments de symétrie communs dans leurs réseaux cristallins (exemple : rutile et hématite).

La technologie de l'épitaxie par jet moléculaire consiste à envoyer des molécules à la surface d'un substrat dans un vide très poussé afin d'éviter tout choc ou contamination sur le parcours. Le principe de la source est l'évaporation sous vide par chauffage. Les sources d'évaporation peuvent être de nature et de dopage différents ; pour chaque élément évaporé, il faut adapter la puissance de chauffe cellules mais aussi du porte-substrat. Par le contrôle des cellules d'évaporation, on crée un jet de molécules en direction du substrat, on peut ainsi réaliser couche par couche des structures très complexes telles que les super réseaux, les diodes laser, les transistors à forte mobilité d'électron (HEMT). On obtient ainsi une très grande précision de croissance, des jonctions très abruptes, mais cette opération est très lente et ne concerne qu'un seul substrat à la fois. La vitesse de croissance est de l'ordre de 1nm par minute. Cette technique est donc très coûteuse et ne concerne que des dispositifs à très forte valeur ajoutée [32].

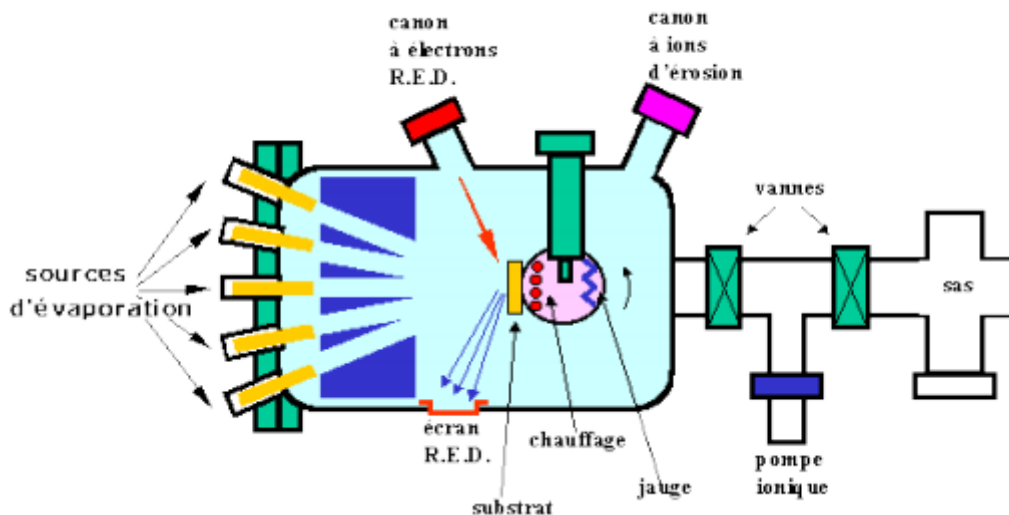


Figure II-8 : Schéma de principe de l'épitaxie par jet moléculaire [32].

3-2-2- Méthodes chimiques :

a- **Dépôt chimique en phase vapeur (CVD) :**

La CVD est une technique utilisée pour des dépôts de couches minces et des revêtements sur la surface d'une pièce. Selon cette technique, la pièce à recouvrir est positionnée dans la zone chauffée d'un réacteur. Une phase gazeuse contenant des molécules (précurseurs CVD) avec des éléments à déposer, est introduite dans le réacteur. La chaleur (l'énergie thermique) fournie permet la décomposition des précurseurs au voisinage de la pièce ou sur sa surface. Les produits volatils résultant des réactions sont évacués du réacteur à l'aide d'un système de pompage approprié [33].

La réaction est activée par la température du substrat. Pour que les réactions chimiques voulues puissent avoir lieu, le substrat doit être chauffé à une température comprise, selon le matériau déposé, entre 500°C et 2000°C [29].

Parmi les méthodes de synthèse on distingue :

- le dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD)
- le CVD à pression atmosphérique (AP-CVD)
- le CVD à basse pression (LP-CVD) [34].

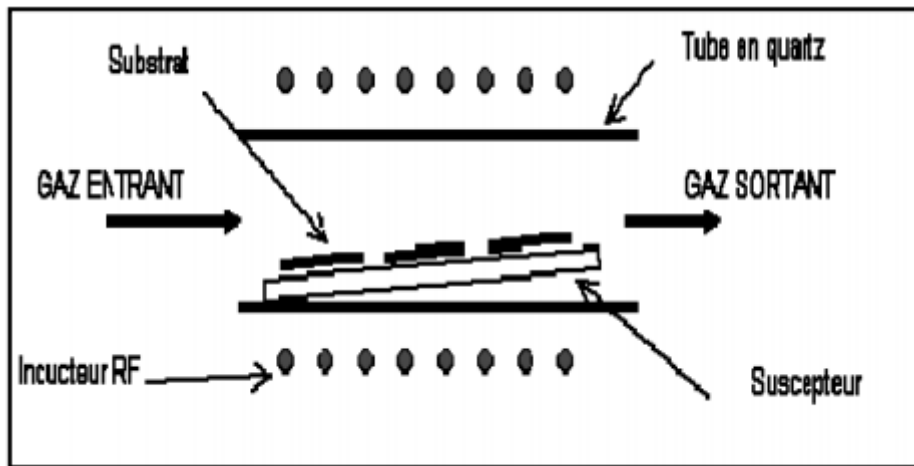


Figure II-9 : Exemple de réacteur de dépôt par CVD [35].

b- Voie sol-gel :

On appelle procédé sol-gel tout procédé qui permet d'élaborer un solide à partir d'une solution en utilisant un sol ou bien un gel dans l'étape intermédiaire.

Le principe de base du procédé sol-gel (correspondant à l'abréviation de «solution-gélification») 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.

La solution de départ est constituée en général par un précurseur, un solvant (en général un alcool), parfois un catalyseur (acide ou basique) et de l'eau. Chaque composé est dosé de façon très précise, car les propriétés du gel en dépendent. La nature du matériau souhaité impose le précurseur. Le choix du solvant et du catalyseur est alors dicté par les propriétés chimiques du précurseur. Ce dernier représente le composé central de la solution.

Le dépôt par voie sol-gel proprement dit peut être réalisé de deux manières différentes :

- Le dip-coating, appelée aussi « méthode de trempage-retrait ». Elle consiste à immerger le substrat dans une solution et à le retirer dans des conditions très contrôlées et stables pour obtenir un film d'épaisseur régulière. Lors de la remontée, le liquide s'étale sur le substrat. A la fin du procédé, le substrat est recouvert d'un film uniforme et très poreux.

- 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 [36].

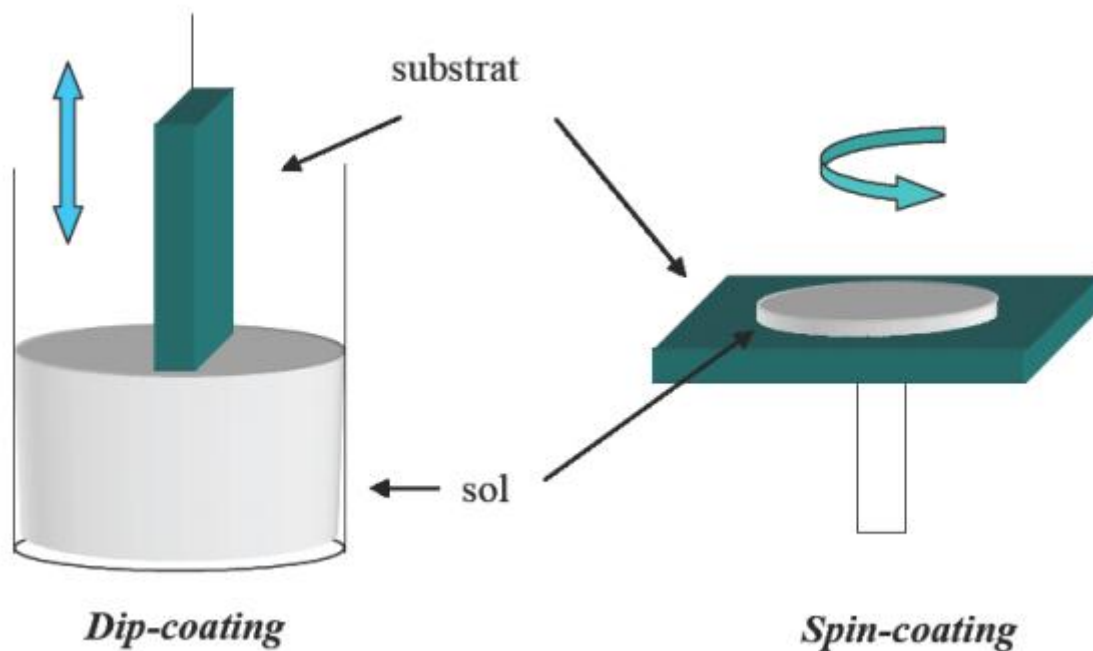


Figure II-10 : Représentation schématique d'appareillages de dépôt par dip et spin-coating [36].

c- Méthode de spray pyrolyse :

Cette méthode repose sur la pulvérisation d'une solution contenant les atomes à déposer, généralement des chlorures ou des nitrates qui sont facilement solubles dans l'eau ou l'alcool. La solution est pulvérisée sur une surface chaude où il se produit une réaction chimique qui permet d'obtenir un film mince après évaporation des produits volatils de la réaction. La température du substrat permet l'activation de la réaction chimique en surface. L'avantage de cette technique est sa simplicité, elle ne nécessite pas de groupement de pompage comme la quasi-totalité des méthodes des dépôts de couche mince [23].

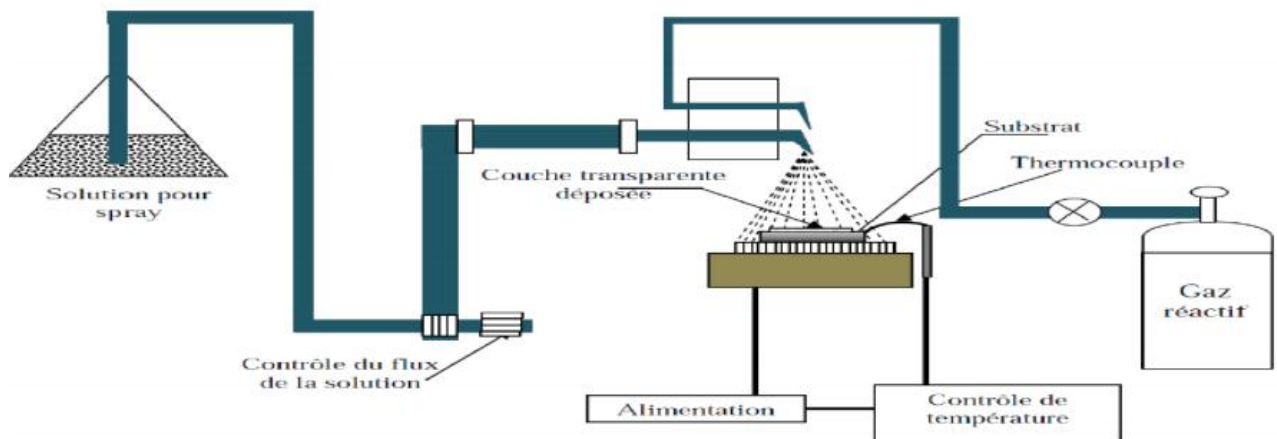


Figure II-11 : Dispositif de la technique spray pyrolyse [23].

4- Le rôle de la couche mince ZnO dans une cellule photovoltaïque :

Les cellules solaires sont des systèmes constitués de matériaux semi-conducteurs qui possèdent la faculté de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est due à l'effet photovoltaïque du matériau utilisé qui permet de capter l'énergie des photons reçus pour libérer des porteurs de charge de la bande de valence à la bande de conduction. Actuellement, la plupart des cellules solaires sont réalisées à partir de silicium. Dans cette application, l'oxyde de zinc peut servir d'électrode transparente sur la couche supérieure "front contact" pour permettre le passage du courant électrique à travers le composant tout en laissant passer la lumière.

Une récente étude a montré que l'utilisation du ZnO en surface et sous certaine condition peut également améliorer l'efficacité de la cellule solaire. Les auteurs montrent en effet que selon le mode d'élaboration, le ZnO peut faire apparaître une surface plus ou moins rugueuse. La rugosité est un élément important pour la réalisation de cellules solaires. En effet plus la surface de la cellule est rugueuse, plus la lumière peut se diffuser dans le matériau (Figure II-12). Ceci a pour conséquence d'allonger le parcours des photons et d'augmenter les chances d'absorber la lumière pour libérer des porteurs de charge. La rugosité du ZnO dépend de ses paramètres technologiques de dépôt et il est dans ce cas important de les contrôler [37].

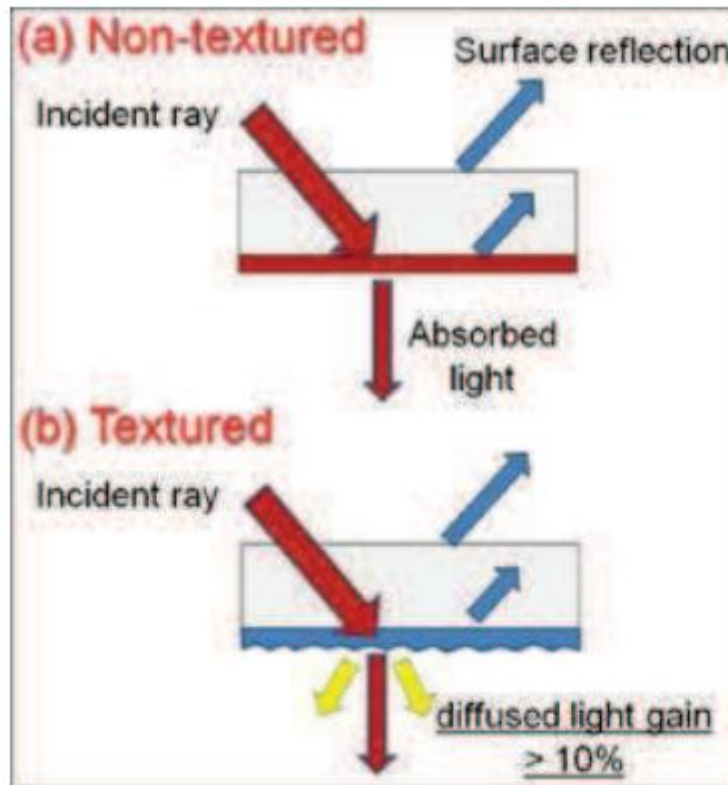


Figure II-12 : Influence de la rugosité de la surface de couche sur l'absorption de la lumière [37].

5- Conclusion :

Nous venons de voir dans ce chapitre que l'oxyde de zinc sous forme de couches minces semble avoir un grand potentiel pour l'amélioration de la filière du photovoltaïque grâce à ces différentes propriétés.

Les techniques de dépôts physique de couches minces sont en général utilisées dans la recherche, alors que les méthodes chimiques sont utilisées dans l'industrie, car ces méthodes permettent d'obtenir de films de meilleure qualité et avec une vitesse de dépôt plus grande [23].

1- Introduction :

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser aux différentes techniques de caractérisations des couches minces de ZnO et les méthodes utilisées dans chaque technique.

2- Techniques de caractérisations d'une couche mince :

Après le dépôt des couches minces de ZnO, l'étape de la caractérisation est primordiale afin d'observer l'influence des paramètres de dépôts. Parmi ces techniques de caractérisation on peut citer : la diffraction des rayons X pour la caractérisation structurelle, la microscopie électronique à balayage et à transmission pour la caractérisation morphologique, il y a aussi la caractérisation optique et enfin électrique.

2-1- Caractérisation structurelle :

2-1-1- Diffraction des rayons X :

La découverte des rayons X est basée sur celle, en 1869, des rayons cathodiques par Hittorf: les physiciens du monde entier se penchent sur cette invention sans y trouver la moindre application pratique. En 1895, Röntgen décide de plonger un tube de Crookes dans un caisson opaque. Il se rend alors compte que le rayonnement traverse la matière, et que les éléments métalliques sont visibles en négatif. Il en déduit que les rayons sont invisibles et qu'ils sont émis dans la direction des électrons de ce tube. Ne trouvant pas de dénomination adéquate, il les nomme « rayons X » en raison de leur nature inconnue.

Un premier cliché est effectué sur la main d'Anna Bertha Röntgen le 22 décembre 1895 : à la suite d'une pose de vingt minutes, le cliché affiche clairement la bague à son doigt. Il s'agit de la première radiographie. Grâce à cette découverte, Röntgen obtient le premier prix Nobel de physique.

a- La diffraction :

Ce phénomène se produit lorsque des ondes, quelle que soit leur nature, rencontrent des obstacles ou des ouvertures dont les dimensions sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde et qui se traduit par des perturbations dans la propagation de ces ondes (contournement d'obstacles ou divergence à partir d'ouverture dans ces obstacles).

C'est aussi un phénomène par lequel les rayons lumineux issus d'une source ponctuelle sont déviés de leur trajectoire rectiligne lorsqu'ils rasant les bords d'un obstacle

opaque. Phénomène d'optique affectant l'observation d'une image à travers un instrument et dû au caractère ondulatoire de la lumière [38].

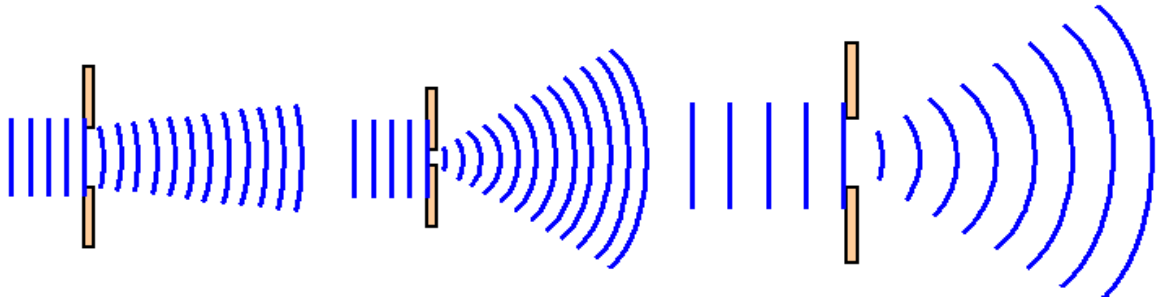


Figure III-1 : *Variation de la diffraction en fonction de l'obstacle rencontré [39].*

b- Diffractomètre :

C'est un appareil utilisé pour mesurer la diffraction des rayons X. La figure III-2 montre un exemple d'un diffractomètre utilisé dans un laboratoire.



Figure III-2 : *Diffractomètre Bruker D8Advanced utilisé dans un laboratoire à l'université de Lyon [40].*

c- définition de la diffraction des rayons X :

Le principal outil utilisé pour la détermination de la cristallinité des matériaux est la diffraction des rayons X (XRD, X-Ray diffraction). Lors d'une analyse par cette

technique, un faisceau de rayons X, émis par une source, est envoyé sur l'échantillon à analyser sous un angle θ , un détecteur reçoit le faisceau des rayons X diffracté par cet échantillon et enregistre l'intensité en fonction de l'angle de diffraction 2θ . Lorsque la loi de Bragg est vérifiée, un pic de diffraction correspondant à la famille de plans considérée est obtenu sur le diffractogramme [41].

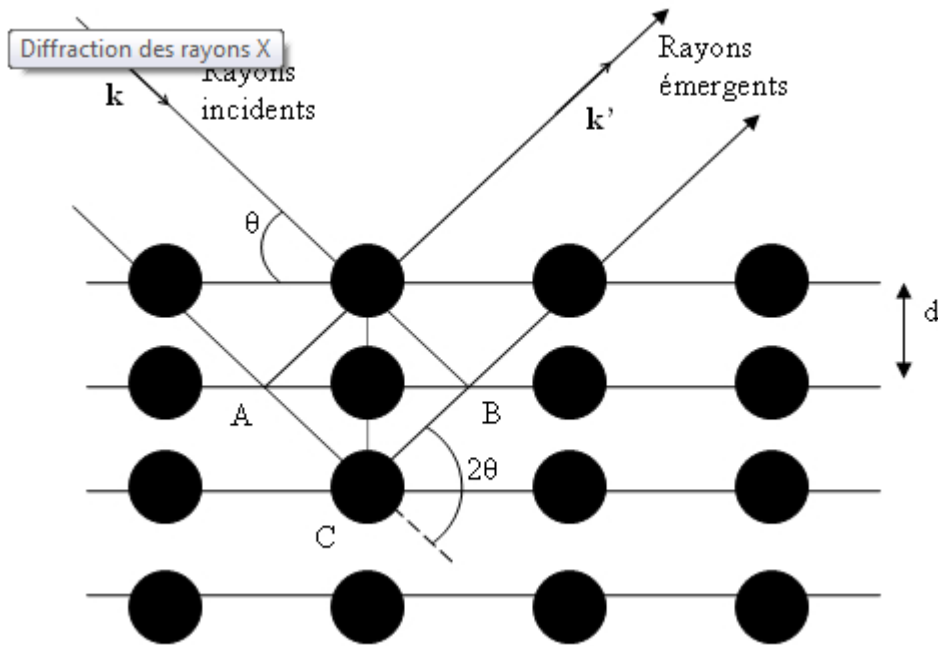


Figure III-3 : Réflexion des rayons X par une famille de plans réticulaires espacés d'une distance d [41].

Les conditions nécessaires à cette interférence constructive sont données par la loi de Bragg :

$$2. d. \sin \theta = n\lambda \quad (\text{III.1})$$

Où :

d est la distance interréticulaire, θ l'angle de diffraction, λ la longueur d'onde des rayons X et n est un entier qui représente l'ordre de diffraction [42].

L'analyse des spectres de rayons X permet d'obtenir des informations sur :

- La ou les phases cristallines (position des pics);

- La taille des cristallites (largeur des pics à mi-hauteur) : en mesurant la largeur à mi-hauteur des pics les plus intenses, on peut estimer la taille moyenne des cristallites (grains) "D" par la formule de Scherrer :

$$D = \frac{0.9\lambda}{\Delta(2\theta) \cos(\theta)} \quad (\text{III.2})$$

Où λ est la longueur d'onde des rayons X utilisées, $\Delta(2\theta)$ est la largeur à mi-hauteur exprimée en radian et θ la position du pic de diffraction considéré.

- Les défauts d'empilement (forme des pics);
- L'orientation des cristallites (absence ou présence de réflexions) [34].

2-2- Caractérisation morphologique :

La caractérisation morphologique permet de faire une étude de la surface des matériaux. Nous allons citer : la microscopie électronique à balayage et à transmission.

2-2-1- Microscopie électronique à balayage : (MEB)

La microscopie électronique à balayage (MEB ou SEM pour *Scanning Electron Microscopy* en anglais) est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon.

Le MEB est généralement utilisé pour étudier la morphologie en 3D d'une surface ou d'un objet et également la composition chimique (microanalyse X). Aujourd'hui, la microscopie électronique à balayage est utilisée dans des domaines allant de la biologie à la science des matériaux, et un grand nombre de constructeurs proposent des appareils de série équipés de détecteurs d'électrons secondaires et dont la résolution peut aller jusqu'à 1 nm [42].

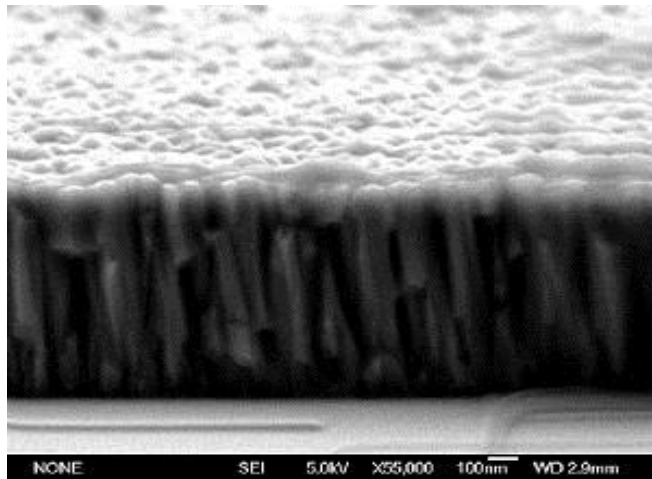


Figure III-4 : Photo MEB d'une couche mince de ZnO Sur un substrat de Silicium réalisée par pulvérisation cathodique [43].

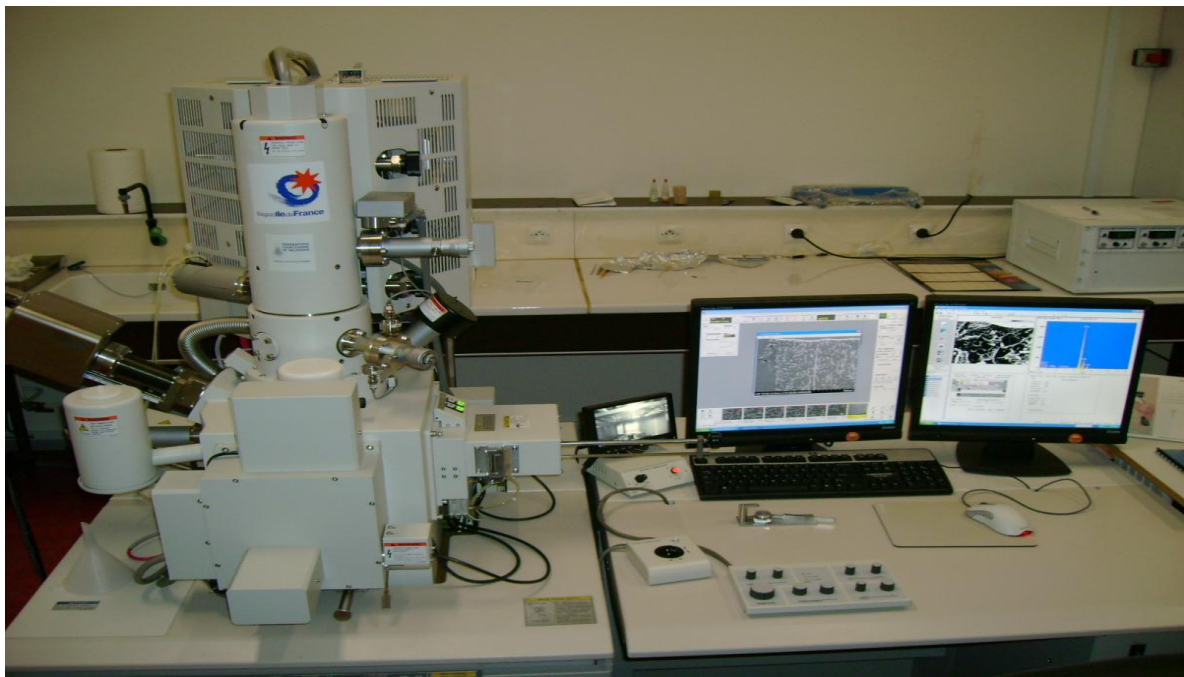
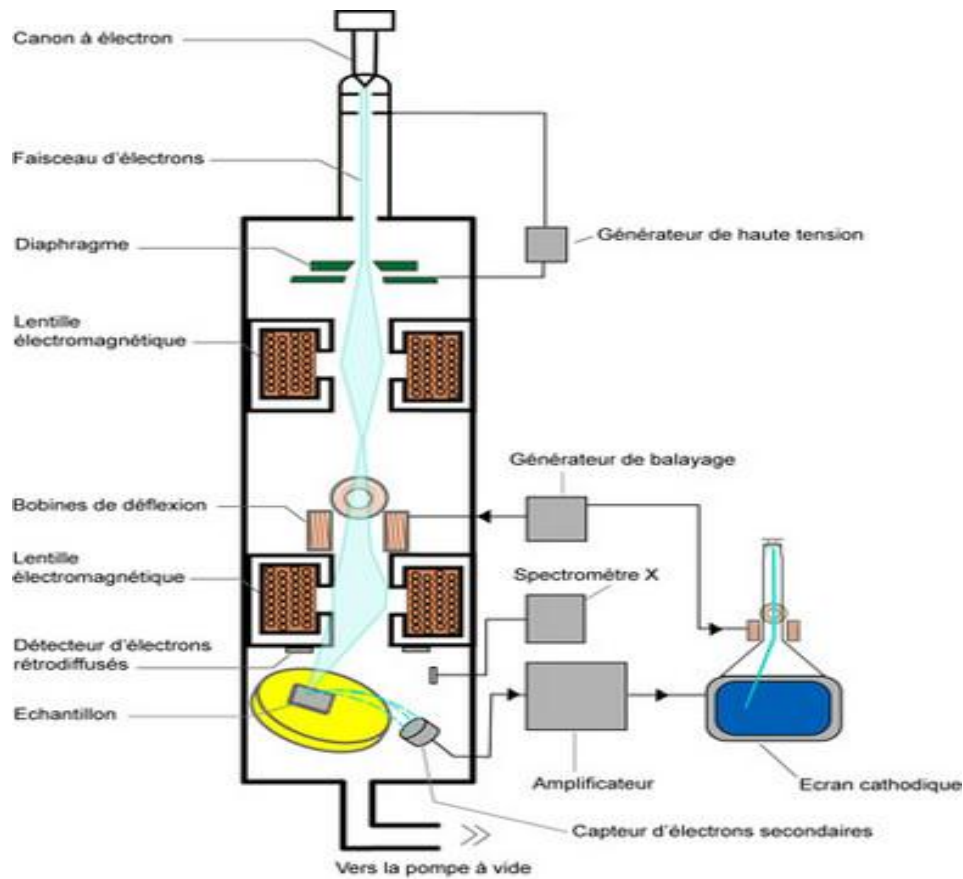


Figure III-5 : Dispositif d'un microscope électronique à balayage HITACHI 4800 [44].

a- Principe :

L'échantillon à analyser se déplace dans une enceinte sous vide. Un canon à électrons envoie un faisceau électronique vers l'échantillon. Ce faisceau électronique est focalisé par une lentille magnétique pour obtenir un faisceau très fin et focalisé. Les électrons secondaires produits suite au bombardement de l'échantillon par le faisceau

électronique sont décelés par le détecteur. Ces électrons secondaires sont amplifiés et interprétés pour reconstruire une image en fonction de l'intensité du courant électrique produit. L'image est obtenue séquentiellement point par point en déplaçant le faisceau d'électrons sur la surface de l'échantillon [37].



Le microscope électronique à balayage

Figure III-6 : Principe du MEB [37].

b- Mesure de l'épaisseur :

Les images obtenues par le MEB nous permettent de mesurer directement l'épaisseur de nos couches.

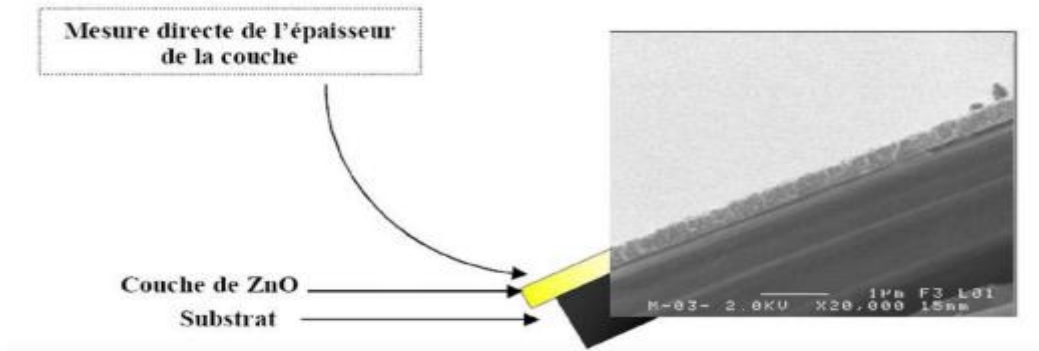


Figure III-7 : *Mesure directe de l'épaisseur de la couche de ZnO à partir de l'image obtenue par MEB [42].*

2-2-2- Microscopie électronique à transmission : (MET)

Au cours de sa thèse, en 1925, Dennis Gabor, un physicien hongrois né au début du siècle, mit au point la première lentille électromagnétique (électro-aimant qui dévie les électrons) capable de faire converger un faisceau d'électrons alors appelée bobine concentratrice. C'est en 1930, à l'aide d'une telle bobine, que Ernst Ruska obtint les premières images d'un objet via l'optique électronique. L'année suivante il ajouta une seconde bobine et le premier microscope électronique en transmission (M.E.T) vit le jour. Il est à noter que l'ancien professeur de Ruska à l'université de Berlin, Max Knoll, ainsi que les travaux de H.Busch sur l'optique électronique de 1926, ont également contribué à la mise au point de ce premier prototype. [42]



Figure III-8 : *Dispositif d'un microscope électronique à transmission utilisé à l'université de Lille 1 [45].*

a- Principe :

On émet des électrons en chauffant un filament de Tungstène (ou cristal d'hexaborure de lanthane). Ces électrons sont ensuite accélérés à l'aide d'une tension comprise entre 200 et 1000 kV (1000 kV pour les plus onéreux). Une fois le vide fait dans la cellule, on fait passer le faisceau d'électrons au travers d'un échantillon d'environ 3 mm de diamètre et d'épaisseur inférieure à 20 nanomètres. Puis ce faisceau est focalisé à l'aide de lentilles magnétiques vers l'écran ou la plaque photographique [46].

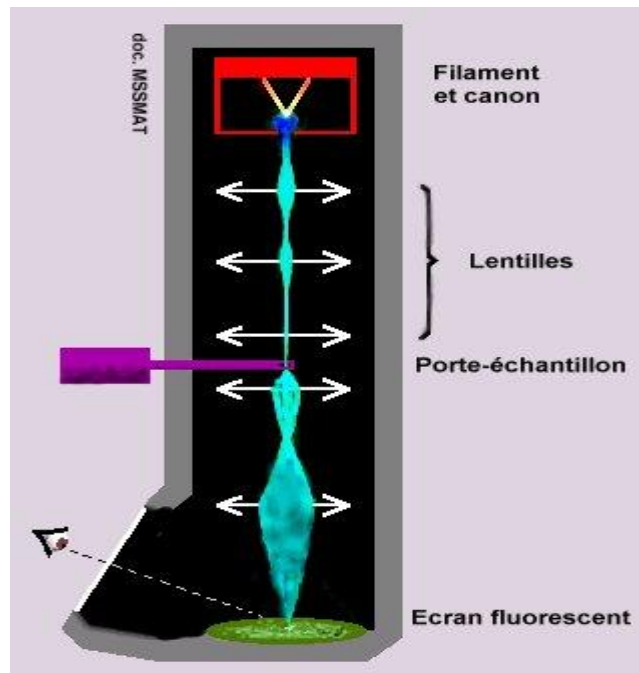


Figure III-9 : Principe de la microscopie électronique à transmission (MET) [46].

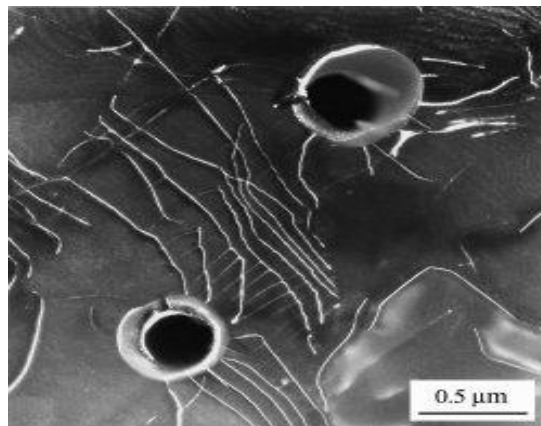


Figure III-10 : Image TEM d'une couche de silice (SiO_2) [45].

2-3- Caractérisation optique :

Les méthodes optiques permettent de caractériser un grand nombre de paramètres. Elles présentent l'avantage sur les méthodes électriques d'être non destructives et de ne pas exiger la réalisation, toujours délicate, de contacts ohmiques [29].

2-3-1- Spectroscopie UV-visible :

Les techniques spectroscopiques qui reposent sur l'interaction des radiations lumineuses et de la matière dans le domaine s'étendant du proche ultraviolet au très proche infrarouge, domaine qualifié d'UV-Visible, utilisent des longueurs d'onde comprise entre 180nm et 1100nm [35].

Un diagramme des composants d'un spectromètre typique sont présentés dans la figure III-11. Le fonctionnement de cet instrument est relativement simple. Un faisceau de lumière provenant d'une source de lumière visible et / ou UV (de couleur rouge) est séparé en ses longueurs d'onde constitutives par un prisme ou un réseau de diffraction. Chaque (longueur d'onde unique) faisceau monochromatique à son tour est divisé en deux faisceaux d'intensité égales par un dispositif demi-miroir. Un faisceau, le faisceau échantillon (couleur magenta), passe à travers un petit récipient transparent (cuve) contenant une solution du composant étudié dans un solvant transparent. L'autre faisceau, la référence (de couleur bleu), passe à travers une cuvette identique ne contenant que le solvant. L'intensité de ces faisceaux lumineux est ensuite mesurée par des détecteurs électroniques et comparés. L'intensité du faisceau de référence, ce qui devrait avoir subi peu ou pas d'absorption de lumière, est défini comme I_0 . L'intensité du faisceau d'échantillonnage est défini comme I . Au cours d'une courte période de temps, le spectromètre scrute automatiquement toutes les longueurs d'onde des composants de la manière décrite. La région ultraviolette (UV) numérisé est normalement de 200 à 400 nm et la partie visible est comprise entre 400 et 800 nm [47].

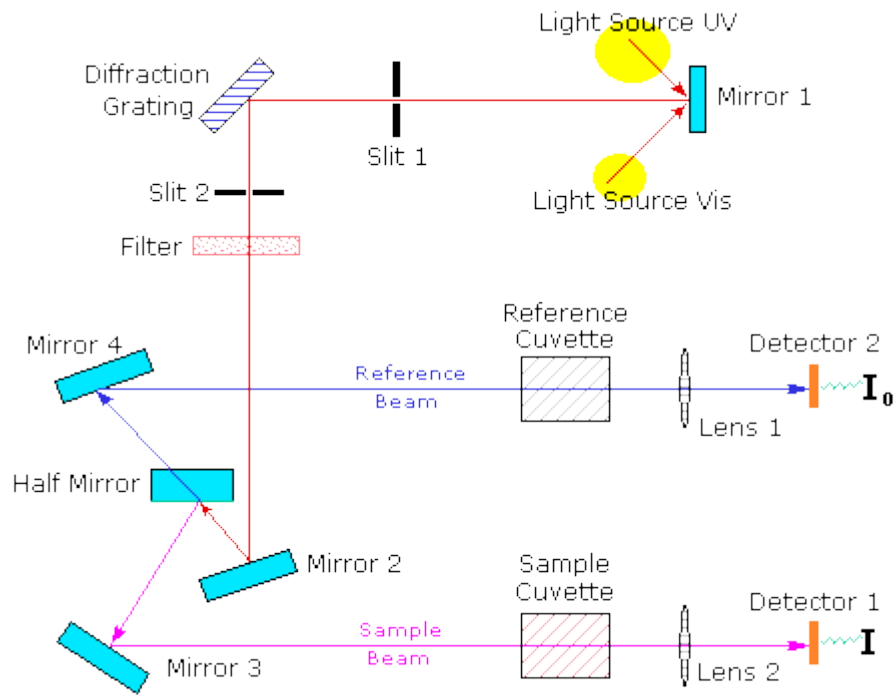


Figure III-11 : Principe de fonctionnement d'un spectromètre [47].

Un spectre UV-visible ressemble à ceci (figure III-12) : une courbe d'absorbance A en fonction de la longueur d'onde λ .

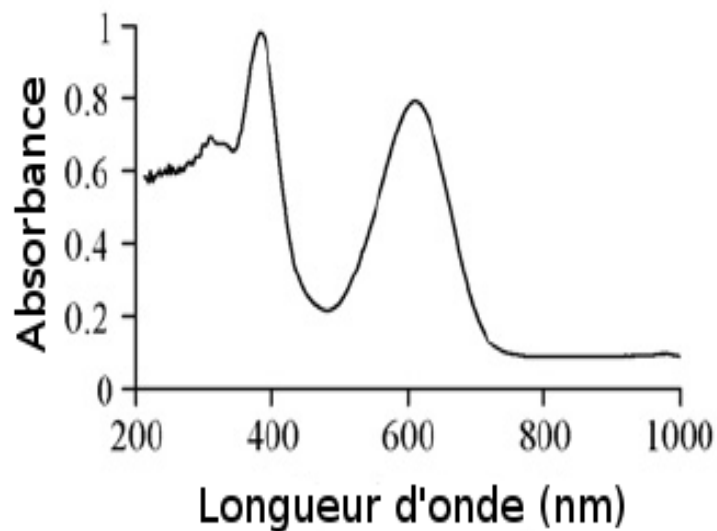


Figure III-12 : Exemple d'un spectre UV-visible [48].

2-3-2- Spectroscopie Raman :

La spectroscopie Raman (du nom de Sir C.V. Raman, prix Nobel de physique en 1930) est une spectrométrie optique mettant en évidence les vibrations moléculaires et ainsi complémentaire à la spectrophotométrie d'absorption en infrarouge (IR).

a- Principe :

La spectroscopie Raman est une méthode non destructive permettant de caractériser la composition moléculaire et la structure d'un matériau. La diffusion Raman résulte de l'interaction lumière-matière et permet d'accéder aux vibrations moléculaires et cristallines (phonons). Cette technique est complémentaire de la spectroscopie infrarouge qui permet également d'étudier les modes vibrationnels d'un matériau. La technique « Raman » consiste à focaliser (avec une lentille) un faisceau de lumière monochromatique sur l'échantillon à étudier et à analyser la lumière diffusée. Cette lumière est recueillie à l'aide d'une autre lentille (ou la même lentille, dans le cas d'une rétrodiffusion) et analysée par un spectromètre. Les intensités sont mesurées avec un détecteur (monocanal type photomultiplicateur ou multicanal type CCD). [49]

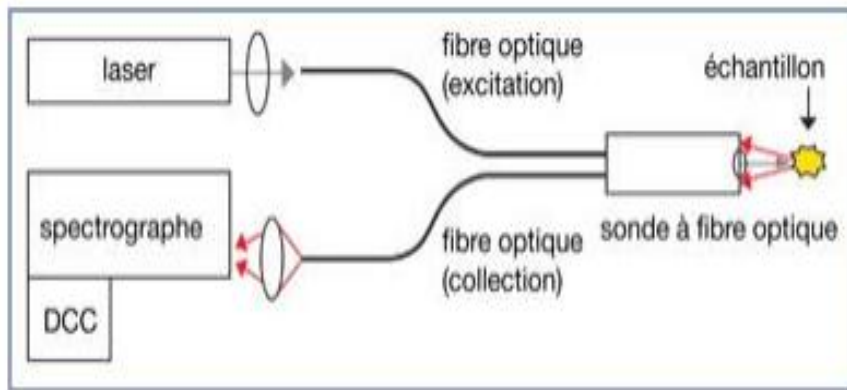


Figure III-13 : Schéma de principe d'un spectromètre Raman [50].

2-4- Caractérisation électrique :

2-4-1- Méthode de quatre pointes :

La méthode des quatre pointes est une méthode expérimentale utilisée couramment pour mesurer la résistance carrée et/ou la résistivité d'un semi-conducteur massif. Elle consiste en quatre pointes alignées, équidistantes d'une distance a petite par rapport aux dimensions de l'échantillon, et qui appuient sur la surface de la couche. On

envoie un courant I entre la pointe 1 et la pointe 4 et on mesure la différence de potentiel V entre les pointes 2 et 3.

Cette mesure permet de connaître R très rapidement. R est donné par la loi d'Ohm:

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{(III.3)}$$

La résistance R dépend en fait de la géométrie du corps. Afin d'obtenir une information intrinsèque au matériau, il est préférable de la caractériser au moyen d'un paramètre indépendant de cette géométrie. Ce paramètre s'appelle la résistivité électrique ρ . Elle est reliée par la relation :

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \text{(III.4)}$$

Lorsque le matériau se présente sous la forme d'un parallélépipède rectangle de longueur L et de section A , l'inverse de la résistivité est appelé la conductivité électrique :

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad \text{(III.5)}$$

Dans le cas des pointes alignées et équidistantes, la conductivité σ (ou ρ la résistivité) est donné par la relation suivante :

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = 0.22 \left(\frac{1}{V \times e} \right) \quad [\Omega^{-1} \cdot cm^{-1}] \quad \text{(III.6)}$$

Où : $0.22 = \ln 2 / \pi$ (paramètre de technologie) ;

e : l'épaisseur en centimètres de la couche conductrice ;

I : intensité du courant en ampères;

V : la tension en volts.

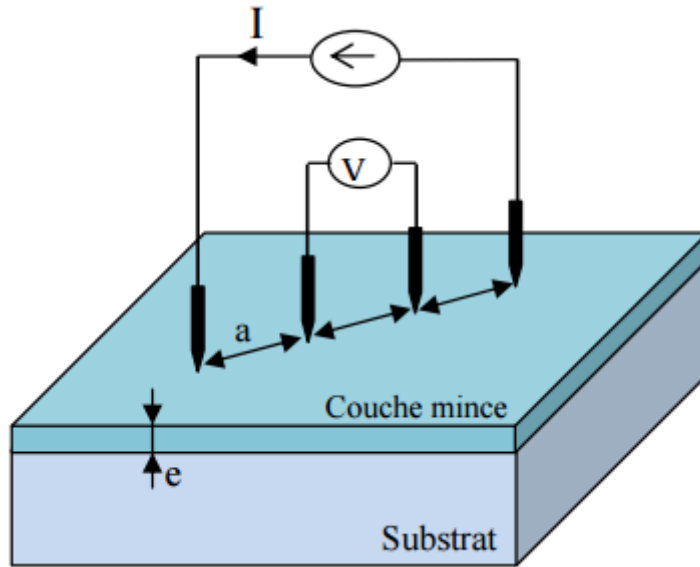


Figure III-14 : Schéma de la méthode des quatre pointes [51].

On définit la résistance carrée d'une couche par la résistance d'un échantillon dont la longueur est égale à la largeur. Dans le cas d'une couche uniformément dopée, la résistance carrée $R_{carrée}$ d'une couche d'épaisseur e est reliée à la résistivité ρ par la relation :

$$R_{carrée} = \frac{\rho}{e} \quad (\text{III.7})$$

L'épaisseur est mesurée à l'aide d'un profilomètres [51].

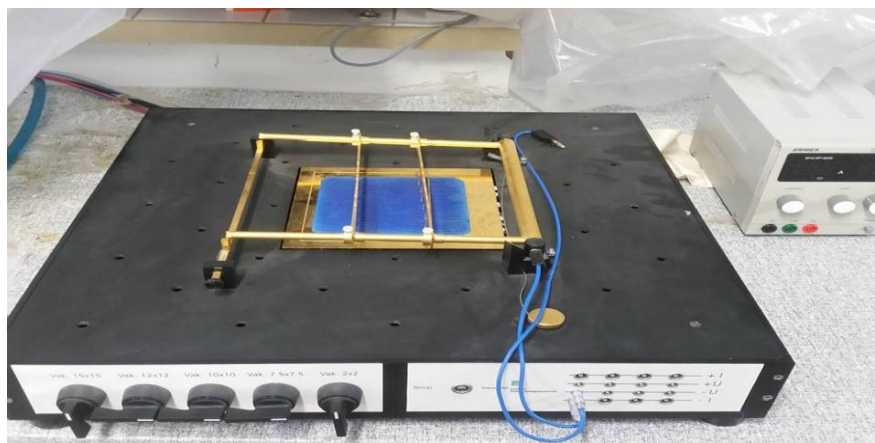


Figure III-15 : Photo réelle du dispositif de la méthode de quatre pointes utilisé à l'Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables (URMER) à l'université de Tlemcen.

3- Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons pu voir que dans le but d'obtenir une couche mince de ZnO qui correspond nos attentes, l'étape de la caractérisation de cette dernière après son élaboration est devenue une étape primordiale, et cela afin de voir et constaté l'influence des paramètres de dépôts sur la couche mince. Ainsi nous aurons l'occasion de l'améliorer jusqu'à l'obtention de la couche mince désiré.

1- Introduction :

La première partie de ce chapitre sera consacrée à la modélisation d'une cellule solaire, on fera l'étude d'un circuit équivalent pour un modèle à une exponentielle, et en utilisant le logiciel Matlab on obtiendra la caractéristique ($I-V$) de la cellule, ensuite on étudiera l'influence de chaque paramètre sur les performances de la cellule.

Les informations obtenues à partir du circuit équivalent ne nous permettent pas de connaître les propriétés internes de la cellule d'où la nécessité d'utiliser d'autres outils pour comprendre en détail le mécanisme interne de la cellule. Dans la deuxième partie le logiciel SCAPS-1D (logiciel de simulation d'une cellule solaire multi-jonctions) sera présenté en détails, ce dernier va nous permettre de comprendre ce qui se passe réellement à l'intérieur de la cellule.

2- Modélisation d'une cellule solaire :

La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toutes opérations d'optimisation du rendement. Le module photovoltaïque est représenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension [52]. Ces paramètres ne sont pas généralement des quantités mesurables ou incluses dans les données de la fabrication. En conséquence, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations $I-V$ à divers points de fonctionnement donnés par le constructeur ou issus de la mesure directe sur le module.

La modélisation de ces dernières s'impose comme une étape cruciale et a conduit à une diversification dans les modèles proposés par les différents chercheurs. Leurs différences se situent principalement dans le nombre de diodes, la résistance shunt finie ou infinie, le facteur d'idéalité constant ou non, ainsi que les méthodes numériques utilisées pour la détermination des différents paramètres inconnus [53].

2-1- Modèle électrique d'une cellule solaire :

Plusieurs modèles de cellule solaire ont été étudiés en littérature montrant l'influence de la résistance en série R_s , en parallèle R_p ou R_{sh} et de la température sur la caractéristique $I-V$. La modélisation des cellules photovoltaïques nécessite un choix

judicieux des circuits électriques équivalents, car pour développer un bon circuit équivalent pour une cellule photovoltaïque quelconque il faut comprendre la configuration physique de la cellule et les caractéristiques électriques pour chaque élément qui la constitue.

2-1-1- Modèle à une diode :

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode, établi par Shockley pour une seule cellule PV, est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle [53].

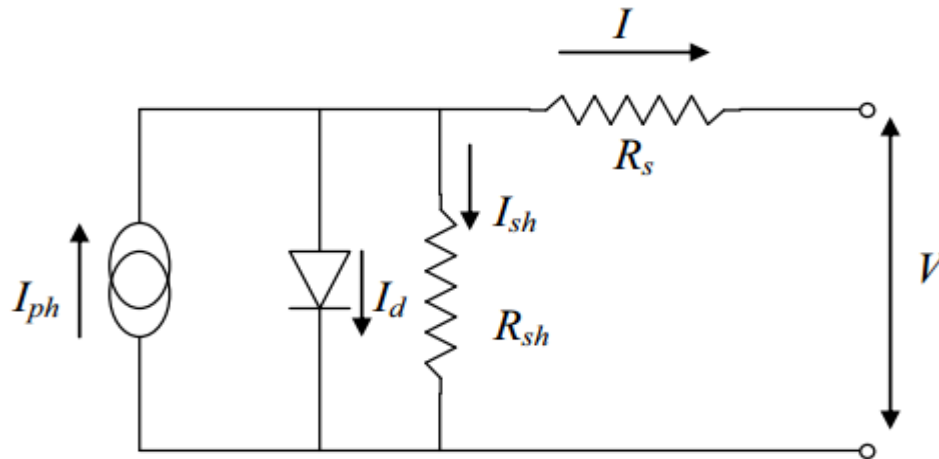


Figure IV-1 : Schéma équivalent d'une cellule solaire. Modèle une diode [53].

Le courant I produit par la cellule est donné par la relation suivante :

$$I = -I_{ph} + \frac{V - R_s I}{R_{sh}} + I_s \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{AkT} \right\} - 1 \right] \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

- I : courant fourni par la cellule [A].
- V : tension à la borne de la cellule [V].
- I_{ph} : le photo-courant [A], proportionnel à l'irradiance.
- I_s : Courant de saturation de la diode [A], dépendant de la température.
- R_s : Résistance série [Ohm].
- R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [Ohm].

- q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb.
- k : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K
- A : Facteur de qualité de la diode.
- T : Température effective de la cellule [Kelvin].

2-1-2- Modèle à deux diodes :

Nous avons, cette fois-ci, deux diodes, ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau. Le schéma du circuit équivalent devient alors :

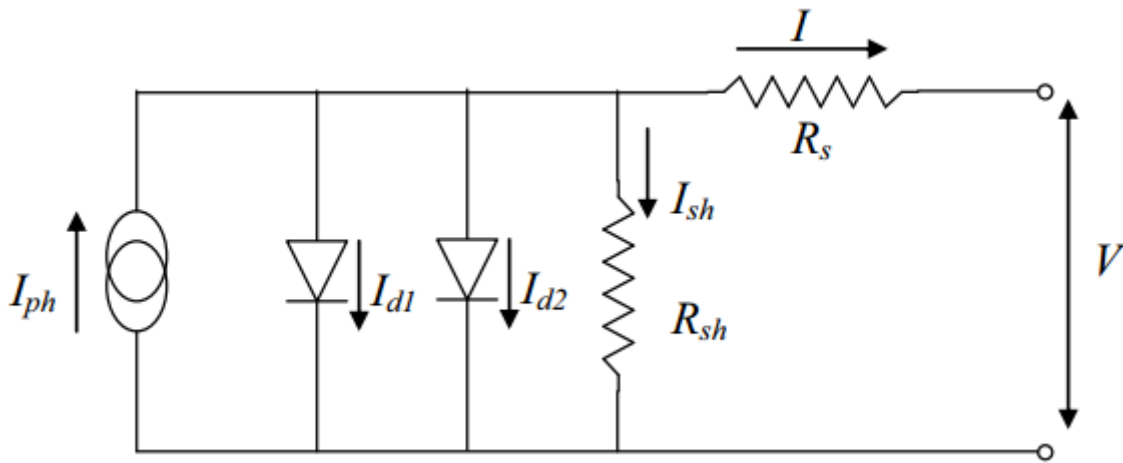


Figure IV-2 : Schéma équivalent d'une cellule solaire. Modèle deux diodes [53].

Le courant I produit par la cellule est donné par la relation suivante :

$$I = -I_{ph} + \frac{V - R_s I}{R_{sh}} + I_{s1} \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{A k T} \right\} - 1 \right] + I_{s2} \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{2 A k T} \right\} - 1 \right] \quad \text{(IV.2)}$$

L'apparition du courant de saturation résulte des phénomènes de recombinaisons [53].

2-2- Résultats et discussion :

La simulation a été faite à l'aide du logiciel MATLAB, qui est un logiciel de manipulation de données numériques et de programmation dont le champ d'application est essentiellement les sciences appliquées. Son objectif, par rapport aux autres langages, est de simplifier au maximum la transcription en langage informatique d'un

problème mathématique, en utilisant une écriture la plus proche possible du langage naturel scientifique et de développer des solutions nécessitant une très grande puissance de calcul. C'est aussi un excellent logiciel pour faire des simulations numériques [54].

En programmant en MATLAB (*Annexe*) nous obtiendrons les résultats suivants :

2-2-1- Caractéristique I-V :

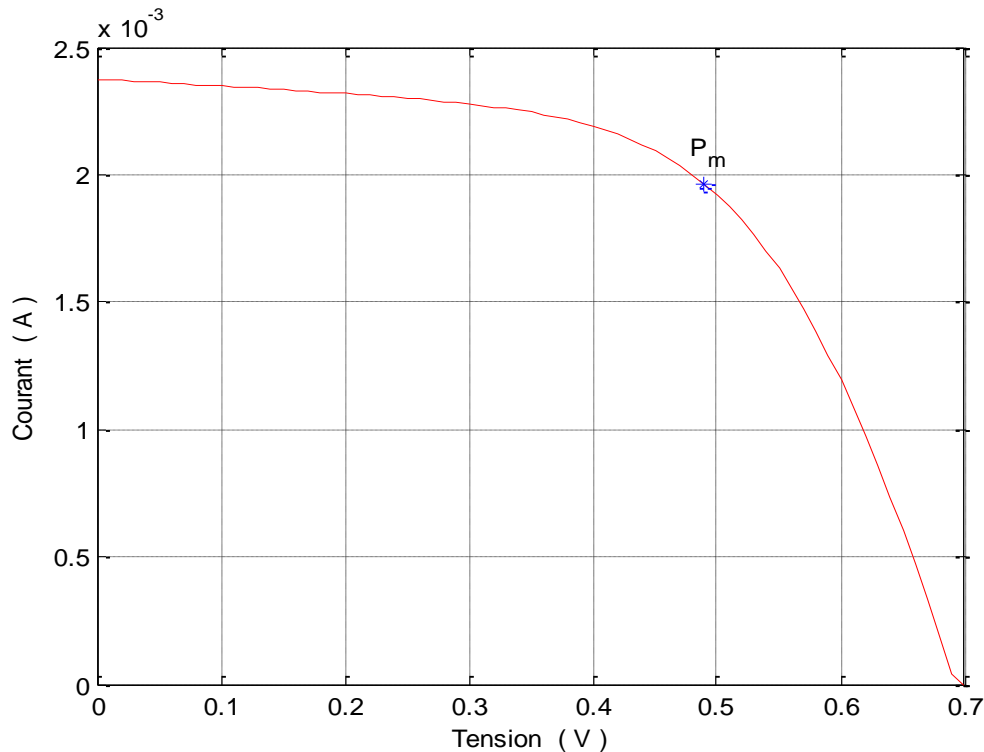


Figure IV-3 : Caractéristique I-V d'une cellule solaire.

La courbe caractéristique I-V montre qu'une cellule solaire est une source de courant constante et de là nous pouvons tirer que le courant d'une cellule solaire est à sa valeur maximale qui est égale au courant de court-circuit I_{cc} pour $V=0$. Ensuite, la tension augmente avec la diminution exponentielle du courant électrique jusqu'à ce qu'il s'annule et la tension atteint sa valeur maximale qui est égale à la tension du circuit ouvert V_{co} . Pour finir, le point en bleu représente le point de puissance maximale MPP qui correspond à des valeurs de courant et de tension optimales.

2-2-2- Influence de la température sur la caractéristique I-V :

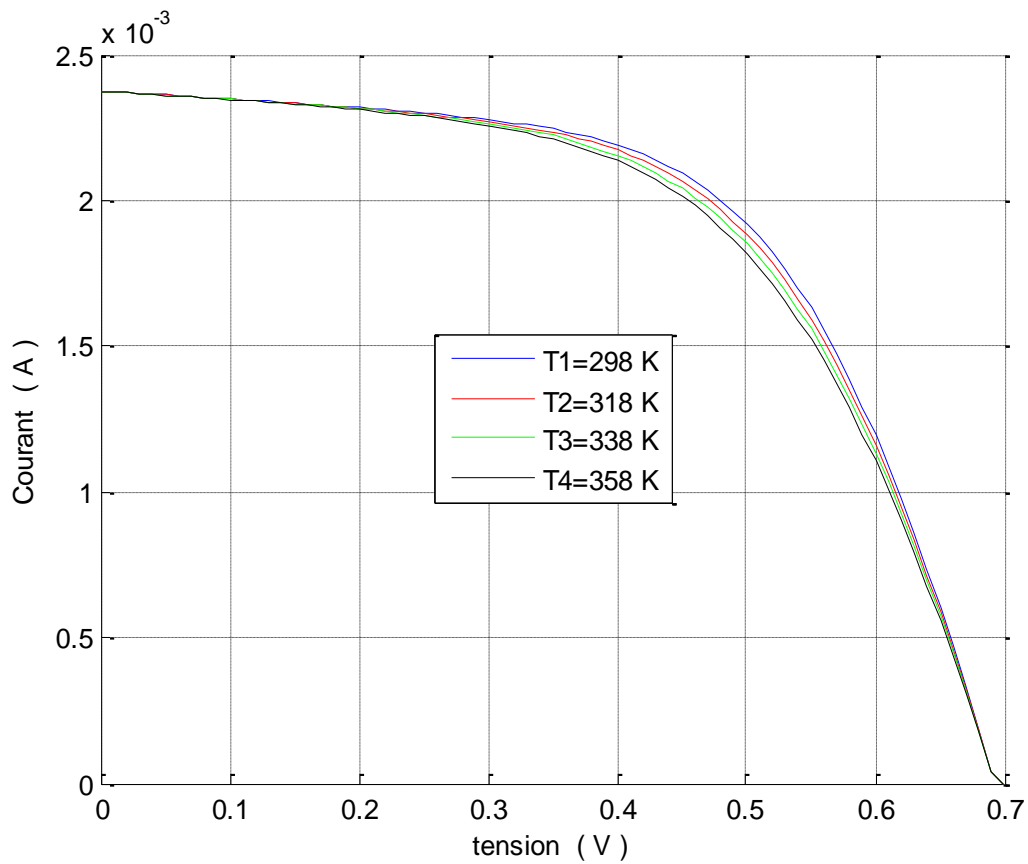


Figure IV-4 : Influence de la température sur la caractéristique I-V.

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules. L'augmentation de la température engendre une diminution de la tension de circuit ouvert V_{co} et de la puissance maximale P_{max} , en revanche le courant de court-circuit (I_{cc}) augmente avec l'augmentation de la température.

2-2-3- Influence de la résistance série :

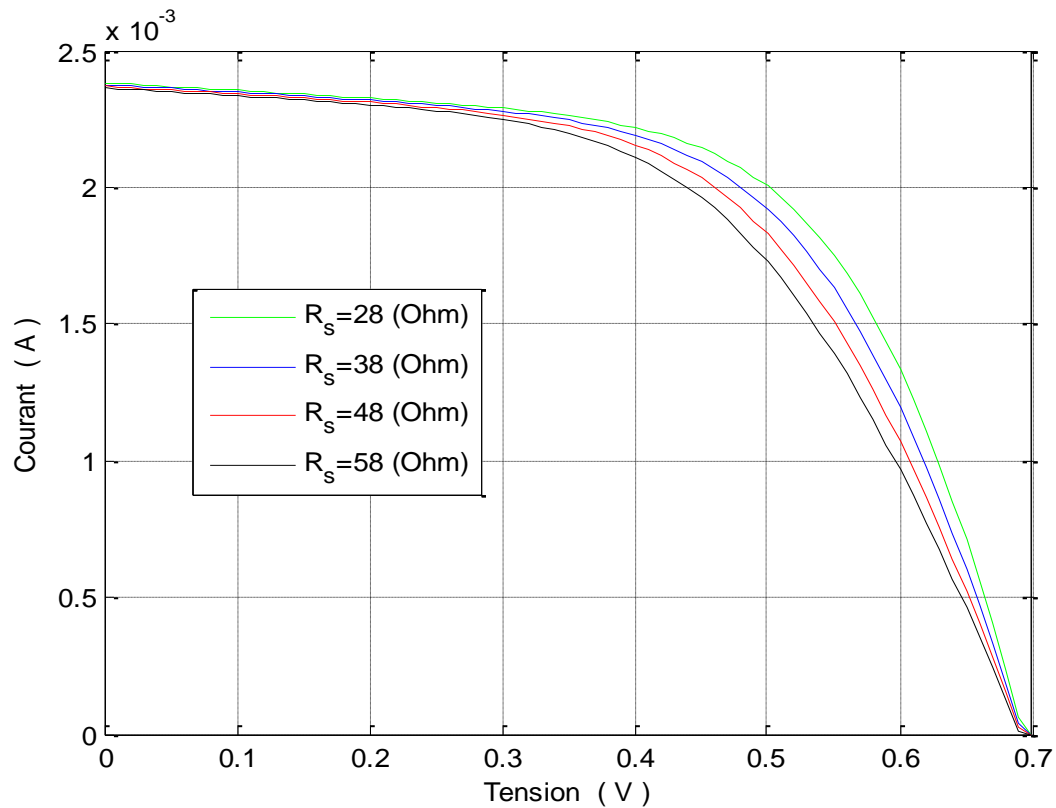


Figure IV-5 : Influence de la résistance série sur la caractéristique I-V.

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court-circuit (I_{cc}), ce qui va limiter le rendement de conversion [55].

2-2-4- Influence de la résistance parallèle (shunt):

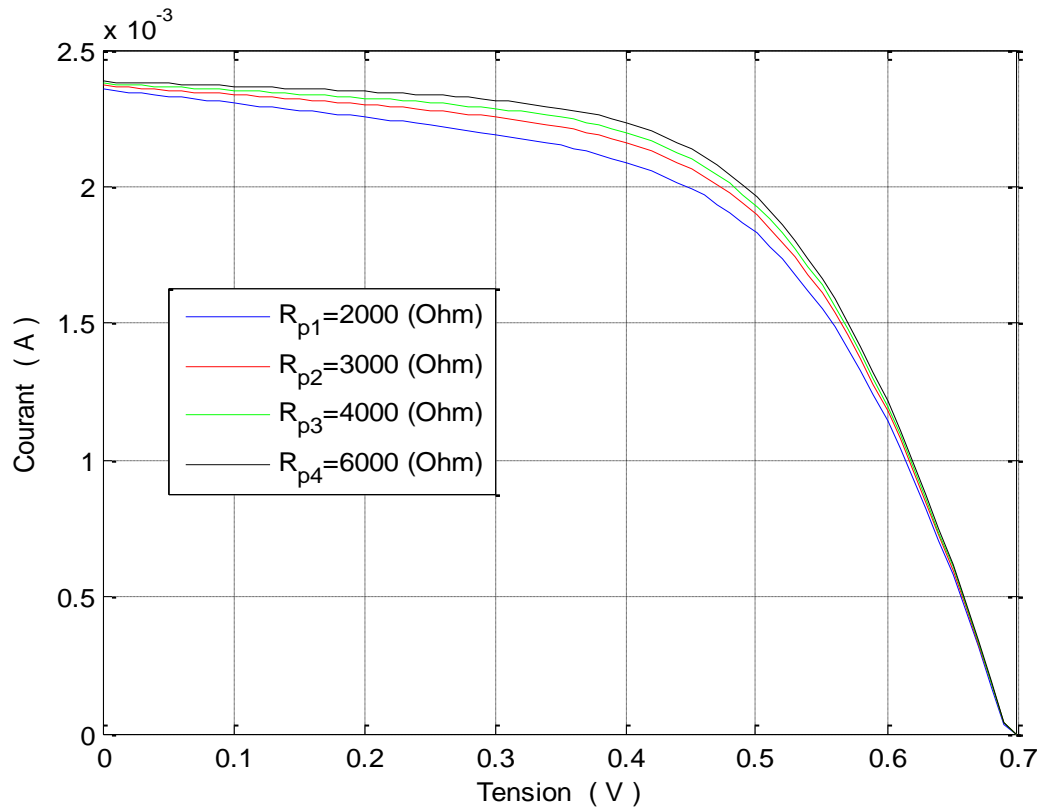


Figure IV-6 : Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique I-V.

La figure ci-dessus montre l'influence de la résistance en parallèle R_p sur la caractéristique I-V et de là on peut dire qu'avec l'augmentation de la résistance parallèle (R_p), la tension de circuit ouvert (V_{co}) marque une légère diminution. Quand le courant de court-circuit (I_{cc}) augmente, on note une augmentation de la pente de la courbe I-V de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source de courant [55].

2-2-5- Influence du facteur d'idéalité :

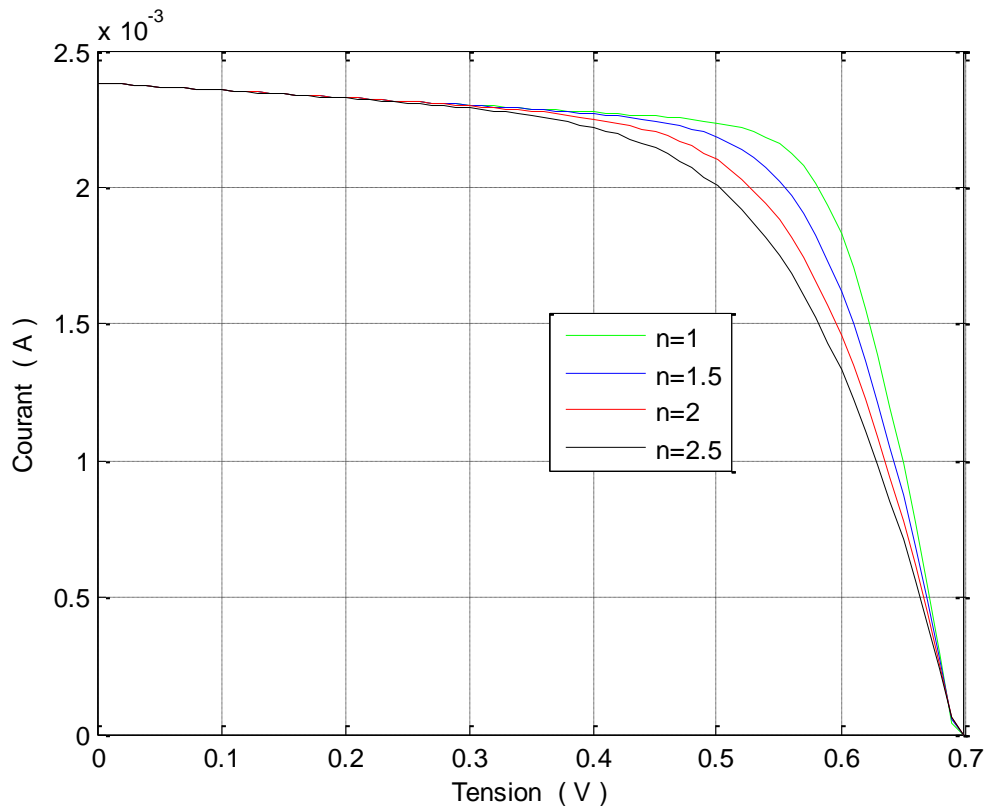


Figure IV-7 : Influence du facteur d'idéalité sur la caractéristique I-V.

Les courbes montrent que l'augmentation du facteur d'idéalité augmente la tension en circuit ouvert V_{co} , en revanche le courant de court-circuit I_{cc} et la puissance maximale P_m diminuent ce qui provoque la diminution du rendement.

3- Simulation avec SCAPS-1D d'une cellule solaire à base de ZnO :

Avec le développement du secteur de recherche sur l'énergie photovoltaïque et de là, la cellule photovoltaïque, on a vu croître la nécessité de développer les moyens de recherche, parmi ces moyens les logiciels de simulation. Il existe plusieurs logiciels de simulation d'une cellule photovoltaïque à base de couches minces, on peut citer : AMPS-1D, PC-1D, ASA, SCAPS-1D, Silvaco etc. Dans ce travail nous allons utiliser le logiciel SCAPS-1D.

3-1- Présentation du logiciel SCAPS-1D :

SCAPS (Soler Cell Capacitance Simulator) est un programme de simulation de cellule solaire tridimensionnelle développée au département d'électronique et des systèmes d'information (ELIS) de l'Université de Gand, Belgique. [56]

SCAPS contient plusieurs panneaux (fenêtres ou pages). Le principal panneau est « le panneau de l'action ». Il permet de régler le problème, définir la liste d'actions de calculs requis, exécuter les calculs, naviguer vers d'autres panneaux et sauver les résultats de l'intrigue [57].

3-2- Utilisation du logiciel :

3-2-1- Panneau d'action :

Après avoir cliqué sur l'icône qui représente le logiciel, la fenêtre ci-dessous (figure IV-8) apparait et ce qu'on appelle le panneau d'action.

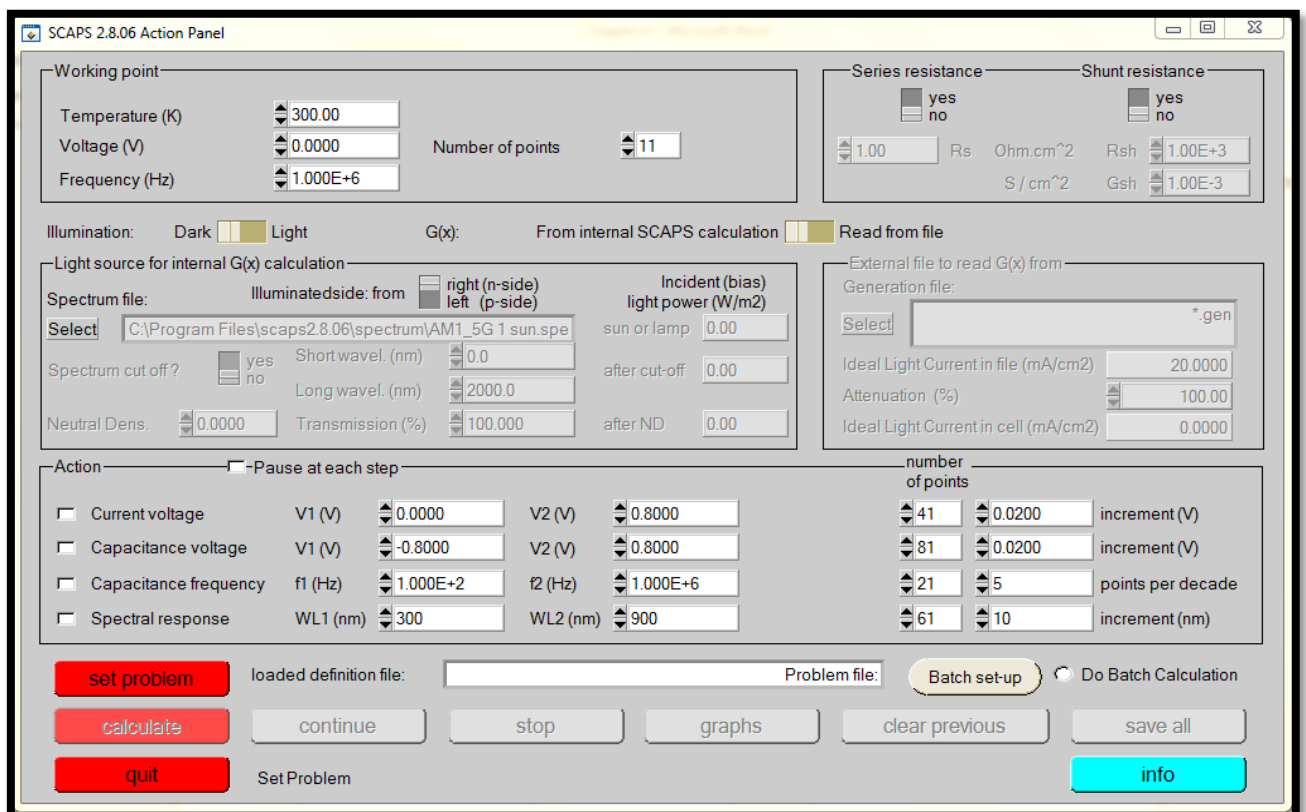


Figure IV-8 : Fenêtre d'exécution « action panel » du logiciel SCAPS.

a- Working point :

Cette partie spécifie le point de fonctionnement.

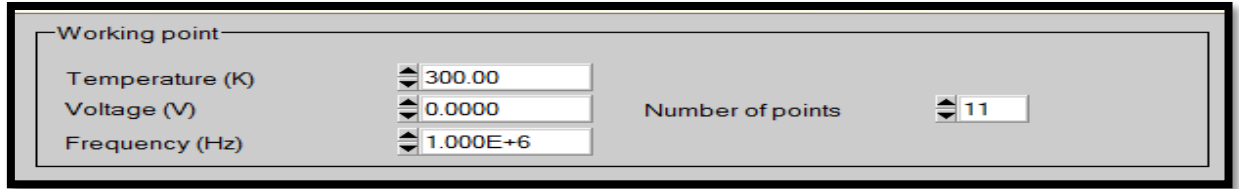


Figure IV-9 : *Le point de fonctionnement.*

Les champs présentés sont :

- **La température :** la température de la cellule, ou bien le dispositif photovoltaïque peut être changé manuellement en l'augmentant ou la diminuant jusqu'à la température souhaité.
- **Le voltage V :** C'est le voltage de la polarisation DC dans une simulation C-f et $QE(\lambda)$. SCAPS commence toujours à 0V, et s'exécute au voltage du point de fonctionnement par un nombre d'étapes qu'on doit aussi spécifier.
- **La fréquence f :** C'est la fréquence dans laquelle la caractéristique C-V est simulée.
- **Nombre de point :** le nombre de point utilisé pour tracer les courbes.

b- Résistance série et résistance shunt (parallèle) :

Il suffit de pousser le bouton vers la case "yes" pour activer la résistance série et la résistance shunt. Ils peuvent être augmenté et diminuer manuellement. Ces deux paramètres influent sur la caractéristique $I-V$.

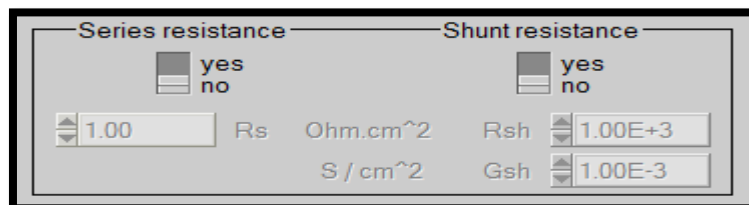



Figure IV-10 : *bloc de la résistance série et shunt.*

c- Light source :

Il suffit de pousser le bouton vers "light"  pour activer la source lumineuse.

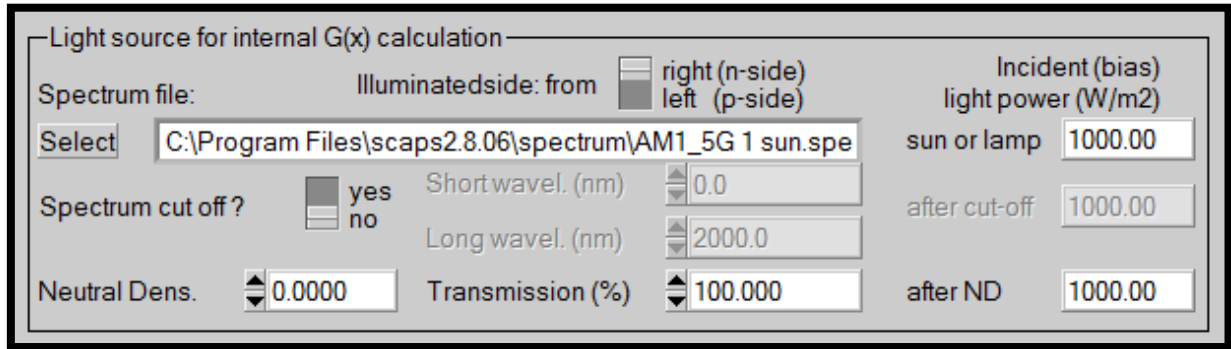


Figure IV-11 : Bloc de l'illumination.

Ce bloc sert à contrôler les paramètres de l'illumination à travers des champs spécifique à savoir : activation de la source lumineuse, le spectre monochromatique ou polychromatique et les longueurs d'onde y compris solaire etc...

d- Action :

A partir de ce bloc nous pouvons définir les grandeurs afin de les simuler et pour cela il faut cocher devant la grandeur à simuler, car on peut obtenir la caractéristique *I-V* (tension du courant), capacitance-tension, capacitance-fréquence et réponse du spectre.

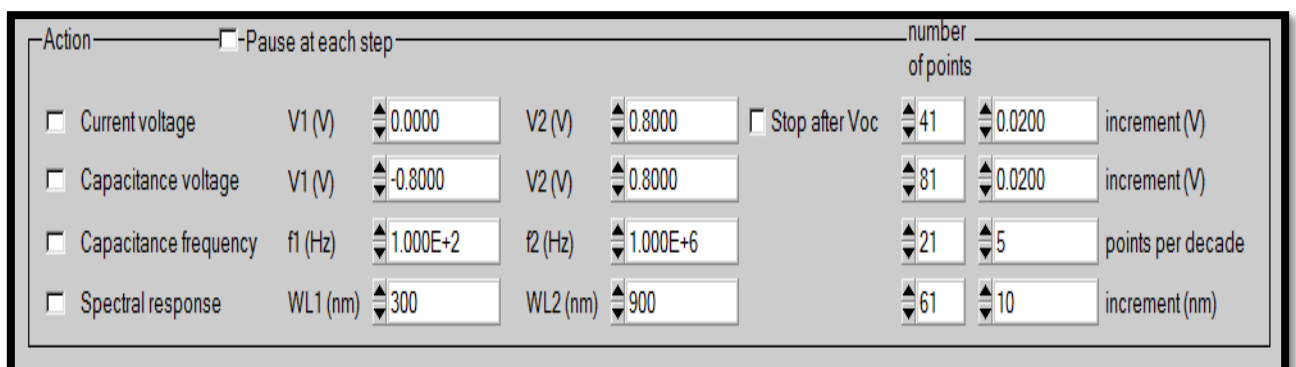


Figure IV-12 : Bloc « Action ».

3-2-2- Panneau de définition de la cellule solaire :

On appuyant sur le bouton « set problem » situé dans le panneau d'action, on obtiendra la fenêtre représentée sur la figure IV-13 : nommée panneau de définition d'une cellule solaire ou bien Solar Cell Definition Panel.

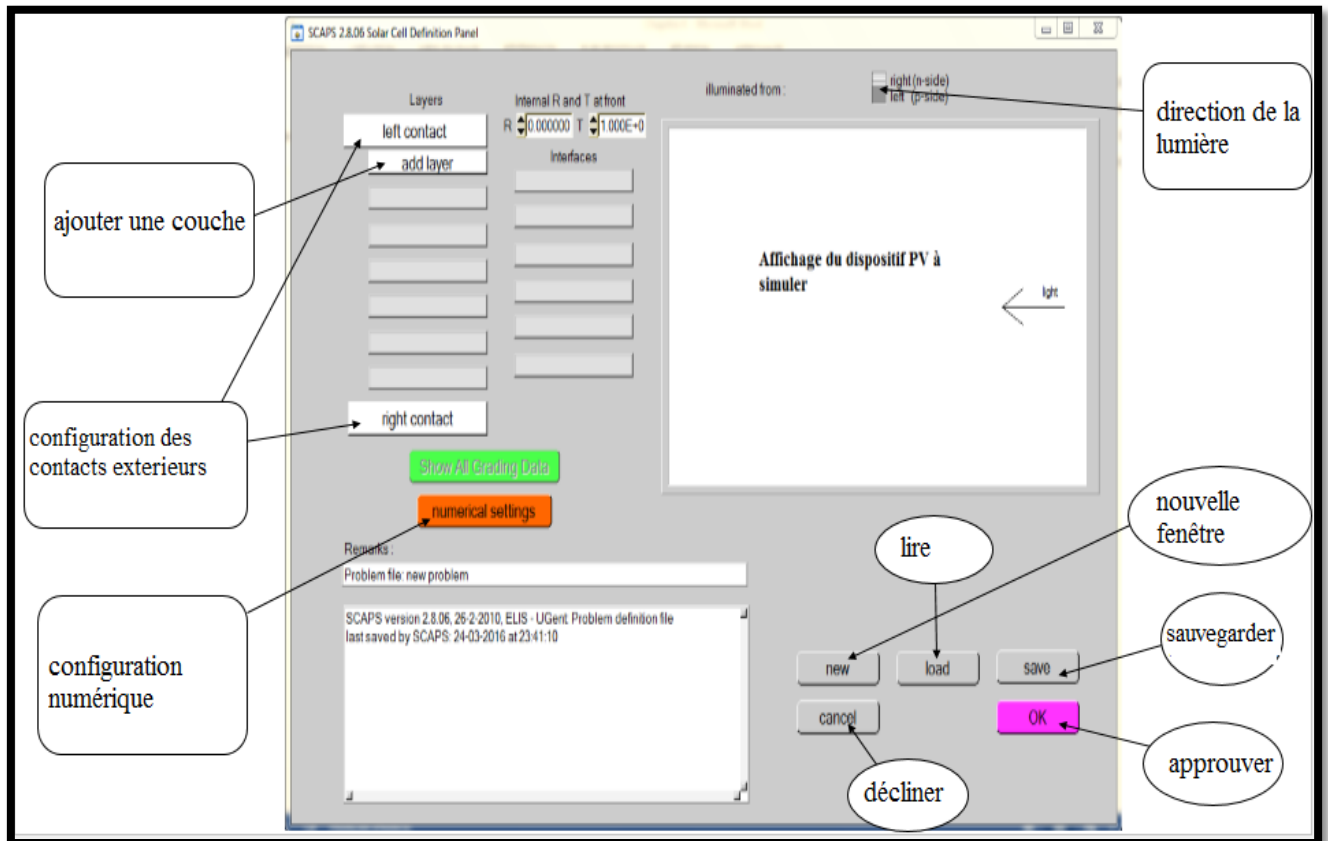


Figure IV-13 : Panneau de définition d'une cellule solaire.

- a- **New** : afin crée un nouveau dispositif photovoltaïque.
- b- **Add a layer** : une fenêtre s'ouvre qui contient des cases à remplir avec des paramètres qui caractérise la couche à étudier, à savoir : le nom de la couche, l'épaisseur, l'énergie de la bande interdite, affinité électronique, permittivité électrique, mobilité, type de dopage,...

Pour finir on clique sur « Add ».

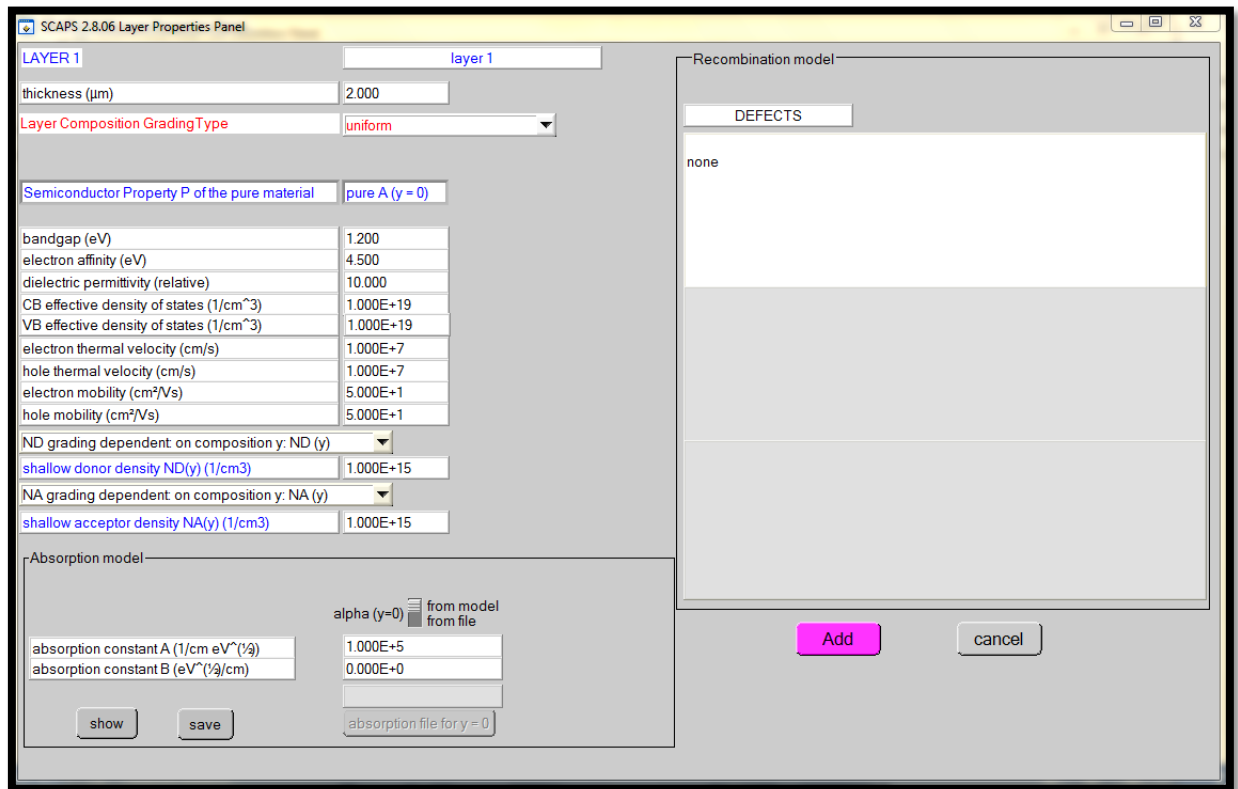


Figure IV-14 : Panneau de propriétés de la couche.

- c- **Right and left contact** : afin de modifier les paramètres des surfaces extérieurs gauche et droite de la cellule.
- d- **Save** : afin de sauvegarder la cellule à étudier.
- e- **Load** : afin de sélectionner une cellule déjà sauvegarder.
- f- **Ok** : approuver la cellule construite et revenir au panneau d'action pour finir le travail.
- g- **Cancel** : décliner le panneau de définition et revenir au panneau d'action.

3-2-3- Panneau des bandes d'énergies : (résultats)

Après avoir appuyé sur le bouton « calculate », SCAPS va lancer le calcul et de là apparaîtra le panneau des bandes d'énergies représenté sur la figure IV-15.

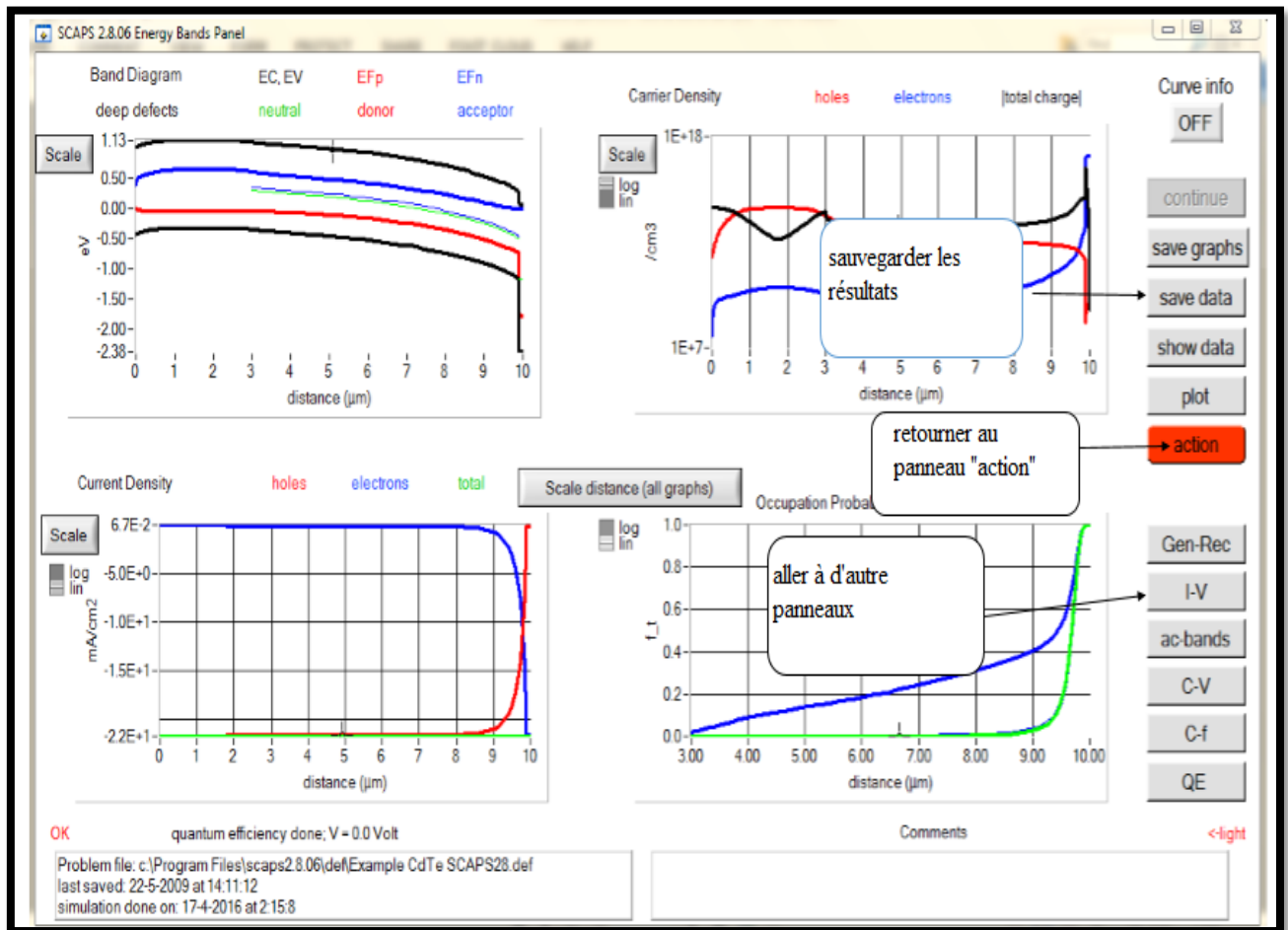


Figure IV-15 : Panneau des bandes d'énergie.

A partir de ce panneau on peut simuler :

- Caractéristique I - V .
- C - V (capacité-tension).
- C - f (capacité-fréquence).
- QE (rendement quantique).

La simulation d'une cellule solaire à l'aide du logiciel SCAPS se résume à :

- Lancer le programme, ouvrir le panneau « action » et régler les paramètres tels que la température.
- Entrer les paramètres des couches de la cellule à simuler dans le panneau de définition.
- Exécuter la simulation et noter les résultats de la simulation.

3-3- Présentation de la cellule ZnO/CdS/CdTe :

La figure IV-16 représente la structure obtenue de la cellule à l'aide du logiciel SCAPS-1D. La cellule est composée de l'hétérojonction suivante : ZnO/CdS/CdTe.

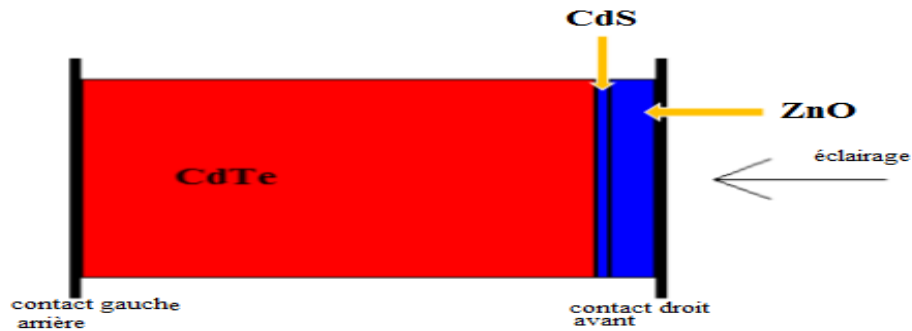


Figure IV-16 : Schéma de la cellule solaire à simuler.

3-3-1- Paramètres de la cellule :

Le tableau suivant représente les paramètres qui correspondent à chacune des couches de notre cellule.

Tableau IV-1 : paramètres de chaque couche de la cellule ZnO/CdS/CdTe.

	n- ZnO [58]	n-CdS [59]	p-CdTe [59]
Epaisseur (μm)	0.2	0.05	2.2
Bande de gap (eV)	3.3	2.4	1.450
Affinité électronique (eV)	4.6	4.5	4.280
Constante diélectrique	9	10	9.4
Densité N_c ($1/\text{cm}^3$)	2.200 E+18	2.200 E+18	2.200 E+18
Densité N_v ($1/\text{cm}^3$)	1.800 E+19	1.800 E+19	1.800 E+19
μ_e ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	1.000 E+2	1.000 E+2	1.000 E+2
μ_h ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	2.500 E+1	2.500 E+1	2.500 E+1
Donneur N_D (cm^{-3})	1.000 E+17	1.000 E+16	0
Accepteur N_A (cm^{-3})	0	0	1.00 E+14

3-3-2- Résultats et discussion :

a- Caractéristique J-V :

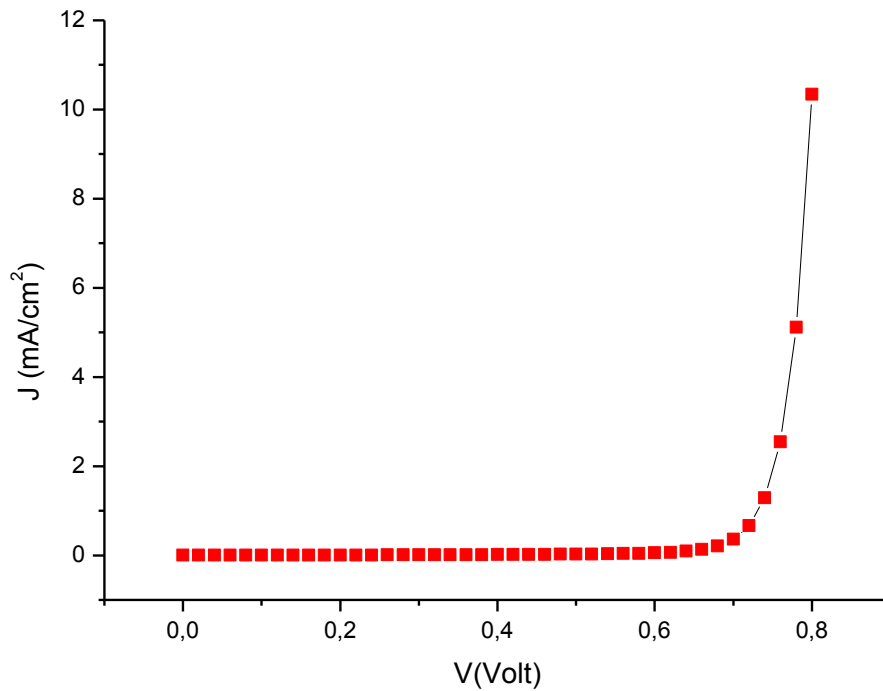


Figure IV-17 : Caractéristique J-V de la cellule ZnO/CdS/CdTe.

La tension de circuit ouvert $V_{co}=0.8582$ V, une densité électrique $J_{cc}= 29.994$ mA/cm^2 , un facteur de forme $FF= 81.06$ % et un rendement $\eta= 20.93$ %.

b- Influence de quelques paramètres sur la caractéristique $J-V$:

➤ *Influence de la température :*

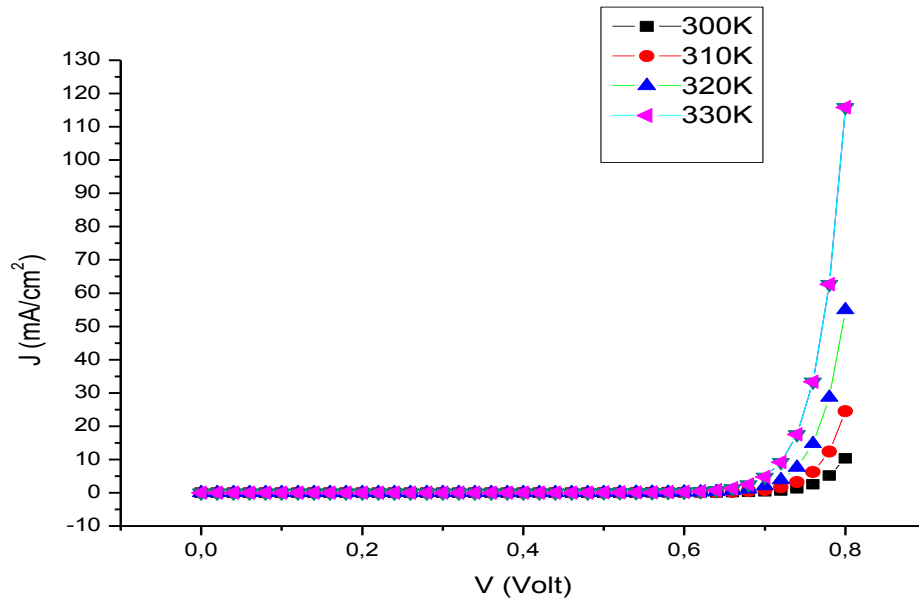


Figure IV-18 : Influence de la température sur la caractéristique $J-V$.

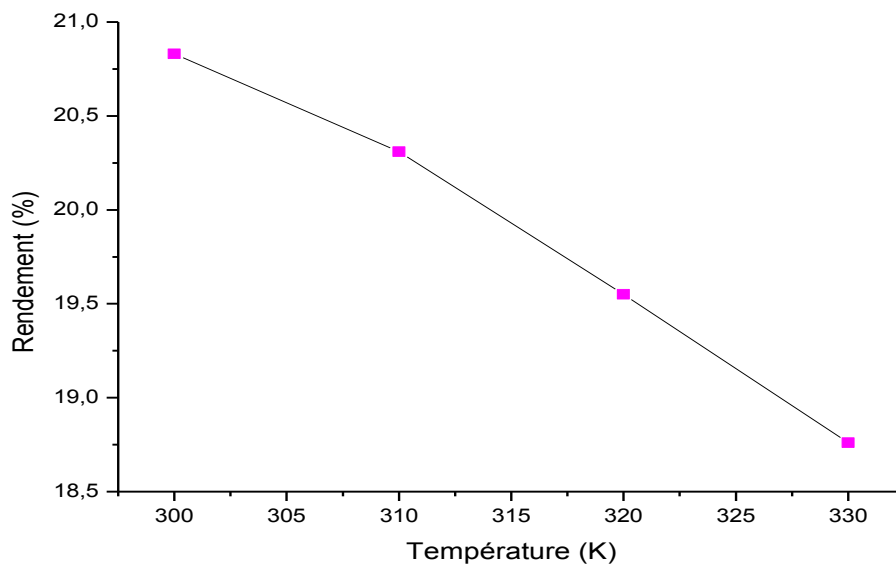


Figure IV-19 : Influence de la température sur le rendement.

L'influence de la température sur la caractéristique $J-V$ (figure IV-18), se traduit principalement par la diminution de la tension générée (V_{co}), de la puissance, du facteur de forme FF et par conséquent une diminution du rendement η (figure IV-19), qui est

ici presque de 0.8 par 10°K . Ceci peut être expliqué par le fait que lorsque la température augmente, la bande de gap devient plus étroite et ceci accélère le phénomène de recombinaison des paires électrons-trous entre la bande de conduction (BC) et la bande de valence (BV).

➤ *Influence de l'épaisseur de la couche de ZnO :*

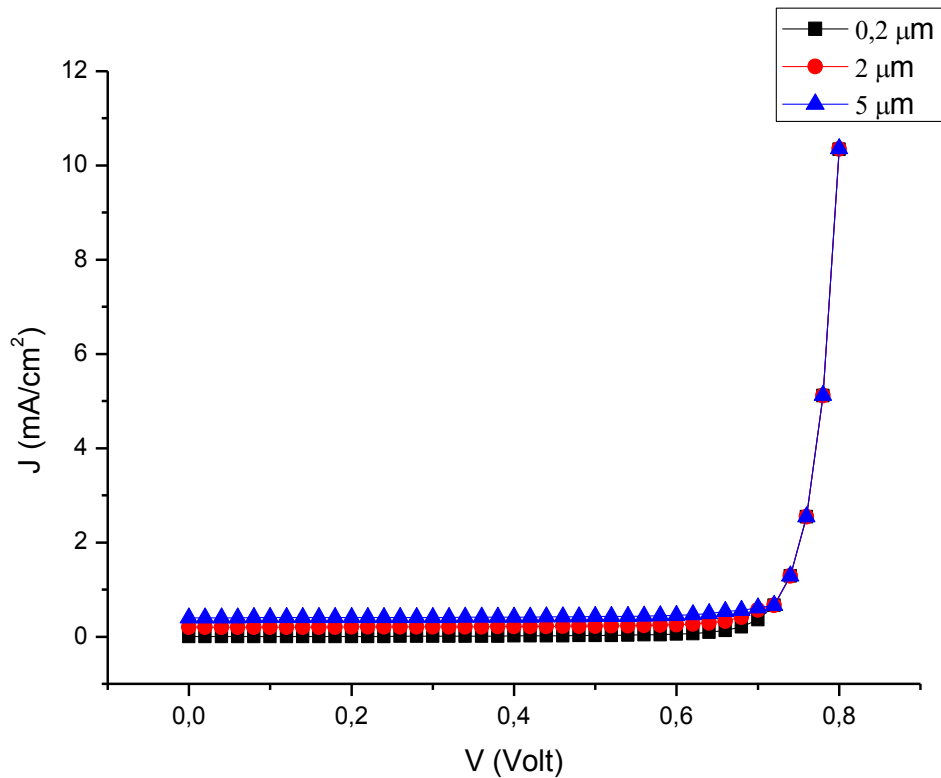


Figure IV-20 : *Influence de l'épaisseur de la couche de ZnO sur la caractéristique J-V.*

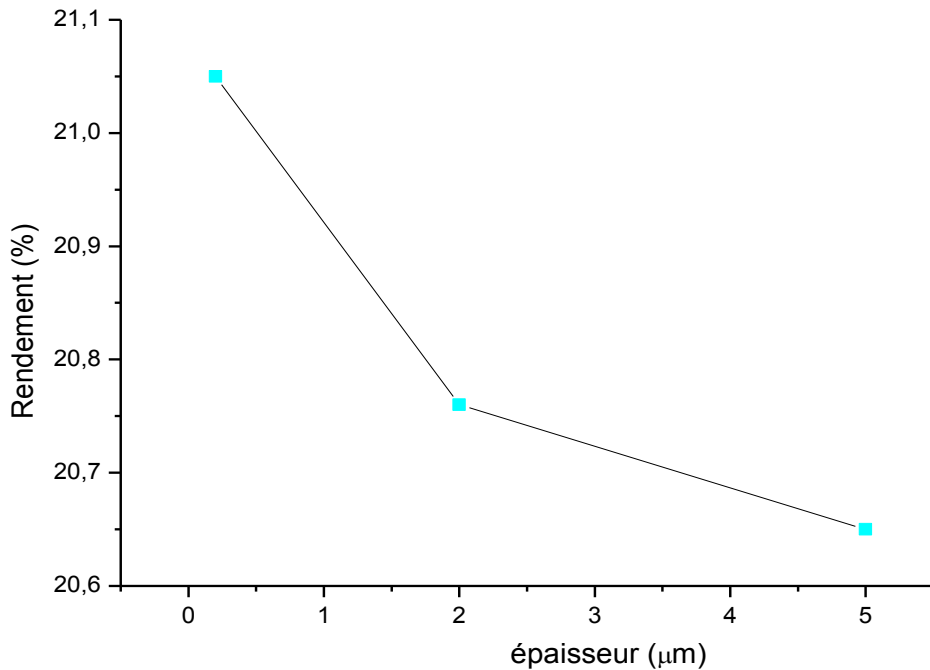


Figure IV-21 : Influence de l'épaisseur de la couche de ZnO sur le rendement.

Les figures IV-20 et IV-21 montrent l'influence de l'épaisseur de la couche mince de ZnO sur la caractéristique $J-V$ et sur le rendement. Pour les petites épaisseurs le phénomène de générations de paires électrons-trous se passe près des interfaces ce qui réduit le nombre de paires électrons-trous. En d'autres termes la couche de l'émetteur doit être la plus mince possible pour qu'elle puisse faire passer toute l'intensité de la lumière. On conclue que plus la couche est mince plus le rendement augmente.

➤ *Influence du dopage de la couche de ZnO :*

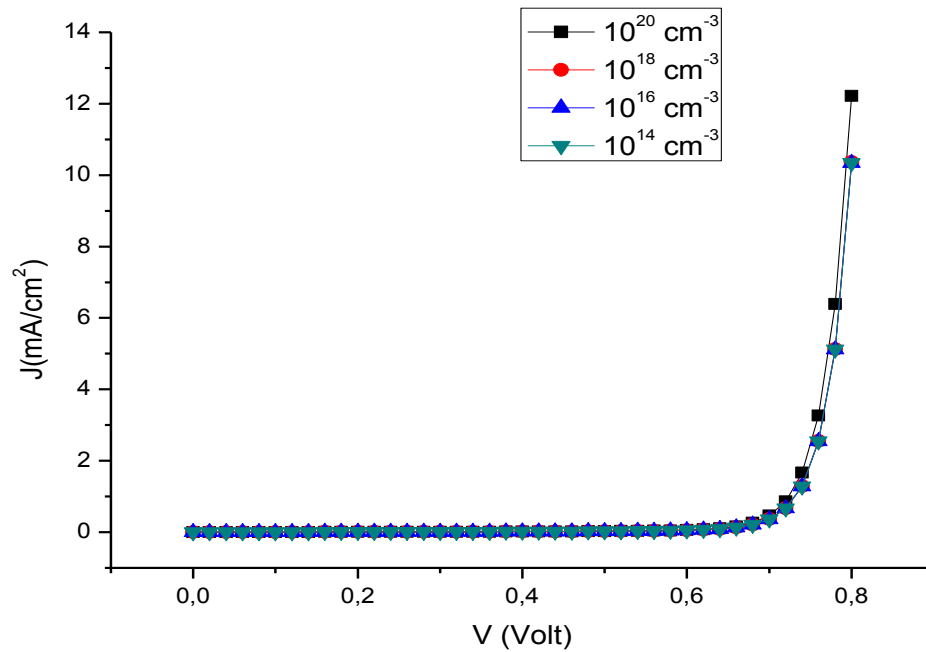


Figure IV-22 : Influence du dopage de la couche de ZnO sur la caractéristique J-V.

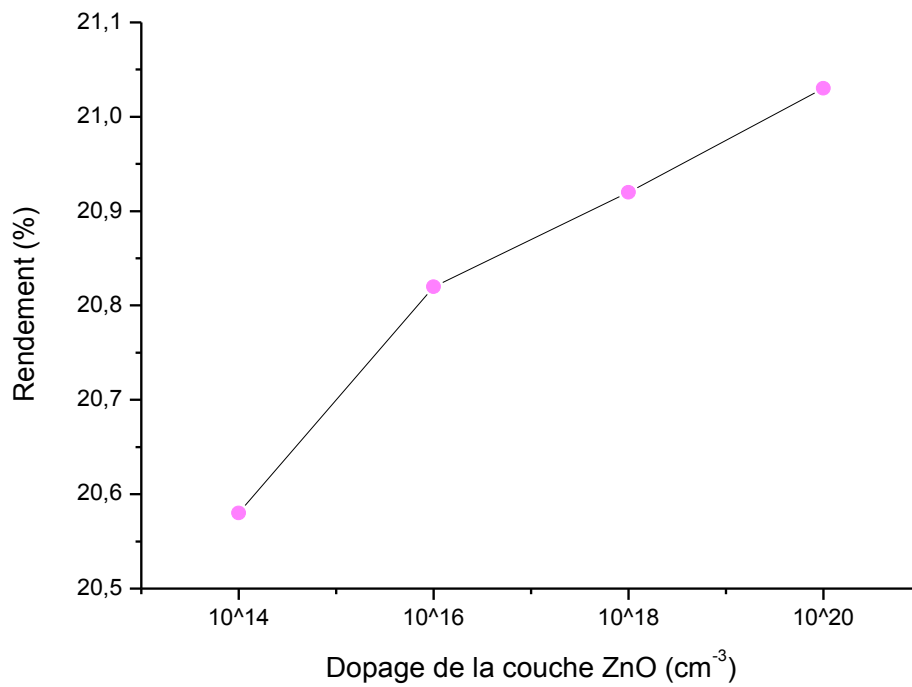


Figure IV-23 : Influence du dopage de la couche de ZnO sur le rendement.

Les figures IV-22 et IV-23 illustrent respectivement l'influence du dopage sur la caractéristique J - V et le rendement, on constate l'augmentation du rendement avec l'augmentation du dopage de la couche de ZnO.

Le matériau est fortement influencé par les impuretés ou les défauts. Ces derniers sont ajoutés pour augmenter la conductivité électrique ou le contrôle de la durée de vie. D'un autre côté, lorsque le dopage de la couche ZnO augmente, la barrière de potentiel dans l'hétérojonction ZnO/CdS/CdTe diminue, et permet une augmentation de la zone de charge d'espace, d'où une amélioration de la collecte des porteurs photo générés et donc une augmentation du rendement de conversion.

➤ *Influence de la mobilité électronique de la couche de ZnO:*

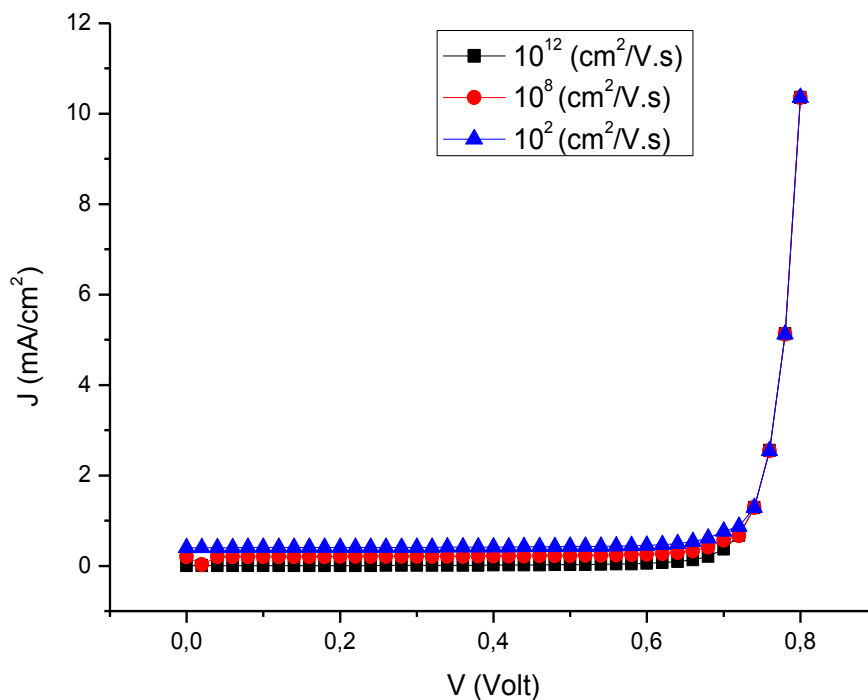


Figure IV-24 : *Influence de la mobilité des électrons de la couche de ZnO sur la caractéristique J-V.*

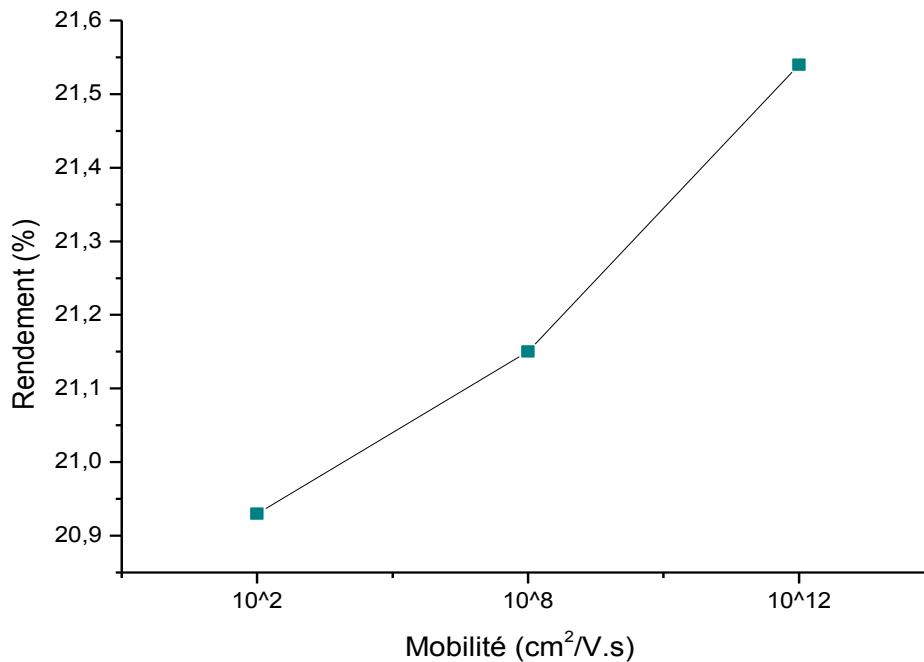


Figure IV-25 : influence de la mobilité de la couche de ZnO sur le rendement.

La figure IV-24 montre l'influence de la mobilité sur la caractéristique (J - V). Des valeurs élevées de mobilité signifient des délais transitoires plus courts, ceci implique une diminution de perte d'électrons dans la cellule, donc un rendement plus élevé. Pour de faibles valeurs de mobilité des électrons, il en résulte des tensions élevées en circuit-ouvert. En revanche dans la figure IV-25 on constate que le rendement augmente en fonction de la mobilité des électrons [60].

4- Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons tout d'abord présenté deux modèles électriques caractérisant les cellules photovoltaïques, on s'est intéressé au modèle à une diode. Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que R_s est grande ou que R_{sh} est faible.

Nous avons vu ensuite par le concept de la simulation l'influence de différents paramètres sur la caractéristique J - V de la cellule $ZnO/CdS/CdTe$ et de son rendement et cela dans le but d'améliorer et de développer les dispositifs photovoltaïque.

En raison de l'épuisement des énergies fossile et de la pollution qui en découle, la filière photovoltaïque a pris, ces dernières années, une ampleur considérable et son développement est devenu une nécessité pour toute l'humanité.

Hormis les cellules solaires classiques à base de silicium, une nouvelle technologie a vu le jour, dites «couches minces ». Elle repose sur l'utilisation de matériaux avec une épaisseur de l'ordre de quelques microns qui est suffisante pour la conversion photovoltaïque étant données que leurs coefficients d'absorption des photons est très supérieurs à celui du silicium cristallin. Ces matériaux sont donc déposés en couche très mince sur un substrat (verre, céramique, polymères). Le coût de fabrication de ce type de cellule est faible par rapport aux cellules classiques.

L'objectif tracé dans notre travail, était d'étudier la structure des cellules solaires à base de couches minces. Nous avons pris l'exemple d'une cellule solaire à base de couche mince de ZnO.

Dans un premier lieu nous avons présenté d'une manière générale l'énergie photovoltaïque, ses différentes filières ainsi que le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Ensuite, nous avons introduit l'oxyde de zinc, en présentant ses différentes propriétés (cristallines, électroniques, optiques,...) qui font de lui un matériau très important dans différents domaines, par la suite on a donné une définition des couches minces ainsi que les différentes techniques d'élaboration. Ceci nous a emmené à distinguer deux méthodes : physiques et chimiques, et montré le rôle d'une couche mince dans une cellule solaire.

Après, nous avons posé les différentes techniques de caractérisation d'une couche mince, à savoir la caractérisation structurale (diffraction des rayons X), morphologique (spectroscopie électronique à balayage et à transmission), optique (spectroscopie UV-visible et Raman) et enfin électrique (méthode de quatre pointes).

Enfin, la dernière partie a été divisée en deux :

- La première a été consacrée à la modélisation d'une cellule solaire par un schéma équivalent et grâce à MATLAB nous avons obtenu la caractéristique ($I-V$) et nous

avons pu voir l'influence de différents paramètres sur cette caractéristique tel que : la température, la résistance série, parallèle et le facteur de forme.

- Dans la seconde, nous avons simulé une cellule solaire à base de ZnO avec le logiciel SCAPS-1D. De prime abord, nous avons présenté le logiciel et les étapes d'utilisation, ceci nous a permis d'obtenir la caractéristique ($J-V$), ensuite on a discuté l'influence de différents paramètres sur les performances de la cellule tel que : la température, l'épaisseur de la couche, le dopage de la couche de ZnO et de la mobilité des électrons.

Nous constatons que les cellules solaires sont beaucoup plus performantes avec des températures basse, une résistance série faible et une parallèle qui tend vers l'infini, une couche mince de ZnO avec les caractéristiques suivantes : la plus faible épaisseur possible, un grand dopage et enfin une forte mobilité électronique.

La modélisation d'une cellule solaire est l'outil performant qui nous permettra par simulation, de lier les caractéristiques photovoltaïques de cette cellule avec les propriétés internes du matériau et la technologie de fabrication en vue d'améliorer les performances de la cellule.

Perspectives :

Comme perspectives de travail à court terme, nous envisageons de réaliser des études supplémentaires expérimentales pour effectuer des caractérisations structurelles et morphologiques d'un échantillon ayant la structure ZnO/SiO₂/Si.

La caractérisation structurelle aura lieu au niveau de notre unité URMER dès que le diffractomètre installé au rez-de chaussé sera opérationnel.

Tandis que la caractérisation morphologique sera faite par le MEB installé à la Rocade après sa mise en marche.

Références

- [1] J. GARNIER, Elaboration de couches minces d'oxydes transparents et conducteurs par spray CVD assisté par radiation infrarouge pour applications photovoltaïques, thèse de doctorat, 2009.
- [2] S. SAMMAR, Elaboration et caractérisation des matériaux magnétiques nanocristallins, thèse de doctorat, université d'Annaba, 2011.
- [3] M. MISSOUM, Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie, thèse de magister, université de Chelf, 2011.
- [4] <http://www.energie-photovoltaïque-et-solaire.com/historique.html>
- [5] M. BELARBI, Modélisation des paramètres électriques d'une cellule solaire sensibilisée par colorant, mémoire de master, université de Tlemcen, 2013.
- [6] K. HELALI, Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque: Etude Comparative, thèse de magister, université de Tizi-Ouzou, 2012.
- [7] <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16696>
- [8] M. LASLAD, simulation numérique des cellules solaires troisième génération pour des applications spatiales, thèse de magister, université de Sétif, 2014.
- [9] N. BANDADLA, optimisation des émetteurs sélectifs et passivables des cellules solaires conventionnelles à base de mc_si, mémoire de magister, université de Tlemcen, 2012.
- [10] K. AMARA, Contribution à l'étude d'une conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension, thèse de magister, université de Tizi- Ouzzou, 2015.
- [11] M. C. ABDELLI, Etude des cellules photovoltaïques organiques, mémoire de master, université de Tlemcen, 2013.

- [12] S. PETIBON, Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, thèse de doctorat, université de Toulouse, 2009.
- [13] CLEFS CEA - N° 50/51 - HIVER 2004-2005.
- [14] F. NEMMAR BELHOCINE, Etude et réalisation de cellules solaires photovoltaïques à base de matériaux organiques, thèse de doctorat, université de Tizi-Ouzzou.
- [15] M. BOUNOUAR, Etude de la purification du silicium destiné à la réalisation des cellules photovoltaïques, thèse de magister, université de Tizi-Ouzzou.
- [16] S. BENSALÉM, Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires, thèse de magister, université de Stéif, 2011.
- [17] M. F. Shraif, Optimisation et mesure de chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque en énergie électrique, Thèse de doctorat, université de Toulouse, 2002.
- [18] Z. SOFIANI, Contributions à l'étude des propriétés optiques non linéaires de nanoparticules en couches minces à base de ZnO, thèse de doctorat, université d'Angers, 2007.
- [19] A. TAABOUCHE, contribution à l'étude structurale et microstructurale de films ZnO obtenus par ablation laser, thèse de magister, université de Constantine, 2010.
- [20] A. DERBALI, L'effet de la distance du Bec et la température du substrat sur les propriétés des couches minces d'oxyde de zinc (ZnO), thèse de magister, université de Biskra, 2011.
- [21] S. BENRAMACHE, Elaboration et caractérisation des couches minces de ZnO dopées cobalt et indium, thèse de doctorat, université de Biskra, 2012.
- [22] A. MOUSTAGHFIR, Elaboration et caractérisation de couches minces d'oxyde de zinc. Application à la photoprotection du polycarbonate, thèse de doctorat, université Blaise Pascal, 2004.
- [23] S. ABED, Elaboration et Caractérisation de Couches minces d'Oxyde de Zinc Obtenues par Spray Pyrolyse, thèse de magister, université de Constantine.

- [24] W.H. HIRSCHWALD et al, Current Topics in Materials Science 7 143–482, 1981.
- [25] A. BEDIA, Synthèse et caractérisation des nanostructures d'oxyde de zinc (ZnO) pour des dispositifs à applications biomédicales, thèse de doctorat, université de Tlemcen, 2015.
- [26] T. Brouri, Élaboration et étude des propriétés électriques de couches minces et de nanofils de ZnO, thèse de doctorat, université Paris-Est France, 2011.
- [27] <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=4550>
- [28] <http://www.institut-numerique.org/chapitre-i-generalites-sur-les-revetements-pvd-519f4d0084f4f>
- [29] A. DJADAI, L'effet de l'amplitude d'onde ultrasonique sur les propriétés optiques et électriques des couches minces de ZnO déposées par spray ultrasonique, thèse de magister, université de Biskra, 2012.
- [30] O. DARANFED, 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 de Constantine 1, 2013.
- [31] M. BENDIMRAD, Réalisation d'un capteur à gaz MOX, thèse de magister, université d'Oran, 2009.
- [32] H. LEKIKET, Elaboration et caractérisation des films ZnS par bain chimique, thèse de doctorat, université de Constantine, 2016.
- [33] L. ALOUI, Dépôt chimique en phase vapeur d'AL, Cu et Fe en vue d'élaboration de films composés de phases intermétalliques, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), 2012.
- [34] S. RAHMANE, Elaboration et caractérisation de couches minces par spray pyrolyse et pulvérisation magnétron, thèse de doctorat, université de Biskra, 2008.
- [35] H. BENAMRA, L'effet de la température du substrat et de la molarité sur les propriétés des couches minces de sulfure de zinc déposées par spray ultrasonique, thèse de magister, université de Biskra, 2013.

- [36] S. MENAKH, Contribution à l'étude des propriétés de films ZnO, thèse de magister, université de Mentouri Constantine, 2010.
- [37] L. YANG, Caractérisation de couches minces de ZnO élaborées par la pulvérisation cathodique en continu, thèse de doctorat, université du Littoral Côte d'Opale, 2012.
- [38] <http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/dico/d/physique-rayon-x-1002/>
- [39] http://www.schoolphysics.co.uk/age14-16/glance/Waves/Diffraction_/index.html
- [40] http://cdalpha.univ-lyon1.fr/CDHL_Appareils_D8Advance.php
- [41] M. OTHMANE, Dépôt et caractérisation des couches minces d'oxyde de Zinc par spray pyrolyse ultrasonique, thèse de magister, université de Biskra, 2010.
- [42] A. MOSBAH, Elaboration et caractérisation de couches minces d'Oxyde de Zinc, thèse de doctorat, université de Mentouri Constantine, 2009.
- [43] S. BENSMAINE, dépôt de couches minces d'oxyde de zinc avec axe c incliné par la pulvérisation magnéton et la réalisation des dispositifs à ondes acoustiques de surface SAW, thèse de doctorat, université de Tlemcen, 2008.
- [44] <http://pimm.paris.ensam.fr/fr/taxonomy/term/294>
- [45] <http://umet.univ-lille1.fr/CCM/images.php?lang=fr>
- [46] http://www.mssmat.ecp.fr/mssmat/moyens/microscopie/principes/moyens_microscope_electronique_a_transmission
- [47] <https://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/virttxtjml/spectrpy/uv-vis/uvspec.htm>
- [48] http://wiki.scienceamusante.net/index.php?title=Fichier:Bleu_aniline_spectre_UV-visible.gif
- [49] R. HAMMOUN, Etude par spectroscopie Raman de la structure des domaines périodiquement polarisés dans le niobate de lithium (PPLN), thèse de doctorat, université de Metz, 2008.

- [50] E. H. BENYAHIA, Caractérisation structurale et optique de couches minces formées par des agrégats des nanocristaux de ZnO, thèse de magister, université Mentouri Constantine,
- [51] F. FERHATI, élaboration de l'oxyde de vanadium V_2O_5 par APCVD. Application photovoltaïque, thèse de magister, université de Tizi- Ouzzou, 2011.
- [52] A. Zerga, B. Benyoucef and J.P. Charles, Insufficiencies of the Single Exponential Model and Efficiency of the Double Exponential Model in the Optimization of Solar Cells Efficiency, Active and Passive Electronic Components, Vol. 21, pp. 265 - 278, 1998.
- [53] Z. BENDJELOULI, Contribution à la modélisation d'une cellule solaire, thèse de magistère, université de Bechar, 2009.
- [54] P. BONNET, Outils de simulation Partie : Matlab, université de Lille 1, 2009-2010.
- [55] M. Belarbi, A. Benyoucef, B. Benyoucef, Study of the equivalent circuit of a Dye-Sensitized Solar Cells, Advanced Energy: An International Journal (AEIJ), Vol. 1, No. 2, April 2014.
- [56] <http://scaps.elis.ugent.be/>
- [57] F. BENSMAIN, Etude théorique sur les applications actuelles du ZnO et les dopages possibles sur ce matériau, mémoire de master, université de Tlemcen, 2015.
- [58] I. DAHMOUS, Etude des couches minces CuInSe₂ pour une application photovoltaïque, mémoire de master, université de Tlemcen, 2012.
- [59] M.A. MATIN, N. AMIN, A. ZAHARIM, and K. SOPIAN, «Ultra-Thin High Efficiency CdS/CdTe Thin Film Solar Cells from Numerical Analysis Engineering», Education, pp. 338-344, (1982).
- [60] M. BELARBI, B. BENYOUCEF, A. BENYOUCEF, T. BENOUAZ, S. GOUMRI-SAID, Enhanced electrical model for dye-sensitized solar cell characterization, Solar Energy ,Volume 122, Pages 700–711, December 2015.

Annexe

Caractéristique I-V d'une cellule solaire :

```
%*****  
clear all,  
%*****  
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=38.1;Rp=3683;  
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=2.5;  
W=q/(n*K*T);  
Io=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));  
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);  
U=0; k=0; I=Icc;  
while I>=0;  
Id=Io*(exp(W*(U+Rs*I))-1); IRp=(U+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRp;  
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIRp(k)=IRp; UU(k)=U;  
IIph(k)=Icc; IIId(k)=Id; end;  
U=U+0.01; end;  
UU=[UU Vco]; II=[II 0];  
plot(UU,II,'r'); hold on;grid on  
xlabel(' Tension ( V ) ');  
ylabel(' Courant ( A ) ');  
PP=UU.*II;  
[Pmax,j]=max(PP)  
Imth=II(j)  
Vmth=UU(j)  
plot(UU(j),II(j),'*'); hold on;  
text(0.478,0.00209,'P_{m}')
```

Influence de la température sur la caractéristique I-V :

```
%T=298k  
hold on;  
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=38.1;Rp=3683;  
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=2.5;  
W=q/(n*K*T);  
Io=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));  
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);  
U=0; k=0; I=Icc;  
while I>=0;  
Id=Io*(exp(W*(U+Rs*I))-1); IRp=(U+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRp;  
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIRp(k)=IRp; UU(k)=U;  
IIph(k)=Icc; IIId(k)=Id; end;  
U=U+0.01; end;  
UU=[UU Vco]; II=[II 0];  
plot(UU,II,'b'); hold on;grid on  
xlabel(' tension ( V ) ');  
ylabel(' Courant ( A ) ');  
%T=318k  
hold on;  
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=38.1;Rp=3683;  
K=1.38e-23;T=318;q=1.6e-19;n=2.5;  
W=q/(n*K*T);  
Io=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));  
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);  
U=0; k=0; I=Icc;  
while I>=0;
```



```

Id=Io*(exp(W*(U+Rs*I))-1); IRp=(U+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRp;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIRp(k)=IRp; UU(k)=U;
IIPH(k)=Icc; IId(k)=Id; end;
U=U+0.01; end;
UU=[UU Vco]; II=[II 0];
plot(UU,II,'r'); hold on;grid on
xlabel(' tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%T=338k
hold on;
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=38.1;Rp=3683;
K=1.38e-23;T=338;q=1.6e-19;n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
U=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id=Io*(exp(W*(U+Rs*I))-1); IRp=(U+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRp;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIRp(k)=IRp; UU(k)=U;
IIPH(k)=Icc; IId(k)=Id; end;
U=U+0.01; end;
UU=[UU Vco]; II=[II 0];
plot(UU,II,'g'); hold on;grid on
xlabel(' tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%T=358 K
hold on;
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=38.1;Rp=3683;
K=1.38e-23;T=358;q=1.6e-19;n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
U=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id=Io*(exp(W*(U+Rs*I))-1); IRp=(U+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRp;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIRp(k)=IRp; UU(k)=U;
IIPH(k)=Icc; IId(k)=Id; end;
U=U+0.01; end;
UU=[UU Vco]; II=[II 0];
plot(UU,II,'k'); hold on;grid on
xlabel(' tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
legend('T1=298 K','T2=318 K','T3=338 K','T4=358 K','Location','Best')

```

Influence de la résistance série sur la Caractéristique I-V :

```

%Rs=28 Ohm
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=28;Rp=3683;
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
U=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id=Io*(exp(W*(U+Rs*I))-1); IRp=(U+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRp;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIRp(k)=IRp; UU(k)=U;
IIPH(k)=Icc; IId(k)=Id; end;
U=U+0.01; end;
UU=[UU Vco]; II=[II 0];
plot(UU,II,'g'); hold on;grid on

```

```

xlabel(' tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%Rs=38 Ohm
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=38;Rp=3683;
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
U=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id=Io*(exp(W*(U+Rs*I))-1); IRp=(U+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRp;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIRp(k)=IRp; UU(k)=U;
IIPH(k)=Icc; IIId(k)=Id; end;
U=U+0.01; end;
UU=[UU Vco]; II=[II 0];
plot(UU,II,'b'); hold on;grid on
xlabel(' tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%Rs=48 Ohm
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=48;Rp=3683;
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
U=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id=Io*(exp(W*(U+Rs*I))-1); IRp=(U+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRp;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIRp(k)=IRp; UU(k)=U;
IIPH(k)=Icc; IIId(k)=Id; end;
U=U+0.01; end;
UU=[UU Vco]; II=[II 0];
plot(UU,II,'red'); hold on;grid on
xlabel(' Tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%Rs=58 Ohm
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=58;Rp=3683;
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
U=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id=Io*(exp(W*(U+Rs*I))-1); IRp=(U+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRp;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIRp(k)=IRp; UU(k)=U;
IIPH(k)=Icc; IIId(k)=Id; end;
U=U+0.01; end;
UU=[UU Vco]; II=[II 0];
plot(UU,II,'black'); hold on;grid on
xlabel(' Tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
legend('R_{s}=28 (Ohm)', 'R_{s}=38 (Ohm)', 'R_{s}=48 (Ohm)', 'R_{s}=58
(Ohm)', 'Location', 'Best')

```

Influence de la résistance parallèle sur la Caractéristique I-V :

```

%Rp=2000 Ohm
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=38.1;Rp=2000;
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));

```

```

Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
U=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id=Io*(exp(W*(U+Rs*I))-1); IRp=(U+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRp;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIRp(k)=IRp; UU(k)=U;
IIPH(k)=Icc; IIID(k)=Id; end;
U=U+0.01; end;
UU=[UU Vco]; II=[II 0];
plot(UU,II,'b'); hold on;grid on
xlabel(' Tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%Rp=3000 Ohm
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=38.1;Rp=3000;
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
U=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id=Io*(exp(W*(U+Rs*I))-1); IRp=(U+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRp;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIRp(k)=IRp; UU(k)=U;
IIPH(k)=Icc; IIID(k)=Id; end;
U=U+0.01; end;
UU=[UU Vco]; II=[II 0];
plot(UU,II,'r'); hold on;grid on
xlabel(' Tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%Rp=4000 Ohm
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=38.1;Rp=4000;
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
U=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id=Io*(exp(W*(U+Rs*I))-1); IRp=(U+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRp;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIRp(k)=IRp; UU(k)=U;
IIPH(k)=Icc; IIID(k)=Id; end;
U=U+0.01; end;
UU=[UU Vco]; II=[II 0];
plot(UU,II,'g'); hold on;grid on
xlabel(' Tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%Rp=6000 Ohm
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=38.1;Rp=6000;
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
U=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id=Io*(exp(W*(U+Rs*I))-1); IRp=(U+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRp;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIRp(k)=IRp; UU(k)=U;
IIPH(k)=Icc; IIID(k)=Id; end;
U=U+0.01; end;
UU=[UU Vco]; II=[II 0];
plot(UU,II,'black'); hold on;grid on
xlabel(' Tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
legend('R_{p1}=2000 (Ohm)', 'R_{p2}=3000 (Ohm)', 'R_{p3}=4000
(Ohm)', 'R_{p4}=6000 (Ohm)', 'Location', 'Best')

```

Influence du facteur d'idéalité sur la Caractéristique I-V :

```
%n=1
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=28.1;Rp=3683;
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=1;
W=q/(n*K*T);
Io=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
U=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id=Io*(exp(W*(U+Rs*I))-1); IRp=(U+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRp;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIRp(k)=IRp; UU(k)=U;
IIPH(k)=Icc; IID(k)=Id; end;
U=U+0.01; end;
UU=[UU Vco]; II=[II 0];
plot(UU,II,'g'); hold on;grid on
xlabel(' tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%n=1.5
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=28.1;Rp=3683;
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=1.5;
W=q/(n*K*T);
Io=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
U=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id=Io*(exp(W*(U+Rs*I))-1); IRp=(U+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRp;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIRp(k)=IRp; UU(k)=U;
IIPH(k)=Icc; IID(k)=Id; end;
U=U+0.01; end;
UU=[UU Vco]; II=[II 0];
plot(UU,II,'b'); hold on;grid on
xlabel(' tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%n=2
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=28.1;Rp=3683;
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=2;
W=q/(n*K*T);
Io=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
U=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id=Io*(exp(W*(U+Rs*I))-1); IRp=(U+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRp;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIRp(k)=IRp; UU(k)=U;
IIPH(k)=Icc; IID(k)=Id; end;
U=U+0.01; end;
UU=[UU Vco]; II=[II 0];
plot(UU,II,'red'); hold on;grid on
xlabel(' Tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
%n=2.5
Icc=0.0024;Vco=0.699;Rs=28.1;Rp=3683;
K=1.38e-23;T=298;q=1.6e-19;n=2.5;
W=q/(n*K*T);
Io=(Icc*(1+Rs/Rp)-Vco/Rp)/(exp(W*Vco));
Iph=Vco/Rp+Io*exp(W*Vco);
U=0; k=0; I=Icc;
while I>=0;
Id=Io*(exp(W*(U+Rs*I))-1); IRp=(U+Rs*I)/(Rp); I=Icc-Id-IRp;
if I>=0; k=k+1; II(k)=I; IIRp(k)=IRp; UU(k)=U;
```

```
IIph(k)=Icc; IIid(k)=Id; end;
U=U+0.01; end;
UU=[UU Vcol]; II=[II 0];
plot(UU,II,'black'); hold on;grid on
xlabel(' Tension ( V ) ');
ylabel(' Courant ( A ) ');
legend('n=1','n=1.5','n=2','n=2.5','Location','Best')
```

Introduction générale.

Chapitre I :
Généralités sur le photovoltaïque.

Chapitre II :
**L'oxyde de zinc et techniques
d'élaboration d'une couche mince de
ZnO**

Chapitre III :
**Techniques de caractérisation d'une
couche mince de ZnO.**

Chapitre IV :

**Modélisation et simulation d'une
cellule solaire à base de couche mince
de ZnO.**

Conclusion générale.

Résumé :

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés aux différentes étapes de l'étude d'une cellule solaire à base de couche mince d'oxyde de zinc (ZnO). Nous avons énuméré les techniques d'élaboration d'une couche mince de ZnO et les techniques de son caractérisation. Nous avons aussi présenté l'étude du circuit équivalent d'une cellule solaire en utilisant le logiciel MATLAB. Ensuite, à l'aide du logiciel SCAPS-1D, nous avons simulé une cellule solaire à base de couche mince de ZnO, afin d'analyser l'influence de certains paramètres à savoir : la température, le dopage, l'épaisseur et la mobilité électronique de la couche mince de ZnO. Enfin, étudier l'évolution du rendement de la cellule solaire en fonction de chacun de ses paramètres.

Mots clés : ZnO, couche mince, technique de dépôt, simulation MATLAB, SCAPS-1D.

Abstract :

In this work, we were interested in the different steps that requires the study of a solar cell made with a thin layer of zinc oxides (ZnO). We have listed all the elaboration technics and the features of a thin layer of ZnO. We also presented the study of equivalent circuit of a solar cell using the MATLAB software. Then with SCAPS-1D software we simulated a solar cell made with a thin layer of zinc oxides (ZnO) in order to analyse the influence of a certain parameters such as : The temperature, doping, thickness and the electronic mobility of the thin layer of ZnO. finally, studying the performance evolution of a solar cell according to each of its parameters

Key words: ZnO, thin layer, deposition technics, simulation MATLAB, SCAPS-1D,

ملخص:

من خلال هذا العمل أردنا ان نتطرق الى مختلف مراحل دراسة الخلايا الشمسية ذات طبقة رقيقة من أكسيد الزنك (ZnO) حيث قمنا بتعداد معظم التقنيات لصنعها وتمييزها. قمنا كذلك بدراسة الدارة المكافئة للخلية الشمسية باستعمال برنامج MATLAB ثم عن طريق برنامج SCAPS-1D قمنا بمحاكاة خلية شمسية ذات طبقة رقيقة من ZnO لتحليل تأثير بعض المعلمات بما في ذلك: درجة الحرارة، المنشطات، السمك والتنقل الإلكتروني في الطبقة رقيقة من أكسيد الزنك. وأخيرا، ودراسة تطور أداء الخلايا الشمسية وفقا لكل من العوامل السالف ذكرها.

كلمات البحث: أكسيد الزنك، طبقة رقيقة تقنية، تقنية ترسيب، المحاكاة MATLAB، SCAPS-1D .