

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Université Abou Bekr Belkaid
Tlemcen Algérie



جامعة أبي بكر بلقايد



Faculté des sciences - Département de physique

Unité de recherche matériaux et énergies renouvelables



Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de :
MASTER en Physique

Spécialité: Matériaux , Systèmes et Energies Renouvelables

Présenté par:

MEKELLECHE SIDI MOHAMMED

Thème

**Modélisation et Simulation de Nouveaux Matériaux
Destinés à la Production d'Energie Photovoltaïque**

Soutenu à Tlemcen, le 21 / 06/ 2015 devant le jury composé de :

Président :	Pr : N.BIBI TRIKI	Université de Tlemcen.
Encadreur :	Pr : B.BENYOUCEF	Université de Tlemcen
Examineur :	MCA : L.MERAD	Université de Tlemcen
Examineur :	MCA : S.BENSMACHINE	Université de Tlemcen

Année universitaire : 2014-2015

Remerciements

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

Ce travail a été effectué dans l'Unité de Recherche des Matériaux et des Energies Renouvelables (URMER) de la faculté des sciences, sous la direction de monsieur **B. BENYOUCEF**, Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaïd- Tlemcen.

Je lui exprime particulièrement toutes mes reconnaissances pour m'avoir fait bénéficier de ces compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.

J'exprime mes sincères remerciements à monsieur : **N. BIBI TRIKI**, Professeur à l'Université Abou-bekr Belkaïd Tlemcen, d'avoir accepté de présider le Jury de cette thèse.

Je remercie sincèrement monsieur : **L.MERAD** Maîtres de conférences à l'Université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen et Madame : **S.BENSMINE** Maîtres de conférences à l'Université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen d'avoir accepter de faire partie du Jury.

Enfin, j'adresse mes vives reconnaissances à tous les membres de l'«**URMER** », spécialement à monsieur **A. BENYOUCEF** sans oublier les étudiants de MASTER et surtout mousab et bouzaki et belkacem et mehiau et abdessami et mostefaoui med amine

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents.

Toute ma famille.

Tous mes amis

Mekelleche sidi mohammed .

II.6.1.1.4 .Les cellules III-V multi jonctions	39
II.6.1.1.5. Les cellules nanocristallines à colorant (ou cellules de Grätzel)	40
II.6.2. Les cellules photovoltaïques organiques	40
II.7.Rendement des différentes technologies photovoltaïques.....	41
II.8. Avantages et inconvénients des cellules solaires	44
a) Avantage :.....	44
b) Inconvénients :.....	44
II.9.Conclusion.....	44

Chapitre III Nouveaux matériaux des couches minces du silicium

III.1. Introduction.....	45
III.2. Les propriétés du matériau	45
III.2.1. Le silicium monocristallin	45
III.2.2. Le silicium amorphe	46
III.2.3.Le silicium amorphe hydrogéné.....	48
III.2.4. Le silicium polymorphe	49
III.2.5. Le silicium microcristallin	49
III.3. Méthodes d'élaboration des couches minces de silicium amorphe	50
III.3.1. Implantation ionique.....	51
III.3.2 .La pulvérisation cathodique	52
III.3.2.1 La pulvérisation DC.....	53
III.3.2.2 La pulvérisation radio fréquence RF	53
III.3.2.3 La pulvérisation magnétron	54
III.3.3. L'évaporation sous vide.....	55
III.3.4 .Les techniques basées sur la décomposition chimique en phase vapeur (C.V.D)	55
III.3.4.1. Le dépôt chimique en phase vapeur conventionnelle (CVD).....	55
III.3.4.2 .Le dépôt chimique en phase vapeur à pression atmosphérique (APCVD)	56
III.3.4.3. Le dépôt chimique en phase vapeur à basse pression (LPCVD)	57
III.3.4.4. Le dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD)	57
III.4. Les différent Cellules photovoltaïques de silicium en couche minces.....	58
III.4.1 Physique d'une cellule p-i-n	58
III.4.2. La cellule tandem a-Si:H/ μ c-Si:H	60
III.4.3.Développement et avantages de la technologie silicium à hétérojonctions	60

III.5.conclusion.....	61
-----------------------	----

Chapitre IV modélisation et Simulation des cellules de silicium à hétérojonctions

IV.1. INTRODUCTION	62
IV.1.1a modélisation de la cellule HIT	62
IV.1.2.Modèle physique pour la simulation de dispositifs à base de semi-conducteur	62
IV.1.2.1.Calcul de la concentration des porteurs dans un semi-conducteur.....	62
IV.1.2. 1.1.Statistiques de Fermi-Dirac et de Boltzmann	62
IV.1.2.1.2.La concentration des porteurs dans un semi-conducteur à l'équilibre thermodynamique.....	63
IV.1.2.1.3La concentration des porteurs dans un semi-conducteur hors équilibre thermodynamique.....	63
IV.1.2.1.4Concentration intrinsèque des porteurs	63
IV.1.3.Équations de base de la modélisation	64
IV.1.3.1 Équation de Poisson.....	64
IV.1.3.2 Equations de continuité	64
IV.1.3.3 Equations de transport	64
IV.2. LOGICIEL DE SIMULATION : PC1D	65
IV.2.1. Aperçu du logiciel :.....	65
IV.2.2. Les paramètres du dispositif (Device).....	66
IV.2.3. Les paramètre des régions.....	67
IV.2.4. Les paramètres d'excitation.....	67
IV.2.5. Les résultats	67
IV.3. simulation des cellules solaires à base de silicium.....	68
IV.3.1. Paramètres de simulation	68
VI.3.2.Résultats et discussions :	69
VI.3.2.1.Caractéristique I-V :	69
IV.3.2.2. Influence de la température de la cellule sur le rendement, I_{cc} et V_{co} et FF et P_{max} :.....	69
IV.3.2.3. Influence de la recombinaison en surface sur le rendement, I_{cc} et V_{co} et P_{max} 72	
IV.3.2.3. Influence du dopage du substrat n sur le rendement, I_{cc} et V_{co}	73
IV.3.2.4 Influence du dopage de l'émetteur p sur le rendement, I_{cc} et V_{co}	75
IV.3.2.5. Influence du dopage de la couche n + sur le rendement et I_{cc} ; V_{co} , P_{max} :....	77
IV.3.2.6. Influence du l'épaisseur de couche P , n , n + sur le rendement :.....	79

IV.3.2.7. Influence du puissance incidente sur le rendement, <i>I_{cc}</i> , <i>P_{max}</i> :	81
IV.5.Conclusion.....	82
Conclusion générale.....	83
Résume	

Liste des figures

Chapitre 1

Figure I.1 : Production mondiale d'électricité d'origine photovoltaïque.....	5
Figure I.2: Différence entre la consommation domestique et la production photovoltaïque	6
Figure I.3 : Exemple de suiveur solaire (Sun tracker).....	7
Figure I.4: Schéma de principe d'une installation raccordée au réseau.....	8
Figure I.5 : Le soleil	9
Figure I.6: Présentation de l'absorption du rayonnement solaire	10
Figure I.7 : Définition de la masse d'air.....	11
Figure I.8 : Schéma simplifié d'une cellule solaire sous éclairage.....	12
Figure I.9 : Branchement en série de n cellules identiques.....	13
Figure I.10 : Branchement en parallèle de m cellules identiques.....	14
Figure I. 11: Une cellule est montée en série avec	15
Figure I. 12: caractéristique pour différents branchements.....	16
Figure I.13 : module photovoltaïque de 36 cellules cristallin.....	17
Figure I.14 : Vue en coupe d'un module au silicium cristallin.....	18

Chapitre 2

Figure II.1 : schéma descriptif d'une jonction PN.....	22
Figure II.2 : Schéma descriptif d'une jonction PN en équilibre thermodynamique.....	23
Figure II.3 : Passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction	23
Figure II.4 : circulation d'un courant électrique dans la jonction sous l'effet de la lumière.....	23
Figure II.5 : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	24
Figure II.6: Caractéristique d'une cellule photovoltaïque.....	25
Figure II.7 : schéma électrique d'une cellule solaire.....	26
Figure II.8 : Structure simple d'une cellule solaire.....	28
Figure II.9: Circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire	28
Figure II.10 : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle avec R_s	29
Figure II.11 : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à une diode.....	30
Figure II.12 : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à deux diodes.....	31
Figure II.13: Répartition de la production photovoltaïque mondiale en 2006 en %.....	32
Figure II.14 : Répartition des matériaux sur le marché mondial Du photovoltaïque.....	33
Figure : II.15 Comparatif des différents types de cellules-PV a base de silicium.....	35
Figure II.16 Schéma de principe d'une cellule à base de CIGS.....	36
Figure II.17 Cellule Tandem a-Si/ μ c-Si & spectre solaire	38
Figure II.18 Caractéristique courant-tension d'une cellule Tandem a-Si/ μ c-Si.....	38
Figure II-19 Caractéristiques électriques simulées de cellules à simple jonction issues.....	39
Figure II-20 Cellule solaire organique.....	41
Figure II-21 Rendement de différentes technologies de cellules PV en laboratoire.....	42

Chapitre 3

Figure .III.1 : Maille cubique conventionnelle de la structure diamant.....	45
Figure.III.2 Bandes d'énergie dans le silicium.....	46
Figure.III.3: vue schématique de l'arrangement atomique dans la structure.....	46
Figure.III.4 : Représentation schématique de la structure atomique	46
Figure.III.5: structure cristalline et amorphe du silicium	48
Figure III.6: Illustration de la structure des couches minces à diverses températures.....	48
Figure.III. 7 : Diagramme des étapes du procédé de fabrication des couches minces.....	50

Figure III.8 : phénomènes de surface dû à l'implantation ionique.....	52
Figure. III.9: Principe général de fonctionnement de la pulvérisation Cathodique	52
Figure. III.10Phénomène de collisions sur les atomes de lacible matériau à pulvériser.....	53
Figure. III-11:Principe de fonctionnement de la pulvérisation RF.....	54
Figure. III-12:Illustration du fonctionnement d'une cathode magnétron.....	54
Figure III13 : Schéma du système de dépôt par VHF GD-PECVD.....	58
Figure III.14: (a) Structure d'une cellule p-i-n. (b) Mécanisme de transport	59
Figure III.15 : Coefficient d'absorption de matériau de silicium amorphe.....	60

Chapitre4

Figure IV.1. Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique.....	66
Figure VI.2: Structure d'une cellule HIT.....	68
Figure VI.3 Caractéristique I-V de la cellule solaire hétérojonction.....	69
Figure .IV.4. Variation du de rendement en fonction de la température de la cellule.....	70
Figure .IV.5. Variation du courant de court circuit en fonction de la température de la cellule.....	70
Figure .IV.6. Variation de la tension de circuit ouvert en fonction de la température de	70
Figure .IV.7. Variation du la puissance maximale en fonction de la température de la cellule.....	71
Figure .IV.8. Variation du de factor de forme en fonction de la température de la cellule.....	71
Figure .IV.9. Variation du de puissance maximale en fonction de la tension de circuit ouvert.....	71
Figure. IV.10. Variation du rendement en fonction de la recombinaison en surface.....	72
Figure .IV.11. Variation du la tension de circuit ouvert en fonction de la recombinaison	72
Figure .IV.12. Variation du de puissance maximale en fonction de la recombinaison	73
Figure .IV.13. Variation du courant de court-circuit en fonction de la recombinaison	73
Figure .IV.14. Variation de rendement de la cellule en fonction du dopage de substrat.....	74
Figure. IV.15. Variation de la tension du circuit ouvert de la cellule en fonction.....	74
Figure. IV.16. Variation du courant de court-circuit de la cellule en fonction du dopage	74
Figure. IV.17. Variation de la puissance maximale de la cellule en fonction.....	75
Figure .IV.18. Variation du rendement de la cellule en fonction.....	76
Figure .IV.19. Variation de courant de court-circuit de la cellule en fonction du dopage	76
Figure .IV.20. Variation du la tension du circuit ouvert de la cellule en fonction.....	77
Figure .IV.21. Variation du la puissance maximale de la cellule en fonction.....	77
Figure .IV.22. Variation du rendement de la cellule en fonction du dopage de la couche n^+	78
Figure .IV.23. Variation du le courant de court-circuit de la cellule en fonction du dopage de	78
Figure .IV.24. Variation du la tension circuit ouvert de la cellule en fonction.....	79
Figure .IV.25. Variation du la puissance maximale de la cellule en fonction.....	79
Figure .IV26 .Variation du rendement de la cellule en fonction.....	80
Figure .IV.27. Variation du rendement de la cellule en fonction De l'épaisseur de substrat.....	80
Figure .IV.28. Variation du rendement de la cellule en fonction D'épaisseur de la couche n^+	81
Figure .IV.29. Variation du rendement en fonction de la puissance incidente.....	81
Figure .IV.30. Variation du la puissance maximale en fonction de puissance incidente	82
Figure .IV.31. Variation du courant de court-circuit en fonction de la puissance incidente.....	82

Listes des tableaux

Tableau II.1exemples d'évolution entre la recherche sur les cellules PV	42
Tableau II.2 avantages, inconvénients et perspectives des différents technologies	43
Tableau III.1 Quelques paramètres caractéristiques de matériaux généralement utilisés dans le Si.....	50

Liste des Symboles

PV: Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P_{\max} : La puissance maximale produite PV (W).

V_{\max} : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

I_{\max} : Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

FF: Facteur de forme.

DC: Courant Continu (Direct Current).

E_g : Energie de la bande interdite (eV).

S : Surface du module photovoltaïque (m²).

E : Eclairement (W/m²).

I_{ph} : Le photo-courant (A).

I_{sat} : Courant de saturation (A).

R_p : Résistances parallèle shunt (Ω).

R_s : Résistance série (Ω).

K : coefficient de Boltzman (1.38.10⁻²³ J / K).

T_c : Température de la cellule (C°).

D_n : Coefficient de diffusion des électrons $cm^2 S^{-1}$.

D_p : Coefficient de diffusion des trous $cm^2 S^{-1}$.

E : Champ électrique.

E_c : Niveau inférieur de la bande de conduction (eV).

E_D : Niveau énergétique des impuretés donneurs (eV).

E_F : Niveau de Fermi (eV).

E_g : Largeur de la bande interdite (eV).

E_v : Niveau supérieur de la bande interdite (eV).

FF : Facteur de forme.

h : Constante de Planck.

I : Courant électrique (A).

I_0 : Courant de saturation de la jonction (A).

I_{cc} : Courant de court circuit (A).

I_m : Valeur maximale du courant (A).

k : Constante de Boltzmann.

L_n : Longueur de diffusion des électrons (cm).

L_p : Longueur de diffusion des trous (cm).

N_i : Concentration intrinsèque à l'équilibre thermique (cm^{-3}).

n_{ie} : Concentration intrinsèque effective (cm^{-3}).

N_A : Concentration des atomes accepteurs (cm^{-3}).

N_D : Concentration des atomes donneurs (cm^{-3}).

P_m : Puissance maximale délivrée par une cellule solaire (mW.cm⁻²).

q : Charge de l'électron (cb).

R : Coefficient de réflexion (%).

T : Température (°K).

U : Taux de recombinaison ($cm^{-3}.S^{-1}$).

V_m : Valeur maximale de la tension (V).

X : Epaisseur de la cellule solaire (μm).

α : Coefficient d'absorption (cm^{-1}).

λ : Longueur d'onde du photon incident (μm).

η : Rendement de conversion (%).

ν : Fréquence du rayonnement incident (S^{-1}).

τ : Durée de vie (s).

μ_n : Mobilité des électrons $cm^2.V^{-1}.S^{-1}$.

μ_p : Mobilité des trous $cm^2.V^{-1}.S^{-1}$.

E_F : le niveau de Fermi

kB : la constante de Boltzmann.

ψ : le potentiel électrostatique.

ϵ : la permittivité locale du milieu.

r^{\rightarrow} : le vecteur position

p_v : la densité volumique de charge.

Liste des Symboles

q : la valeur absolue de la charge électronique élémentaire.

n, p : sont les concentrations d'électrons et de trous,

j_n, j_p : sont les densités de courant d'électrons et de trous,

G_n, G_p : sont les taux de génération des électrons et des trous,

R_n, R_p : sont les taux de recombinaison des électrons et des trous.

μ_n, μ_p : sont les mobilités des électrons et des trous,

E_{Fn}, E_{Fp} : sont les quasi-niveaux de Fermi des électrons et des trous.

Introduction générale

La problématique de l'énergie est au centre de l'actualité mondiale. Avec une consommation et une demande croissante liée au développement industriel, la production de l'énergie est une question centrale de notre société avec des implications économiques, géopolitique, environnementale et sociale. La production mondiale d'énergie est largement dominée par les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) qui représentent 78 % du marché en 2008 [1]. Ces sources d'énergie fossiles non renouvelables qui sont néfastes à l'environnement disposent de stocks encore disponibles pour quelques décennies. La grande majorité des experts mondiaux s'accorde à travers le GIEC (*Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*) sur le fait que l'augmentation des gaz à effet de serre issus de la combustion de ces énergies fossiles est à l'origine du réchauffement climatique.

La tendance actuelle est de développer les énergies renouvelables pour la production d'énergie. Les principales sources d'énergies renouvelables sont le solaire (photovoltaïque et thermique), l'hydro-électricité, l'éolien, la biomasse et la géothermie. Elles permettent de produire une énergie propre qui ne nuit pas à l'environnement et disposent de stocks incommensurables. La diversité de ces sources d'énergies renouvelables est un avantage car leur complémentarité est à mettre en avant pour assurer un approvisionnement durable et continu.

Le photovoltaïque repose sur la transformation de l'énergie du soleil en électricité constitue une voie d'avenir pour la production d'énergie électrique renouvelable. La puissance d'énergie photovoltaïque installée dans le monde approchait les 15 GWc en 2008 [2] et connaît une forte croissance (Voir Figure 1). Le photovoltaïque possède plusieurs avantages : la source (soleil) est inépuisable et disponible sur toute la planète, le temps de retour sur investissement énergétique (temps nécessaire pour rembourser l'énergie nécessaire à la fabrication des panneaux) est d'environ trois ans alors que les panneaux peuvent durer jusqu'à 50 ans (ils sont garantis sur 25 ans) et nécessitent très peu d'entretien.

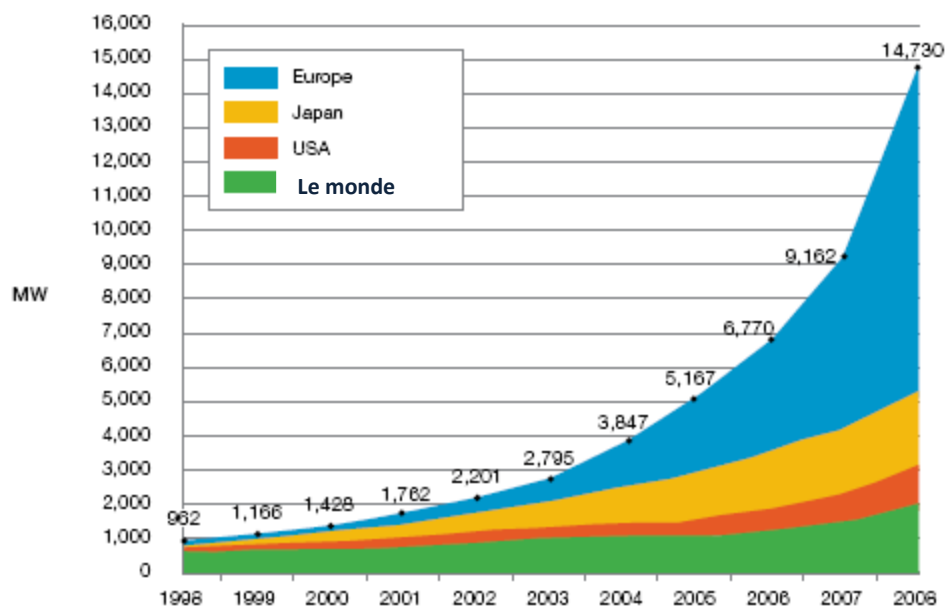


Figure 1 : Puissance d'énergie photovoltaïque installée par région dans le monde [2].

le prix de l'électricité photovoltaïque reste supérieur à celui des électricités conventionnelles même si une baisse constante est observée. Dans cette optique, les deux grandes tendances du marché photovoltaïque pour augmenter la production sont la réduction drastique des coûts de fabrication ($< 1\text{€}/\text{Wc}$) et l'obtention de hauts rendements ($>20\%$). La technologie à base de silicium cristallin domine le marché photovoltaïque avec 67 % de la production mondiale de panneaux en 2008 [2]. Elle bénéficie d'une base de savoir faire et de connaissances, d'une fiabilité prouvée, des rendements élevés et un fort potentiel de réduction des coûts et d'augmentation du rendement de conversion. Des études sont menées dans ce sens à travers des projets innovants pour améliorer les procédés de fabrication et développer de nouvelles structures de cellules photovoltaïques.

Le projet européen QCPASSI entre en droite ligne avec ces évolutions du marché photovoltaïque. En effet, l'objectif du haut rendement est à la base de ce projet par l'utilisation combinée d'une architecture innovante (structure à contacts arrières) et de la technologie silicium à hétérojonction silicium cristallin (c-Si)/ silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) ayant un potentiel bien au de là de 20 % de rendement. De plus, la réduction de l'épaisseur des tranches de silicium permettra d'obtenir un gain significatif en termes de coût matière : la structure de la cellule en face arrière et le fait d'effectuer le procédé à basse température permettront de réduire les contraintes internes (en particulier mécanique) de la cellule autorisant l'utilisation de tranches très fines. De plus, il diminuera considérablement le budget thermique du procédé cellule avec le développement de procédés basse température avec l'utilisation du silicium amorphe [3].

Les recherches effectuées au cours de cette mémoire ont consisté à mettre en place un modèle pour simuler et étudier le fonctionnement des cellules silicium à hétérojonctions.

Le manuscrit se divise en quatre chapitres :

Déboutement par introduction générale.

- ✚ Le première chapitre portera sur la présentation généralité sur le photovoltaïque.
- ✚ Le deuxième chapitre sera consacré la présentation sur les cellules photovoltaïques.
- ✚ Le troisième chapitre sera consacré les méthodes d'élaboration des couches minces de silicium amorphe Un accent particulier sera mis sur la présentation des cellules photovoltaïques à hétérojonction c-Si/a-Si:H et les cellules P-i-N . Les cellules qui constituent une structure innovante seront présentées ainsi que leurs avantages par rapport à une structure conventionnelle.
- ✚ Enfin, dans le quatrième le dernier chapitre, nous décrivons les différentes étapes du logiciel PC1D, utilisé en simulation numérique, et nous donnons quelques exemples numériques de simulation pour différents matériaux. Les résultats obtenus ainsi sont commentés et Interprétés grâce aux notions de la caractéristique courant tension. La maîtrise du logiciel et des techniques de simulation, nous permettra d'avantage d'étudier n'importe quelle région de la cellule solaire et tous les paramètres physiques.

Finalement ; on terminera par une conclusion générale qui regroupe tous les principaux résultats de ce travail avec une discussion appropriée .

Références

[1] Annual Energy Outlook 2010 Early Release Overview, EIA, December 2009.

[2] Global Market Outlook for Photovoltaic until 2013, EPIA, April 2009.

[3] Doctorale, E., & De, T. (2010). THESE DE DOCTORAT SPECIALITE : PHYSIQUE SUJET : Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière.

CHAPITRE I

Généralités sur photovoltaïques

I.1. Introduction :

Comme pour toutes les applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire à l'étude des systèmes photovoltaïques, surtout dans une optique de développement des marchés et des technologies. Par gisement solaire, on les différentes caractéristiques du rayonnement solaire, susceptibles d'influencer les performances d'un système en un lieu donné. Dans un premier temps, on rappellera quelques données de base concernant les différentes énergies qui existe ainsi leur spécification en suite en fait une définition générale concernant coordonnées terrestres et quelques éléments de géométrie et en termine par une brève description des différents types de rayonnement.

Les applications photovoltaïques requièrent des présentations spécifiques des données de rayonnement, qui peuvent être différentes selon le niveau de détail des études en visages ,mais aussi selon le système projeté (selon qu'il est, par exemple, autonome ou relié au réseau). [1] Dans ce chapitre nous présentons un aperçu sur l'historique de l'énergie photovoltaïque, Les différents types de centrales photovoltaïques, Les différents types de centrales photovoltaïques, Conversion du rayonnement, Groupement des cellules solaires parallèles et série et mixte, module photovoltaïque et le rendement d'un module, Nombre de cellule par module, Encapsulation et encadrement, avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque, Les applications de l'énergie photovoltaïque.

I.2. Histoire du photovoltaïque :

Le terme photovoltaïque provient de « photo » qui signifie lumière, et de « voltaïque » qui signifie électricité, désignant donc la production d'électricité à partir de lumière. L'effet photovoltaïque a été découvert par Antoine Becquerel (voir photo) et son fils Alexandre Becquerel en 1839.

L'effet photoélectrique (L'émission d'électrons par un matériau soumis à l'action de la lumière) fût découvert quant à lui en 1887 par le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz mais c'est Albert Einstein qui a réussi le 1er à l'expliquer intégralement, ce qui lui valut le prix Nobel physique en 1921.

En 1954, trois chercheurs américains (Charpin, Pearson et Price) des laboratoires BELL Mirent au point la première cellule photovoltaïque en silicium avec un rendement de 4%. Les cellules photovoltaïques virent leur première application pour fournir de l'énergie électrique au satellite Vanguard en 1958. Une première maison alimentée par des cellules photovoltaïques fut construite par l'université de Delaware aux États-Unis en 1973.

A partir de 1975, les pompes solaires se sont développés, en particulier pour le Sahel. A partir de 1980, des maisons photovoltaïques et des électrifications rurales ont été faites, en Polynésie, au Kenya, en Inde, en République Dominicaine, etc. A partir de 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001 et les projections sont assez optimistes pour les années à venir, comme le montre la Figure. [1]

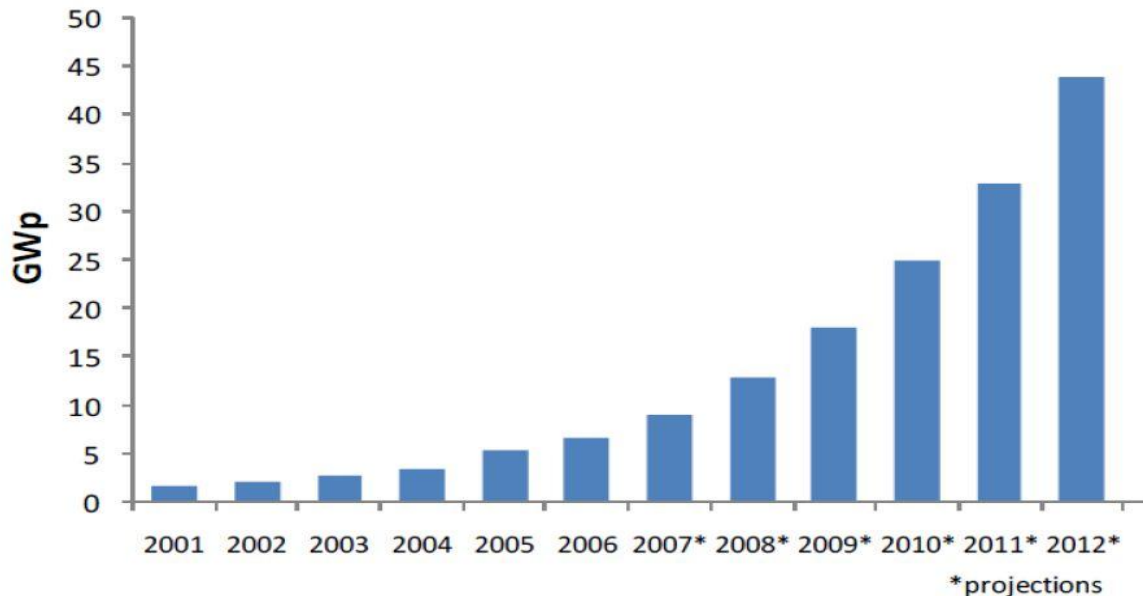
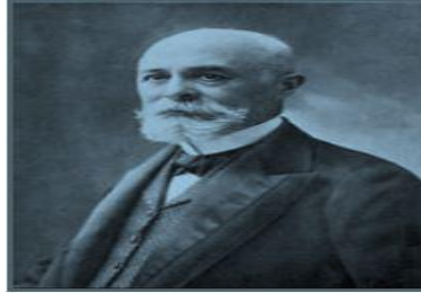


Figure I.1 : Production mondiale d'électricité d'origine photovoltaïque

De plus, des politiques fiscales incitatives ont été mises en place dans de nombreux pays et notamment en France pour encourager les populations à s'équiper de panneaux photovoltaïques. En outre, l'énergie photovoltaïque n'a pas seulement vocation à concurrencer les autres énergies raccordées au réseau pour une utilisation domestique ou industrielle, mais se destine à d'autres applications très spécifiques comme le domaine spatial, l'alimentation électrique de sites isolés (habitations dans le désert, balises maritimes, ...) ou encore comme une alternative aux piles dans les biens de consommations portables (montres, téléphones portables,...).

I.3. Les différents types de centrales photovoltaïques :

L'énergie photovoltaïque est exploitée de multiples façons. On peut distinguer les installations autonomes et les installations raccordées au réseau.

I.3.1. a) Les systèmes photovoltaïques autonomes :

Les systèmes photovoltaïques peuvent être adaptés pour répondre à tous besoins, petits ou grands : calculatrices, montres, matériel de télécommunication, panneaux de signalisation, feux de stationnement, et balises météo. Pionnières, les centrales photovoltaïques autonomes sont destinées à des consommateurs éloignés du réseau électrique (refuges en montagne, relais hertziens, stations de pompage agricole). La figure I-2 montre que la production solaire n'est pas adaptée à la consommation d'énergie dans un logement. Les centrales domestiques

autonomes sont donc onéreuses du fait du coût de stockage de l'énergie, souvent sous forme de batteries, et sont par fois utilisées en complément d'un autre générateur d'énergie (diesel, essence, gaz, éolien). Les installations autonomes peuvent avoir des dimensions «familiales», ou alimenter les besoins d'une collectivité, d'un village.

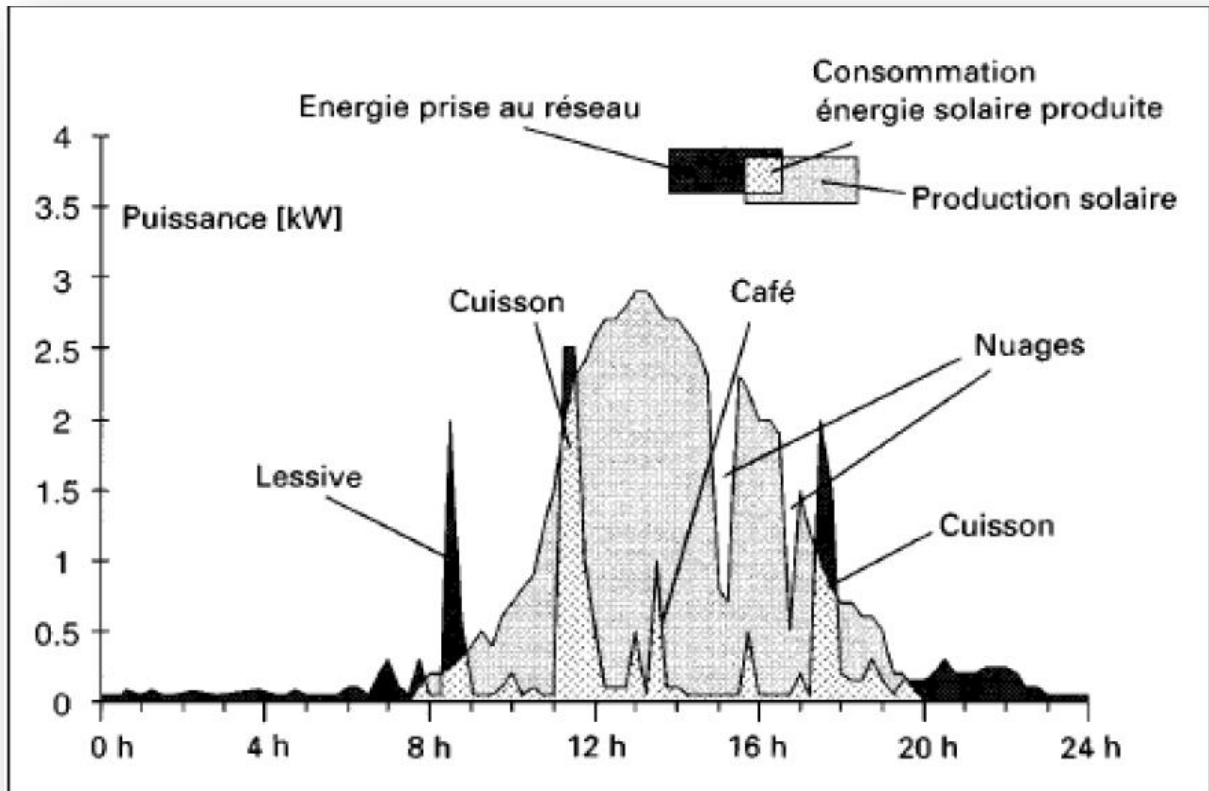


Figure I.2: Différence entre la consommation domestique et la production photovoltaïque au cours d'une journée

I.3.2. b). Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau :

Dans les années 80 est apparue la pratique d'échange d'énergie avec le réseau. De cette façon, les installations photovoltaïques peuvent se dispenser d'un système de stockage par batteries ; le réseau se comporte donc comme un stockage virtuel d'énergie. En plus de sa fonction traditionnelle de répartiteur de l'énergie produite par les gros producteurs, le distributeur assure maintenant le rôle de compensateur entre les excédents et les insuffisances de la production d'électricité d'origine solaire. La problématique de l'apport économique d'une production électrique d'origine solaire dans un réseau de distribution est complexe et a fait l'objet d'études par la Pacific Gas & Electric Company en 1992 ainsi que par l'association HESPUL pour la France en 2007. [2]

Selon le syndicat des énergies renouvelables SOLER, les technologies actuelles permettraient de couvrir toute la consommation électrique du pays à partir d'une surface de panneaux de 5 000 km², soit environ la surface qu'occupe aujourd'hui la totalité des côtés sud des toits.

Les grandes centrales solaires de production sont installées sur des toitures de grands bâtiments ou au sol, alors parfois dotés de suiveurs (« *trackers* » en anglais) solaires sur un ou deux axes afin d'augmenter le rendement (Figure I.3).

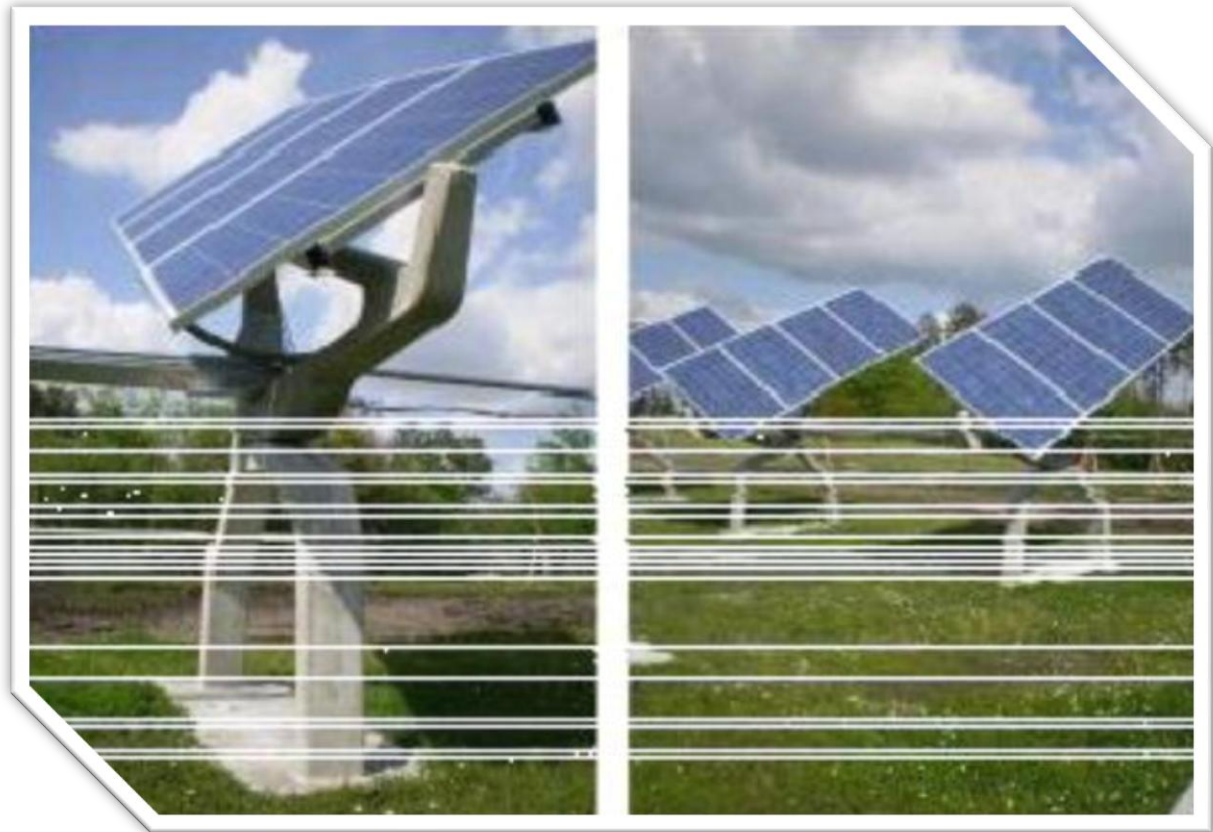


Figure I.3 : Exemple de suiveur solaire (Sun tracker)

I.3.3. c). Les éléments d'une centrale photovoltaïque raccordée au réseau :

Les composants d'un système photovoltaïque raccordé au réseau sont (Figure I.4) les panneaux photovoltaïques, les boîtiers de jonction, les convertisseurs/onduleurs, le compteur, et les autres composants (protections contre la foudre, fusible, disjoncteurs, interrupteur programmable). Le boîtier de jonction relie électriquement les différents panneaux entre eux. [3]

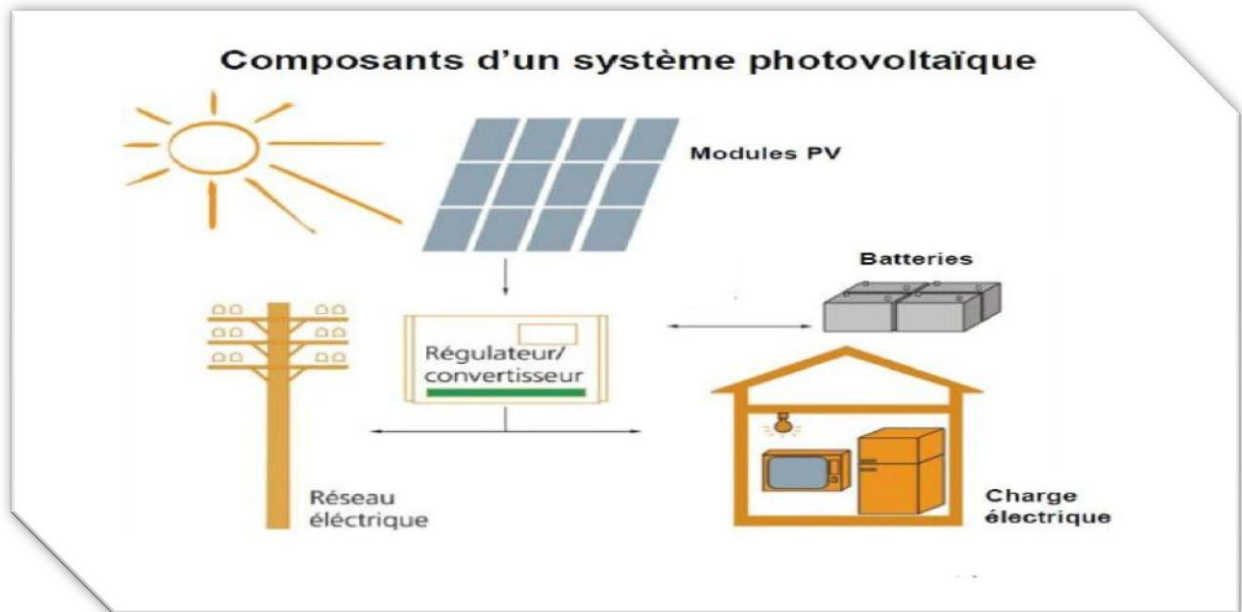


Figure I.4: Schéma de principe d'une installation raccordée au réseau

➤ **Couplage des modules photovoltaïques avec la charge** : Pour s'assurer que les cellules travaillent à leur puissance maximale, il faut veiller à ce que la charge impose ce point de fonctionnement optimal.

- Dans le cas d'une charge de type « batterie », c'est elle qui fixe la tension, dès lors la tension de la batterie sera choisie en conséquence.
- Dans le cas du branchement d'une charge résistive, il faut que l'impédance de la charge évolue pour que les modules restent à leur point de fonctionnement optimal. Si ce n'est pas le cas, il est parfois utile de coupler un adaptateur de charge (maximum power tracker).
- Un adaptateur de charge est un dispositif électronique qui crée une impédance fictive pour que le point de fonctionnement des modules soit toujours à puissance optimale. [4]

➤ **Batteries** : Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques:

- Capacité de stockage (Ah) (selon temps de décharge C_n) (où n = nombre d'heures pour la décharge).
- Tension nominale (V).
- Durée de vie (Nombre de cycles).
- Courant de charge et de décharge (A).

➤ **Régulateur de charge** : Le régulateur de charge a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie.

➤ **Convertisseur** : Un convertisseur est utilisé pour transformer la forme d'électricité. Onduleur CC/AC ou bien Convertisseur CC/CC. [4]

I.4. Principe de la conversion photovoltaïque :

I.4.1. Le soleil :

Le soleil est l'étoile la plus proche de la terre ; 150 millions de km, le soleil est principalement composé de 70 % d'hydrogène et de 28 % d'hélium. La fusion thermonucléaire dans son centre libère une énergie énorme sous forme de rayonnements. Le plasma qui le constitue est en majeure partie opaque à la lumière sauf les zones superficielles qui sont transparentes. Le soleil tourne sur lui-même environ 27 jours. Sa masse est 33×10^4 fois plus élevée que celle de la terre, et son volume plus d'un million de fois supérieur à celui de notre planète. Sa température à la surface ; la photosphère, avoisine les 6000 °C et monte à 15 millions de degrés au centre, là où se déroulent les réactions de fusion thermonucléaire et où naissent les photons. L'activité solaire est réglée par un cycle d'environ 11 ans d'un maximum au suivant, lié aux variations de son champ magnétique ; 10^4 fois plus puissant que celui de la terre [5].

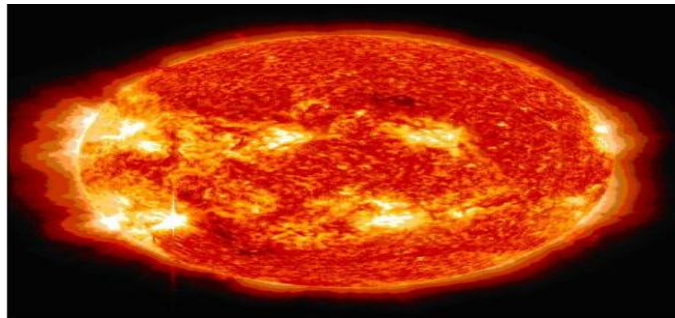


Figure I.5 : Le soleil [5]

I.4.2. Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est l'ensemble du rayonnement émis par le soleil. En plus des rayons Cosmiques, particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées, le soleil émet des ondes électromagnétiques dont le spectre s'étend des ondes radio aux rayons gamma, en passant par la lumière visible.

❖ *Spectre solaire :*

Le spectre solaire est la décomposition du rayonnement solaire en longueurs d'onde ou "Couleurs". La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Les photons, grains de lumière qui composent le rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation [6]:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.1)$$

Une courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre, compilée selon les données recueillies par les satellites. Sa distribution en énergie est répartie comme il est indiqué sur la figure (I.3) [7].

❖ *Absorption du rayonnement solaire :*

L'optimisation de l'efficacité de la conversion photovoltaïque se base sur le spectre solaire. En Traversant les différentes couches de notre atmosphère, certaines longueurs d'onde sont atténuées, voire absorbées par certains composants tels que l'ozone (absorption des UV) ou les

vapeurs d'eau (absorption des rayons infrarouges). la répartition du rayonnement solaire est représentée sur la figure (I.6).

Le spectre solaire diffère entre l'espace et la surface du globe terrestre, il diffère également à la surface de la terre en fonction du lieu et de l'heure. On le caractérise d'une façon globale par un coefficient Air Mass, AM ($1/\sin h$) où h correspond à l'angle entre l'horizontale et le rayonnement solaire. [7]

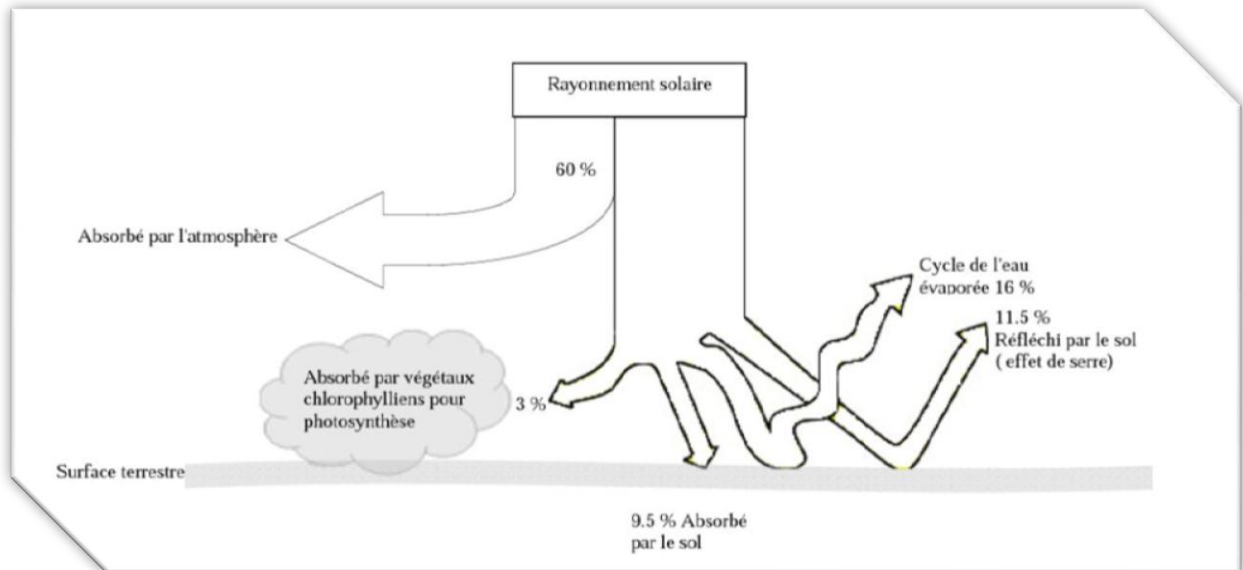


Figure I.6: Présentation de l'absorption du rayonnement solaire depuis son émission jusqu'à son arrivée à la surface de la terre. [7]

❖ La constante solaire :

La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère terrestre faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360 W/m^2 (bien qu'elle varie de quelques % dans l'année à cause des légères variations de la distance Terre-Soleil). Lors de la traversée de l'atmosphère, ce rayonnement de 1360 W/m^2 subit des déperditions, du fait de son absorption partielle par les gaz atmosphérique et la vapeur d'eau. Ainsi, le flux reçu sur la Terre est inférieur au flux « initial » et dépend de l'angle d'incidence, et donc de l'épaisseur d'atmosphère traversée [8].

❖ Masse d'air :

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir de transformation. On appelle masse d'air ou Air Masse en anglais, le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée au vertical du lieu [9].

La longueur du trajet d'un rayon solaire incliné par rapport à l'horizontale d'un angle h est donné par la formule [10]:

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

Donc la masse d'air est [10]

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad (I.3)$$

Par définition, AM0 correspond au rayonnement solaire hors atmosphère [11]. Le rayonnement signalé comme rayonnement de la masse d'air « 1 » (ou AM1) est celui qui accède au niveau de la mer à midi dans un ciel clair, son irradiante sera à ce moment précis de 1000 W/m². La perte d'énergie peut être provoquée par une perte d'altitude du soleil dans le ciel car elle doit à ce moment-là traverser une masse d'air plus importante. Étant donné que le soleil se trouve au zénith pendant une courte durée, l'énergie disponible sera inférieure à 1000 W/m² en permanence étant donné que la masse d'air sera plus grande [9].

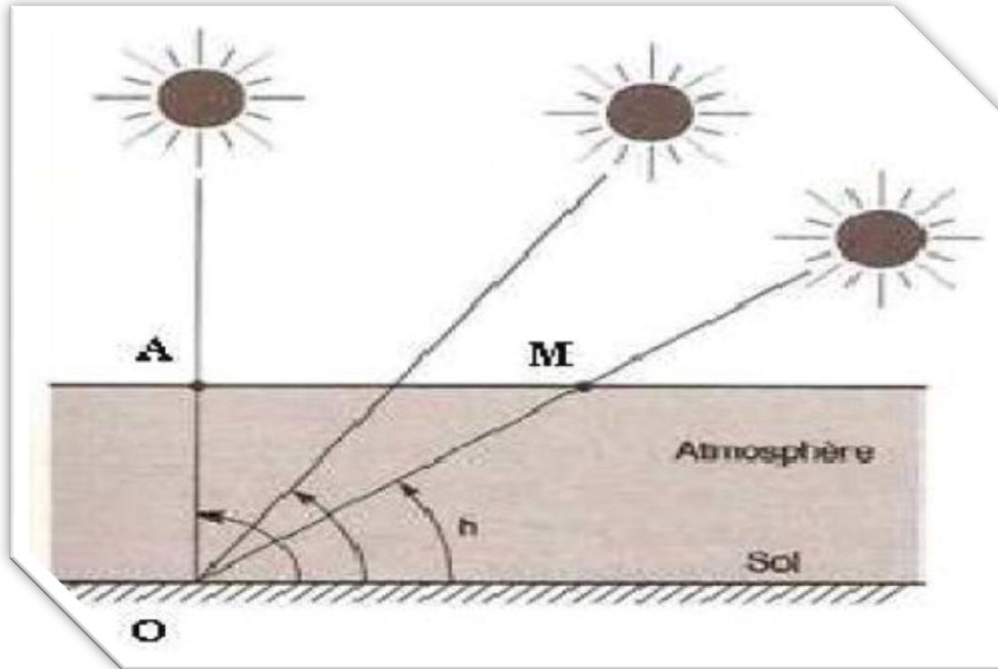


Figure I.7 : Définition de la masse d'air [9].

❖ Rayonnement au sol:

L'atmosphère modifie le spectre énergétique du rayonnement solaire à travers trois mécanismes principaux [12]:

- L'absorption par les différents gaz, chacun ayant des raies caractéristiques.
- La diffusion moléculaire de Rayleigh.
- La diffusion par les aérosols, par les poussières et par les nuages.

I.4.3. Conversion du rayonnement:

L'effet photovoltaïque provient de la conversion du rayonnement du soleil en énergie électrique. Cette conversion est effectuée par l'intermédiaire des composants électroniques à base des matériaux semi-conducteurs: dit des cellules solaires ou des cellules photovoltaïques. Le groupement d'un ensemble des cellules solaires constitue le panneau solaire ou le panneau photovoltaïque.

À chaque photon du spectre solaire, on associe une énergie E : $E = h\nu$

Avec ν la fréquence associée à la longueur d'onde du photon, et h la constante de Planck. Une cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif constitué de deux semi-conducteurs de conductions différentes, type P (les trous sont les porteurs majoritaires) et type n (les électrons sont les porteurs majoritaires), il permet de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière. Les semi-conducteurs candidats pour qu'ils

soient les bases des cellules solaires doivent présenter une stabilité physique pour assurer la fiabilité des photopiles au cours du temps et ayant des gaps adaptés pour l'absorption du spectre solaire avec un coefficient d'absorption plus élevé.

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut se résumer en deux étapes:

a- Un photon d'énergie $E = h\nu$ pénétrant dans la cellule solaire est absorbé par le matériau semi-conducteur.

b- Si l'énergie du photon incident est suffisamment élevée, le photon va pouvoir faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi un pair électron - trou. Ces électrons et trous sont séparés par un champ électrique interne (jonction) et collectés entre une grille (face avant) et un contact ohmique réalisé (face arrière) puis débités dans la charge.

Ci - dessous est présenté le schéma simplifié d'une cellule solaire (figure I.8).

Notons que la cellule photovoltaïque n'est sensible que dans un domaine d'onde particulier et seul les matériaux semi-conducteurs disposent de la structure nécessaire à la génération des porteurs de charge: le pair électron - trou. [7]

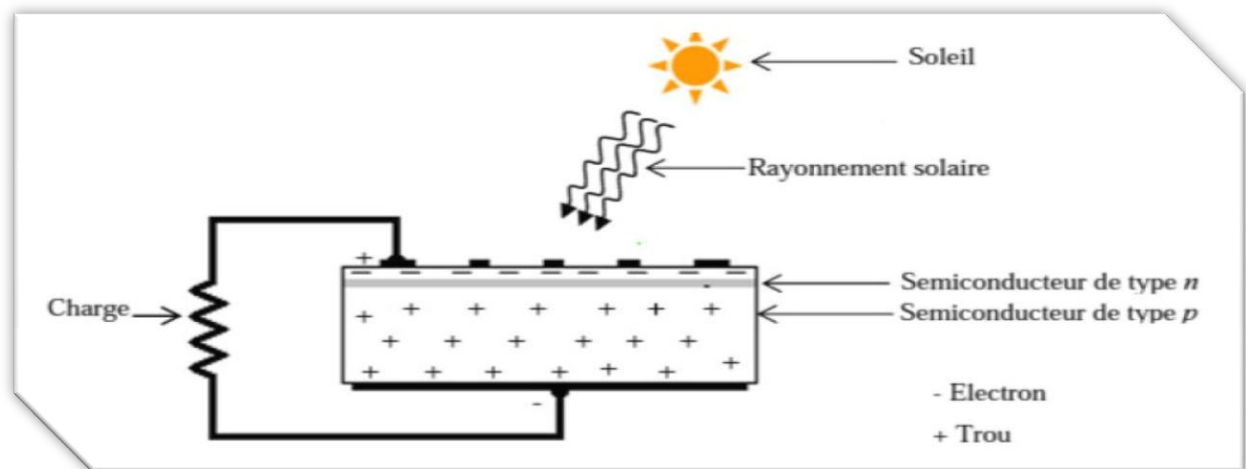


Figure I.8 : Schéma simplifié d'une cellule solaire sous éclairage. [7]

Dans un semi-conducteur, la structure des bandes de conduction et de valence définissent un gap plus faible que dans le cas des isolants: 0.3 à 2 ou 3 eV. Si le minimum de la bande de conduction coïncide avec le maximum de celle de valence, le gap est direct, les transitions sont donc directes et radiatives [7].

Dans un semi-conducteur, la structure des bandes de conduction et de valence définissent un gap plus faible que dans le cas des isolants: 0.3 à 2 ou 3 eV. Si le minimum de la bande de conduction coïncide avec le maximum de celle de valence, le gap est direct, les transitions sont donc directes et radiatives [7].

- **Le gisement solaire :**

Chaque année, la Terre reçoit 1,56.10 kWh en énergie solaire, ce qui représente plus de 10000fois la consommation mondiale d'électricité ! Il existe deux façons d'exploiter cet incroyable gisement : convertir le rayonnement en chaleur puis (éventuellement) en électricité (voie thermodynamique) ou convertir le rayonnement directement en électricité (voie photovoltaïque).

- Dans le cas de la voie thermodynamique, on peut capter la lumière avec des matériaux absorbants (typiquement noirs) qui vont convertir la lumière en chaleur. Les ballons d'eau chaude solaires fonctionnent ainsi. Un panneau absorbant est mis sur le toit de la maison et l'énergie thermique récupérée sert à chauffer l'eau du robinet. On peut atteindre des

températures comprises entre 60 et 80°C de la sorte. Une approche plus industrielle consiste à disposer des miroirs concentrateurs autour d'un dispositif contenant un fluide caloporteur. Le fluide caloporteur, mis en contact avec un second réseau d'eau via des échangeurs thermiques fait passer celle-ci en phase vapeur, ce qui permet de faire tourner une turbine. De telles centrales existent déjà et permettent une production d'électricité de l'ordre de quelques mégawatts à plusieurs centaines de mégawatts (cas de la centrale **de Luz Solar Energy** en Californie).

Des bacs de sels fondus permettent le stockage de l'énergie thermique excédentaire (jusqu'à plus de 550°C) et ainsi de lisser la production avec la possibilité de continuer de produire de l'électricité durant la nuit. On parle, pour ces technologies, de centrales solaires thermodynamiques.

- Dans le cas de la voie photovoltaïque, on convertit directement 3 à 40% de l'énergie lumineuse incidente en courant continu. La force de cette approche est la simplicité de mise en œuvre comparée à la précédente. Les faiblesses sont les mêmes : le problème du stockage de l'énergie produite lors de la journée ou des journées ensoleillées pour continuer de la distribuer la nuit ou les journées où la couverture nuageuse est trop importante pour permettre un fonctionnement correct des cellules.

L'aspect intéressant de ce mode de production vient du peu d'entretien que nécessite un panneau photovoltaïque une fois posé, et le fait que toutes les surfaces exposées au soleil sont candidates pour recevoir de tels panneaux. Ces deux points donnent un avantage significatif à filière solaire photovoltaïque par rapport à la filière solaire thermodynamique. Là où la première fonctionne sans entretien, la seconde est une usine à part entière, avec l'entretien et les risques industriels que cela implique. Là où la première ne nécessite qu'un toit, la seconde demande un terrain découvert pour les concentrateurs et le procédé en lui-même. [13]

I.4. Groupement des cellules solaires [14]:

La modélisation des parties de l'installation photovoltaïque, nous conduit à déterminer le fonctionnement du système à chaque heure de la journée et de l'année. La puissance débitée à l'utilisation est en fonction des caractéristiques des éléments du système, des données météorologiques (éclairage solaire et la température). À cet effet, la modélisation est nécessaire pour établir une relation directe entre l'énergie produite par l'installation et la demande de l'utilisation. Tandis que l'estimation des propriétés d'adaptation du système à chaque période de l'année, obtenue de l'étude théorique et expérimentale.

I.4.1 Groupement série des cellules solaires :

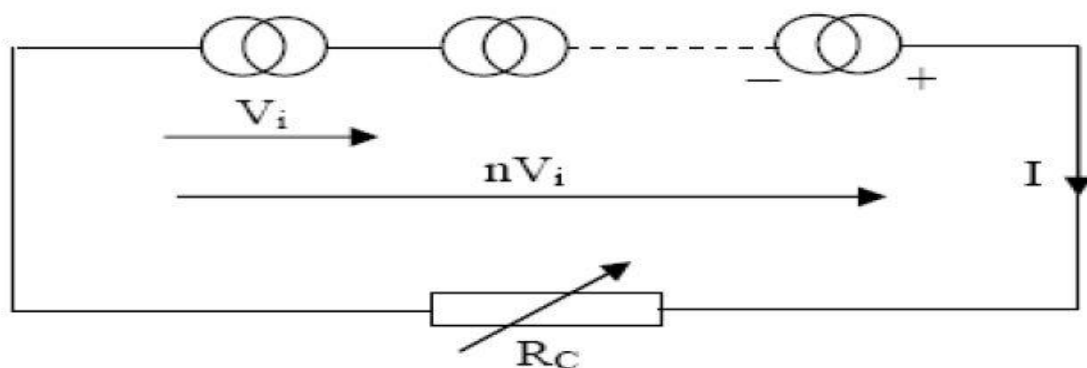


Figure I. 9 : Branchement en série de n cellules identiques.

Pour n cellules identiques, la tension V' et le courant I' fournis à la charge R_c sont :

$$I' = I \quad \text{et} \quad V' = \sum_{i=1}^n V_i = n.V_i \quad (I.4)$$

La caractéristique de n cellules groupées en série est donnée par l'équation suivante :

$$I' = I_{PH} - I_O \left(e^{\frac{qV}{n.AKT}(V'+R_{Se}I)} - 1 \right) - \frac{V' + R_{Se}I}{R_{Pe}} \quad (I.5)$$

Avec $R_{Se} = n.R_s$ et $R_{Pe} = n.R_p$

Si $R_s \rightarrow 0$ $R_p \rightarrow \infty$ les quatre grandeurs caractéristiques du groupement sont :

** La tension en circuit-ouvert $V'_{co} : V'_{co} = n.V_{co}$

** Le courant de court-circuit $I'_{cc} : I'_{cc} = I_{cc}$

** Le facteur de forme $FF'' : FF'' = FF$

** Le rendement $\eta'' : \eta'' = \eta$

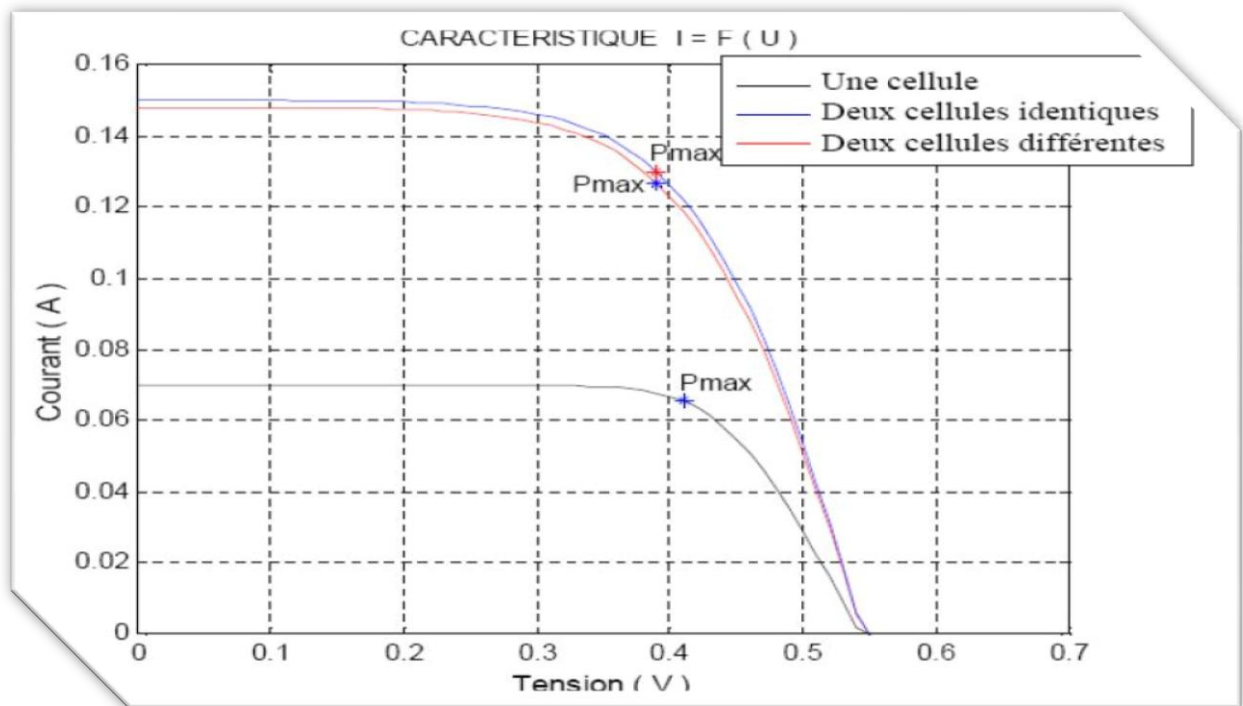


Figure I.10 Une cellule de $I_{cc} = 0.07$ A, $V_{co} = 0.55$ volt est montée en parallèle avec :
 a- Une cellule : $I_{cc2} = 0.09$ (A) même $V_{co} = 0.55$ volt

b- Une cellule : $V_{co} = 0.6 \text{ volt}$

Si une ou plusieurs cellules non identiques sont introduites dans un branchement en série, le courant le plus faible généré par les n cellules sera imposé à l'ensemble ; la tension du système sera la somme des n tensions pour les mêmes conditions d'éclairement et de température, l'introduction d'une cellule non identique conduit à une diminution de la puissance maximale du système et par conséquent à une réduction du rendement.

I.4.2 .Groupement parallèle des cellules solaires

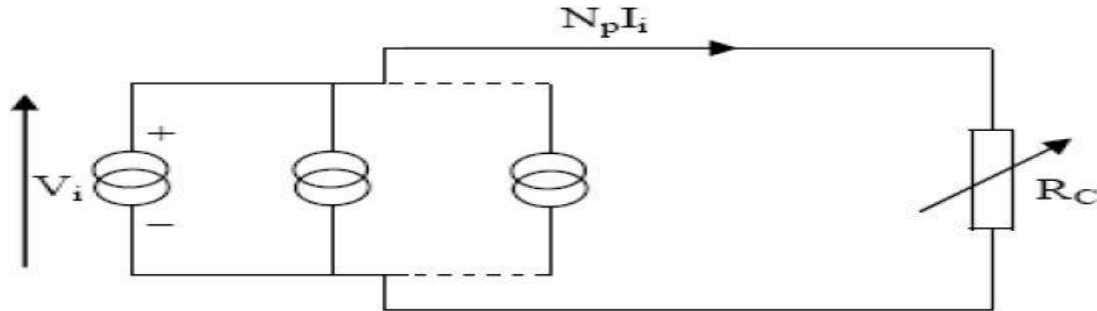


Figure I.11 : Branchement en parallèle de m cellules identiques

Si on connecte m cellules identiques en parallèle, la tension sera toujours la même, le courant et la puissance seront multipliés par le nombre de cellules m :

$$V' = V, I' = \sum_i^n I_i = m \cdot I_i \quad (\text{I.6})$$

D'où la puissance est:

$$P' = m, I_i V_i = m \cdot P \quad (\text{I.7})$$

La caractéristique de m cellules groupées en parallèles est donnée par l'équation suivante [18]:

$$I' = m \cdot I_{PH} - m \cdot I_O \left(e^{\frac{qV}{n \cdot AKT} (V' + R_{Se} I)} - 1 \right) - \frac{V' + R_{Se} I}{R_{Pe}} \quad (\text{I.8})$$

Avec: $R_{se} = n \cdot R_s$ et $R_{pe} = m \cdot R_p$ Si $R_s \rightarrow 0$ $R_p \rightarrow \infty$

les quatre grandeurs caractéristiques du groupement sont :

- La tension en circuit ouvert $V'_{co}: V'_{co} = V_{co}$
- Le courant de court circuit $I'_{cc}: I'_{cc} = m \cdot I_{cc}$
- Le facteur de forme $FF': FF' = FF$
- Le rendement $\eta': \eta' = \eta$

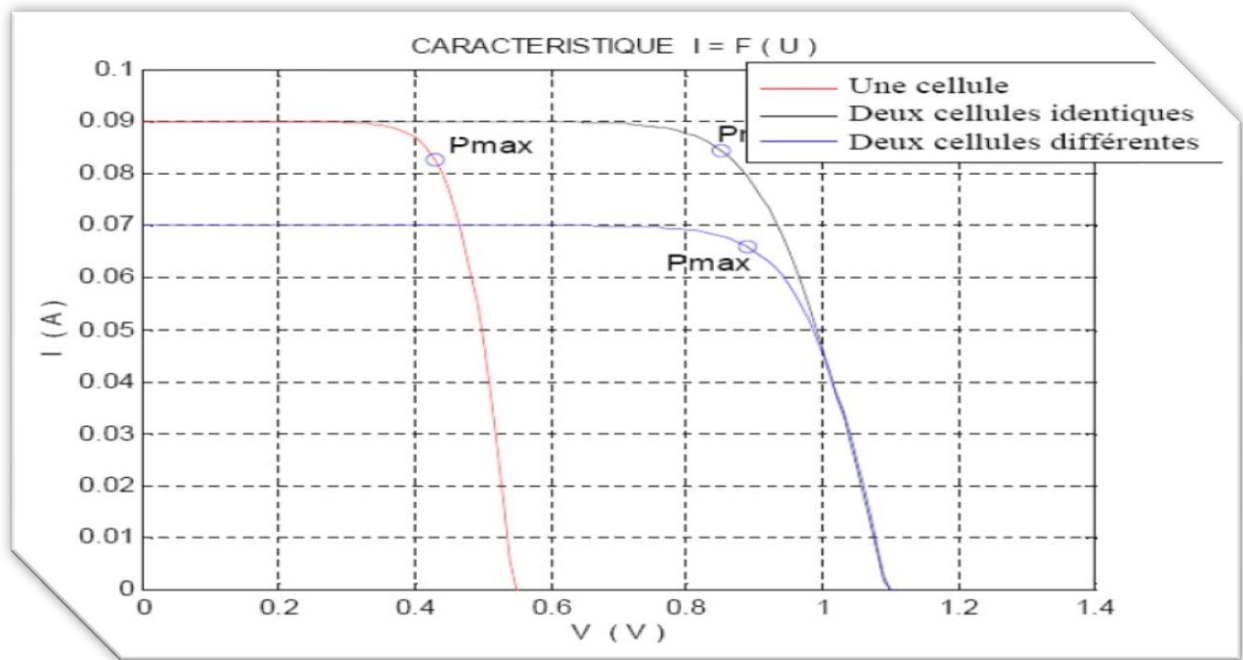


Figure I.12: Une cellule est montée en série avec :

- c- Une cellule identique $I_{cc1} = I_{cc2} = 0.09 (A)$ même $V_{co} = 0.55 \text{ volt}$
- d- Une cellule différente $I_{cc1} = 0.09 (A), I_{cc2} = 0.07$ même $V_{co} = 0.55 \text{ volt}$

Si les m cellules ne sont pas identiques, cette connexion est possible qu’avec des diodes anti-retour dans chaque branche. La tension en circuit ouvert sera la plus petite des m cellules et le courant de court-circuit du système sera alors la somme des courants de court-circuit.

I.4.3. Groupement mixte des cellules solaires :

Le groupement mixte (série- parallèle) permet d’augmenter le courant et la tension du système. Si on combine m branche parallèle et n cellules série dans chaque branche on aura.

$$V' = n V, \quad I' = m I \quad \text{et} \quad P' = m.n V I = mn.P \tag{I.9}$$

L’équation caractéristique du système est donnée par l’équation suivante :

$$I' = m.I_{PH} - m.I_o \left(e^{\frac{qV}{AKTn.m}(m.V' + n.R_S I)} - 1 \right) - \frac{m.V' + n.R_S I}{m.n.R_P} \tag{I.10}$$

Si $R_S \rightarrow 0$ $R_P \rightarrow \infty$ les quatre grandeurs caractéristiques du groupement sont :

** La tension en circuit ouvert $V''_{co} : V'_{co} = n.V_{co}$

**Le courant de court circuit $I''_{cc} : I'_{cc} = m.I_{cc}$

**Le facteur de forme $FF'' : FF' = FF$

**Le rendement

$$\eta'' : \eta' = \eta$$

Les différents branchements de douze modules identiques constituant un panneau photovoltaïque et leurs caractéristiques sont représentés par la Figure I. 13:

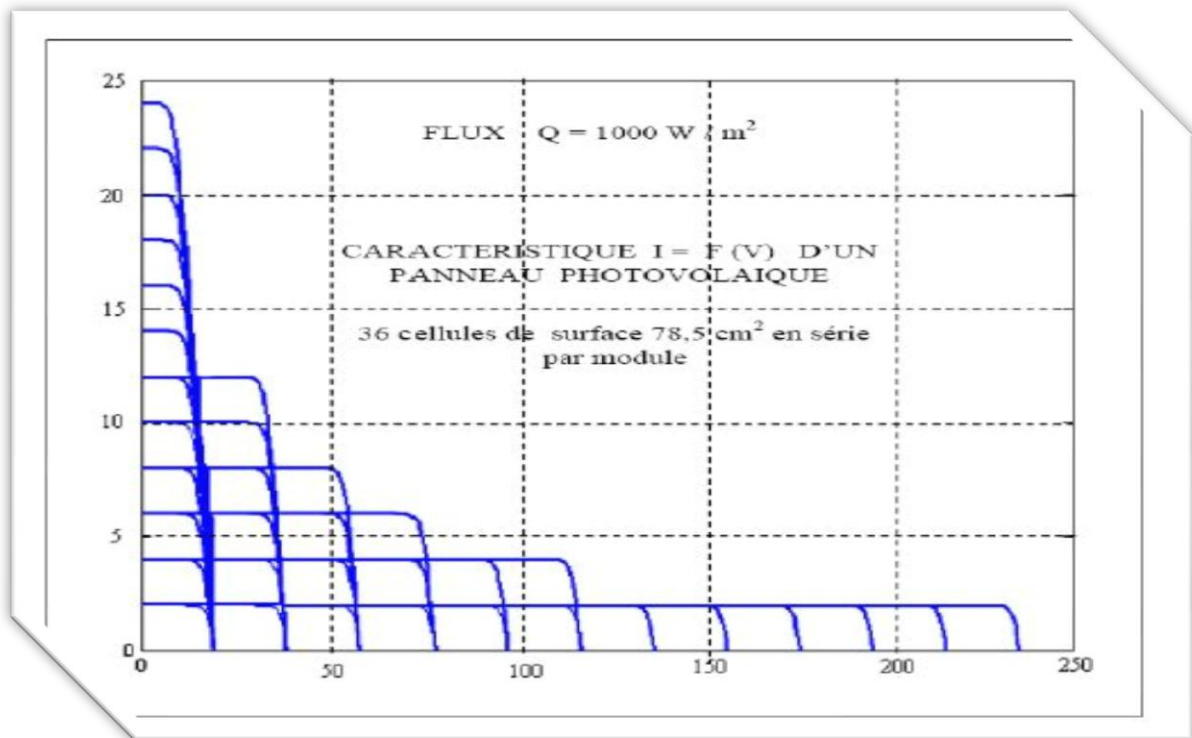


Figure I.13: caractéristique pour différent branchements.

I.5. Module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la même tension. Le module standard commercialisé, connectant 36 cellules cristallines en série pour des applications en 12V, protégées de l'humidité par un capsulage de verre et de plastique. L'ensemble est ensuite muni d'un cadre et d'une boîte de jonction électrique, a généralement une tension à vide supérieure à 20 V et le point optimal de fonctionnement est au voisinage de 16 V à 25°C. Mais la température du module sous rayonnement est souvent supérieure à 40°C, et les performances des cellules sont réduites. On compte en général par cellule une baisse de 2 mV/°C, soit 72 mV/°C pour les modules de 36 cellules. La tension du module tombe alors aux alentours de 14 V ce qui est idéal pour la charge d'une batterie. Les modules en silicium mono cristallin (64% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de 15 à 18%), délivrent des tensions normalisées (12, 24, 48V) et des puissances comprises entre 10 et 100Wc (Watt- crête : puissance obtenue pour l'ensoleillement maximal) . [14]



Figure I.14 : module photovoltaïque de 36 cellules cristallin

I.5.1.Rendement d'un module :

Le rendement du module est le rendement d'une cellule diminué par les pertes dues aux connexions des cellules entre elles, à la transparence des matériaux d'encapsulation, et éventuellement à la chute de tension dans la diode « anti-retour » lorsqu'il faut protéger la batterie d'une éventuelle décharge nocturne.

$$\eta_{\text{module}} = \eta_{\text{cellule}} \times \eta_{\text{connexion}} \times \eta_{\text{encapsulation}} \times \eta_{\text{diode}}$$

I.5.2.Nombre de cellule par module :

Une cellule au silicium cristallin présente une tension de circuit ouvert de 0.58 à 0.60 et un point de puissance maximale situé à 0.46-0.47 V. considérant que le module doit pouvoir charger une batterie 12V jusqu'à sa tension maximale d'environ 14V et que l'on va perdre 2 à 3 V en câblage et du fait des élévations de température il faudra disposer d'un module fournissant au minimum 16-17 V à sa puissance maximale. Si l'on divise 16.5 par 0.46, on trouve le nombre arrondi de 36, valeur extrêmement courant comme nombre de cellules en séries des modules usuels du marché. De plus, cela permet de disposer les photopiles d'un module en 4 range de 9. En pratique, le module les plus courants en 12 V comportent 32 à 34 cellules : cela dépende de la valeur exacte de la tension de chaque cellule et de la température d'utilisation [16].

I.5.3.Encapsulation et encadrement

Le but principal de l'encapsulation d'un ensemble de cellules solaires et des raccords électriques est de protéger leurs fils de l'interconnexion de l'environnement hostile dans lequel elles sont utilisées. Par exemple, les cellules solaires sont relativement minces et sujettes à des dommages mécaniques. En plus de ça la grille métallique sur la surface supérieure de la cellule solaire et le fils de l'interconnexion des cellules solaires peut être corrodée par l'eau ou la vapeur d'eau. Les deux principales fonctions de l'encapsulation est de prévenir les dommages mécanique des cellules solaires et d'empêcher l'eau ou la vapeur d'eau de la corrosion des contacts électriques. Une fois ces connexion effectuées, on réalise l'opération dite encapsulation les photopiles sont enrobées dans une résine et prises en

sandwich entre deux supports en éloignant les cellules d'environ 1 cm du bord pour éviter la corrosion :

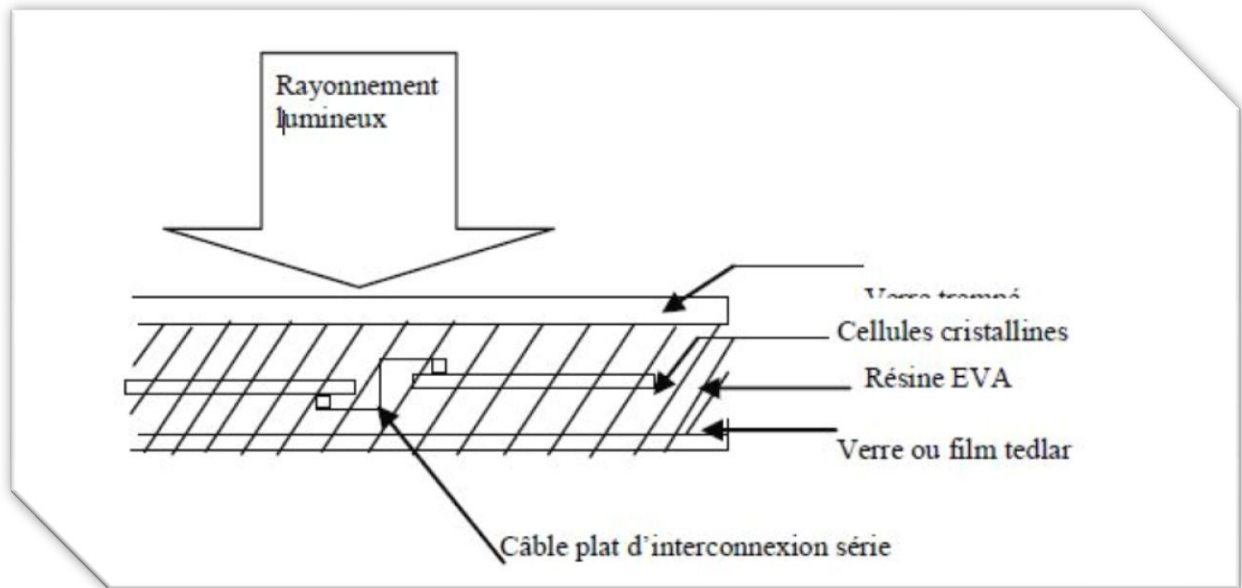


Figure I.15 : Vue en coupe d'un module au silicium cristallin

- ❖ En face avant : il faut placer un revêtement transparent et résistant. Un verre trempé haute transmission est un bon choix. Il s'agit de verre de moindre concentration en oxyde de fer que le verre à vitre et donc plus transparent. L'épaisseur de ce verre est généralement de 3 ou 4mm d'épaisseur selon la dimension du module.
- ❖ En face arrière : on a longtemps mis également du verre, selon la technique de bi-verre feuilleté inspirée de la fabrication des pare-brise automobiles. C'est évidemment la solution de plus résistance, qui de plus offre une transparence intéressante pour certaines application architecturales. Mais il est plus économiques et parfois aussi efficace d'utiliser un film plastique de type PVF (connu sous marque Tedlar), ou un autre film faisant barrière à l'humidité comme un multicouche plastique/métal. La résine d'enrobage, quant à elle, est fréquemment de l'EVA (Éthyle-Vinyle-Acétate).elle se présente sous forme de feuilles de couleur blanchâtre, qui sont placées entre les revêtements et les photopiles, l'EVA dit solaire adapte a cette opération, comporte des additifs pour amorcer la solidification ainsi que pour favoriser l'adhérence sue le verre. On chauffe l'empilement verre/EVA/photopiles câbles/EVA/verre (ou filme plastique) jusqu'à 100-120°C pour liquéfier la résine, on exerce alors une pression pour chasse l'air et réaliser le collage, puis on maintient la température vers 140°C pendant environ 30 min afin de solidifier.
- ❖ Réticuler : l'EVA.il devient alors transparent, avec un indice de réfraction proche de celui du verre, ce qui évite les pertes optiques. La technologie employée s'apparente à celle des pare-brise feuillète, à la différence que le verre étant plat et non courbe, il suffit de 1 bar de pression pour effectuer ce collage (contre 3 à 5 bars dans les autoclaves de l'industrie automobile). Cette opération est réalisée dans un l'animateur

compose d'un plateau chauffant, d'une pompe à vide et d'une poche pour appliquer la pression atmosphérique sur les empilements. Le module photovoltaïque est alors opérationnel. Et surtout, il est prêt à endurer tous les climats. On lui ajoute souvent un cadre de fixation et une sortie électrique adéquate cette dernière phase est importante car le passage des connexions électriques vers le mode extérieur ne doit pas constituer un point d'infiltration d'eau ou de vapeur d'eau. Sur le cadre on fixe le plus souvent une boîte de raccordement, dite boîte de jonction, pour connecter le panneau avec des conducteurs compatibles avec son ampérage de sortie [17].

I.6. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

I.6.1. Avantages :

Une haute fiabilité ; les modules sont garantis pendant 25 ans par la plupart des constructeurs. Elle ne comporte pas de pièces mobiles, qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.

Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé. Généralement la maintenance est limitée à une ou deux visites annuelles effectuées par un professionnel.

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique, car le produit final est non polluant, silencieux, peu de déchet, pas de ligne électrique supplémentaire et pas de nuisance sonore olfactive. [18]

I.6.2. Inconvénients :

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions. Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28 %). Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis. [18]

I.7. Les applications de l'énergie photovoltaïque :

En dehors des applications spatiales à l'origine du développement des techniques photovoltaïques et des applications en électronique (alimentation de calculettes, de montres, etc.), on trouve deux grandes familles d'applications à savoir : [18]

a. Les générateurs autonomes: Pour l'alimentation de sites isolés du réseau de distribution d'électricité (habitat, relais hertzien, pompage, balisage en mer, électrification rurale des pays du sud, etc.).

b. Les centrales photovoltaïques: Il est possible d'utiliser un générateur photovoltaïque de façon non autonome, en le connectant au réseau public de distribution d'électricité. Nous aurons alors, une petite centrale de production d'électricité, dont l'énergie sera soit consommée sur place par le propriétaire, soit revendue sur le réseau. En cas de production excédentaire, le générateur photovoltaïque alimente le réseau et inversement, le réseau alimente la distribution en cas de déficit ou hors production solaire. L'ensemble est entièrement automatisé et géré par un ou plusieurs onduleurs.

Le système est donc beaucoup plus simple. Il n'y a plus de batterie (c'est le réseau qui joue ce rôle), il n'y a plus d'armoire de régulation complexe. Ces centrales peuvent être installées sur des maisons d'habitation individuelles, des bâtiments publics ou privés. Elles peuvent remplacer la toiture ou être installées en façade [18].

I.8.CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire .et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales et leurs groupements dans le module photovoltaïque et nous avons donné des notions sur le module photovoltaïque : rendement, nombre des cellules dans le module, leur encapsulation et leur encadrement. Et les avantages et les inconvénients et leurs applications.

Références de chapitre I

- [1] A.E. Becquerel, Compt. Rend. Acad. Sci. **1839**, 9, 145.
- [2] rapport publié par HESPUL en 2007.
- [3] 05 Technologies ER - Solaire photovoltaïque – ENER002 - Michel HUART –2005[23] M.A.
- [4] Green, "Solar Cells", Ed. Prentice Hall (1982).
- [5] M. Bouafia & L.Deblaoui, « Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium (CIGS) », diplôme de Master professionnel, 2012, Université de Ouargla.
- [6] Wenham S. R., Green M. A. and Watt M. E, «Applied Photovoltaic», Bridge Printer, Sidney, (1994).
- [7] A. BOURAIOU, «Élaboration et Caractérisation des Couches Minces CuInSe₂ par Électrodéposition » ;thèse de doctorat,2009 université mentouri – constantine, PP 15-26 ; 43-44.
- [8] Anne Labouret & Pascal Cumuenel & Jean-Paul Braun & Benjamin Faraggi: « Cellules Solaires Les bases de l'énergie photovoltaïque », Dunod 5^{eme} édition, 2005.
- [9] B. Zouak, « Etude de l'évolution des caractéristiques des matériaux thermoélectriques des anciennes et nouvelles générations et applications photovoltaïque-thermoélectricité », mémoire de magister, 2012, Université de Tizi-Ouzou.
- [10] M. Adaika, « Étude par Simulation Numérique de L'effet des Couches Sur-dopées Coté Contacts Avant et Arrière sur Les Caractéristiques Électriques d'une Cellule Solaire n /p en Silicium», thèse de master, 2012, Université de Biskra.
- [11] N. Benabdallah, « Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe », thèse de magister, 2006, université Abou Bekrbelkaid Tlemcen.
- [12] A. Ricaud, "photopiles solaires de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés", ©1997.presses polytechniques et universitaires romandes.
- [13] mémoire de
- [14] M. Rachid, «application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah», thèse de magister, Université de Tlemcen décembre 2005.
- [15] S. Inchirah, «contribution a l'étude de la caractéristique courant tension de cellules solaires fonctionnant sous éclairnement et l'obscurité», thèse de magister, université de Tlemcen, 2003.
- [16] A .Labouret, M .Villoz, « énergie solaire photovoltaïque », Dunod, 3eme édition, Paris 2006.
- [17]http://www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/FR/realisations/EnergieRenouvelables/Filieres_solaire/PanneauxPhotovoltaiques/Celule/Temperature.htm.

CHAPITRE II

Les cellules photovoltaïques

II.1.Introduction

L'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839 est la conversion de l'énergie lumineuse contenue dans le rayonnement solaire en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Dans ce chapitre nous allons faire un bref aperçu sur l'effet photovoltaïque, la composition d'une cellule photovoltaïque, les différents types de cellules photovoltaïques, le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque, la caractéristique I(V) et les paramètres photovoltaïques extraits de la caractéristique I-V permettant d'évaluer les performances et le comportement électriques de la cellule.

Selon la qualité du silicium, nous rappelons les performances. Nous présentons ensuite le principe de fabrication des cellules multi-jonctions à haut rendement dont le développement a été motivé en priorité par les applications spatiales où les performances de la cellule priment sur les coûts de fabrication. Nous parlons ensuite d'une des nouvelles générations de cellules solaires, qui utilise de nouveaux matériaux de type organique. Ces nouveaux composés, en particulier les polymères, pourraient révolutionner le marché du PV grâce à leur faible coût de fabrication et leur facilité d'utilisation (flexibilité, légèreté). La recherche dans ce domaine est extrêmement active depuis plusieurs années et les avancées sont rapides. Nous abordons enfin le large domaine des cellules PV dites couche mince (« Thin-Film ») qui constitue ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin.

Leur principal atout vient de la faible quantité de matériaux nécessaire à la fabrication d'une cellule comparativement aux cellules classiques (première génération). Les cellules couche mince les plus développées utilisent comme matériau de base le silicium amorphe, le di Sélénium de Cuivre Indium Galium (CIGS), le Tellurure de Cadmium CdTe) et on trouve de plus en plus de cellules multi jonction améliorant d'autant les performances de cette filière.

II.2. L'effet photovoltaïque

La première structure de la cellule solaire était incapable d'offrir des performances élevées et de délivrer une puissance satisfaisante aux charges. Cette structure présentant beaucoup d'inconvénients dues aux pertes par réflexion ainsi que les contacts ohmiques et la recombinaison a subi plusieurs modifications au cours de ces dernières années. La structure actuelle tient à optimiser les performances de la structure classique. Elle est constituée de plusieurs couches, l'élément de base de ces structures est la jonction P-N [1]. La jonction comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau diffusent dans le matériau p comme schématisé sur la **figure 1**.

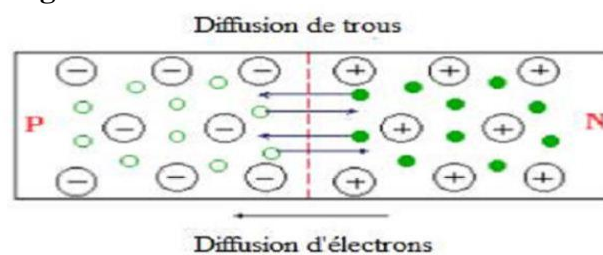


Figure II.1 : schéma descriptif d'une jonction PN.

La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P 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, **figure 2** Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est ainsi obtenue.



Figure II.2 : Schéma descriptif d'une jonction PN en équilibre thermodynamique.

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 engendrant ainsi une paire électron-trou comme le montre la **figure 3** ci-dessous [2].

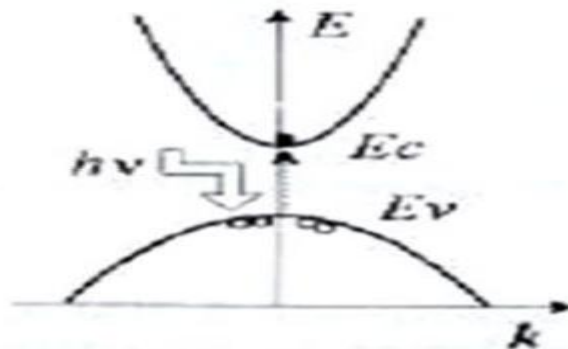


Figure II.3 : Passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction sous l'effet de la lumière.

L'absorption d'un photon (grain de lumière) dans le matériau semi-conducteur entraîne la formation d'une paire électron-trou. L'électron de la zone n et le trou de la zone p sont séparés sous l'effet de la différence de potentiel dans la jonction. Si on ferme le circuit par une charge extérieure (ampoule, etc ...), un courant électrique circule **figure 4**

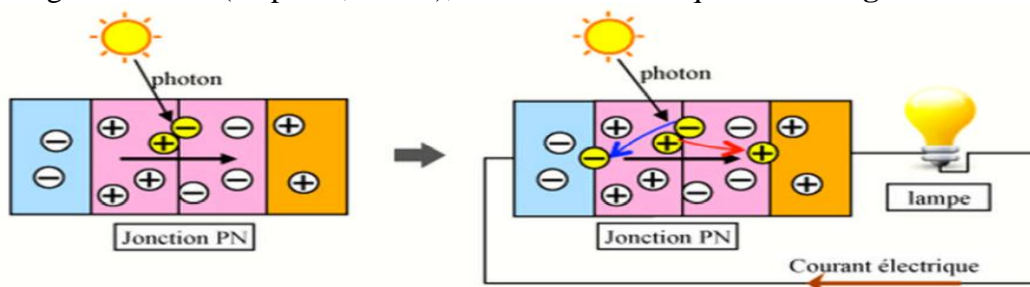


Figure II.4 : circulation d'un courant électrique dans la jonction sous l'effet de la lumière

II.3.Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque [4]

La cellule photovoltaïque classique biface en silicium est constituée d'une jonction PN (Figure II.5). Cette dernière est la juxtaposition de deux zones, l'une comportant un fort excès d'électrons libres - partie N - et l'autre comportant un fort défaut d'électrons libres (ou excès de trous) – partie P.

La jonction PN engendre un champ électrique dans la zone de charge d'espace, à l'interface des deux zones N et P. Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace. Ces porteurs ont un comportement différent suivant la région où ils sont générés :

Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaire. On aura un photo-courant de diffusion ; dans la zone de charge d'espace, les paires électron/trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P.

On aura un photo-courant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photo-courant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

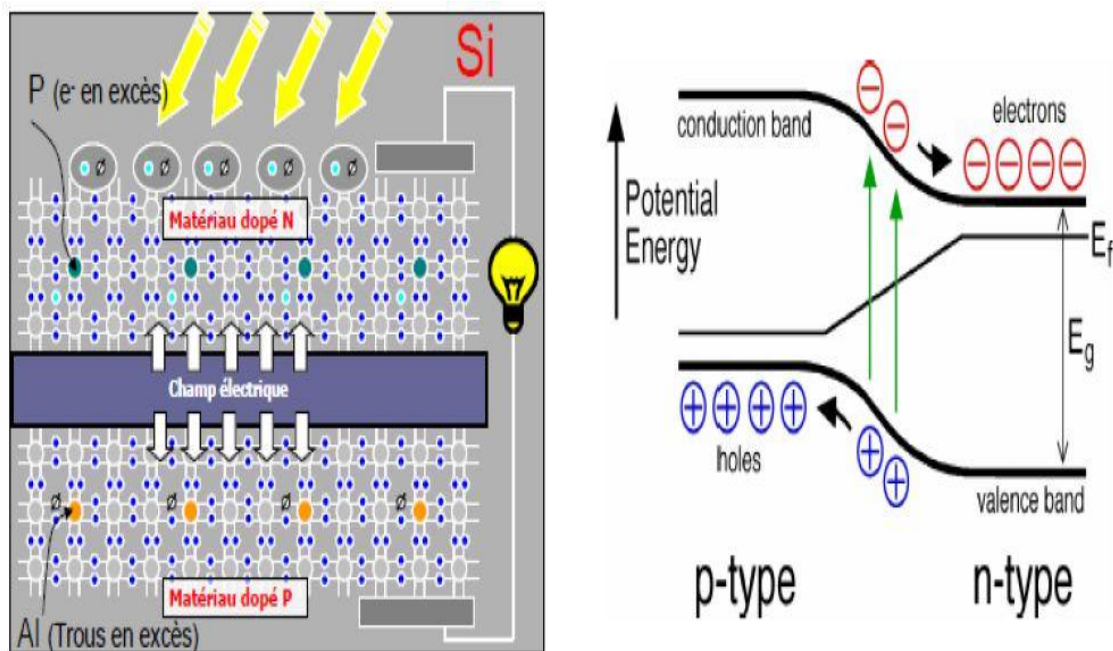


Figure II.5 : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque avec le diagramme énergétique [5].

II.4. Caractérisation physique des cellules photovoltaïques [4]

Caractéristique courant/tension et schéma équivalent

La figure II.6 représente les caractéristiques courant-tension d'une cellule photovoltaïque sous obscurité et sous éclairage.

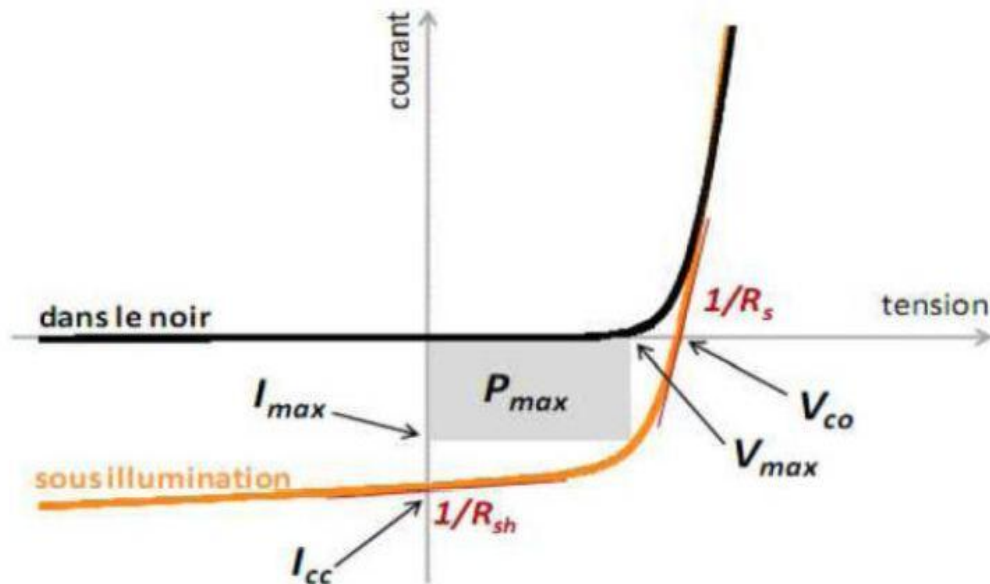


Figure II.6: Caractéristique d'une cellule photovoltaïque. [4]

Pour une cellule solaire sous obscurité et polarisée par une tension V , la courbe obéit à l'équation de Shockley suivante:

$$I_{obs} = I_s \left(\exp \left(\frac{qV}{nKT} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.1})$$

Où I_{obs} est le courants d'obscurité, I_s est le courant de saturation, q la charge de l'électron, k la constante de Boltzmann, T la température et n le facteur d'idéalité de la diode qui tient compte des recombinaisons (dans le cas idéal, il est égale à 1).

Sous éclairage, les paires électron-trou créées dans le semi-conducteur, sont balayées par le champ électrique interne et produisent un courant I_{ph} . Le courant I_{ph} passe dans le circuit extérieur à travers une résistance de charge R_{ch} , ce qui induit une auto polarisation V de la cellule. Dans le modèle le plus simple (modèle linéaire), qui stipule la superposition des courants d'obscurité et d'illumination, I et V sont reliés par :

$$I(V) = I_{obs}(V) - I_{ph} \quad (\text{II.2})$$

Dans le cas réel, des résistances de contacts (résistivité des électrodes et des interfaces métal-matériaux organiques) et des pertes ohmiques (dus à la résistivité des couches organiques) ainsi que des courants de fuite (des courants de court-circuit) apparaissent à travers la cellule.

Schéma équivalent :

La figure II.7 propose un modèle électrique de la cellule photovoltaïque :
On y retrouve le générateur de courant I_{ph} correspondant au courant photo généré ainsi que les résistances complémentaires, R_s (résistance série) et R_p (résistance parallèle), et un diode d (le courant diode représente le courant d'obscurité I_{obs}).

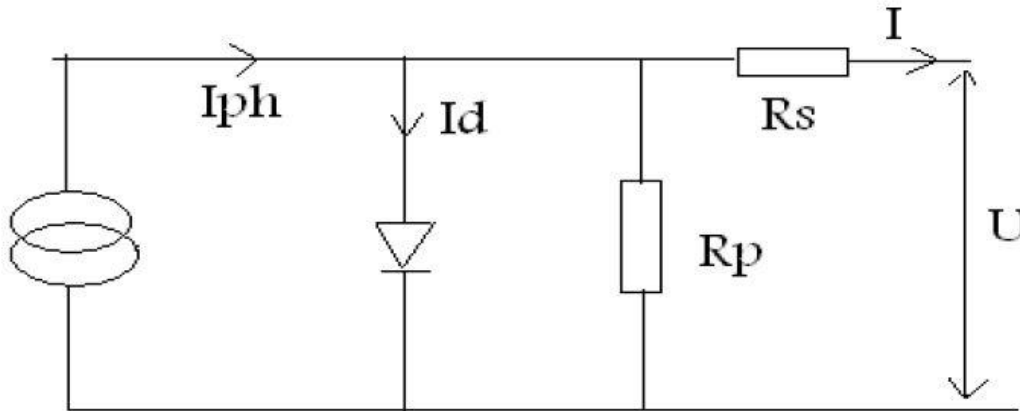


Figure II.7 : schéma électrique d'une cellule solaire. [4]

La résistance série est une résistance liée à la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, à savoir l'émetteur, la base et l'impédance des électrodes.

La résistance parallèle R_p est également connue sous le nom de résistance de court-circuit. Elle traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur. Ces résistances donnent dans le cas réel une évaluation des imperfections de la diode.

II.4.1. Les paramètres des cellules photovoltaïques

Les paramètres des cellules photovoltaïques, extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques. Ces paramètres sont définis comme suit :

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

Le courant de court-circuit est le courant qui circule à travers la jonction sous illumination sans application de tension. Il croît avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

b) Tension de circuit ouvert (V_{co}) :

La tension de circuit ouvert est la tension mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans le dispositif photovoltaïque. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction pn, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts couche active-électrode. De plus, elle dépend de l'éclairement de la cellule.

On peut facilement avoir l'expression de V_{co} dans le cas d'un courant nul:

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

- I_{cc} : courant de court circuit, courant lorsque $V = 0$.
- I_s : courant de saturation

c) Facteur de forme FF

On peut définir le facteur de remplissage ou facteur de forme FF par la relation suivante:

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{II.4})$$

- V_m : tension correspondant à la puissance maximale fournie
- I_m : courant correspondant à la puissance maximale fournie.

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, soit $P_m = I_m \cdot V_m$.

d) Le rendement

C'est le rendement énergétique externe de conversion de puissance. Il est défini par la relation suivante:

$$\eta = \frac{V_m \cdot I_m}{P_{incidente}} \quad (\text{II.5})$$

Ce rendement peut être optimisé en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. C'est un paramètre essentiel, car la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

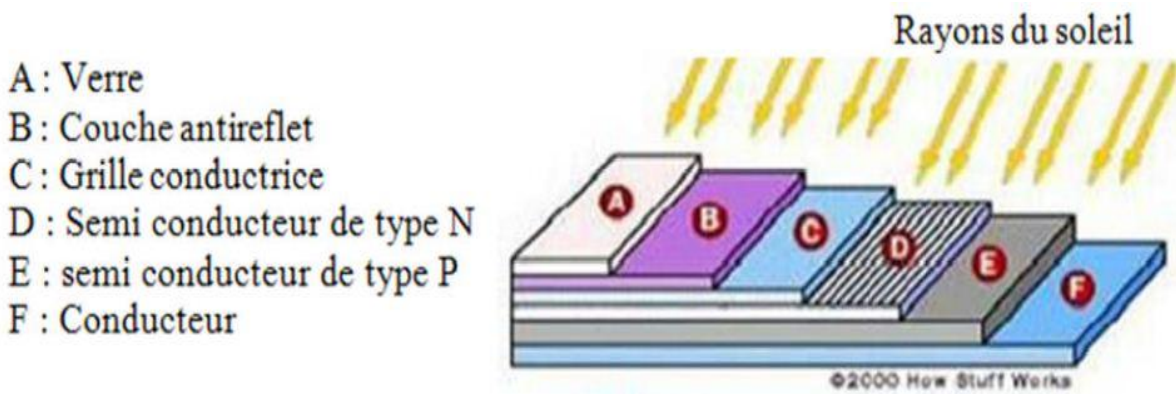


Figure II.8 : Structure simple d'une cellule solaire. [6]

II.5. Modélisation des cellules photovoltaïques [7]

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents.

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant plus ou moins de détails. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque.

II.5.1. Modèle idéal

C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule solaire, car il ne tient compte que du phénomène de diffusion (figure II.9). Le circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire se compose d'une diode et d'une source de courant montés en parallèle. La source de courant produit le photo courant I_{ph} , qui est directement proportionnel à l'éclairement solaire E . L'équation courant tension I-V du circuit équivalent simplifié est déduite à partir de la loi de Kirchhoff (première loi de Kirchhoff : la somme de tous les courants entrant et sortant d'un point est égale à zéro):

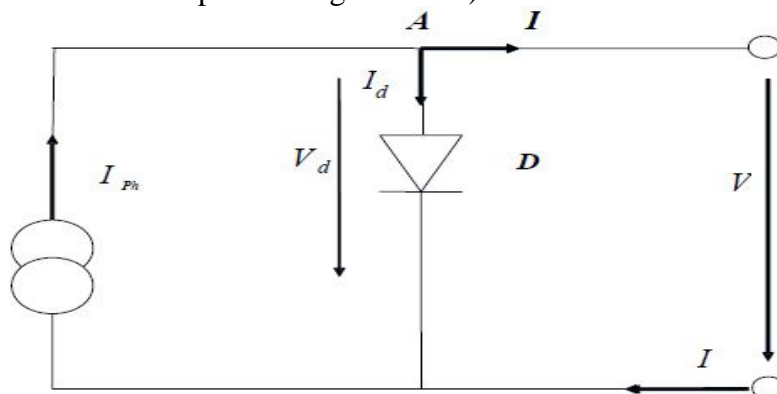


Figure II.9: Circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{mV}{V_T}} - 1 \right) \quad (\text{II.7})$$

D'où

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{mV}{V_T}} - 1 \right) \quad (\text{II.8})$$

Avec

- I_{ph} : Photo courant.
- I_d : Courant de diode.
- I_s : Courant inverse de saturation de la diode.
- m : Facteur d'idéalité de la diode,
- V_T : Tension thermique.

II.5.2 .Modèle avec pertes ohmiques

Le deuxième modèle, tient compte de la résistivité du matériau et des pertes ohmiques dues aux niveaux des contacts, ce qui permet une meilleure représentation du comportement électrique de la cellule par rapport au modèle idéal. Ces pertes sont représentées par une résistance série R_s dans le circuit équivalent représenté ci-dessous :

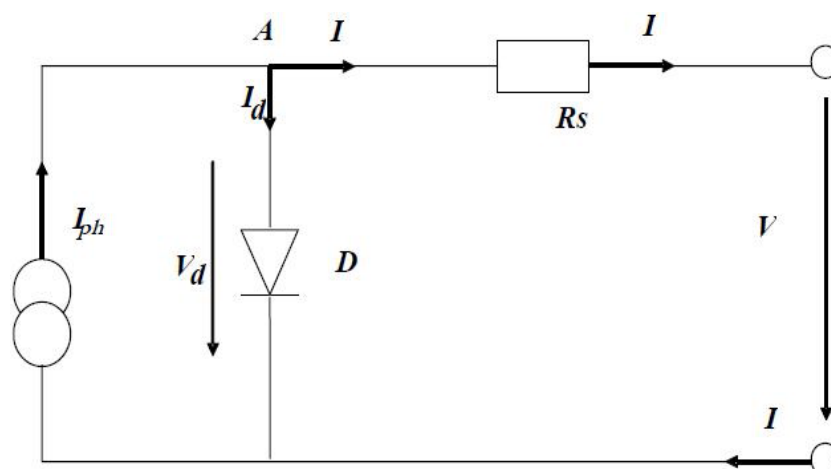


Figure II.10 : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle avec R_s .

Après analyse du circuit, l'équation courant tension est donnée comme suit :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V+I.R_s}{m.V_T}} - 1 \right) \quad (\text{II.9})$$

Avec :

R_s : Résistance série qui tient compte des pertes en tension dues aux contacts externes.

II.5.3 .Modèle à une diode

C'est le modèle sur lequel s'appuient les constructeurs en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires (data sheets). Il est aussi considéré satisfaisant et même une référence pour les constructeurs pour cataloguer typiquement les modules solaires. Il tient compte non seulement des pertes en tension exprimées par la résistance série R_s , mais aussi des fuites de courants exprimées par une résistance parallèle R_p (voir figure II.11).

Remarque : La résistance parallèle R_p est en générale très élevée, et lorsqu'elle est trop faible, la cellule solaire ne donnera plus de tension sous faible éclairément.

La caractéristique courant tension décrivant le fonctionnement du circuit ci-dessus est donné par les équations :

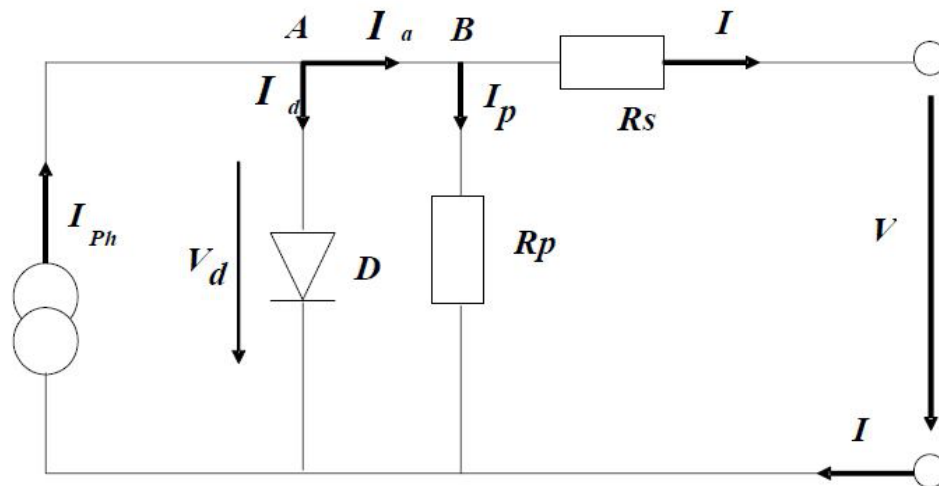


Figure II.11 : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à une diode.

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (\text{II.10})$$

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{V+I.R_s}{m.V_T}} - 1 \right) \quad (\text{II.11})$$

$$I_p = \frac{V_d}{R_p} = \frac{V+I.R_s}{R_p} \quad (\text{II.12})$$

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V+I.R_s}{m.V_T}} - 1 \right) - \frac{V+I.R_s}{R_p} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

R_p : Résistance parallèle simulant les pertes en courant de la cellule solaire.

L'équation en termes de I et V n'est pas tellement facile à résoudre comparativement à l'équation du circuit équivalent simplifié. Par conséquent une méthode numérique (Newton_Raphson) doit être appliquée.

II.5.4 .Modèle à deux diodes

Le circuit équivalent du modèle à deux diodes est donné sur la figure II.12 Ce modèle est dit le plus proche du comportement réel de la cellule solaire, du fait qu'il tient compte du mécanisme de transport des charges électriques à l'intérieur de la cellule (deux diodes).

Le modèle à deux diodes est composé de deux exponentiels, le premier tient compte du phénomène de diffusion, tandis que le deuxième exponentiel correspond au phénomène de recombinaison, dans la région de déplétion, par les niveaux profonds.

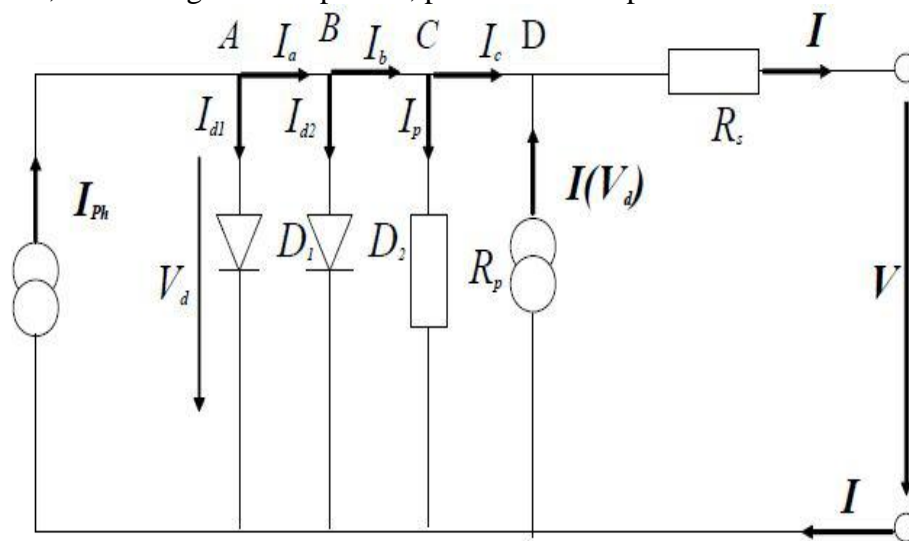


Figure II.12 : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à deux diodes

Les équations caractéristiques du système sont données ci-dessous :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_p + I(V_d) \tag{II.14}$$

$$I_{d1} = I_{s1} \left(e^{\frac{V}{m_1 V_T}} - 1 \right) \tag{II.15}$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left(e^{\frac{V}{m_2 V_T}} - 1 \right) \tag{II.16}$$

$$I(V_d) = -a. (V + I. R_s) \left(1 - \frac{V + I. R_s}{V_{Br}} \right)^{-n} \tag{II.17}$$

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{V}{m_1 V_T}} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{V}{m_2 V_T}} - 1 \right) - \frac{V + I. R_s}{R_p} - a. (V + I. R_s) \left(1 - \frac{V + I. R_s}{V_{Br}} \right)^{-n} \tag{II.18}$$

- I_{s1}, I_{s2} : Courant de saturation de la première et la deuxième diode respectivement.

- m_1, m_2 : Facteur d'idéalité de la première et la deuxième diode respectivement.
- V_{Br} : Tension de rupture.
- a : Facteur de correction.
- n : Indice de la rupture d'avalanche.

II.6. Les filières technologiques du photovoltaïque

La filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques (Figure II.13). Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque silicium détaillées ci-après

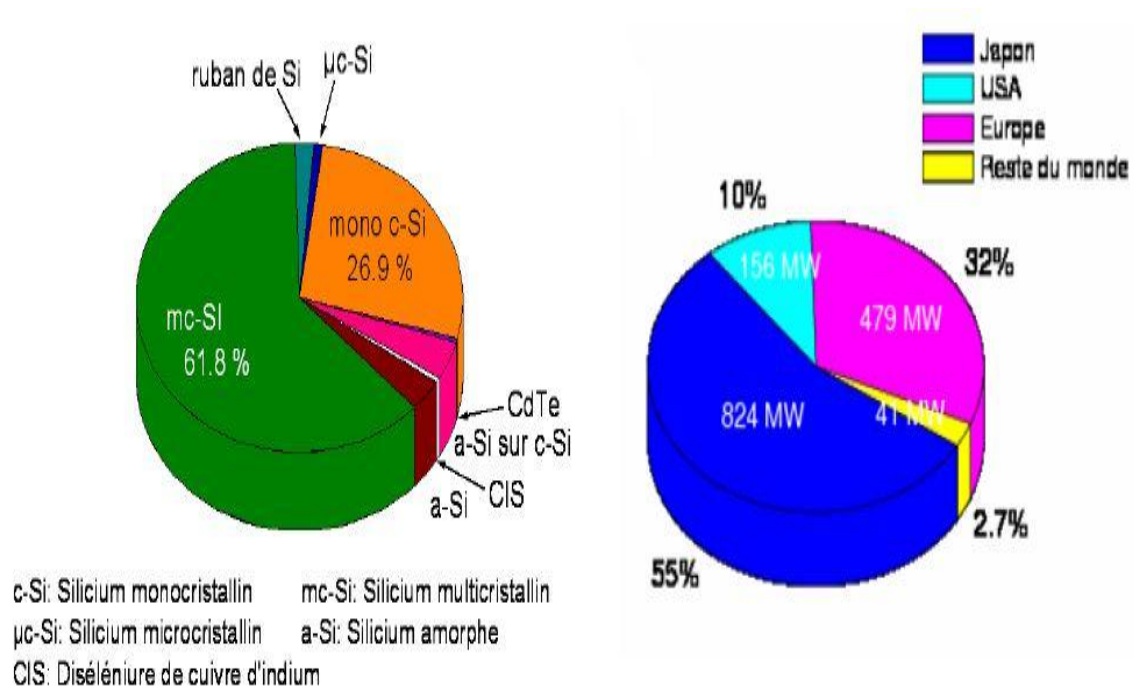


Figure II.13: Répartition de la production photovoltaïque mondiale en 2006 en %

Et suivant les différentes filières :

II.6.1 les Types des cellules photovoltaïques

Selon la nature des matériaux utilisés on distingue deux grandes classes : les cellules Photovoltaïques inorganiques et les cellules photovoltaïques organiques :

II.6.1.1. Les cellules photovoltaïques inorganiques

Les cellules photovoltaïques inorganiques qui dites aussi au silicium, représentent 99 % des ventes mondiales de panneaux solaires, la technologie de cette filière est la plus avancée, pour preuve, la faible différence entre le rendement théorique de 27 % et les meilleurs modules de laboratoire d'un pied carré qui ont un rendement de 20,8 % ; ainsi le

rendement du meilleur module commercial de grande taille ($1m^2$), est de 15,3 %. On peut distinguer plusieurs grandes filières : [8]

II.6.1.1.1. La filière silicium

La filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques comme le montre la Figure II.14. Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque silicium détaillées ci-après ; d'une part les cellules à base de silicium massif (monocristallin, poly cristallin, rubans,...) dites de « première génération » et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques commercialisés et d'autre part la technologie à base de silicium en couche mince.

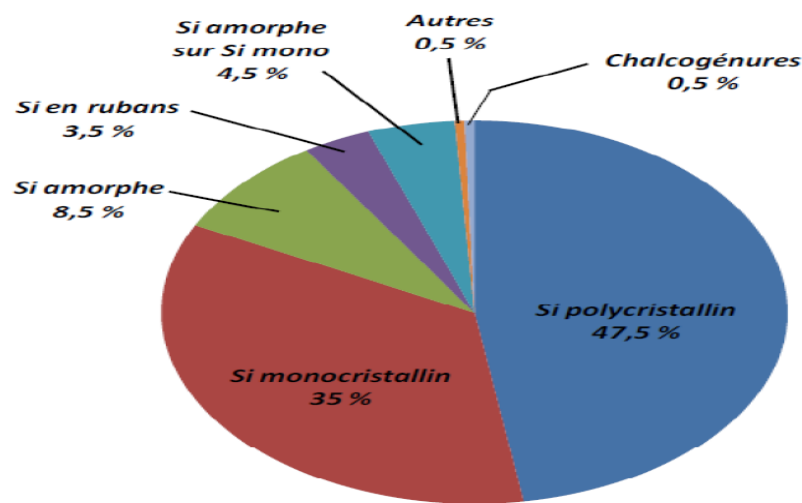


Figure II.14 : Répartition des matériaux sur le marché mondial Du photovoltaïque

a) Cellules au silicium monocristallin

Il existe deux méthodes par lesquelles il est possible d'obtenir du silicium monocristallin de qualité microélectronique, mais nécessitant cependant une dépense d'énergie considérable proche du MWh. [9] Les siliciums obtenus sont appelés Cz (méthode Czochralski) et FZ (« Float Zone »), et permettent d'obtenir des rendements de conversion records en laboratoire de l'ordre de 25 % pour des cellules de 4 cm^2 [8], soit supérieurs de huit points à ceux de l'industrie. Les inconvénients de cette technologie sont les rendements faibles obtenus sous un faible éclairage et surtout le coût prohibitif de production des matériaux.

Avantage :

- Très bon rendement (23% en théorie et environ 17% dans la pratique).

Inconvénients :

- Coût élevé

- Rendement faible sous un faible éclaircissement

b) Cellules au silicium poly-cristallin

Le silicium poly-cristallin est produit par des techniques de croissance qui assurent la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux (dénommé silicium multi-cristallin) afin de limiter les effets néfastes des joints de grains. Cependant, le matériau multi-cristallin est d'une part contraint et disloqué, et d'autre part contaminé par des impuretés résiduelles de la matière première de silicium. Cette dernière est en partie constituée par des rebuts de l'industrie de la microélectronique, c'est-à-dire le silicium monocristallin Cz ou FZ. Les rendements de conversion industriels, qui étaient de l'ordre de 8 à 10% avant 1980, sont actuellement de 16 à 17 % pour des grandes plaquettes de 200 m^2 [9]. Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché du photovoltaïque car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin.

Avantage :

- Bon rendement 13%, mais cependant moins bon que le monocristallin.
- Moins cher que le monocristallin
- Meilleur rapport qualité/prix.

Inconvénient :

- Rendement faible sous un faible éclaircissement.

c) Silicium en ruban auto-supporté

Les techniques de production de silicium cristallin en rubans autosupportés ont été très séduisantes sur le plan technologique. La plus connue est basée sur l'effet de capillarité entre deux lèvres de carbone. Ces rubans ont connu de nombreux développements au niveau de la recherche et, pour certains d'entre eux, jusqu'à la conception de chaînes de production préindustrielles.

Cependant, la vitesse de croissance linéaire extrêmement lente (quelques cm/min) pousse les industriels à abandonner progressivement cette technologie. Les meilleurs rendements obtenus sont néanmoins de l'ordre de 15 %. [9]

d) Silicium amorphe

Depuis les années 1970, des recherches intensives ont été entreprises pour utiliser du silicium non cristallisé, c'est-à-dire à l'état amorphe. Ce sont les cellules des calculatrices ou des montres dites « solaires ».

Le silicium amorphe présente plusieurs avantages, en particulier son fonctionnement possible en intérieur sous faible éclaircissement contrairement Au silicium cristallin, son fort coefficient d'absorption, sa faible consommation énergétique durant le cycle de production et son aptitude à être déposé sur des grandes surfaces (de l'ordre de $1m^2$).

Cependant, les cellules photovoltaïques à base de silicium amorphe présentent de faibles rendements (inférieurs à 10 % au niveau industriel) et une diminution assez rapide de leurs performances au cours du temps [9]. L'avenir des couches de silicium amorphe passera probablement, par un mariage avec le silicium cristallin. En effet, les hétéro-structures à base

de silicium amorphe/silicium cristallin (structure HIT de Sanyo [8]) présentent des rendements de laboratoire de plus de 21 % et de 16 % en production industrielle.

Avantage :

- Fonctionnent avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).
- Moins chères que celles que nous avons citées précédemment.

Inconvénients :

- Rendement faible en plein soleil (environ 6%).
- Performances qui diminuent sensiblement avec le temps.

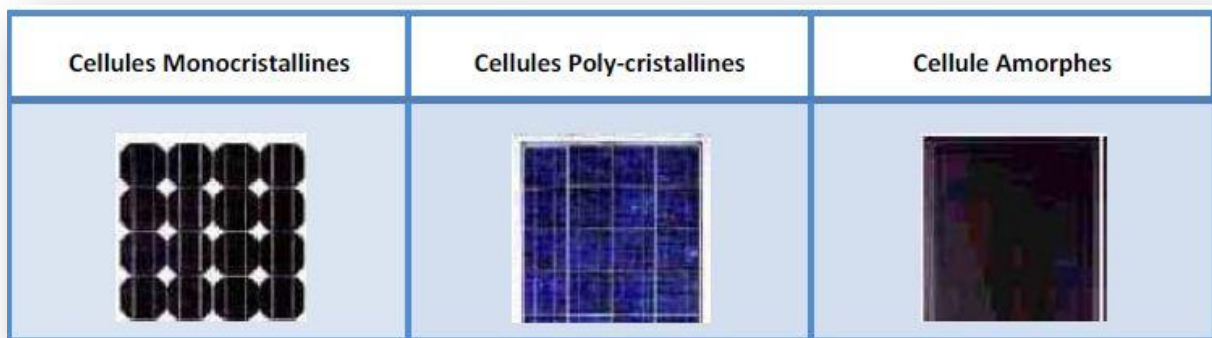


Figure : II.15 Comparatif des différents types de cellules-PV a base de silicium

II.6.1.1.2. Cellules couches minces

Les cellules PV dites couche mince (Thin-film) constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses. L'intérêt de la technologie couche mince vient de la faible quantité de matériaux nécessaire à la fabrication d'une cellule comparativement aux cellules classiques. Contrairement aux cellules silicium cristallin de première génération, on ne dépose que la quantité de matériau photosensible efficace pour absorber l'essentiel du rayonnement solaire (quelques microns d'épaisseurs suffisent). Par ailleurs, on utilise des méthodes de fabrication moins coûteuses des cellules qui permettent une intégration totale.

Les trois technologies émergentes sont aujourd'hui :

- _ Le Silicium amorphe et microcristallin noté TFSi (Thin-Film Silicons).
- _ Le Semi-conducteur Poly-cristallin CdTe (Tellure de Cadmium).
- _ L'alliage Cu In, Ga Se₂ (Cuivre-Indium/Gallium-Sélénium) noté dans la littérature CIGS.

II.6.1.1.3. Les filières non silicium en couche mince [10]

Les recherches actuelles sur les matériaux PV portent également sur d'autres matériaux que le silicium, mieux adaptés à une utilisation en couches minces et délivrant de hauts rendements à des coûts relativement bas. Deux filières semblent s'imposer progressivement,

l'une basée sur le tellure de cadmium (notée CdTe) et l'autre sur les alliages Cuivre-indium/gallium-Sélénium (noté CIGS).

Les cellules CIGS sont constituées par empilement. Tout d'abord, une couche métallique de molybdène de $0.5 \mu\text{m}$ d'épaisseur est déposée sur du verre de vitre pour réaliser le contact arrière. Puis on vient déposer une couche CIGS de type P, d'environ $1.5 \mu\text{m}$. Suit une couche de CdS ou de ZnS (pour Sulfure de Cadmium et Zinc Sulfuré) d'environ 50 nm , et enfin une couche de ZnO (Oxyde de Zinc) de type N, de $1 \mu\text{m}$, servant de contact avant, conducteur et transparent. Finalement, la cellule est encapsulée par couverture par une vitre. Dans le cas du CdTe, une couche de CdS de type N est déposée sur du verre, puis une couche de CdTe de type P, d'environ $2 \mu\text{m}$, et une couche conductrice de carbone servant de deuxième contact.

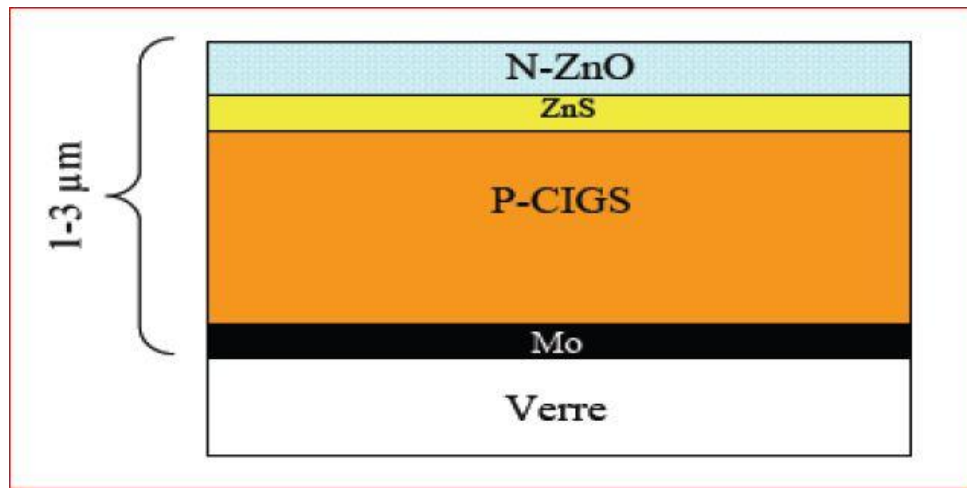


Figure II.16 Schéma de principe d'une cellule à base de CIGS.

La technologie CIGS exhibe actuellement le meilleur rendement de production pour une cellule et pour des modules par rapport à toutes les technologies couches minces inorganiques avec des cellules pouvant atteindre 19.9% en laboratoire .et des modules commerciaux de 12%. Cependant, il reste un grand nombre de points à améliorer afin de réduire le prix de ces cellules. Le principal challenge de la technologie CIGS couche mince est la réduction du prix des matériaux. Diverses pistes existent pour essayer de remplacer les matériaux chers 1. De plus, il est nécessaire également de trouver des solutions pour moins gaspiller la matière première active pendant la fabrication. Une dernière piste consiste à réduire tout simplement l'épaisseur de la couche active.

La simplicité chimique du matériau à base de tellure de cadmium - (CdTe) et sa stabilité en font un matériau attractif. Ses propriétés thermo-physiques et ses caractéristiques chimiques permettent de fabriquer des cellules simplement et à faible coût. Le rendement des cellules en CdTe dépend fortement de la manière dont les couches actives sont déposées (température de dépôt, vitesse et nature du substrat). Comparé aux autres technologies couche mince, le CdTe est plus facile à déposer et donc plus approprié à la production de module PV de surface importante. L'inconvénient majeur actuel repose sur la toxicité reconnue du Cadmium bien qu'il a été démontré que les risques environnementaux liés aux cellules PV en CdTe sont minimes. En effet, les modules en CdTe ne présenteraient pas de risques sanitaires et environnementaux, et un simple recyclage des modules en fin de vie résoudrait définitivement le problème de pollution. L'utilisation de CdTe dans les modules

photovoltaïques est en fait beaucoup moins inquiétante que d'autres utilisations du cadmium, comme par exemple dans les batteries Ni-Cd.

D'un point de vue rendement énergétique, la filière CdTe, présente des rendements de cellules record de 16.5% en laboratoire et des modules commerciaux à près de 10.7% .L'Europe et les USA produisent déjà des panneaux en couches minces CdTe. Leurs rendements avoisinent les 9%.

On peut trouver les caractéristiques I(V) réelle et simulée d'une cellule CIGS réalisée en laboratoire avec un rendement de 17.5% pour les conditions STC. Ces résultats, tout à fait remarquables, positionnent le CIGS comme le CdTe au dessus des cellules silicium en termes de compromis coût rendement .Bien que moins développées jusqu'à présent que les filières silicium, celles-ci montent néanmoins en puissance avec un fort potentiel de développement en termes de coût de production Bien que la majeure partie de la production de cellules solaires soit faite sur des substrats de verre, on voit apparaître progressivement de nouveaux substrats souples compatibles avec la filière couche mince.

Ces nouveaux substrats (métal ou plastique) présentent les avantages d'être plus légers que le verre, plus faciles à mettre en œuvre et surtout moins coûteux. Ces caractéristiques font d'eux des supports de choix pour le futur.

II.6.1.1.4 .Les multi-jonctions en couche mince

Pour améliorer les performances des cellules couche-mince, des architectures double et triple jonctions ont été développées. Elles sont inspirées des cellules multi-jonction développées initialement pour le spatial pour bénéficier au maximum du spectre solaire. Elles présentent néanmoins une mise en œuvre plus simple et mieux maîtrisée aujourd'hui pour le marché terrestre. Nous pouvons citer par exemple les cellules tandem à base de silicium à la fois amorphe et polycristallin (a-Si/ μ c-Si) [11].

Les meilleurs rendements stabilisés en laboratoire sont de l'ordre de 12% pour ces cellules.

Il s'agit comme pour les multi-jonctions d'empiler deux cellules photovoltaïques qui absorbent des photons de longueurs d'onde différentes. Par ce mécanisme, l'ensemble tandem composé de l'association de deux cellules, permet d'absorber un plus large spectre lumineux et ainsi produire plus d'énergie qu'une cellule simple jonction. La première couche en silicium amorphe absorbe une partie du spectre alors que l'autre partie, qui la traverse, est absorbée par la seconde couche en silicium microcristallin. Le procédé de fabrication est le même que pour les couches minces, les différentes couches qui composent la cellule sont déposées par plasma(PECVD) sur un substrat de verre.

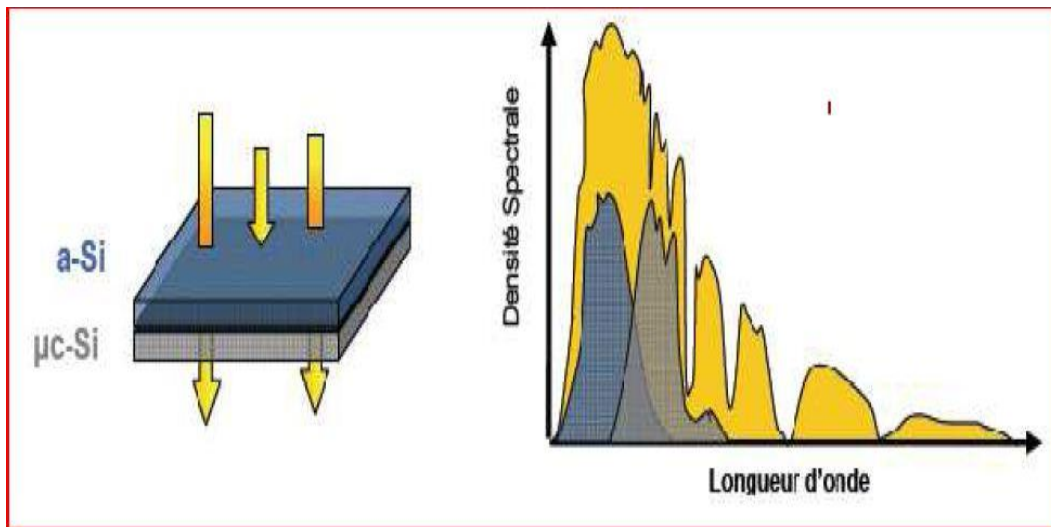


Figure II.17 Cellule Tandem a-Si/ μ c-Si & spectre solaire et spectres d'absorption [10]

On peut observer en Figure II.18 les caractéristiques électriques réelles et simulées d'une cellule tandem a-Si/ μ c-Si. Contrairement aux autres cellules simple jonction, la tension de circuit ouvert de cette cellule s'élève à 1.39V. Cette hausse de tension s'explique par l'architecture tandem équivalente à la mise en série de deux cellules. Par conséquent, les tensions V_{oc} de la cellule a-Si et de la cellule μ c-Si s'additionnent. Cette configuration lie cependant électriquement les deux cellules. Ainsi, le courant produit par cette association dépend de la cellule produisant le plus faible courant. Généralement, on optimise conjointement les deux cellules afin d'optimiser la puissance fournie par l'ensemble tandem.

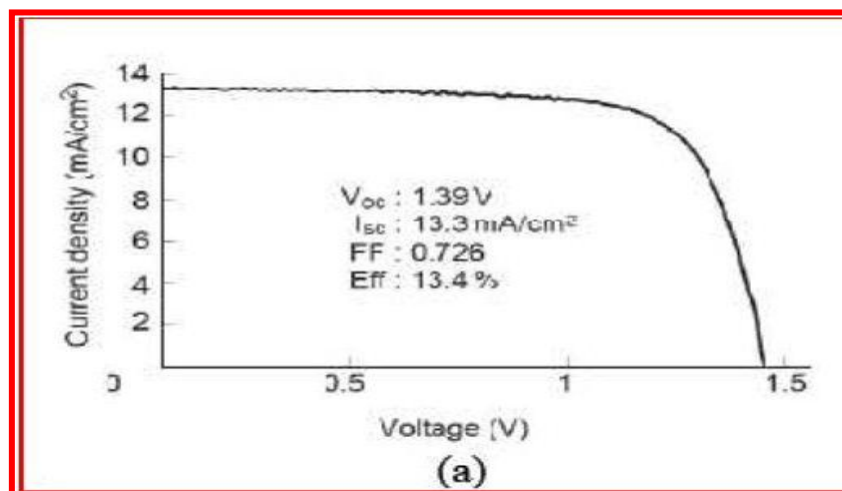


Figure II.18 Caractéristique courant-tension d'une cellule Tandem a-Si/ μ c-Si.
(a) Courbe réelle, (b) Courbe simulée. [10]

Une triple jonction, particulièrement prometteuse, à base de silicium amorphe a été développée au NREL (National Renewable Energy Laboratory) au Colorado, en association avec United Solar System Corp. Cette nouvelle structure se compose de trois couches qui capturent différentes longueurs d'onde, doublant les rendements par rapport à la limite théorique des jonctions simples [12]. La première cellule, qui capture les photons bleus, fait appel à un matériau a-Si disposant d'un gap de 1.8eV. La cellule centrale en silicium amorphe

et germanium (10 à 15% de concentration en Ge) dispose d'un gap de 1.6eV qui permet d'absorber les photons verts. La cellule arrière, en aSi-Ge (40 à 50% de Ge), capture les photons rouges et infrarouges (Gap de 1.4eV). Des modules commerciaux triple-jonction en support souple sont déjà disponibles avec des rendements avoisinant les 7% pour des films solaires de 1 m². Le meilleur rendement de cellule triple-jonction a-Si/a-SiGe/a-SiGe s'élève à 13% en laboratoire. Maintenant, le passage à l'échelle industrielle et à la production de modules multi-jonction performants sont les principaux défis auxquels doit faire face cette technologie afin d'avoir un développement complet.

Ces données vont nous servir à alimenter les simulateurs de type circuit en ayant un comportement des GPV le plus près possible de la réalité afin de pouvoir optimiser au mieux les étages d'adaptation et la gestion nécessaires pour encore augmenter le rendement.

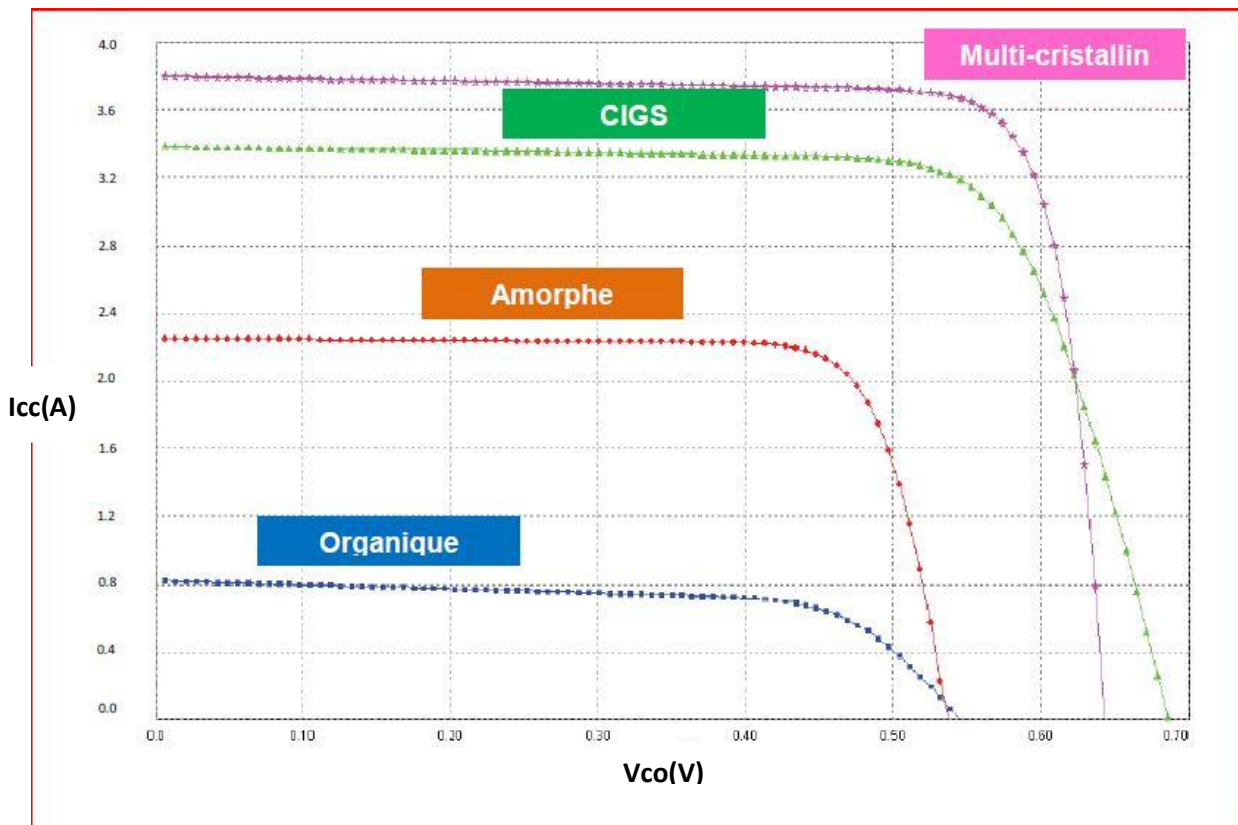


Figure II.19 Caractéristiques électriques simulées de cellules à simple jonction issues de différentes filières photovoltaïques. [10]

II.6.1.1.4 .Les cellules III-V multi jonctions

La filière des dispositifs multi jonctions, dite de « troisième génération » permet d'accéder aux rendements records dans le domaine de l'énergie photovoltaïque, mais se cantonne pour le moment aux applications spatiales. Cette technologie repose sur l'utilisation de plusieurs cellules de bandes interdites différentes, chacune optimisée pour une partie différente du spectre solaire. Les rendements les plus élevés ont été obtenus avec des structures basées sur des empilements de composés III-V en épitaxie. Ces dispositifs, parfois appelés « tandems » fonctionnent déjà, et permettent d'atteindre un rendement de 32 % avec Système triple-jonction GaInP/GaAs/Ge sous un spectre standard [13]. Grâce à des systèmes De concentrateurs de lumière, permettant de décupler la puissance solaire reçue par la cellule,

des rendements de plus de 40 % ont même été obtenus avec cette technologie ce qui constitue un record absolu en terme de conversion photovoltaïque [14].

II.6.1.1.5. Les cellules nanocristallines à colorant (ou cellules de Grätzel)

Inspirée par la photosynthèse, l'équipe de Michael Grätzel a développé au début des années 1990 des cellules solaires fonctionnant selon un principe différent de celui décrit dans les paragraphes précédents [9]. Ces cellules sont composées d'un électrolyte, d'un colorant et d'un oxyde semi-conducteur inorganique. Le meilleur rendement certifié reporté est de 10,4 % pour une cellule de 1 cm² et est à mettre au profit de la société Sharp [8]. Des tests de stabilité effectués montrent que la durée de vie des cellules est de 20 ans en fonctionnement. Cependant, à cause de fuites possibles de l'électrolyte liquide, celui-ci est remplacé par des électrolytes solides pour lesquels les rendements chutent alors à 6,7 %.

II.6.2. Les cellules photovoltaïques organiques

Si l'effet photovoltaïque a été observé dans les matériaux organiques depuis plus de 30 ans, les premières cellules présentaient des rendements de conversion en énergie très faibles, de l'ordre de 10–5 %. Dès 1978, Merritt prévoyait que les valeurs de ϵ pourraient dépasser les 1 % [20], mais ce n'est qu'en 1986 que ce rendement a été atteint avec les travaux de Tang (PCE = 0,95 %) [21]. Pendant les années qui suivirent, cette valeur parfois été reproduite avec des matériaux différents mais elle n'a jamais été améliorée. Ce n'est que depuis le début du XXI^e siècle que le rendement a recommencé à croître, atteignant 2,5 % avec les travaux publiés par Shaheen [16], 3,6 % avec ceux de Peumans [17] sous éclaircissement AM1,5 avec une puissance lumineuse de 100 mW.cm⁻² et enfin 4,2 % avec une double hétéro structure de C60 et de phthalocyanine de cuivre. Aujourd'hui, le record au niveau industriel est détenu par la firme Konarka avec un rendement qui dépasse les 5 % [8]. L'équipe de Heeger a même obtenu un rendement de 6,7 % avec des cellules de type « tandem ». Cette valeur reste encore très faible si on la compare aux rendements obtenus par les autres technologies. Cependant, plusieurs raisons justifient les efforts consentis pour développer la filière organique, et qui résident dans les avantages que présentent ces matériaux. En effet, ils peuvent être mis en forme facilement, par voie sèche ou voie humide (tournette, jet d'encre,...) avec des techniques issues de l'industrie de la microélectronique.

De plus, les quantités de matériaux utilisées sont relativement faibles, les films ayant des épaisseurs de 100 nm. L'ingénierie moléculaire permet en outre d'adapter les valeurs de la bande interdite et des niveaux d'énergie. Enfin, cette technologie permettrait d'accéder à des modules photovoltaïques flexibles et/ou de grandes surfaces.



Figure II.20 Cellule solaire organique

✓ **Situation nationale** : Sur le plan national, l'Algérie a mis en place un plan fixant les orientations de la politique énergétique :

- ✚ une priorité à la recherche énergétique renouvelable (principalement pour l'énergie solaire).
 - ✚ une réduction d'impôts sur les coûts des matériaux accordée aux particuliers qui choisissent des matériels de production d'électricité faisant appel aux sources d'énergies renouvelables.
- Ces mesures ont pour but de faire un pas vers le contrôle de ces énergies pour un meilleur rendement économique et technologique.

II.7.Rendement des différentes technologies photovoltaïques

Beaucoup de recherches sont effectuées sur la technologie des cellules photovoltaïques pour en améliorer le rendement et en diminuer les coûts. Pour augmenter les rendements, la tendance est aux couche en tandem silicium amorphe – silicium microcristallin et aux multicouches associant deux semi-conducteurs de sensibilités spectrales complémentaires.

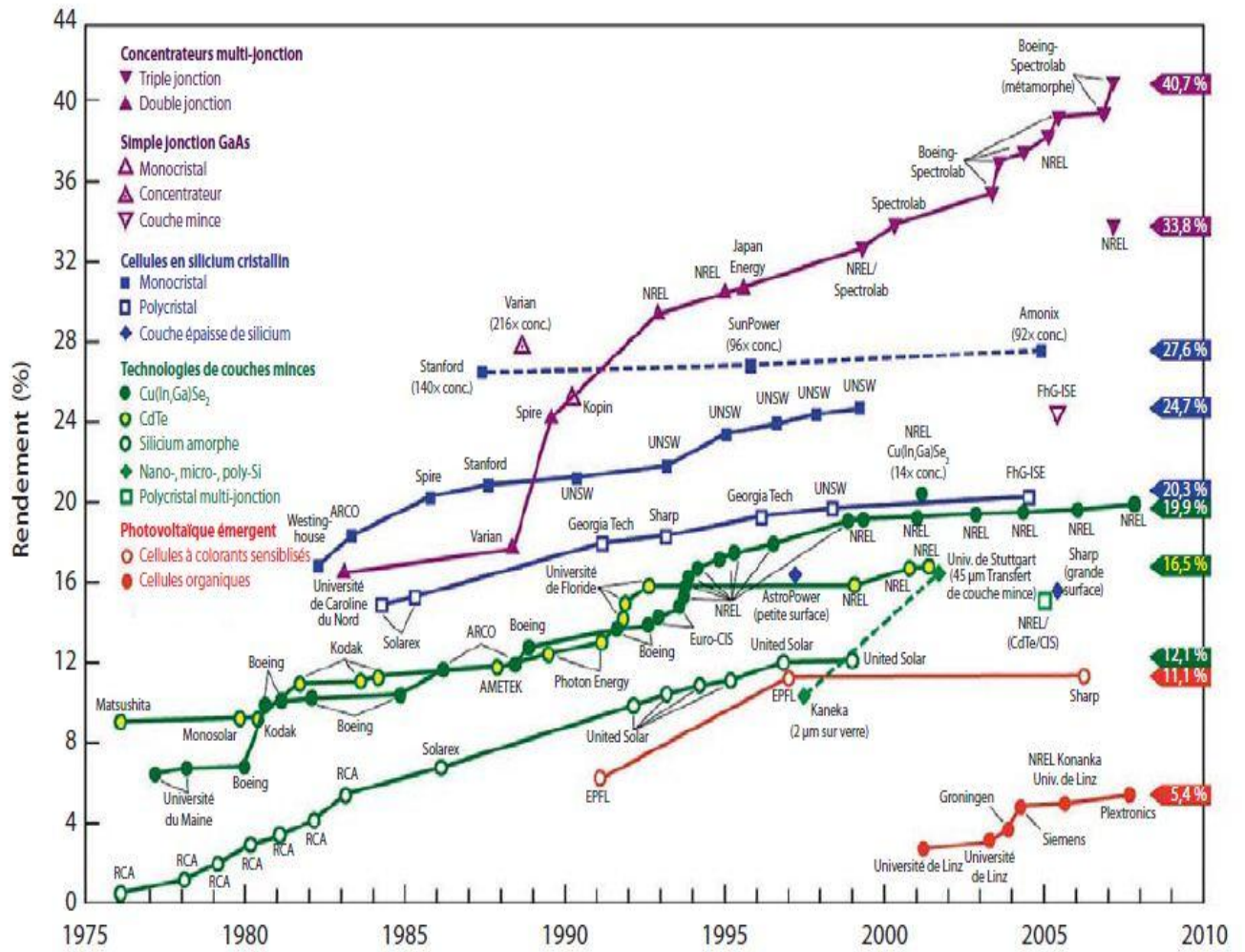


Figure II-21 Rendement de différentes technologies de cellules PV en laboratoire [18].

Le rendement des cellules en laboratoire est en constante amélioration, entraînant vers le haut les rendements des modules photovoltaïques. Le décalage entre le rendement des cellules de laboratoire et celui des modules commercialisés est constant comme le souligne la figure II.22

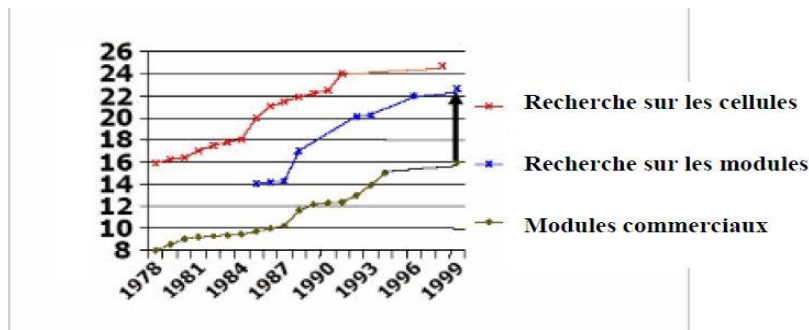


Figure II.22 exemples d'évolution entre la recherche sur les cellules PV et la commercialisation [19]

Le tableau I-2 suivant présente le rendement des modules photovoltaïques pour les technologies les plus matures en 2002. le tableau I-3 indique les avantages. Les inconvénients et les perspectives des différentes technologies photovoltaïques [20].

technologie	Rendement typique d'un module	Rendement maxi en labo d'une cellule	Rendement théorique maximum [1]	Etat de la technologie en 2005
Silicium mono cristallin (mono c-Si)	14-17 %	24,7%	27%	mature
Silicium multi cristallin (multi c-Si)	12-15%	19,8%	27%	mature
Silicium amorphe (a-Si)	6-8%	12,7%	25%	mature
Silicium sur ruban (ou EFG) (de RWE Solar) [2]	12-14%	27 %	27 %	mature
Silicium micro cristallin (μ -Si)	9-11%	16,4%	27%	Semi industriel
Tellurure de cadmium (CdTe)	6-9% [3]	16,0%	28,5%	Semi industriel
Diséléniure de cuivre et indium (CIS ou CIGS)	10-12%	18,2%	27,5%	Semi industriel
Arséniure de gallium(AsGa)	18-20	25.7	29%	Spatial
Matériaux organiques (TiO ₂) (cellule Graetzel)	(10%)	9 – 12%		Pré-industriel

Tableaux II.1 rendement des différents types de cellules photovoltaïques [21]

Technologie	Durée de vie	Avantages	Inconvénients	Perspectives
Silicium multi cristallin	10 ans à 90% Pc 25 ans à 80% Pc	Bon rapport coût /puissance surface	Assez chère, 2 à 3 fois moins d'énergie pour la production que le mono c-Si	Devrait dominer le marché dans les dix prochaines années
Silicium monocristallin	25 ans à 90% Pc 30 ans à 80% Pc	Meilleur rapport puissance/surface	Chère et forte consommation en énergie pour la production	Bon avenir si le coût baisse en améliorant encore le rendement
Silicium amorphe	10 ans	Meilleur coût par Wc	Faible rendement, donc grande surface de capteurs, faible durée de vie	Promis à un grand avenir si amélioration de la durée de vie
Silicium ruban		Croissance rapide du cristal		Décroissance du prix de production dans le futur
CdTe			Utilise certains matériaux toxiques	Décroissance du prix de production dans le futur
CIS			Ressource en Indium limité	Décroissance du prix de production dans le futur

Tableaux II.2 avantages, inconvénients et perspectives des différentes technologies photovoltaïques [21]

II.8. Avantages et inconvénients des cellules solaires

a) **Avantage :**

Les cellules solaires possèdent certains avantages très intéressants :

- D'abord, une haute fiabilité elle ne comporte pas de pièces mobiles - qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du mW au MW.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

b) **Inconvénients :**

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

II.9. CONCLUSION

Dans ce chapitre, j'ai rappelé le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule solaires photovoltaïque et aussi les différents types de cellule solaire et leurs propriétés. Ensuite, nous avons présenté les paramètres essentiels permettant de calculer le rendement d'une cellule solaire à partir de la caractéristique courant-tension avec la modélisation de la cellule solaire et terminer par quelle que avantages et inconvénients des cellules solaires.

Référence de chapitre II

- [1] Article « Électricité photovoltaïque – Principes » Abdelilah SLAOUI, Directeur de recherche, Laboratoire des Sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie (ICUBE),CNRS et Université de Strasbourg p 6,7,8.
- [2] Article « physique des semi-conducteurs : Fondamentaux » Noël SERVAGENT - Ecole des Mines de Nantes,2007.
- [3] Mémoire de Magister « Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride Éolien -photovoltaïque »BELGHITRI HOUDA, 2010.
- [4] Mémoire de Master « Étude de transfert des films minces de silicium monocristallin dans la réalisation de cellule solaire à faible budget thermique » bencherat abdennebi , Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen
- [5] prof Jean-Marie Tarascon Le photovoltaïque: principes et filières inorganiques, organiques, hybrides2 Mars 2011.
- [6] *Mémoire de Master « Amélioration du Rendement Énergétique de Cellules Photovoltaïques en Couches Minces à base de CZTS » BOUDJERAD Fatiha, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2013*
- [7] Mémoire de Magister «MODELISATION DE MODULES PHOTOVOLTAIQUES» MEZIANI Zahra, Univ de Batna, 2012
- [8] : M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa et W. Warta, Progress in Photovoltaics: Research and Applications 2008, 16, 61
- [9] : J.-C. Muller, Techniques de l'Ingénieur, dossier BE8579
- [10] Mémoire Magister « ETUDE DES NOUVELLES GENERATIONS DE CELLULES PHOTOVOLTAIQUES » YACINE Fouad , université de Mohamed Boudiaf(USTO) d'Oran , 2011
- [11]:<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/30292c.pdf>
- [12]:<http://electronique.rivalin.voila.net/manuels/isis6.2.pdf>
- [13]: M. Taguchi, K. Kawamoto, S. Tsuge, T. Baba, H. Sakata, M. Morizane, K. Uchihashi, Nakamura, S. Kiyama et O. Oota, Progress in Photovoltaics: Research and Applications 2000, 8, 503
- [14] : R.R. King, D.C. Law, K.M. Edmondson, C.M. Fetzer, G.S. Kinsey, H. Yoon, R.A. Sherif et N.H. Karam, Applied Physics Letters 2007, 90, 183516
- [15] : B. O'Regan et M. Grätzel, Nature 1991, 353, 737
- [16]: S.E. Shaheen, C.J. Brabec, N.S. Sariciftci, F. Padinger, T. Fromherz et J.C. Hummelen, Applied Physics Letters 2001, 78, 841
- [17]: P. Peumans et S.R. Forrest, Applied Physics Letters 2001, 79, 126
- [18] N.benaoudal,R.Aiouaz et M.Abersi ,(2007),Réponses spectrales et des Caractéristiques I –V des cellules solaires au silicium ,Revue des énergies Renouvelables ICRES-07,Tlemcen.
- [19] site NREL <http://www.pvmeas.com/solarcellspectralresponse.pdf>The document is trying
- [20] site pv ressources <http://www.pvmeas.com/solarcellspectralresponse.pdf>
- [21]Mémoire de Magister «Modélisation du vieillissement d'un module photovoltaïque », Radhia Doumane, université M'hamed BOUGARA de boumerdes ,2011

Chapitre III

Nouveaux matériaux des couches minces du silicium

III.1. Introduction

La microélectronique est un domaine particulièrement exigeant, mais malgré les barrières technologiques qui freinent son évolution, il est toujours distingué par son aptitude à produire régulièrement de nouvelles générations de dispositifs et par une réduction importante de ses composants. Le matériau utilisé principalement pour la fabrication de ces composants est le silicium.

Nous présentons dans ce chapitre les propriétés structurales du matériau à étudier, ensuite nous décrivons les principales techniques d'élaboration utilisées lors de notre travail.

III.2. Les propriétés du matériau

En cristallographie, la structure d'un cristal est complètement décrite par les paramètres de réseau : sa maille élémentaire, son groupe d'espace et la position des atomes. Comme beaucoup d'autres éléments le silicium peut exister sous différentes structures, dont les deux extrêmes sont respectivement l'état cristallin et l'état amorphe. [1]

III.2.1. Le silicium monocristallin

Dans un cristal idéal de silicium, les atomes sont arrangés selon la structure diamant avec une distance interatomique $d = 2.37 \text{ \AA}$ (Figure .III.1).

La liaison entre les atomes les plus proches est de caractère de type $3sp^3$ (angle de liaison $109^\circ 28'$). À ce type de liaison correspond des états électroniques qui sont couplés entre eux dont le potentiel périodique dans le cristal, conduisant à des bandes d'énergie permises et interdites pour les électrons.

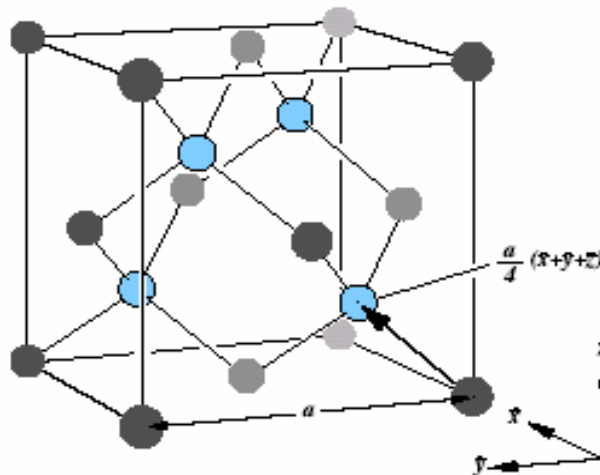


Figure .III.1 : Maille cubique conventionnelle de la structure diamant. [1]

La bande interdite (gap), séparant la bande de valence pleine à 0°K et de la bande vide de Conduction à 0°K , est égale à $g E = 1.12 \text{ eV}$ (Figure.III.2).

L'importance du gap, $g E$ détermine l'échange des porteurs de charge entre les différentes bandes d'énergie et ainsi les propriétés électroniques du semi-conducteur.

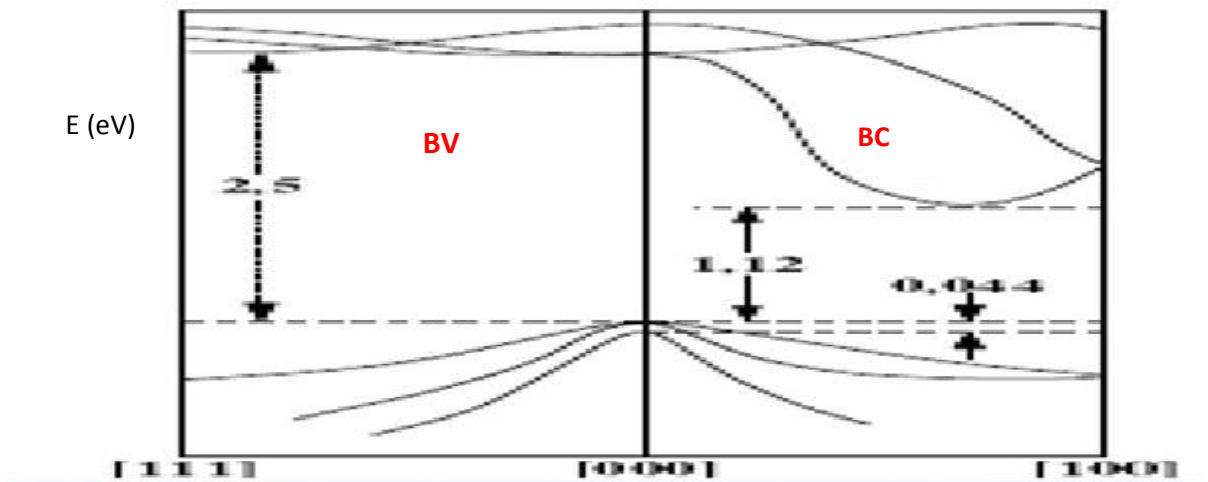


Figure.III.2 Bandes d'énergie dans le silicium. [2]

III.2.2. Le silicium amorphe

Le silicium amorphe a-Si présente de faible variation de longueur et d'angle de liaison qui a pour conséquence d'éliminer l'ordre après quelques distances atomiques (Figure.III.3-a). À cause de ce désordre, des distorsions apparaissent dans le réseau, induisant une distribution des états électroniques, ce qui se traduit par l'apparition d'états localisés dans la bande interdite en haut de la bande de valence et en bas de la bande de conduction. Ils forment ce qu'on appelle les queues de bande (Figure.III.3-b). [1]

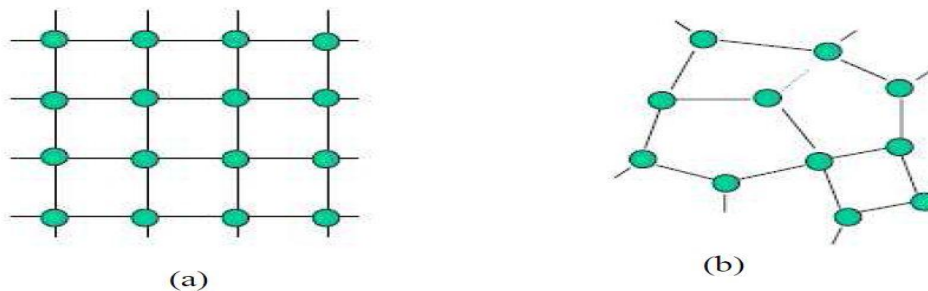
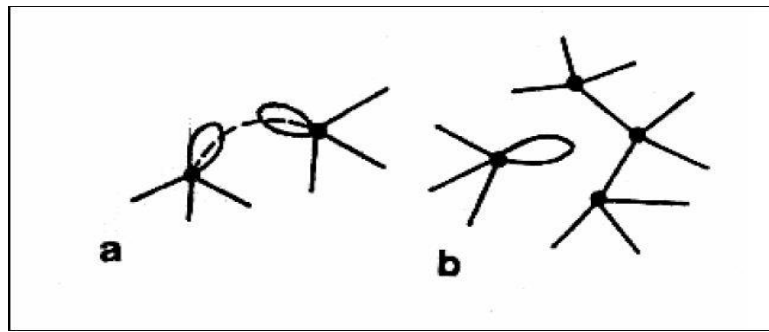


Figure.III.3: vue schématique de l'arrangement atomique dans la structure: (a) cristalline, (b) amorphe. [1]

D'autre part, ces distorsions peuvent donner lieu à la formation des liaisons pendantes (Figure.III.3). Ces dernières ont une très grande influence sur les propriétés électroniques du silicium amorphe. Elles sont caractérisées par la présence d'un électron célibataire de l'atome concerné. Un second électron peut aisément s'y fixer, pour former une paire d'électrons, le centre est alors chargé négativement. Les liaisons pendantes constituent de ce fait des pièges à électrons très efficaces. L'électron célibataire peut aussi éventuellement quitter l'atome, laissant un centre chargé positivement.



*Figure.III.4 : Représentation schématique de la structure atomique :
a- une paire de liaisons pendantes.
b- une liaison pendante isolée [3].*

Le silicium amorphe est distingué du silicium cristallin par des avantages telles que [1]:

- Possibilité de le déposer sur des grandes surfaces;
- Possibilité de le déposer sur des surfaces non planes ou souples : intéressant pour la déposition sur cylindres ou sphères (axes de symétrie) ;
- Facilité de fabrication;
- Forte absorption de la lumière visible;
- Peu de dégradation par les rayons X;
- Bande interdite plus élevée (1,75 eV; 1,12 eV pour le silicium cristallin), qui permet d'obtenir des courants inverses dans l'obscurité plus faible.

Le silicium amorphe a aussi quelques inconvénients [1]:

- Beaucoup de défauts, dans la structure;
- Faible mobilité des porteurs libres;

Après comparaison des avantages multiples du silicium amorphe et des inconvénients cités ci-dessus, il ne faut pas conclure que ce matériau va remplacer le silicium cristallin dans un proche avenir. Par contre, il est possible de tirer partie de certains avantages du silicium amorphe afin de développer de nouvelles applications pour lesquelles le silicium cristallin ne peut être ou est difficilement utilisable : principalement les technologies qui nécessitent des grandes surfaces (macro-électronique), ou des surfaces non planes.

La plus connue de ces applications est la cellule photovoltaïque; utilisée le plus souvent dans des alimentations qui nécessitent de petites puissances, ce type de cellule solaire est assez répandu dans les calculatrices, les montres ou les chargeurs de batteries.

Les trois autres applications actuellement en production industrielle grandissante sont:

- les applications téléfax.
- les applications de Xérographie (photocopie et impression laser): tant pour les photocopieuses que pour les imprimantes laser, le silicium amorphe est actuellement utilisé dans certains modèles de la firme canon comme matériau photoconducteur; il a le grand avantage d'être mécaniquement beaucoup plus résistant que ses concurrents, qui sont en général le sélénium amorphe, ou des semi-conducteurs organiques. Dans cette application, la surface photoconductrice sert également de support au toner, elle devra être mise en contact direct avec la feuille (lors du transfert du toner); l'utilisation d'un matériau beaucoup plus résistant mécaniquement augmente de façon non

négligeable la durée de vie du dispositif (durée de vie prolongée d'un facteur 10 environ).

- les écrans plats (technologie TFT): le silicium amorphe est actuellement utilisé de plus en plus dans la confection d'écrans d'ordinateurs portables; la possibilité d'utiliser de grandes surfaces, ainsi que la technologie des transistors en couches minces (TFT), rend cette dernière application pratique réalisable avec le silicium amorphe [5].

III.2.3. Le silicium amorphe hydrogéné

Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) est un matériau issu de la famille des semi-conducteurs; cette forme de semi-conducteurs a été découverte vers le début des années soixante; dans un premier temps elle n'était pas utilisable car elle avait beaucoup trop de défauts, mais vers la fin des années soixante, Chittick et al [4] observa qu'en déposant le silicium amorphe par un plasma de silane (SiH_4), plus de 99,9 % des défauts étaient saturés par l'hydrogène, ce qui rendait ce matériau utilisable comme semi-conducteur. Dès cette découverte, il fit l'objet de recherches intensifiées. La recherche de nouvelles ressources énergétiques, ainsi que de nouvelles applications en font un matériau actuellement encore en pleine évolution.

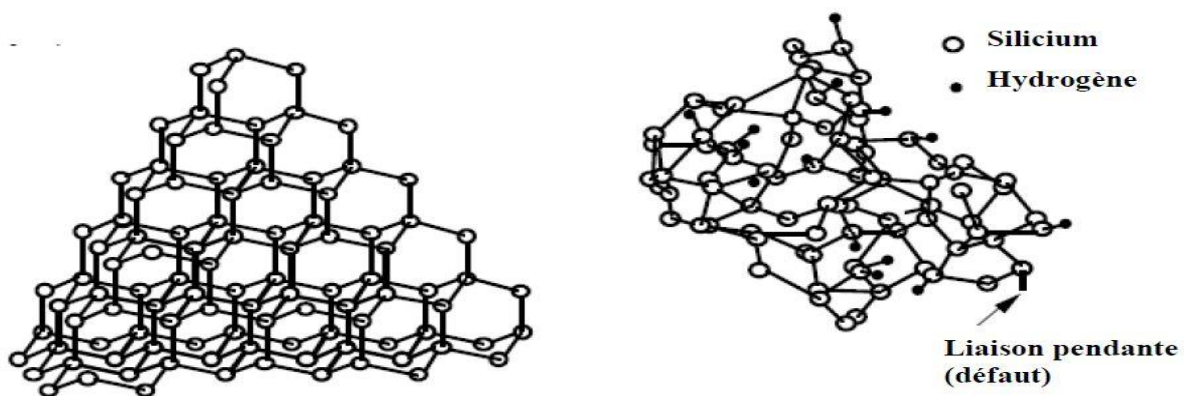


Figure.III.5: structure cristalline et amorphe du silicium [5].

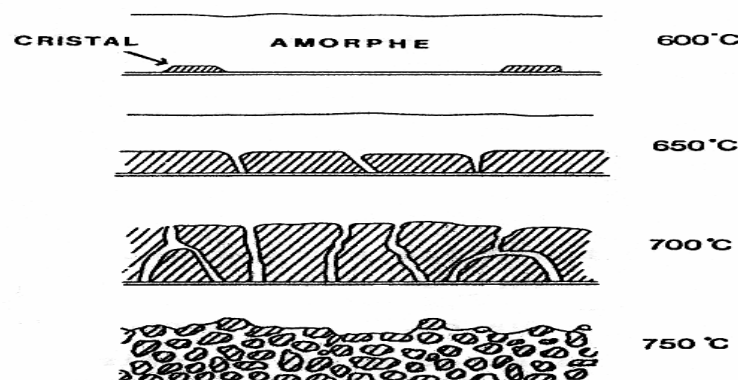


Figure III.6 : Illustration de la structure des couches minces à diverses températures [10]

III.2.4. Le silicium polymorphe

Depuis les premiers dépôts du pm-Si:H de nombreuses études lui ont été consacrées et toutes s'accordent à dire qu'il possède de meilleures propriétés électroniques et de transport par rapport au silicium amorphe hydrogéné standard et qu'il est plus stable par rapport à l'effet Staebler-Wronski.

En quoi diffère-t-il du a-Si:H ? Le silicium polymorphe est un matériau nanostructure consistant en des agrégats de silicium et/ou des cristallites de taille nanométrique incorporés dans une matrice amorphe relaxée.

Ces nano éléments ne sont pas détectables par la spectroscopie Raman ou par la diffractométrie de rayons X (XRD) ; ils ne peuvent être observés que par la microscopie électronique en transmission à haute résolution (HRTEM) [6]. La différence fondamentale est donc la présence de ces nanoparticules qui induit une différence structurale entre les deux matériaux et qui serait à l'origine des bonnes propriétés du pm-Si:H. montre une image HRTEM du pmSi:H. On peut y observer des cristallites de 4 nm de diamètre entourées en rouge baignant dans la matrice noncristalline. Le pm-Si:H peut-être considéré comme un matériau hétérogène compte tenu de sa microstructure.

III.2.5. Le silicium microcristallin

Le silicium microcristallin hydrogéné ($\mu\text{c-Si:H}$) a été fabriqué pour la première fois par Veprek et Maracek en 1968 [7]. C'est un semi-conducteur à gap indirect comme le silicium cristallin ; il absorbe plus que le silicium cristallin dans le visible et plus que le silicium amorphe hydrogéné dans le rouge et le proche infrarouge.

Pour les applications photovoltaïques, il nécessite une épaisseur de l'ordre du micromètre (1-4 μm) mais ces couches sont en général plus épaisses que celles du silicium amorphe et polymorphe. Les premières cellules p-i-n à base de $\mu\text{c-Si:H}$ [8] et tandem [9] à base de $\mu\text{c-Si:H}$ et a-Si:H ont été réalisées respectivement en 1993 et 1994 par un groupe de l'université de Neuchâtel.

Le $\mu\text{c-Si:H}$ présente une structure particulière qui consiste en une interface amorphe avec le substrat sur laquelle croissent les cristallites. Celles-ci forment deux parties distinctes : la couche de volume qui est fortement cristallisée au-dessus de laquelle se trouve la sous-couche qui est moins cristallisée. Qualitativement, sa structure peut être décrite comme un ensemble de cristallites de silicium dont la taille s'étend de l'ordre du nanomètre à l'échelle du micron baignant dans une phase amorphe de silicium. Contrairement au silicium polymorphe, la mesure de spectroscopie Raman donne une signature claire de ce matériau et est utilisée pour déterminer la fraction cristalline. Ce dernier paramètre et la taille des cristallites sont très déterminants pour les propriétés électroniques du $\mu\text{c-Si:H}$ dans la mesure où les joints de grains aussi bien que les surfaces des cristallites sont à l'origine de défauts dans ce matériau. Il a été observé que le matériau peut contenir des fissures et des zones vides qui, dans un dispositif, peuvent provoquer des shunts électriques si elles ne sont pas bien passivées par l'hydrogène. Par ailleurs, plusieurs études menées sur le matériau [10, 11] et sur des cellules p-i-n [20] ont montré que le $\mu\text{c-Si:H}$ n'est pas sensible à l'effet Staebler-Wronski. Cependant, il n'est pas exclu que, selon les conditions de dépôt, certaines couches puissent légèrement se dégrader sous illumination prolongée.

Le silicium microcristallin hydrogéné, de par sa structure et ses propriétés notamment son gap de mobilité, vient en complément au silicium amorphe dans les applications photovoltaïques. Je reviendrai sur ce point dans la section I.3. Le *tableau III.1* donne les principaux paramètres

caractéristiques du silicium amorphe, polymorphe et microcristallin à savoir le gap de Tau (E_g), la longueur de diffusion ambipolaire (L_d), le produit mobilité-durée de vie des électrons ($\mu_n \tau_n$) et la densité d'états à la position 0,5 eV dans le gap au-dessous du bord de la bande de conduction.

Matériau	E_g (eV)	L_d (nm)	$\mu_n \tau_n$ ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1}$)	$N(0,5 \text{ eV})$ ($\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1}$)
a-Si:H	1,6-1,85	140-170	$1-5 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{15} - 10^{17}$
pm-Si:H	1,8-1,95	180-240	$7 \times 10^{-6} - 10^{-5}$	$7 \times 10^{14} - 10^{16}$
$\mu\text{c-si:H}$	1,1-1,4	150-280	$10^{-6} - 10^{-5}$	$5 \times 10^{16} - 10^{17}$

Tableau III.1 : Quelques paramètres caractéristiques de matériaux généralement utilisés dans le silicium.

III.3. Méthodes d'élaboration des couches minces de silicium amorphe [1]

Tous les procédés de dépôt des couches minces contiennent quatre parfois cinq étapes successives. La source qui constitue le matériau de base du film mince à élaborer peut être un solide, un liquide, une vapeur ou un gaz. Lorsque le matériau est solide, son transport vers le substrat s'effectue par vaporisation, ce qui peut être réalisé par: évaporation thermique, canon à électron, ablation laser ou par pulvérisation. L'ensemble de ces méthodes est classé sous le nom de dépôt physique en phase vapeur PVD (Physical Vapor Deposition). La source solide est occasionnellement transformée en vapeur. Dans d'autre cas, le matériau de base est sous forme d'un gaz ayant une pression cette vapeur suffisante pour qu'il soit transporté à des températures modérées. Les procédés qui utilisent comme matériau de base les gaz, les liquides évaporés ou les solides évaporés par voie chimique sont connus sous le nom de dépôts chimiques en phase vapeur, CVD (Chemical Vapor De position) [5].

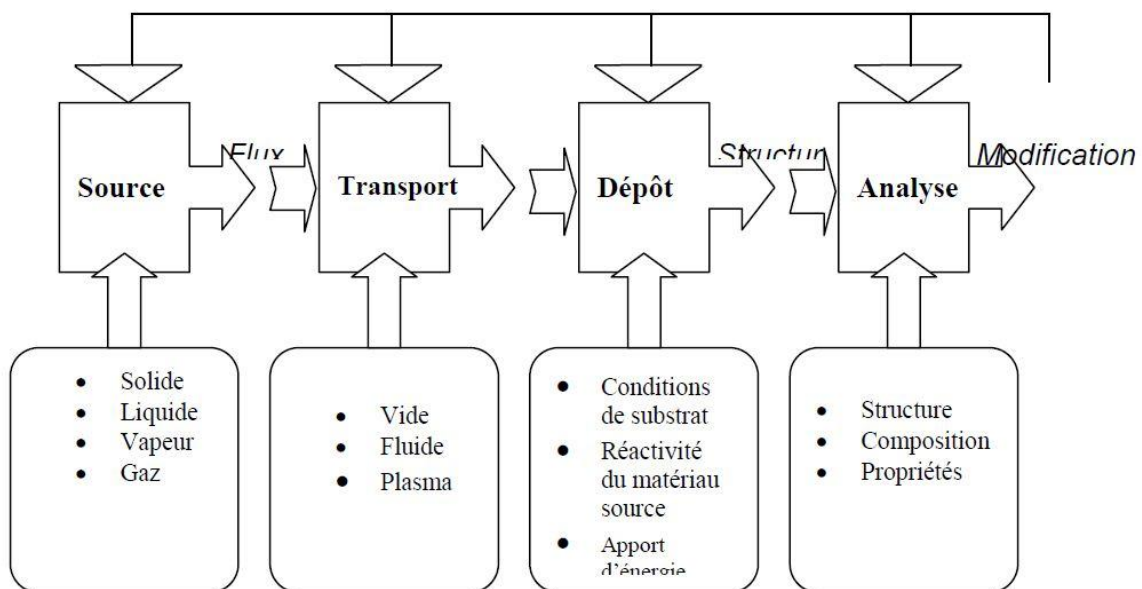


Figure.III. 7 : Diagramme des étapes du procédé de fabrication des couches minces

III.3.1. Implantation ionique

L'implantation ionique est une technique de dopage sélectif de matériau semi-conducteur dont les principes de base ont été élaborés en 1954 par Schottky. Cette méthode a connu des développements et des améliorations considérables dans les années 1960.

*) Interaction des faisceaux d'ions avec la matière

L'implantation ionique (Figure III.8) est un procédé qui consiste à modifier la composition superficielle du matériau en faisant pénétrer des ions possédant une énergie suffisante. Cette énergie est fournie par accélération dans un champ électrique. Les ions possédant une énergie supérieure à quelques centaines d'eV peuvent traverser la surface en provoquant une succession de collisions avec les atomes du matériau.

Sous l'effet de ces collisions, les ions ont une trajectoire aléatoire. Mais à chaque collision, les atomes heurtés peuvent reculer et entrer eux même en collision avec d'autres atomes, un seul ion d'une centaine de Kev peut rencontrer une bonne centaine d'atomes ou provoquer directement et indirectement la formation de défauts cristallins.

Par ailleurs, si le faisceau ionique est suffisamment intense, des atomes superficiels seront éjectés, c'est le phénomène de pulvérisation. Au cours de la pulvérisation du matériau en surface, diverses émissions ont lieu.

La *Figure III.8* montre l'ensemble des phénomènes se produisant à la surface. Les ions incidents qui ne sont pas rétrodiffusés, pénètrent dans le matériau où ils subissent des interactions avec la matière. Ils perdent leurs énergies selon deux processus décrits par la théorie LSS (Lindhard Schaff et Schiott):

- Collisions élastiques directes avec les atomes du matériau qui donnent lieu à des changements rapides de quantité de mouvement ainsi que des transferts importants d'énergie cinétique.
- Interaction avec le cortège électronique qui peut être traitée comme une force de frottement sur la particule en mouvement. Elle peut donner lieu à des ionisations et/ ou excitations.

Les parcours des ions seront donnés par une distribution de probabilité qui permet de déterminer le profil de concentration des ions implantés. Ce profil peut être représenté par une gaussienne caractérisée par un parcours projeté R_P et l'écart- type ΔR_P :

$$C(x) = \frac{d}{\sqrt{2\pi} N \Delta R_P} \exp \left[- \frac{(x - x_P)^2}{2 \Delta R_P^2} \right] \quad (\text{III.1})$$

Dans la pratique, les valeurs de R_P et ΔR_P , ainsi que leur profil de concentration seront calculées à l'aide d'un programme de simulation.

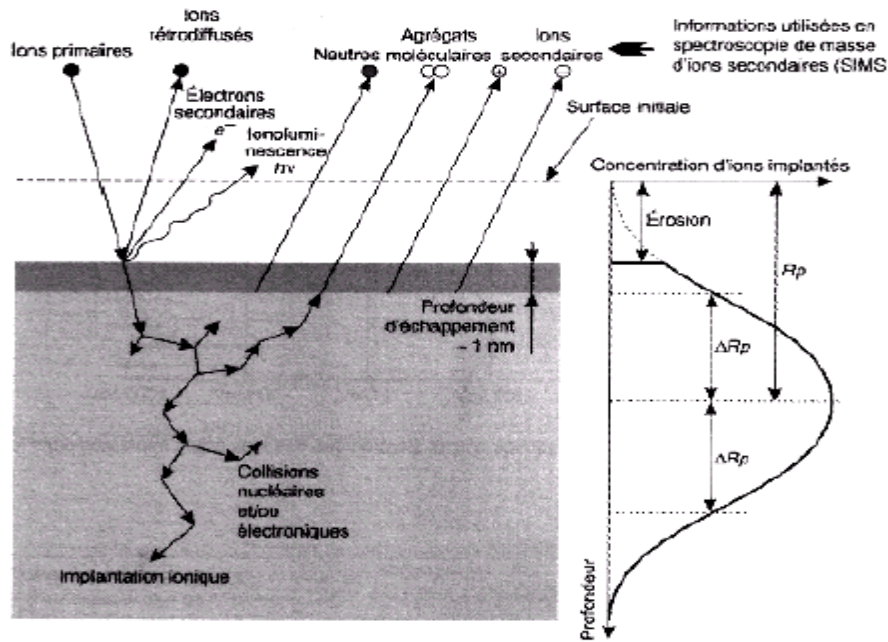


Figure III.8 : phénomènes de surface dû à l'implantation ionique.

III.3.2 .La pulvérisation cathodique

La pulvérisation est le phénomène par quoi le matériau est enlevé sous une forme atomique, suite à un bombardement par des atomes énergétiques accélérés par un champ électrique intense. Un schéma de principe de la pulvérisation est représenté sur la *Figure III.7* où la cible est polarisée négativement (la cathode), l'anode est le support du substrat. L'enceinte se trouve sous pression réduite d'Argon environ 10^{-3} Torr. Des différences de potentiel de 3 à 5 KV provoquent la décharge (l'ionisation) du gaz d'Argon, et accélèrent ses ions vers la cible. Cette dernière subit une série de collisions des ions accélérés, qui s'achèvera par une éjection de ses atomes.

L'intérêt de cette méthode est la possibilité d'un meilleur contrôle du contenu en hydrogène dans la couche (en faisant varier sa pression partielle dans le gaz). Suivant la nature de la tension. Continue ou alternative, appliquée entre la cible et le substrat, on distingue deux modes de pulvérisation :

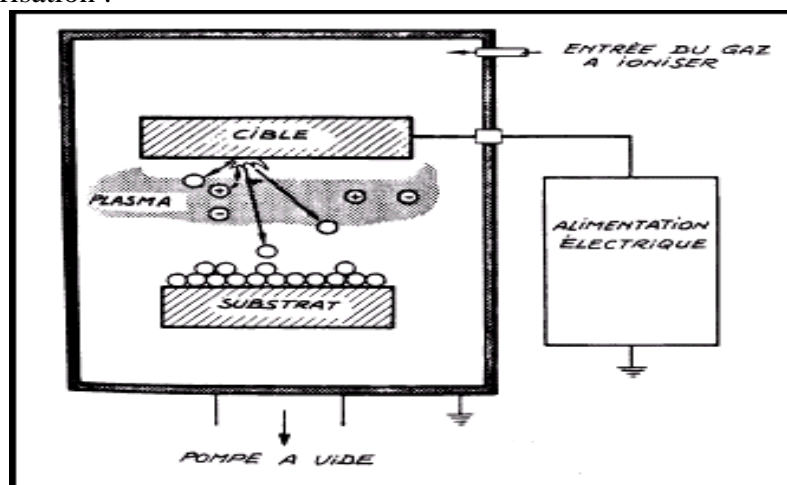


Figure. III.9: Principe général de fonctionnement de la pulvérisation Cathodique [6].

III.3.2.1 La pulvérisation DC

La tension appliquée au cours de la pulvérisation DC est une tension continue (de 3 à 5 KV) Cette méthode ne peut pas être utilisée avec des cibles isolantes, car il y'aura une accumulation des charges positives sur la cible, ce qui conduira à annuler le champ provoquant l'ionisation. La solution du problème posé est l'utilisation d'une tension alternative entre les deux électrodes est utilisée exclusivement dans l'élaboration des couches minces métalliques ou semi-conductrices.

Elle exige des pressions de travail élevées de l'ordre de 10^{-1} à 10^{-2} mbar.

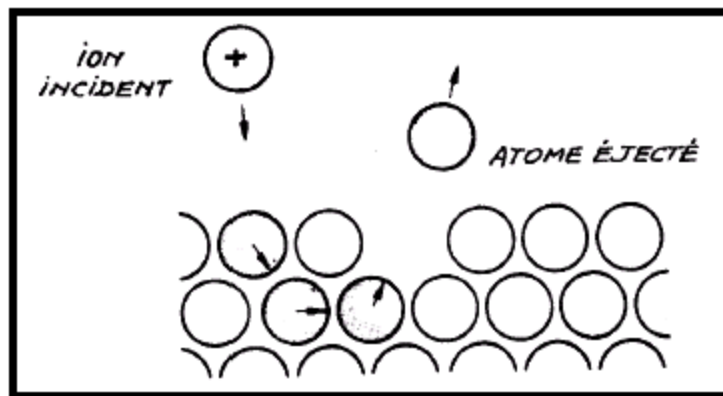


Figure. III.10: Phénomène de collisions sur les atomes de la cible matériau à pulvériser.

III.3.2.2 La pulvérisation radio fréquence RF

On polarise la cathode par un signal alternatif radiofréquence à 13.56 MHz. Au cours de l'alternance négative. Les ions sont attirés par la cible (situation semblable à DC). Pendant l'alternance positive. Ce sont les électrons qui vont être attirés par la cible et neutralisent ainsi la charge positive qui est apparue lors de l'alternance précédente. Vu leur grande inertie, les ions ne sentiront pas la fréquence contrairement aux électrons. Ainsi la cible sera en permanence bombardée par des électrons qui vont la charger négativement (auto polarisation). Cette tension d'auto polarisation joue le rôle de la tension accélératrice pour les ions qui vont pulvériser la cible.

Les puissances RF utilisées sont généralement supérieures à 100 W. Cependant dans la méthode de dépôt par décharge lumineuse elles ne dépassent guère 70W. Ceci résulte de l'énergie de dissociation du silane qui est plus faible de celle de l'ionisation de l'Argon.

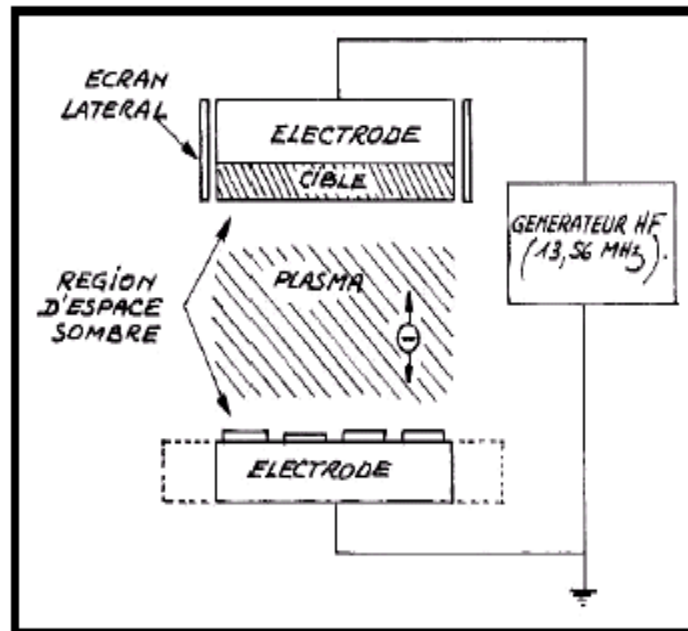


Figure. III.11: Principe de fonctionnement de la pulvérisation RF.

III.3.2.3 La pulvérisation magnétron

Afin d'augmenter le taux d'ionisation, on utilise la pulvérisation magnétron qui consiste à placer un aimant sous la cible, dont le champ magnétique fait tourbillonner les électrons, ce qui augmente le taux d'ionisation du plasma. Par conséquent, les vitesses de dépôt sont élevées, tout en minimisant l'échauffement du substrat (figure. III-10).

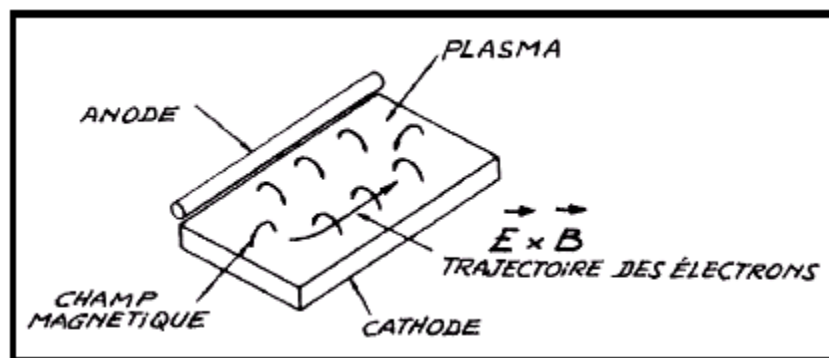


Figure. III.12: Illustration du fonctionnement d'une cathode magnétron.

III.3.3. L'évaporation sous vide

Dans cette méthode, les films déposés après évaporation du silicium par un canon à électrons. L'évaporation sous vide peut produire des films jusqu'à 20 μ m d'épaisseur. Cette méthode exige certaines conditions telle que : L'ultravide, un taux assez lent d'évaporation. Cependant, les films produits par évaporation dans un vide sans doute contiennent quelque oxygène ce qui tend à stabiliser les films contre la cristallisation sous chauffage .

III.3.4 .Les techniques basées sur la décomposition chimique en phase vapeur (C.V.D)

Les techniques d'élaboration des couches minces ont connu lors de ces dernières décennies un développement considérable. Le matériau qui a fait un immense succès pour la réalisation des couches minces est le silicium. Il possède des propriétés électriques et des structures mécaniques très convenables. Les dépôts chimiques en phase vapeur ou CVD (Chemical Vapor De position) sont des méthodes qui permettent de former des couches minces solides non volatiles sur un substrat, par des réactions chimiques avec des gaz. Il existe plusieurs types de procédés CVD. Le dépôt CVD assisté par plasma (ou PECVD : Dépôt en Phase Chimique assisté par Plasma ou Plasma Enhanced Chemical Vapor De position) est l'une de ces méthodes.

III.3.4.1. Le dépôt chimique en phase vapeur conventionnelle (CVD)

Le principe général du dépôt chimique à partir d'une phase gazeuse (C. V. D : Chemical Vapor De position) est de recouvrir un substrat par un revêtement solide que l'on fait croître à partir de réactifs gazeux. Il existe un intervalle de températures très étroit autour de 600°C, où la vitesse de dépôt du silicium amorphe est approximativement 1µm/heure, le dépôt obtenu est alors amorphe.

Le dépôt chimique en phase vapeur permet de produire des films minces dont les propriétés sont contrôlées. Les applications de ce procédé sont nombreuses. Elles concernent principalement : la microélectronique (isolants, semi-conducteurs, couches conductrices entrant dans la fabrication des transistors et des circuits intégrés, supraconducteurs), l'optique (lasers, fibres optiques), photovoltaïque (conversion du rayonnement solaire,...), la protection des pièces massives sensibles aux agressions mécaniques et/ ou chimiques, l'amélioration des propriétés de surface.

Le processus de dépôt est imité par des réactions chimiques qui peuvent être :

- Activées thermiquement (LPCVD, APCVD);
- Assistées par un plasma (PCVD, PECVD).

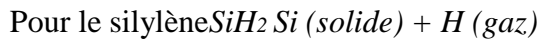
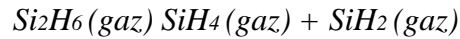
La décomposition thermique présente une faible concentration d'hydrogène, par contre pour celle assistée par un plasma, la concentration d'hydrogène est comprise entre 5 à 30 %.

Une opération de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) activée thermiquement comporte généralement sept étapes :

- Transfert de matière dans la phase gazeuse, de l'entrée du réacteur jusqu'à la surface du dépôt. Apport par conversion des espèces gazeuses jusqu'au voisinage du substrat;
- Réaction en phase gazeuse (pendant le transfert);
- Absorption du gaz précurseur sur la surface du solide;
- Diffusion des molécules absorbées en surface jusqu'aux sites de croissance;
- Réaction chimique éventuelle en surface : incorporation des atomes de dépôt (nucléation croissance);
- Désorption des produits de réaction;
- (a) transfert de matière des produits de réaction depuis la zone de dépôt jusqu'à la sortie du réacteur; (b) diffusion éventuelle d'atomes du dépôt vers le substrat.

Les gaz les plus couramment utilisés sont le silane (SiH_4) et à un degré moindre le di silane (Si_2H_6) ou le dichlorosilane (SiH_2Cl_2) pour ne mentionner que les plus importants.

Le di silane se décompose en phase gazeuse ($T > 300^\circ\text{C}$), en silane et silylène suivant la réaction suivante :



La vitesse de dépôt peut être ramenée à une expression de la forme :

$$V_d = Cte \cdot f(k_s, h_g) \cdot Y \quad (\text{III.2})$$

Où k_s et h_g sont respectivement les constantes de vitesse de réaction et le coefficient de transfert de masse en phase gazeuse ;

Y : La fraction molaire des espèces réactants.

Cette vitesse de dépôt obéit à deux cas selon la prépondérance de h_g devant k_s ou inversement. Si $h_g > k_s$ la vitesse V_d se ramène à :

$$V_d = Cte \cdot k_s \quad (\text{III.3})$$

Comme k_s , la vitesse de dépôt V_d est activée thermiquement et prend la forme d'une loi d'Arrhenius :

$$V_d = V_{d0} * \text{Exp} \left(-E_{ad} / KT \right) \quad (\text{III.4})$$

Où V_{d0} est une constante qui dépend de la pression et des débits et $-E_{ad}$ l'énergie apparente d'activation du dépôt.

III.3.4.2 .Le dépôt chimique en phase vapeur à pression atmosphérique (APCVD)

Cette technique a été utilisée à l'origine pour des dépôts CVD de semi-conducteurs, surtout à des températures très élevées autour de 1000 °C. Plus que pour le dépôt du silicium polycristallin ou amorphe, cette méthode était employée pour la croissance épitaxiale de couches de silicium, ce qui est possible même à de température autour de 600 °C en utilisant du SiH_4Cl_2 et des systèmes de purification de gaz .Dans ce cas les vitesses de croissance ne sont plus très grandes (1 nm/ min). Les taux de transfert des espèces gazeuses et celle de la réaction de surface sont voisins.

Dans le domaine de fabrication des couches amorphes à environ 600 °C, les vitesses atteignent environ 5-10 Å/ sec .Dans l'industrie, l'APCVD a été largement remplacée par les dépôts à basse pression, car, dans ce cas, les espèces réactives diffusent plus rapidement, l'uniformité des dépôts s'en trouve améliorée.

III.3.4.3. Le dépôt chimique en phase vapeur à basse pression (LPCVD)

Le dépôt chimique en phase vapeur à basse pression dit LPCVD est aujourd'hui la méthode la plus répandue dans l'industrie micro électronique et s'effectue dans un réacteur tubulaire horizontal à paroi chaud. Dans cette technique, les molécules du gaz réactif sont décomposées à basse pression (2 mbar) par voie thermique.

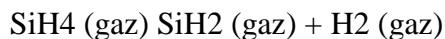
En fonction des conditions de pression et de température, des réactions de dissociation ou de formation des molécules se produisent de façon homogène ou hétérogène.

A basse pression, le taux de transfert des espèces gazeuses vers le substrat et des produits de réaction à partir du substrat devient très élevé et la réaction n'est limitée alors que pour la vitesse de réaction de surface. Les vitesses de dépôts se situent autour de 50-100 Å/ min. Cette technique traite un grand nombre de plaquettes lors d'un même cycle de dépôt en obtenant des couches de bonne qualité et d'épaisseur uniforme sur toutes les plaquettes avec une réduction de température et une faible consommation de gaz mais, son inconvénient majeur est la limitation de température car certains réacteurs chimiques ont besoin de très hautes températures qui dépassent la température que le substrat doit supporter, ce qui entraîne la détérioration de ce dernier ou la modification des propriétés physiques du matériau.

III.3.4.4. Le dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD)

Cette technique consiste à réaliser un dépôt chimique en phase vapeur à basse pression, ce dépôt s'effectue normalement dans un four à mur chaud à des températures de l'ordre de 600°C. Le gaz réactif est ionisé par formation d'un plasma généré par un champ électrique alternatif d'une fréquence de 13.56 MHz (cas général).

Turban [15] a étudié en détail les mécanismes de dissociation du silane dans un tel plasma :



Les produits de cette réaction sont des ions d'hydrures de silicium qui vont venir réagir à la surface d'un substrat porté à une température d'environ 250 °C pour éviter de briser les liaisons Si-H. Du fait de la faible température de la surface de dépôt, l'hydrogène n'exodiffuse pas et par conséquent le matériau obtenu est hydrogéné. La teneur en hydrogène des couches déposées varie selon des conditions expérimentales et est typiquement de l'ordre de 10% ou bien 20% dans notre cas. D'autre part, toujours à cause de la relative basse température du substrat, les conditions généralement utilisées aboutissent à un dépôt amorphe.

Le rôle du plasma est de mettre en jeu des espèces chimiquement plus actives ce qui permet d'abaisser la température du substrat nécessaire pour induire la réaction chimique. Ces espèces sont produites :

*) soit par des collisions entre les molécules de gaz et les électrons énergétiques présents dans le plasma.

*) soit à la surface du solide lors de l'impact ions-électrons ou de photons issus du plasma.

Les phénomènes physico-chimiques mis en jeu sont très complexes car ils impliquent l'interaction des particules de types différents dans le plasma et à la surface du substrat et les produits de réaction sont formés de différentes façons (cassures de liaisons existantes, création de nouvelles liaisons, ...).

La polyvalence des méthodes de dépôt en phase vapeur est, par principe, limitée par la nécessité de disposer d'un composé gazeux du solide à élaborer.

Beaucoup de métaux, de semi-conducteurs et isolants peuvent cependant être élaborés en couches minces par ces techniques. De plus, elles sont économiques et permettent de traiter un grand nombre de tranches simultanément avec une bonne uniformité de composition et d'épaisseur.

L'inconvénient du procédé CVD est que les connaissances thermodynamiques sont parfois insuffisantes, des températures souvent élevées, les gaz utilisés en CVD et les produits des réactions souvent toxiques, explosives ou corrosifs avec dans certains cas un temps de réaction long. La figure III-11 donne un aperçu de la configuration du système de dépôt VHF-GDPECVD.

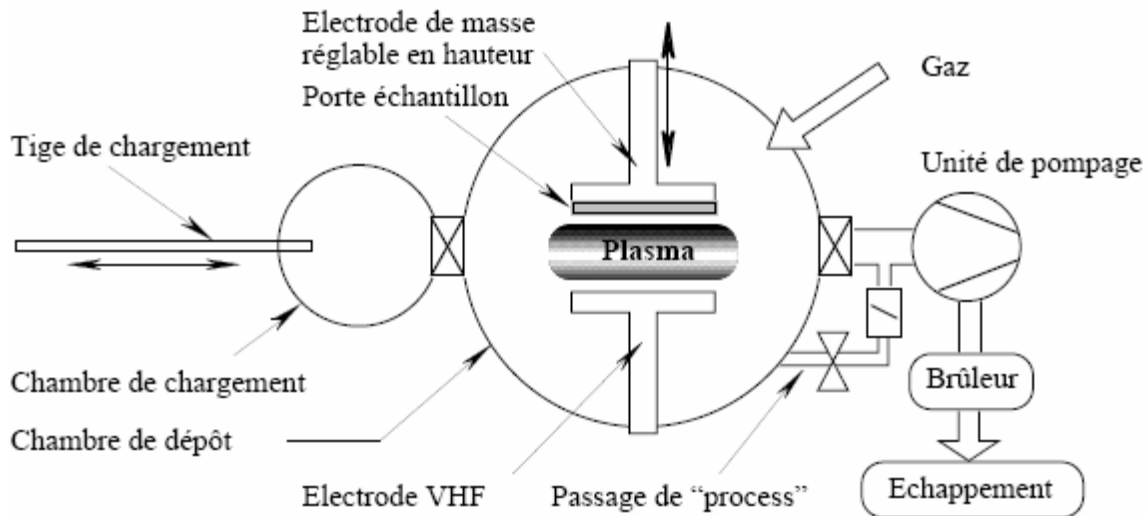


Figure III.13 : Schéma du système de dépôt par VHF GD-PECVD.

III.4. Les différent Cellules photovoltaïques de silicium en couche minces

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque en silicium non cristallin est une diode p-i-n. Elle se compose de trois couches respectivement dopée p, intrinsèque et dopée n. Les performances peuvent être améliorées en superposant plusieurs cellules p-i-n fabriquées avec des matériaux de gaps différents. Elles sont empilées dans le sens décroissant des gaps en partant de la face qui est exposée à l'éclairage. Ces cellules sont appelées cellules à multijonctions (cellules tandem dans le cas de deux cellules p-i-n). [12]

III.4.1 Physique d'une cellule p-i-n

Dans une jonction p-n classique soumise à un éclairage, deux catégories de porteurs contribuent au photocourant selon le lieu où ils ont été créés. Les paires électron-trou générées dans les zones neutres n et p produisent un courant de diffusion pendant que celles générées dans la zone de charge d'espace sont à l'origine du courant de dérive qui est produit sous l'action du champ électrique interne qui règne dans ladite zone.

Pour obtenir de grandes valeurs de courant de diffusion, il faut que le matériau ait une longueur de diffusion suffisamment grande. Les matériaux amorphes non dopés de bonne qualité ont généralement des valeurs de longueurs de diffusion comprises entre 150 et 280 nm, valeurs qui sont divisées par 1000 quand le matériau est dopé. Ce sont là de bien faibles longueurs de diffusion comparées à celles du silicium cristallin qui sont comprises entre 40µm et 3 mm (elles dépendent du dopage et de la pureté du matériau). Pour cette raison, on privilégie, pour les couches minces, le courant de dérive et donc les porteurs générés dans la zone de transition (encore appelée zone de déplétion par référence à la dénomination anglaise indiquant qu'il s'agit d'une zone appauvrie en porteurs libres). L'amélioration des

performances de la diode p-i-n en dehors de la qualité du matériau passe aussi par l'optimisation de la zone de déplétion. [12]

Artificiellement, on arrive à l'élargir en intercalant une couche intrinsèque entre les couches n et p. A cause de la faible longueur de diffusion du matériau, cette couche a généralement une épaisseur inférieure à 500 nm. Les porteurs sont donc essentiellement générés dans la couche intrinsèque. Les couches dopées ne servant qu'à établir le champ interne et ne participant pratiquement pas à la génération des porteurs ont des épaisseurs comprises entre 10 et 20 nm. Sur la figure I.3 sont présentés les schémas de la structure (a) et du diagramme de bande (b) d'une diode p-i-n. Le contact avant est généralement de l'oxyde transparent conducteur (TCO) et le contact arrière un métal, de l'aluminium ou de l'argent.

Comme le montre la figure I.4, chaque type de porteur photo généré dérive vers la couche dopée où il est majoritaire. Les trous ayant une mobilité 10 fois inférieure à celle des électrons, il est préférable que les paires de porteurs soient générées près de la couche p pour raccourcir le parcours des trous et ainsi obtenir une meilleure collecte. Pour cette raison la cellule ou le module photovoltaïque en couches minces est en général éclairé du côté de la couche dopée p.

Les cellules p-i-n en silicium amorphe ou microcristallin sont bon marché et leur fabrication consomme peu d'énergie. Cependant, à cause de leur faible rendement, leur utilisation a longtemps été limitée aux petits systèmes à faible consommation électrique. Mais aujourd'hui, avec l'amélioration des rendements leur champ d'application s'est élargi. Les meilleurs rendements stabilisés rapportés pour ces deux matériaux et pour des cellules simples jonction (cellule p-i-n) sont compris entre 9 et 10% [13].

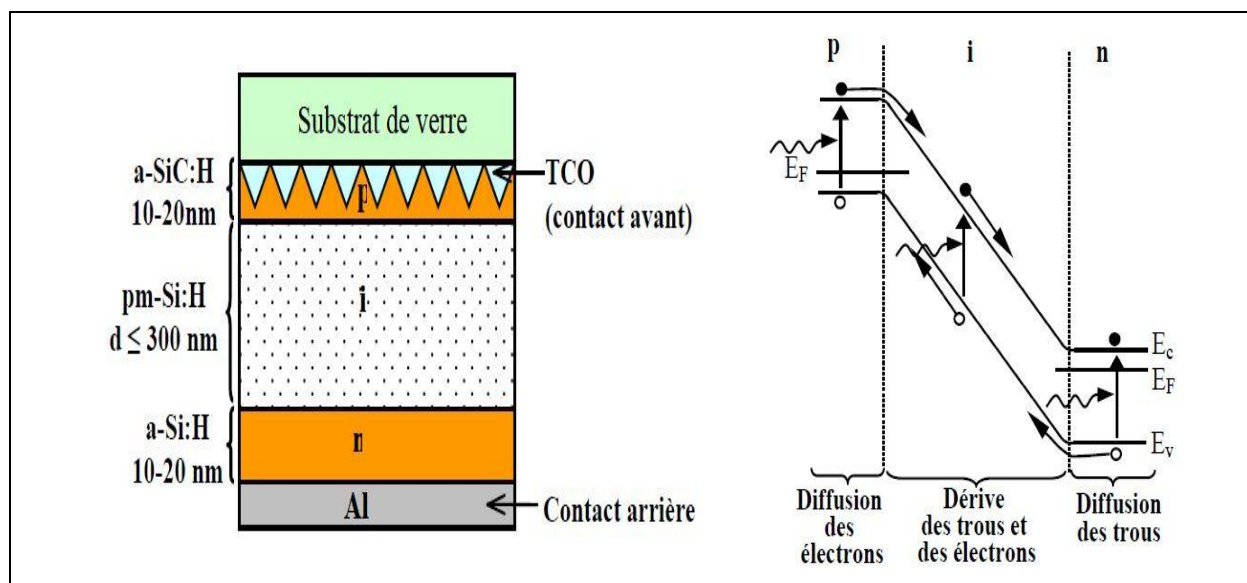


Figure III.14: (a) Structure d'une cellule p-i-n. (b) Mécanisme de transport des porteurs photo générés dans une diode p-i-n. [12]

III.4.2. La cellule tandem a-Si:H/ μ c-Si:H

La cellule tandem est l'empilement monolithique de deux cellules p-i-n dont les domaines d'absorptions spectraux se chevauchent. La cellule avant est faite avec le matériau ayant le plus grand gap. Le but de cette réalisation est d'optimiser l'absorption du spectre solaire : la partie du spectre solaire qui n'est pas absorbée par la cellule avant le sera par la cellule arrière. La figure III.13 montre le coefficient d'absorption d'échantillons de a-Si:H, pm-Si:H et μ c-Si:H.

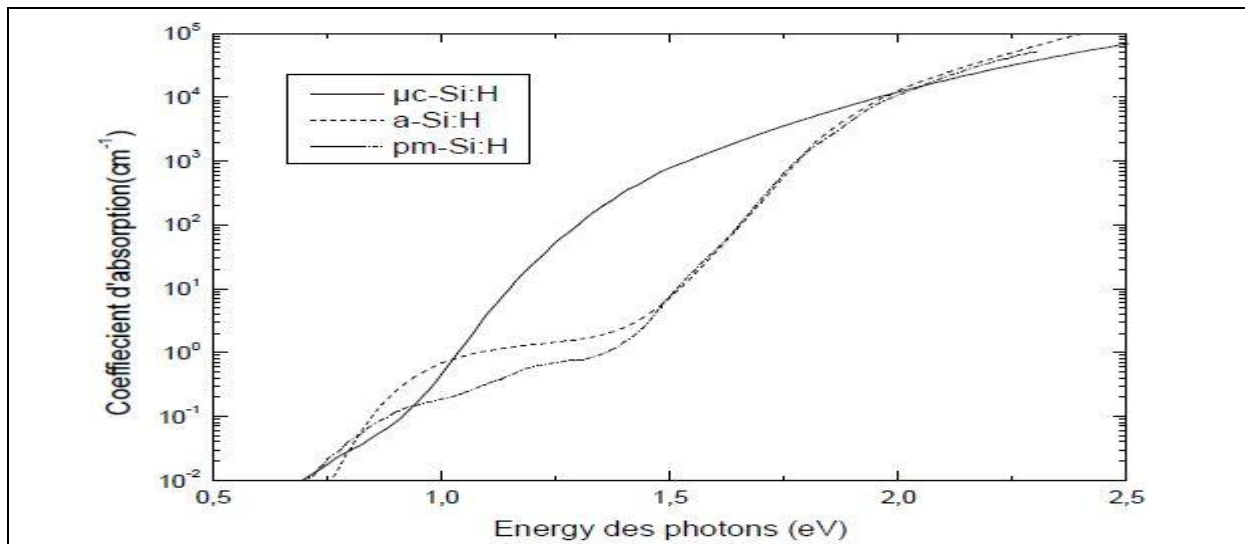


Figure III.15 : Coefficient d'absorption de matériau de silicium amorphe. [12]

Les échantillons de a-Si:H et de pm-Si:H ont une plus grande absorption dans le visible alors que celle du $\mu\text{c-Si:H}$ est plus importante dans le proche infrarouge. N'absorbant pas dans le même domaine ces trois matériaux conviennent pour la réalisation d'une cellule tandem de silicium. La cellule avant est fabriquée avec le a-Si:H ou le pm-Si:H et la cellule arrière avec le $\mu\text{c-Si:H}$ puisqu'il a le plus petit gap.

La cellule tandem a-Si:H / $\mu\text{c-Si:H}$ est aussi appelée cellule hybride ou micromorphe. En général, les performances des dispositifs photovoltaïques sont liées à leur surface : plus elle est grande et plus les contraintes (problèmes d'homogénéité notamment) sont importantes. Les meilleurs rendements stabilisés des tandems a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ stagnent en dessous de 12%. Golay et al. [15] de l'IMT de Neuchâtel, ont rapporté en 2000 un rendement de 9% sur un module de $4 \times 8 \text{ cm}^2$. En 2008, les rendements n'ont certes pas considérablement évolué, mais la différence de taille des modules est notable. En effet, Ankur Kadam et al. [14]

Ont rapporté des rendements de 6,6% et 9,3%, respectivement sur des modules de $30 \times 30 \text{ cm}^2$ de a-Si:H à simple jonction et de tandem micromorphe.

III.4.3. Développement et avantages de la technologie silicium à hétérojonctions

Les premiers composants à base d'hétérojonctions a-Si:H/c-Si (diode) ont été réalisés par l'équipe de **Walter FUHS** [16]. Cette découverte fut exploitée par l'entreprise japonaise SANYO pour réaliser des cellules solaires. SANYO a commencé ces premiers travaux sur les cellules silicium à hétérojonctions a-Si:H/c-Si vers la fin des années 1980 et la première publication a été faite en 1991 [17]. SANYO domine actuellement le marché de la production des cellules silicium à hétérojonctions avec ses cellules HIT (*Heterojunction with Intrinsic Thin film*) dont l'originalité est d'utiliser une couche de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque (non dopé) entre le silicium amorphe hydrogéné dopé et le silicium cristallin. Cette couche de silicium amorphe intrinsèque joue un rôle primordial dans les valeurs élevées de V_{oc} obtenues avec la technologie HIT.

La technologie des cellules silicium à hétérojonctions possède plusieurs avantages. En effet, elle possède un grand potentiel d'amélioration du rendement avec l'optimisation du dépôt du silicium amorphe (passivation du silicium cristallin). L'intégralité du procédé de

fabrication est à basse température (autour de 200 °C) ce qui permet de baisser considérablement le budget thermique. Le procédé basse température permet aussi d'utiliser des substrats moins épais (avec moins de casse) et de prévenir toute dégradation liée à la mauvaise qualité du substrat. La réduction de l'épaisseur du substrat constituant la voie privilégiée pour diminuer le coût des cellules solaires en c-Si ou mc-Si, cette technologie est mieux adaptée que la technologie silicium à homojonctions où le procédé est à haute température. D'autant plus que la réduction de l'épaisseur du substrat rend encore plus critique la passivation des surfaces. La technologie silicium à hétérojonctions est donc simple à mettre en œuvre et sa mise à l'échelle est facile.

Les cellules silicium à hétérojonctions possèdent aussi une meilleure constance du rendement avec la température. En effet, des mesures en extérieur ont montré que la variation du rendement des cellules est moins importante qu'avec une cellule à homojonctions (-0,33 %/°C contre -0,45 %/°C). Sanyo a mesuré un gain en énergie de 9 % pour des cellules à hétérojonctions affichant un rendement de conversion identique à des cellules classiques [18]. Évidemment un tel gain dépend fortement des conditions de mesures et du type d'ensoleillement, il ne s'agit ici que d'un exemple

III.5.conclusion

Dans ce chapitre, je présente la propriété des matériaux, les méthodes d'élaboration des couches minces de silicium amorphe et les types de la cellule photovoltaïque des couches minces.

Les cellules photovoltaïques à hétérojonctions c-Si/a- Si:H en décrivant les deux matériaux utilisés (c-Si et a-Si:H) et les composants de ce type de cellules. Puis, nous avons présenté la technologie silicium à hétérojonctions et la technologie à contacts arrière (RCC). Ce chapitre se conclut par une brève présentation de la structure combinant ces deux technologies qui suscite un intérêt grandissant de la communauté photovoltaïque.

Référence de chapitre III

- [1] Mémoire de Magister « Élaboration de nouvelles phases de silicium en couches minces », khaled Amira, Univ. Mentouri Constantine, 2008
- [2] P. Münstr, thèse de l'université de Renne 1, (2001).
- [3] C. A. Hogarth (éd.), Interscience Publishers, New York, (1965).
- [4] R. C. Chittick, J. H. Alexander, and H.S. Sterling, *J. Electrochem. Soc.* 116, 77 (1969).
- [5] P. Chabloz, thèse de l'école polytechnique fédérale de Lausanne, (1996).
- [6] A. Fontcuberta i Morral, H. Hofmeister, P. Roca i Cabarrocas, *J. Non-Cryst. Solids* 299-302 196-200 (2002).
- [7] S. Veprek, V. Marecek, *Solid State Electron*, 11 683 (1968).
- [8] R. Flückiger, J. Meier, H. Keppner, A. Shah, O. Greim, M. Morris, J. Pohl, P. Hapke, R. Carius, *Proceedings of the 11th EC PV Solar Conference, Montreux*, p. 617 (1992).
- [9] J. Meier, R. Flückiger, H. Keppner, A. Shah, *Appl. Phys. Lett.* 65 860 (1994).
- [10] J. P. Kleider, C. Longeaud, R. Brüggemann, F. Houzé *Thin Solid Films*, 383, 57-60 (2001).
- [11] M. Goerlitzer, N. Beck, P. Torres, U. Kroll, H. Keppner, J. Meier, J. K. ohler, N. Wyrsh, A. Shah, *Proc. Mater. Res. Soc. Symp.* 467 301 (1997).
- [12] These de Doctorat « Caractérisation électronique de couches minces de silicium polymorphe (pm-Si:H) déposées à grande vitesse pour le photovoltaïque », Yrèbégnan Moussa SORO, Université Paris-sud 11, 2010
- [13] J. Meier, S. Dubail, S. Golay, U. Kroll, S. Faÿ, E. Vallat-Sauvain, L. Feitknecht, J. Dubail, A. Shah, *Sol. Energy Mater. & Sol. Cells*, **74**, 457-467 (2002).
- [14] Ankur Kadam, Liwei Li, Shuran Sheng, Tae Kyung Won, Jeff Su, Yongkee Chae, David Tanner, Chris Eberspacher, Soo Young Choi and John M. White, *Proceedings of 23rd*
- [15] S. Golay, J. Meier, S. Dubail, S. Faÿ, U. Kroll, A. Shah, *Proceedings of 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conférence*, (Anchorage, USA, 2000).
- [16] W. Fuhs, K. Niemann, and J. Stuke, *Bull. Am. Phys. Soc.* **19**, 345 (1974).
- [21] K. Wakisaka, M. Taguchi, T. Sawada, M. Tanaka, T. Matsuyama, T. Matsuoka, S. Tsuda, S. Nakano, Y. Kishi, and Y. Kuwano, *Proc. of the 22nd IEEE PSC* **2**, 897 (1991).
- [17] S. Taira, Y. Yoshimine, T. Baba, M. Taguchi, H. Kanno, T. Kinoshita, H. Sakata, E. Maruyama and M. Tanaka, *Renewable Energy Proceedings*, 115 (2006).

Chapitre IV

Modélisation et simulation des cellules de silicium

IV.1. INTRODUCTION

Une façon d'exploiter l'énergie solaire est d'utiliser des cellules photovoltaïques qui convertissent l'énergie véhiculée par le rayonnement incident en un courant électrique continu. Cette conversion est basée sur l'effet photovoltaïque engendré par l'absorption de photons. Une partie des photons absorbés génère des paires électron-trou dans lesquelles un champ électrique créé dans la zone de charge d'espace d'une jonction p-n.

Un tel dispositif est appelé diode p-n. Une autre façon d'amplifier ce courant est de réduire l'épaisseur de la première zone qui absorbe une partie de la lumière incidente. [1].

IV.1.1a modélisation de la cellule HIT [2]

La modélisation est un outil puissant permettant de reproduire mathématiquement le fonctionnement d'objets et de systèmes. Par fonctionnement, on entend l'évolution des variables électriques externes et des grandeurs physiques internes sous l'effet de différentes contraintes. La modélisation est basée sur les principes physiques régissant le comportement des semi-conducteurs. De cette modélisation il a été créé des simulations numériques utilisées pour l'optimisation des cellules photovoltaïques. Les avantages de la simulation numérique sont :

- un gain de temps en évitant la fabrication de plusieurs prototypes avec des paramètres différents.
- des économies dans la mise au point d'un produit : elle est indépendante de la technologie utilisée (on peut faire varier largement un paramètre donné).
- un outil d'investigation scientifique car elle permet d'étudier l'influence de chaque zone séparément lorsqu'on a des paramètres interdépendants (mobilité, durée de vie, dopage...) dans une structure donnée.

IV.1.2.Modèle physique pour la simulation de dispositifs à base de semi-conducteur

Des décennies de recherche sur la physique des dispositifs ont permis de mettre en place un modèle mathématique permettant de simuler le fonctionnement des dispositifs à base de semi conducteur [1]. Ce modèle mathématique est basé sur un système d'équations fondamentales qui relient les grandeurs physiques que sont le potentiel électrostatique et les concentrations des porteurs de charge dans un domaine défini. Ce système d'équations, à la base de la physique des semi-conducteurs, dérive de la simplification des équations de Maxwell.

IV.1.2.1.Calcul de la concentration des porteurs dans un semi-conducteur

IV.1.2. 1.1.Statistiques de Fermi-Dirac et de Boltzmann

Un système obéissant au principe d'exclusion de Pauli et conservant le nombre total de ses particules ainsi que son énergie interne est régie par la statistique de Fermi-Dirac. En équilibre thermodynamique, la fonction de Fermi-Dirac f_n qui traduit la probabilité d'occupation d'un état d'énergie E par un électron est définie par :

$$f_n = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_f}{k_B T}}} \quad (\text{IV.1})$$

Où E_f est le niveau de Fermi et k_B est la constante de Boltzmann.

IV.1.2.1.2. La concentration des porteurs dans un semi-conducteur à l'équilibre thermodynamique

Le nombre d'électrons ou de trous d'énergie E dans un semi-conducteur est donné par le produit de la densité d'états par la fonction de distribution. Ainsi, les concentrations totales d'électrons n_0 dans la bande de conduction et de trous p_0 dans la bande de valence à l'équilibre thermodynamique sont données par les expressions suivantes:

$$n_0 = \int_{E_C}^{E_{Cmax}} N_C(E) f_n(E) dE \quad (\text{IV.2})$$

$$p_0 = \int_{E_{Vmin}}^{E_V} N_V(E) f_p(E) dE \quad (\text{IV.3})$$

Où E_C et E_{Cmax} sont les niveaux énergétiques le plus faible et le plus grand de la bande de conduction. E_{Vmin} et E_V sont les niveaux énergétiques le plus faible et le plus grand de la bande de valence. $N_C(E)$ et $N_V(E)$ sont les densités d'états des électrons et des trous dans la bande de conduction et de valence

IV.1.2.1.3 La concentration des porteurs dans un semi-conducteur hors équilibre thermodynamique

A l'équilibre thermodynamique, le niveau de Fermi est défini comme étant le niveau énergétique pour lequel la probabilité d'occupation d'un état par un porteur de charge est 0,5. Dans le cas hors équilibre thermodynamique, nous définissons deux quasi-niveaux de Fermi, un pour les électrons E_{Fn} et un pour les trous E_{Fp} , qui expriment la modification de la probabilité d'occupation des états. Les concentrations des électrons n et des trous p hors équilibre thermodynamique sont alors données par :

$$n = N_C \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_C}{k_B T}\right) \quad (\text{IV.4})$$

$$p = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_{Fp}}{k_B T}\right) \quad (\text{IV.5})$$

IV.1.2.1.4 Concentration intrinsèque des porteurs

A l'équilibre thermodynamique le produit des concentrations des électrons et des trous est indépendant de la position du niveau de Fermi et des concentrations de dopants. Ainsi, nous définissons la concentration intrinsèque n_i des porteurs par :

$$n_0 p_0 = n_i^2 = N_C N_V e^{-\frac{E_g}{k_B T}} \quad (\text{IV.6})$$

E_g Étant la largeur de la bande interdite du semi-conducteur.

Pour un semi-conducteur intrinsèque, chaque électron qui passe dans la bande de conduction laisse un trou dans la bande de valence. Avec la neutralité électrique, nous avons alors :

$$n_0 = p_0 = n_i \quad (\text{IV.7})$$

IV.1.3.Équations de base de la modélisation

Les équations de base sont l'équation de Poisson, les deux équations de courant et les deux équations de continuité. L'équation de Poisson relie les variations du potentiel électrostatique aux densités locales de charge. Les équations de continuité et de transport décrivent la façon dont les densités d'électrons et de trous évoluent en fonction des mécanismes de transport, de génération et de recombinaison. La résolution de ces équations de base permet de trouver simultanément les distributions d'électrons, de trous, de potentiel et de la charge d'espace. Ce système de cinq équations de base peut être ramené à un système de trois équations car les deux équations de courant sont en effet incluses dans les deux équations de continuité. La simulation numérique est basée sur la résolution de ces trois équations fondamentales qui régissent le transport de charge dans les semi-conducteurs : équation de Poisson et équations de continuité pour les électrons et les trous.

IV.1.3.1 Équation de Poisson

L'équation de Poisson est définie ci-dessous :

$$\text{div}(\varepsilon \nabla \psi) = -\rho_v(\vec{r}) \quad (\text{IV.7})$$

Où ψ est le potentiel électrostatique, ε est la permittivité locale du milieu, \vec{r} est le vecteur position et ρ_v est la densité volumique de charge.

IV.1.3.2 Equations de continuité

Les équations de continuité des porteurs de charge décrivent l'évolution de la concentration des électrons et des trous en fonction du temps. La variation de la concentration locale d'un porteur (électron ou trou) peut avoir différentes origines.

Les équations de continuité pour les électrons et les trous sont données par les expressions suivantes

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div} \bar{J}_n(\vec{r}, t) + G_n(\vec{r}) - R_n(\vec{r}) \quad (\text{IV.8})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \text{div} \bar{J}_p(\vec{r}, t) + G_p(\vec{r}) - R_p(\vec{r}) \quad (\text{IV.9})$$

Où q est la valeur absolue de la charge électronique élémentaire, n et p sont les concentrations d'électrons et de trous, j_n, j_p sont les densités de courant d'électrons et de trous,

G_n, G_p sont les taux de génération des électrons et des trous, $R_n; R_p$ sont les taux de recombinaison des électrons et des trous.

IV.1.3.3 Equations de transport

Les équations de base donnent un cadre général mais il est nécessaire de disposer d'équations secondaires qui permettront de déterminer les modèles physiques particuliers pour les variables suivantes $j_n^{\rightarrow}, j_p^{\rightarrow}, G_n, G_p, R_n$ et R_p .

L'existence de courants électriques dans un semi-conducteur s'explique par la présence de champ électrique et aussi par l'existence d'un gradient de concentration des porteurs de charge dans le semi-conducteur. Les courants induits par le champ électrique sont les courants

de dérive et les courants induits par le gradient de concentration de porteurs sont appelés courants de diffusion. Le modèle de dérive diffusion est le plus couramment utilisé pour décrire le transport de charge dans un semi-conducteur

Ainsi, les densités de courant \vec{j}_n, \vec{j}_p , des équations de continuité peuvent être approximées à l'aide de la théorie de transport de Boltzmann par le modèle de dérive-diffusion. En utilisant les quasi-niveaux de Fermi des électrons et des trous (E_{Fn} et E_{Fp}), leurs expressions sont :

$$\vec{J}_n = -q\mu_n n \nabla E_{Fn} \quad (\text{IV.10})$$

$$\vec{J}_p = -q\mu_p p \nabla E_{Fp} \quad (\text{IV.11})$$

où μ_n et μ_p sont les mobilités des électrons et des trous, E_{Fn} et E_{Fp} sont les quasi-niveaux de Fermi des électrons et des trous.

IV.2. LOGICIEL DE SIMULATION : PC1D

IV.2.1. Aperçu du logiciel :

Le logiciel de simulation numérique des cellules solaire PC1D à une réputation internationale dans la recherche photovoltaïque, il a été développé à l'université «New South Wales de Sydney» en Australie ; qui est l'une des pionnières dans ces domaines.

Son utilisation est très pratique, il permet de simuler n'importe quelle structure photovoltaïque, selon les matériaux disponibles en fichiers data, en jouant sur les paramètres variables (largeur, surface, dopage, etc...). Les résultats de la simulation, sont très proches des résultats expérimentaux, donc c'est un gain de temps et d'argent.

La fenêtre du logiciel PC1D est présentée sur la Figure IV.1, ce logiciel se divise en quatre parties, les trois premières sont pour la programmation ; où il faut introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation. La quatrième partie concerne les résultats de la simulation.

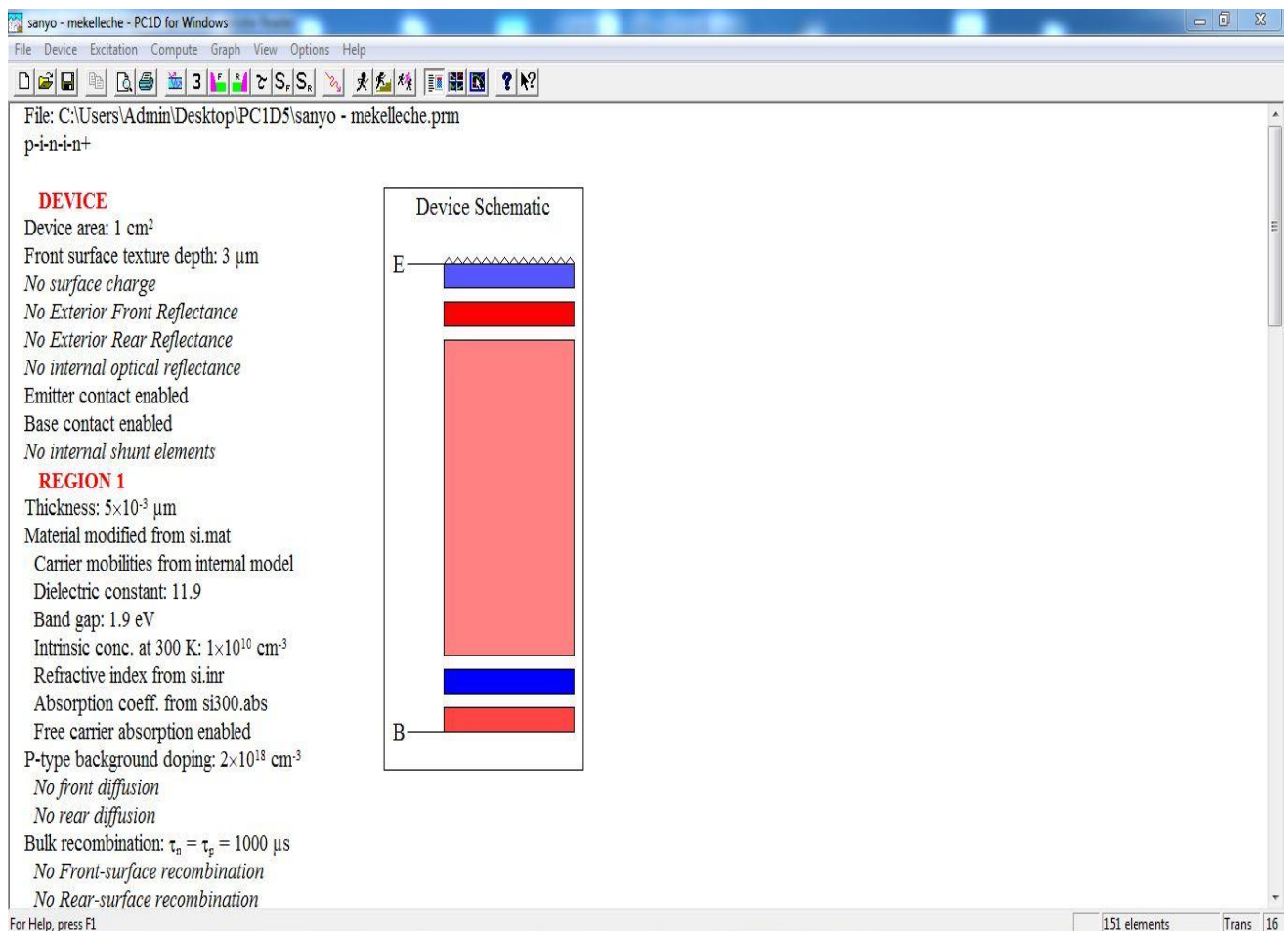


Figure IV.1. Fenêtre du logiciel PCID utilisé en simulation numérique

IV.2.2. Les paramètres du dispositif (Device)

- ✚ Aire du dispositif (Device) : la surface du dispositif est très importante car elle influe sur le photo courant d'une manière appréciable. Dans notre simulation, nous avons choisi une surface de 1cm²
- ✚ Surface texturée : les surfaces texturées utilisées dans toutes les structures étudiées sont composées de micro pyramides inversées de profondeur (depth) 3μm et d'angle facial 54,74°. La texturation est très importante, car elle permet de diminuer les pertes par réflexion du rayonnement incident. Nous avons texturé seulement la face avant, car l'autre face est considérée à l'obscurité.
- ✚ Les deux faces sont considérées comme neutres, du fait qu'il n'y a pratiquement pas de charges aux interfaces, c à d qu'il n'y a pas de barrière de potentielle aux surfaces.
- ✚ Nous n'avons pas introduit de couches antireflets, car elle est remplacée par la texturation. Cette couche est généralement de la silice (SiO₂), elle peut être remplacée par d'autres matériaux qui sont transparent au spectre solaire et qui sont donnée dans le logiciel sous forme de fichiers.

IV.2.3. Les paramètre des régions

- ✚ L'épaisseur de l'émetteur est relativement mince par rapport à la base. Dans le cas du silicium elle varie sur un intervalle compris entre 10nm et 20 nm
- ✚ Le matériau utilisé: les paramètres qui le décrivent, sont stockés dans des fichiers d'extension (*.mat), ils sont fourni avec le logiciel dans une diskette.

Les paramètres stockés dans ce fichier sont :

- La mobilité : le modèle utilisé est le modèle de Thuber et al 1981.
- La constante diélectrique.
- L'énergie de gap (eV).
- La concentration intrinsèque (cm^{-3}).
- L'indice de réfraction.
- Coefficient d'absorption : le modèle utilisé est celui de Rajkanan et al 1979.
- Absorption des porteurs libres : l'équation décrivant l'absorption des porteurs libres
- Type et concentration de dopage : de type n ou p, la concentration maximale est de $2.10^{19} cm^{-3}$ Ce logiciel présenté quatre profils de dopages : le profil uniforme, le profil exponentiel, le profil gaussien et le profil erfc.
- Les recombinaisons en volume : le modèle utilisé est basé sur la statistique de Read Shockley-Hall décrivant les recombinaisons par pièges, situées dans la bande de valence.
- Les recombinaisons face avant et arrière.

IV.2.4. Les paramètres d'excitation

- Deux fichiers intégrés dans le logiciel permettent de simuler la caractéristique courant-tension et autre caractéristiques en utilisant le fichier « One-Sun.exc », ou la réponse spectrale en utilisant le fichier « Scan-qe.exc ».
- Le mode d'excitation : il y a trois modes d'excitation (en équilibre, stationnaire et transitoire). Pour une bonne simulation numérique, le mode transitoire est vivement recommandé.
- Dans la plus part des cas on choisit la température ambiante, $T=25^{\circ}C$.
- Il y a deux sources de Thevenin identiques, l'une pour la base et l'autre pour le collecteur.
- Seulement la face avant est éclairée (coté p), par un flux lumineux d'une intensité de $0,1 W/cm^2$. Pour avoir la réponse spectrale, le logiciel fait un balayage sur l'intervalle de longueurs d'onde compris entre [300, 1200] nm. Pour avoir la caractéristique, il utilise directement le fichier d'aire masse « am 15g.spc ».La seconde source est désactivée, car la face arrière n'est pas éclairée dans notre cas [40].

IV.2.5. Les résultats

Les résultats que nous pouvons visualiser en utilisant le fichier d'excitation « One-Sun.exc » sont :

- ✓ La valeur du courant de court-circuit.
- ✓ La valeur de la tension en circuit ouvert.

- ✓ La valeur de la puissance maximale.
- Et ceux obtenus avec le fichier « Scan-qe.exc » sont :
- ✓ La valeur de courant de court circuit.
 - ✓ La valeur de la puissance maximale.

IV.3. simulation des cellules solaires à base de silicium

IV.3.1. Paramètres de simulation

Nous simulons une cellule de type $p-i-n-i-n+$ de surface 1cm^2 avec une texturation de $3\mu\text{m}$ à la surface avant pour optimiser le captage du rayonnement.

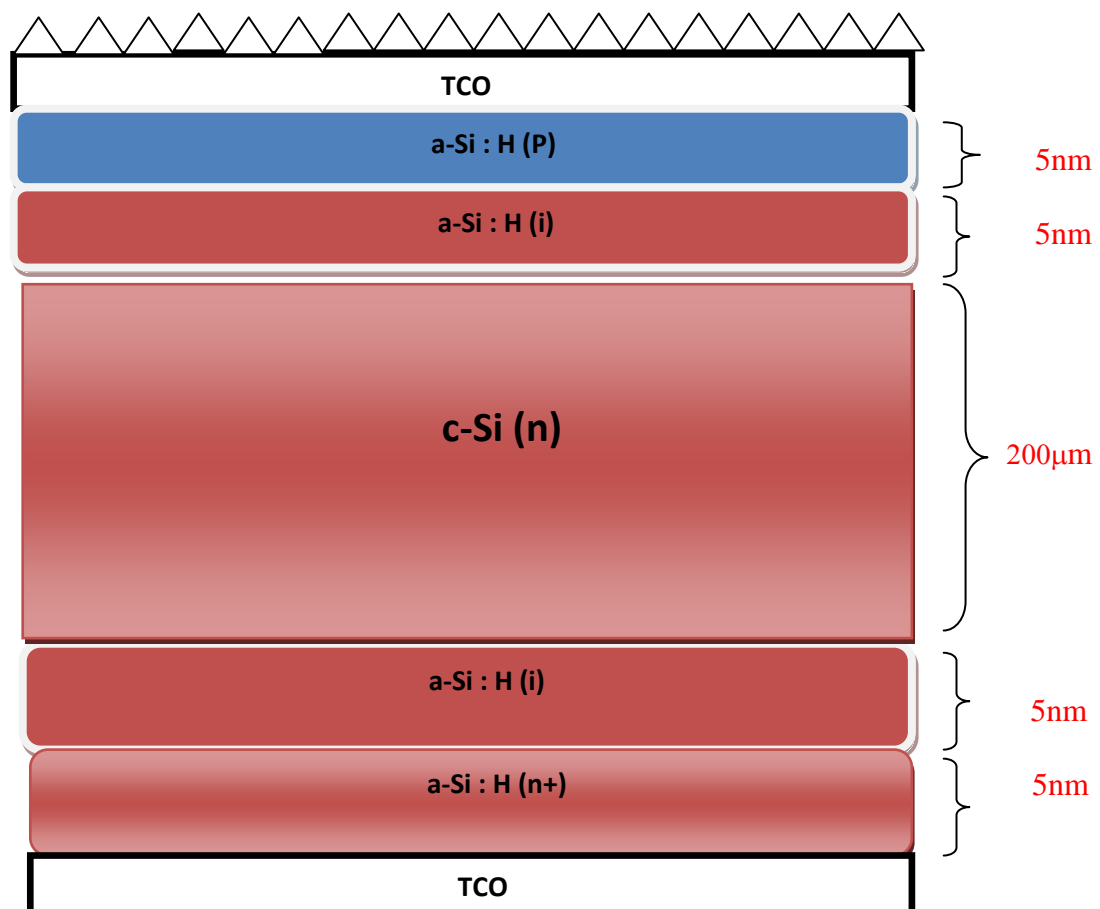


Figure VI.2: Structure d'une cellule HIT

VI.3.2. Résultats et discussions :

VI.3.2.1. Caractéristique I-V :

La cellule solaire simulée est à base de silicium cristalline (n) d'épaisseur $200\mu\text{m}$ dopée à 1.10^{16} cm^{-3} , de face avant (face éclairée) texturée en pyramides inversées, cette texturation permet une réduction importante du coefficient de réflexion et ainsi des pertes

optiques dans la cellule. l'épaisseur de l'émetteur a-Si :H (5nm) dopée a $2.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ avec l'épaisseur de BSF de a-Si :H(5nm) dopée a $2.10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Et les deux couches restantes sont d'épaisseurs de 5nm est sont intrinsèque.

Les résultats obtenus sont :

$$\begin{aligned} I_{cc} &= 0.0398 \text{ A} \\ V_{co} &= 0.7301 \text{ V} \\ P_{max} &= 0.0244 \text{ W} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} FF &= 83.97\% \\ \eta &= 24.45\% \end{aligned}$$

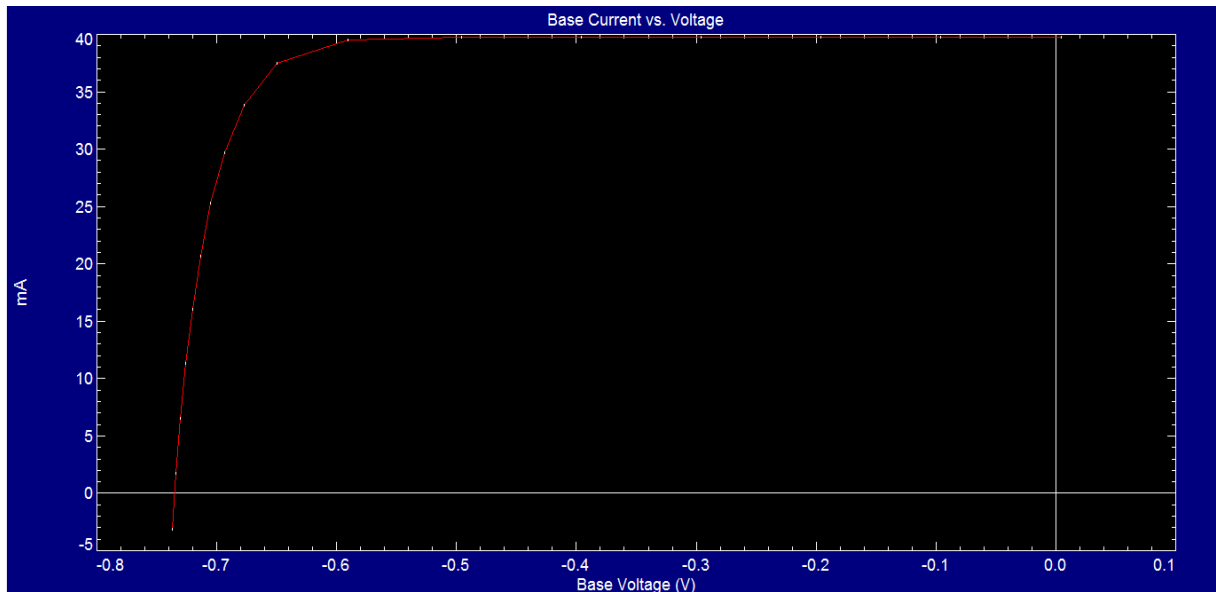


Figure VI.3 Caractéristique I-V de la cellule solaire hétérojonction

IV.3.2.2. Influence de la température de la cellule sur le rendement, I_{cc} et V_{co} et FF et P_{max} :

Pour examiner l'influence de la température de la cellule solaire de sanyo avec les paramètres de la cellule solaire le rendement ; I_{cc} et V_{co} et FF et P_{max} .

Les résultats de la simulation sont présentés sur les figures ci dessous.

Le rendement ; V_{co} et I_{cc} et P_{max} de la cellule solaire dépende de la température.

Le rendement diminué avec l'augmentation de température par ce que il ya grand concentration des porteur

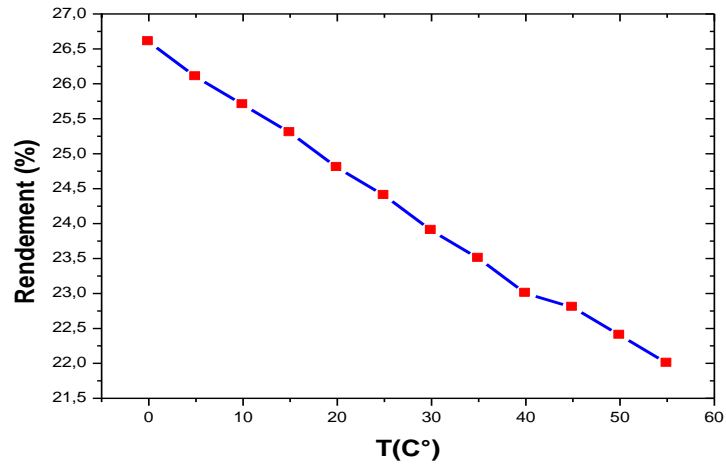


Figure .IV.4. Variation du de rendement en fonction de la température de la cellule

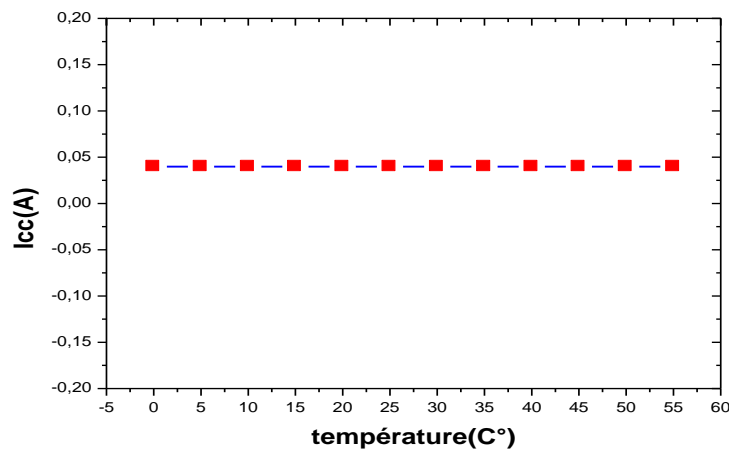


Figure .IV.5. Variation du courant de court circuit en fonction de la température de la cellule

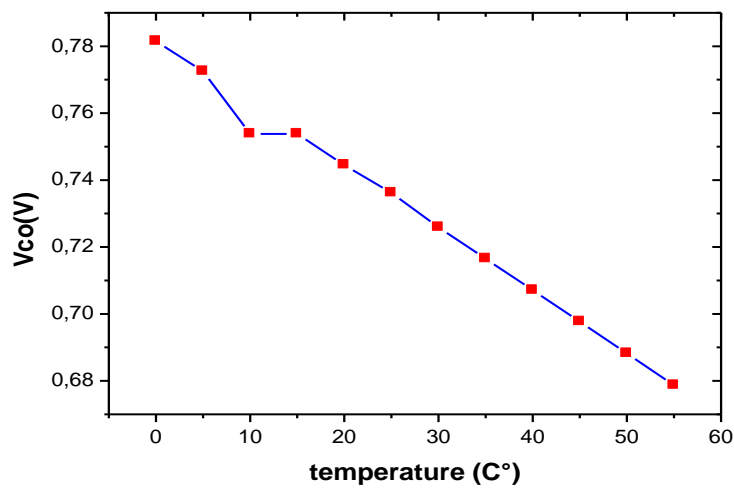


Figure .IV.6. Variation de la tension de circuit ouvert en fonction de la température de la cellule

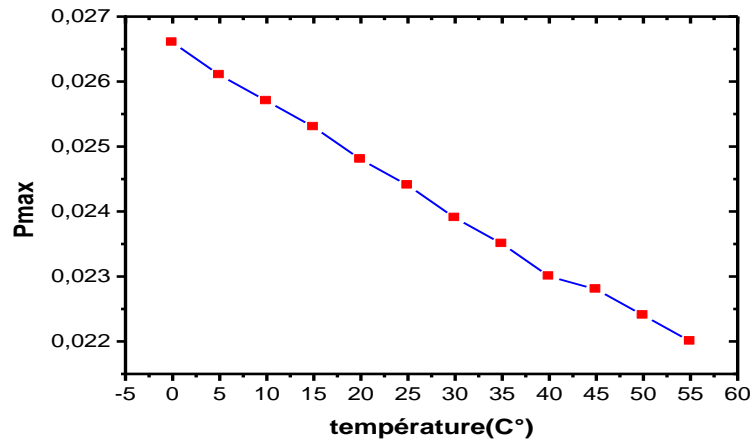


Figure .IV.7. Variation du la puissance maximale en fonction de la température de la cellule

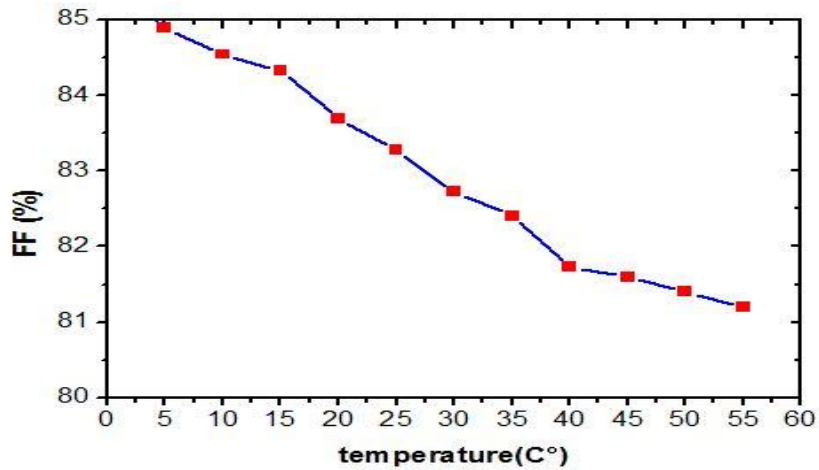


Figure .IV.8. Variation du de factor de forme en fonction de la température de la cellule

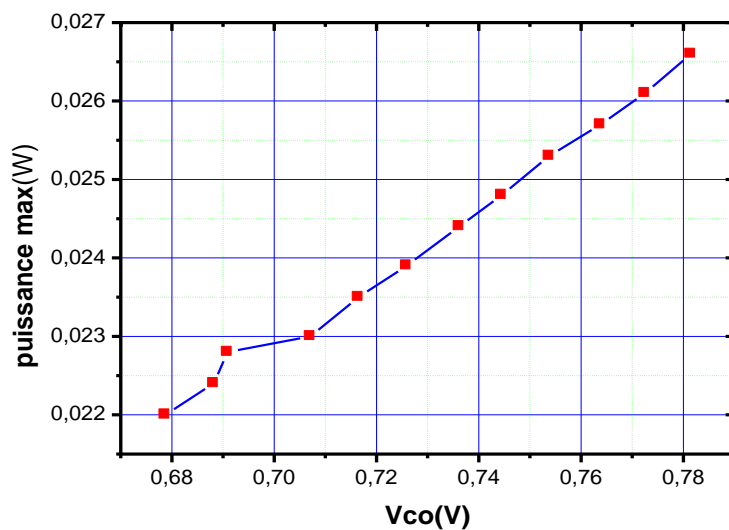


Figure .IV.9. Variation du de puissance maximale en fonction de la tension de circuit ouvert de la cellule

IV.3.2.3. Influence de la recombinaison en surface sur le rendement, I_{cc} et V_{co} et P_{max}

Pour examiner l'influence de la recombinaison sur les faces avant et arrière de la base de c-Si nous avons fait varier ces deux paramètres séparément. Les résultats de la simulation sont présentés sur les figures ci dessous.

On constate que la vitesse de recombinaison en surface est l'un des paramètres qui influence sur le rendement des cellules solaires. La grande vitesse de recombinaison peut dégrader le rendement, par contre si la vitesse de recombinaison en surface est inférieure à 500 cm/s elle n'a pas d'influence importante sur les caractéristiques de la cellule car le rendement constant. On remarque aussi que le courant de court-circuit reste constant quelque soit la recombinaison en surface face avant ou face arrière. et une bonne valeur de V_{co} a inférieure de 1000 cm/s

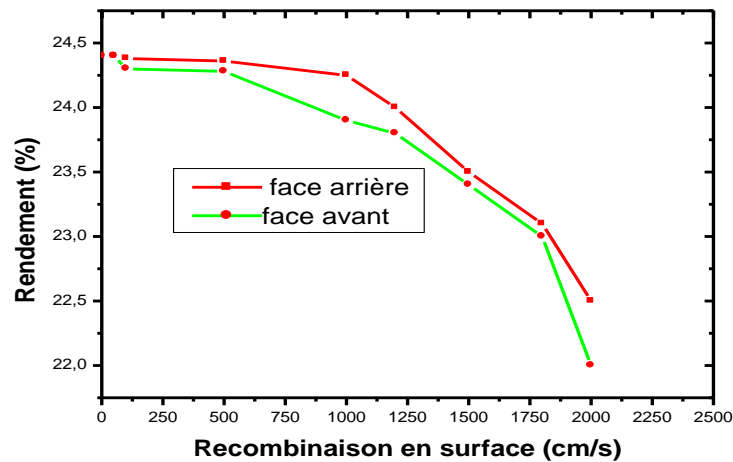


Figure. IV.10. Variation du rendement en fonction de la recombinaison en surface

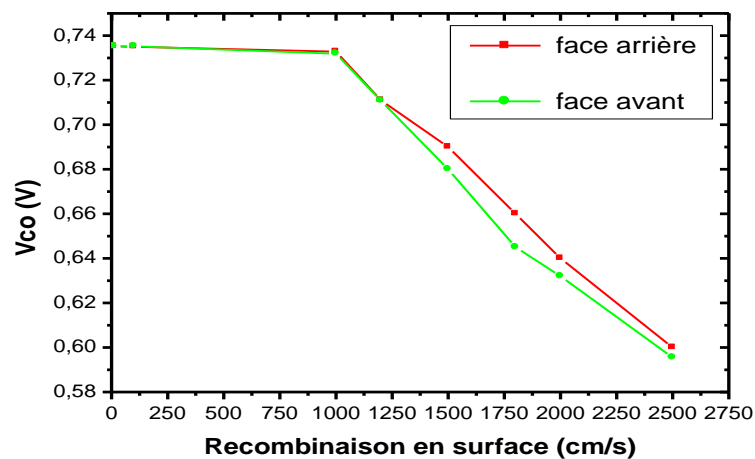


Figure .IV.11. Variation de la tension de circuit ouvert en fonction de la recombinaison en surface

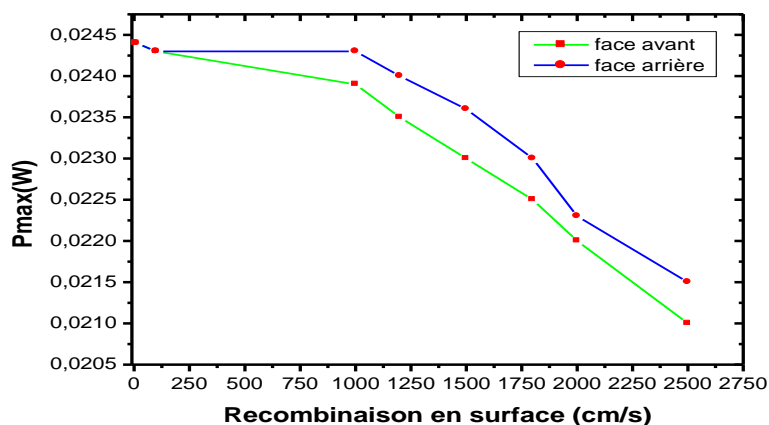


Figure .IV.12. Variation du de puissance maximale en fonction de la recombinaison en surface

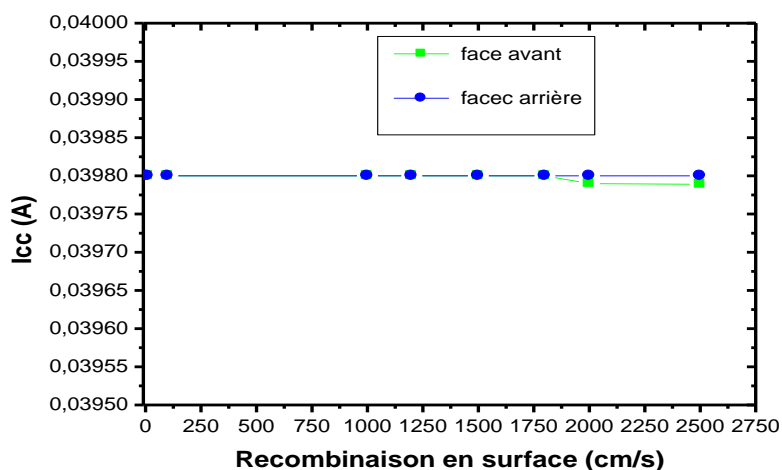


Figure .IV.13. Variation du courant de court-circuit en fonction de la recombinaison en Surface

IV.3.2.3. Influence du dopage du substrat n sur le rendement, I_{cc} et V_{co}

Nous pouvons constater qu'il y a une valeur optimale du dopage du substrat qui correspond au maximum de rendement de la cellule. Pour une cellule de référence sur un substrat de type n avec une épaisseur de $200\mu\text{m}$, le dopage optimal est égal à $1 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$. Si le substrat est faiblement dopé, la hauteur de barrière de potentiel de la jonction p-n est réduite. Dans ce cas, le champ électrique de la jonction p-n est moins fort et les conditions de collecte des porteurs sont mauvaises.

En créant un gradient d'accepteurs en face arrière de la cellule solaire, nous obtenons:

- une augmentation du courant de court circuit due aux porteurs générés.
- une augmentation de la tension du circuit ouvert due aux gradients de dopage donc un champ crée empêche les porteurs de se recombiner.

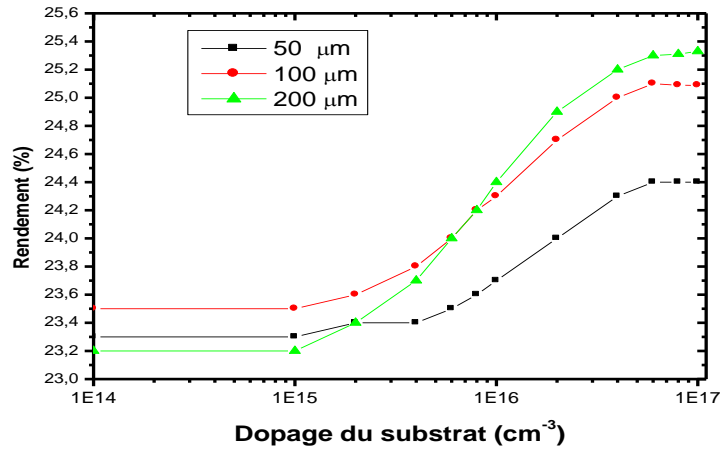


Figure .IV.14. Variation de rendement de la cellule en fonction du dopage de substrat

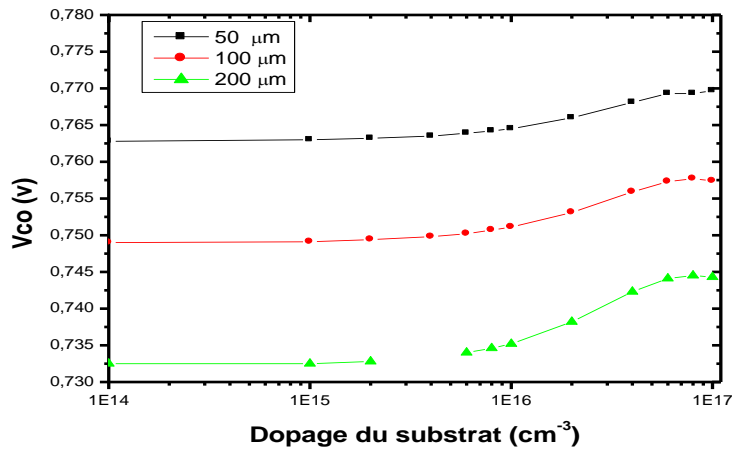


Figure. IV.15. Variation de la tension du circuit ouvert de la cellule en fonction du dopage de substrat

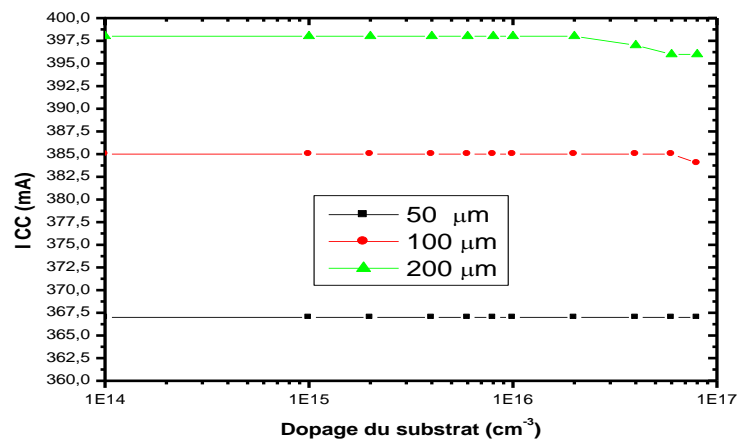


Figure. IV.16. Variation du courant de court-circuit de la cellule en fonction du dopage de substrat

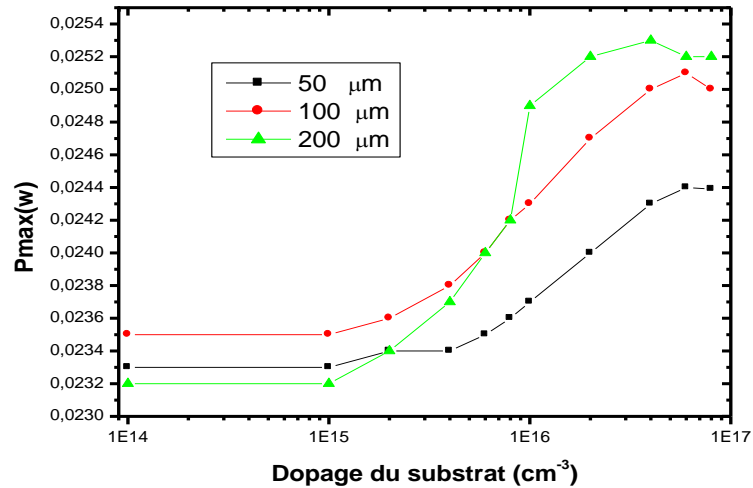


Figure. IV.17. Variation de la puissance maximale de la cellule en fonction du dopage de substrat

IV.3.2.4 Influence du dopage de l'émetteur p sur le rendement, I_{cc} et V_{co}

Maintenant, nous fixons tous les paramètres de la cellule et nous faisons varier que le dopage de l'émetteur. Nous remarquons que le courant de court circuit varie très peu en fonction du dopage de l'émetteur, par contre la variation du rendement et de la tension du circuit ouvert est remarquable.

Dans l'intervalle $[2 \cdot 10^{18}; 2 \cdot 10^{19}] \text{ cm}^{-3}$, le rendement a une valeur presque constante. Au delà de $6 \cdot 10^{20}$ l'élévation du niveau de dopage de l'émetteur diminue la hauteur de la barrière de potentiel. Une croissance du dopage de l'émetteur conduit à une dégradation des performances de la cellule solaire.

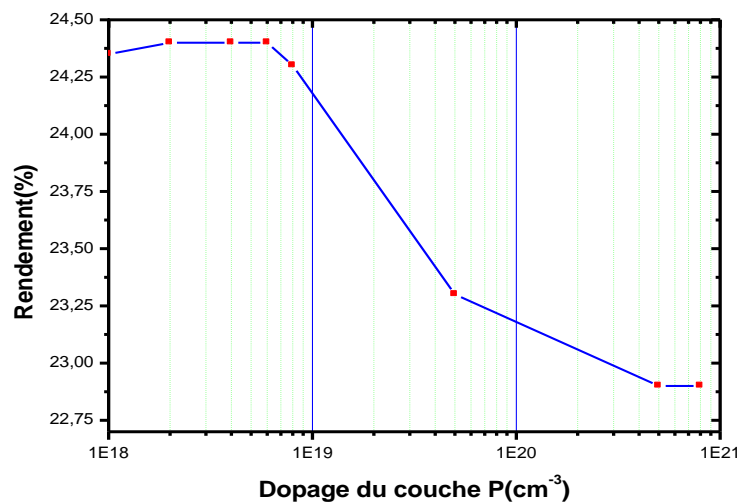


Figure .IV.18. Variation du rendement de la cellule en fonction du dopage de la couche P

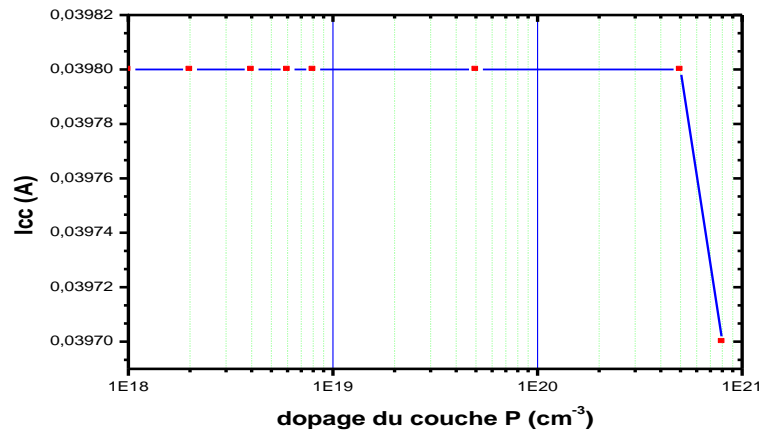


Figure .IV.19. Variation de courant de court-circuit de la cellule en fonction du dopage de la couche P

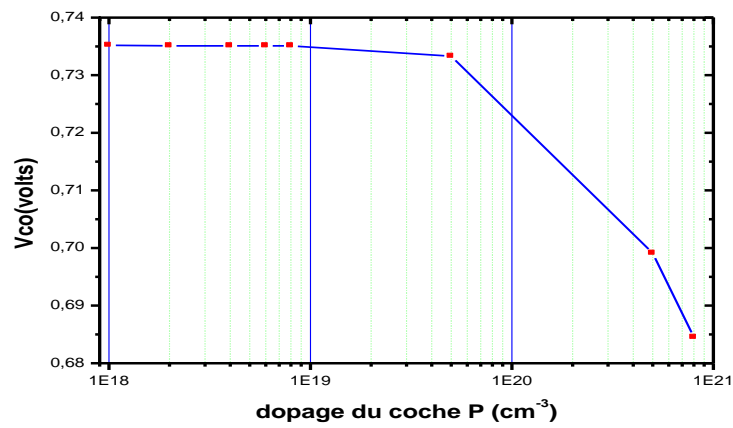


Figure .IV.20. Variation de la tension du circuit ouvert de la cellule en fonction du dopage de la couche P

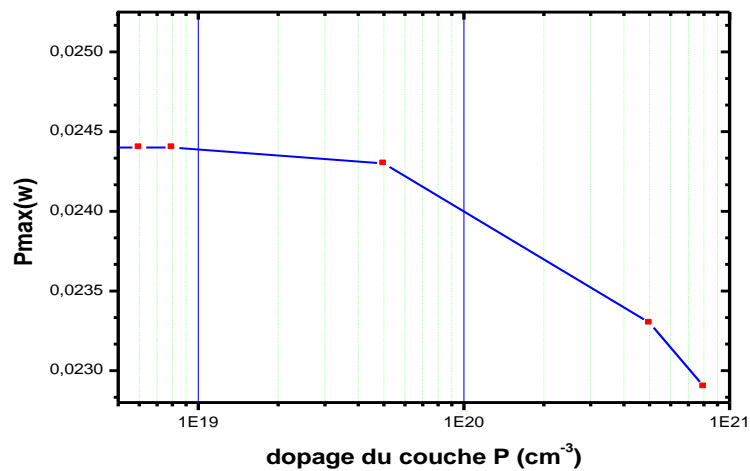


Figure .IV.21. Variation de la puissance maximale de la cellule en fonction du dopage de la couche P

IV.3.2.5. Influence du dopage de la couche n^+ sur le rendement et

I_{cc} ; V_{co} , P_{max} :

Nous pouvons constater qu'il y a une valeur optimale du dopage du couche n^+ qui correspond au maximum de rendement de la cellule. le dopage optimal est égal à $2.10^{19} cm^{-3}$. Si la couche n^+ est faiblement dopé, la hauteur de barrière de potentiel de la jonction p-n est augmentée. Dans ce cas, le champ électrique de la jonction p-n est plus fort et les conditions de collecte des porteurs sont bonnes.

Nous obtenons les résultats sur ci dessous:

- une diminution du rendement de la cellule par le dopage.
- une diminution du courant de court circuit par le dopage.
- une diminution de la tension du circuit ouvert par le dopage.

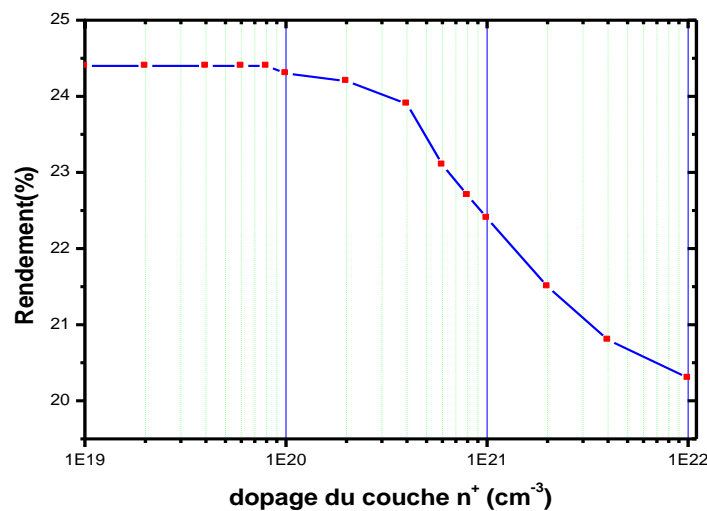


Figure .IV.22. Variation du rendement de la cellule en fonction du dopage de la couche n^+

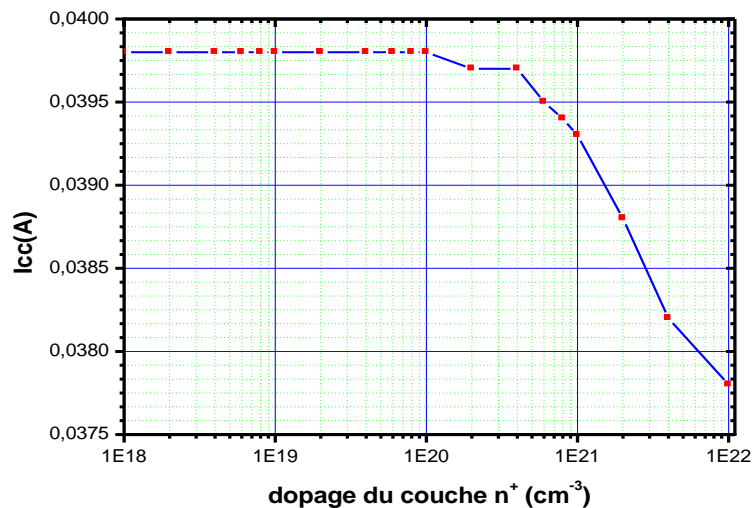


Figure .IV.23. Variation du le courant de court-circuit de la cellule en fonction du dopage de la couche n^+

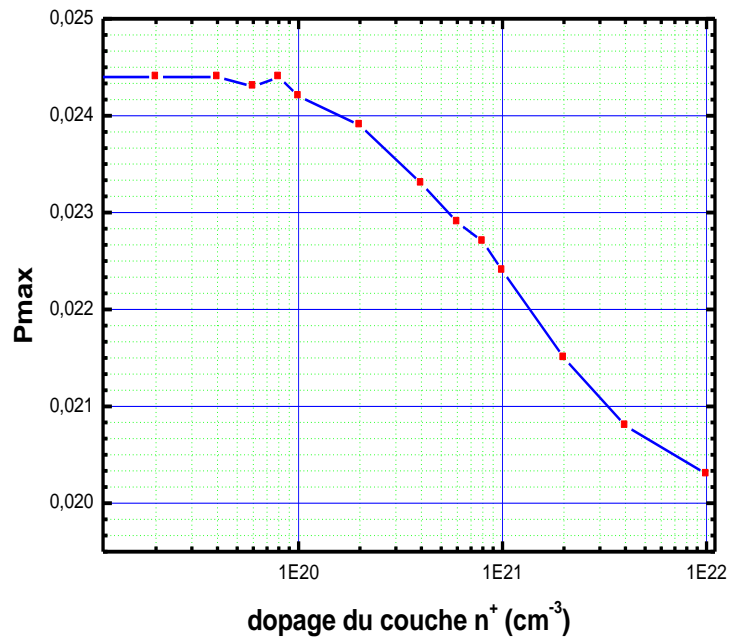


Figure .IV.24. Variation de la tension circuit ouvert de la cellule en fonction du dopage de la couche n^+

IV.3.2.6. Influence de l'épaisseur de couche P, n , n^+ sur le rendement :

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de l'émetteur, de base et de couche n^+ . D'après le résultat obtenu (Figure. IV.6,7,8), on a

- diminution du rendement par apport augmentation de l'épaisseur de l'émetteur n .
- augmentation du rendement par apport augmentation de l'épaisseur de c-Si
- diminution du rendement par apport augmentation de l'épaisseur de la couche n^+ .

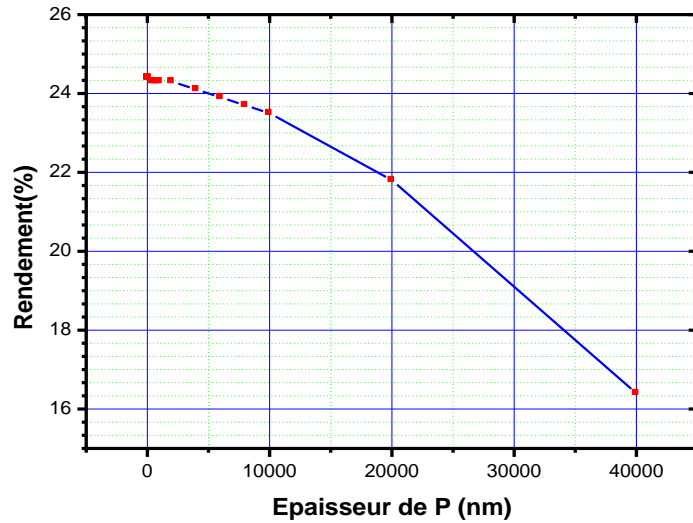


Figure .IV.26 .Variation du rendement de la cellule en fonction De l'épaisseur de l'émetteur

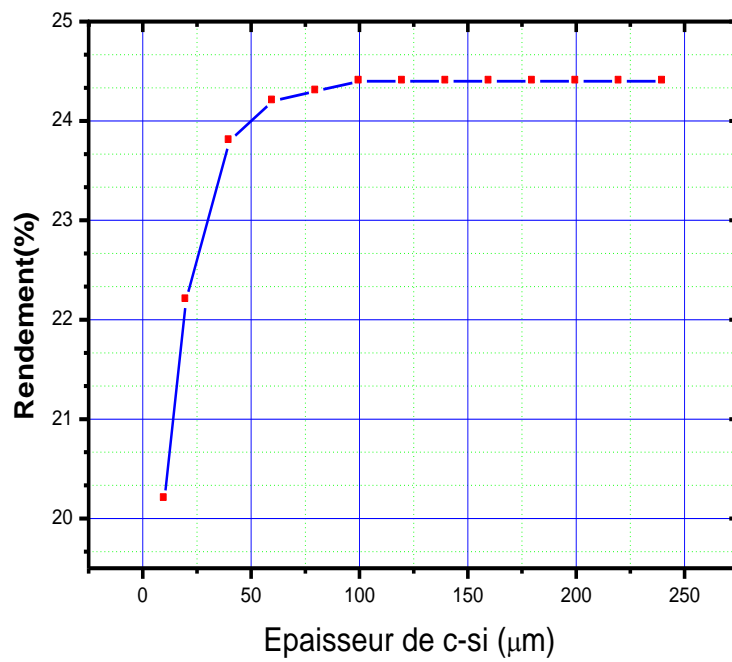


Figure .IV.27. Variation du rendement de la cellule en fonction De l'épaisseur de substrat

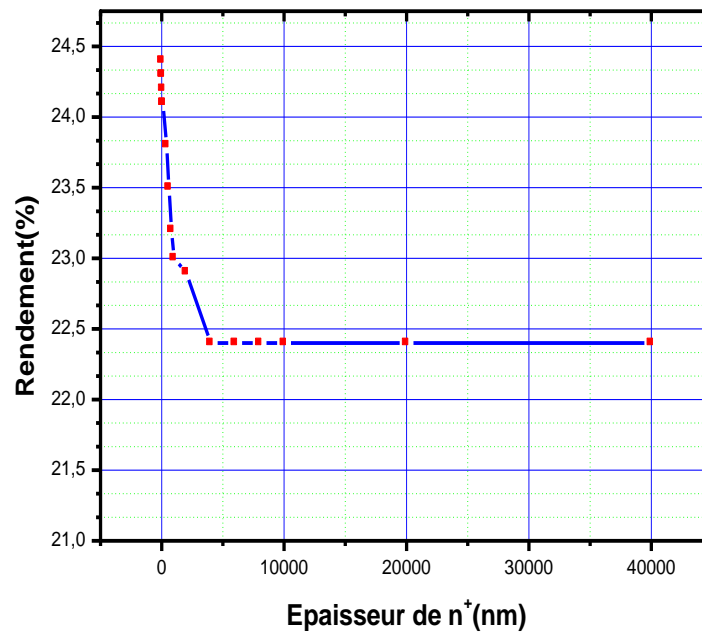


Figure .IV.28. Variation du rendement de la cellule en fonction D'épaisseur de la couche n^+

IV.3.2.7. Influence du puissance incidente sur le rendement, I_{cc} , P_{max} :

Pour étudier l'influence de la puissance incidente, de la cellule solaire et nous avons varié la puissance incidente (flux) entre 1000w/m^2 et 100 w/m^2 . D'après le résultat obtenu (Figure. IV.) cela est du au rendement élevé obtenu par rapport à l'autre puissance incidente.

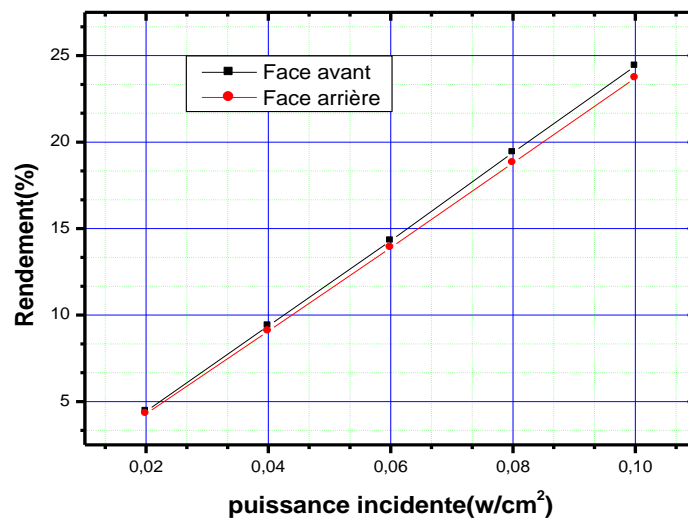


Figure .IV.29. Variation du rendement en fonction de la puissance incidente

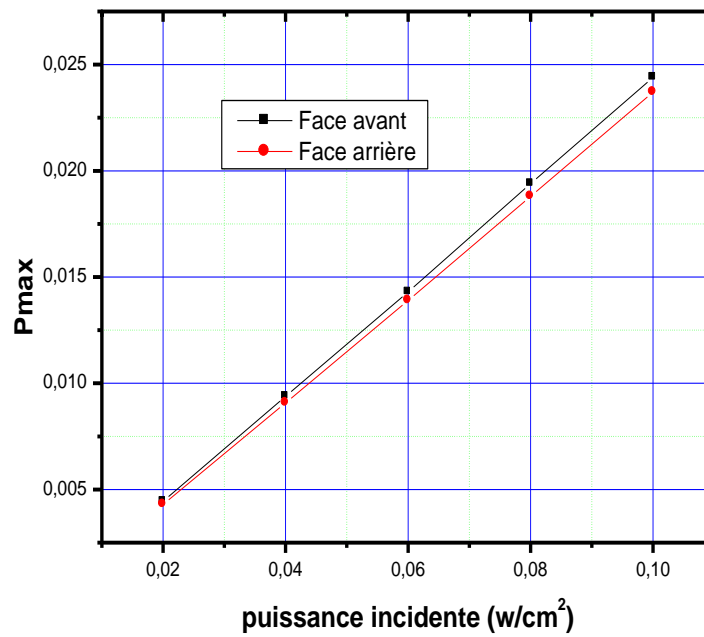


Figure .IV.30. Variation de la puissance maximale en fonction de puissance incidente

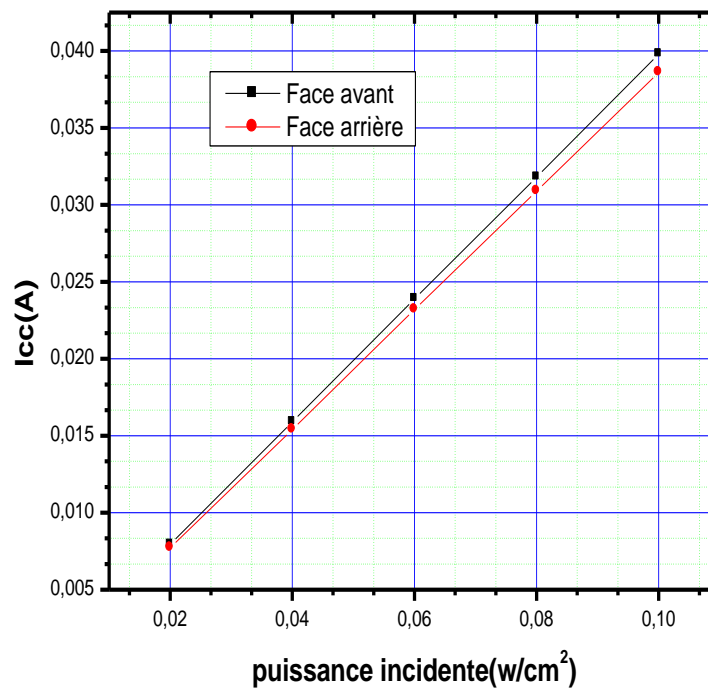


Figure .IV.31. Variation du courant de court-circuit en fonction de la puissance incidente

IV.5.Conclusion

Quelque soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire pour avoir un bon rendement. Habituellement, les paramètres à optimiser sont l'épaisseur de la cellule, les niveaux et les profils de dopage, la configuration des contacts et le confinement optique. Les valeurs des paramètres optimaux dépendent, bien sûr, de la structure de la cellule solaire, de la qualité du matériau, de la vitesse de recombinaison en surface (faces avant et arrière), etc... L'optimisation de la cellule solaire comprend donc l'étude de l'influence de ces paramètres sur le rendement afin d'obtenir une structure conduisant au rendement maximum.

Dans ce chapitre on traite les variations des paramètres électriques de la cellule solaire (hétéro jonction) sur le rendement,

Les paramètres de la cellule température et l'influence de la recombinaison sur les faces avant et arrière de la base nous avons fait varier ces deux paramètres séparément ; et aussi influence du dopage de les couches n (émetteur), n^+ (la base) et p (BSF) , et Variation du rendement de la cellule en fonction De l'épaisseur de substrat et de l'émetteur et de BSF. Et je voir que le rendement de varie avec les paramètres précédents.

Référence de chapitre IV

[1] http://anodegroup.univ-lille1.fr/docs/theses/heloisecolder_these.pdf

[2] Doctorale, E., & De, T. (2010). THESE DE DOCTORAT SPECIALITE : PHYSIQUE SUJET :Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière.

CONCLUSION

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale. Différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plus part des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée. Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ne peuvent générer de paire électron-trou, et sont donc perdus. Le rendement d'une cellule dépend aussi à la base du nombre de photons y pénétrant.

L'industrie photovoltaïque est constituée à plus de 90% sur l'utilisation du silicium comme matériau de base. Le silicium reste cependant le matériau le plus utilisé dans le photovoltaïque, il bénéficie d'une implantation importante et durable dans l'industrie de la microélectronique. Celle-ci utilise du silicium monocristallin de très haute pureté, obtenu par des méthodes telles que le tirage CZ (Czockralski). Ce type de matériau, qui présente d'excellentes qualités électroniques, est très coûteux. La part de silicium monocristallin est plus importante, puisque les modules produits selon cette technologie ont un rendement plus élevé que ceux en silicium multi-cristallin.

Notre présentation s'est ensuite orientée vers la filière silicium et plus particulièrement les cellules photovoltaïques à hétérojonctions c-Si/a-Si:H en décrivant les deux matériaux utilisés (c-Si et a-Si:H) et les composants de ce type de cellules.

Notre étude nous permet de déterminer la géométrie optimale pour la cellule hétérojonction et aussi de déterminer les paramètres critiques qui conditionnent les performances de la cellule

La simulation est largement utilisée dans le cadre de ce travail afin d'étudier les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des cellules solaires à base de silicium, dans le but de diminuer les pertes et d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule en vue d'obtenir un rendement maximum.

La simulation est faite par le logiciel Pc1d , ce dernier est un logiciel à application sur windows. Il a été développé pour simuler les caractéristiques électriques des cellules solaires à hétérojonction et à couche minces. Avec pc1d il est possible de simuler des structures constituées d'un nombre défini de couches (jusqu'à 5 couches intermédiaires ainsi que les

contacts avant et arrière), avec des profils de dopage différents ,et avec des distributions énergétiques des niveaux donneurs ou accepteurs donnés .

Les valeurs de rendement de la cellule hétéro jonction calculées par les paramètres de cellule sont en accord avec d'autres calculs théoriques.

Le rendement varie avec le température de la cellule ; l'épaisseur des couches (p,i,n,i,n+) ainsi que le dopage des couches(p,n,n+) et la vitesse de recombinaison en surface donnent une puissance incidente. Le rendement obtenu après la simulation est $\eta=24.4\%$.

La relation interactive entre simulations et expériences devra être naturellement poursuivie. Des caractérisations plus systématiques sont à mener sur les dépôts de silicium amorphe réalisés afin de pouvoir disposer d'une banque de données sur les paramètres de a-Si:H. Ces informations permettent d'enrichir notre modèle afin d'être en meilleur accord avec l'expérience et par la suite de mieux orienter les choix expérimentaux.

Les cellules solaires prennent une nouvelle dimension lorsqu'elles sont utilisées en couches minces, car le rapport performance / coût atteint avec de telles cellules est supérieur à celui d'une cellule au silicium pour la même épaisseur, mais les rendements atteints sont encore faibles par rapport à ce que l'on attend d'une cellule solaire, à cause de la faible épaisseur de la couche.

Perspectives

- ❖ Simplification géométrie/procède
- ❖ Recherche de nouveaux matériaux pour l'hétérojonction sur c-Si ?
- ❖ Importance de la qualité du matériau

Résume :

Les cellules solaires à couches minces sont de plus en plus utilisées essentiellement en raison de leur faible cout. Durant ces dernières décennies les performances de ces cellules ont été nettement améliorées. Dans ce travail, nous avons fait une étude sur les paramètres (caractéristiques) structurale des couche minces de silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H) réalisées par les techniques de dépôt(physique et chimie). Nous avons simulé une cellule solaire hétérojonction a-Si :H/c-Si/ a-Si :H à l'aide du logiciel pc1d. En particulier les propriétés de la cellule hétérojonction (température, épaisseur, dopage) jouent un rôle primordial dans les performances de la cellule. Afin de les optimiser ,nous étudions leur influence sur les grandeurs photovoltaïques de la cellule solaire(V_{co} , I_{cc} , P_{max} , FF , η).

Mots clés : Silicium amorphe hydrogéné, techniques de dépôt, cellule hétérojonction, couches minces

Abstract :

Thin film solar cells are increasingly used essentially because of their low cost .the performance of such a solar cells has known a remarkable improvement during the last decenies.the present work ,we made a structural study on the parametres (characteristic) of thin films the hydrogenated amorphous silicon (a-Si :H) made by spttering . formed by deposition techniques (physics and chemistry) .we simulated a heterojunction solar cell a-Si: H / c-Si / a-Si: H using a software (pc1d). especially the properties of the heterojunction cell (temperature, thickness, doping) play a crucial role in the performance of the cell, and to optimize them, we study their influence on the magnitude of the photovoltaic solar cell (V_{oc} , I_{sc} , P_{max} , FF , η).

Keywords: Hydrogenated amorphous silicon ; deposition technics, the cell heterojunction, Thin films

المخلص :

يتزايد استخدام أفلام الخلايا الشمسية الرقيقة على نحو متزايد أساسا بسبب تكلفتها المنخفضة. كما انه في العقود الأخيرة تم تحسين أداء هذه الخلايا بشكل كبير و ملحوظ. و في هذا العمل قد قمنا بدراسة المعلمات (الخصائص) للطبقات الهيكلية المهدرجة للسيلكون غير المتبلور. الرقيقة التي قدمتها تقنيات الترسيب (الفيزيائية والكيميائية)

وبالتالي قمنا بمحاكاة الخلايا الشمسية (a-Si: H / c-Si / a-Si: H) hétérojonction المتعددة الوصال باستخدام برنامج (pc1d) لتحليل بعض خصائص هذه الخلية (درجة الحرارة، سمك، المنشطات) والتي بدورها تلعب دورا حاسما في أداء الخلية، ومن اجل تحسين ذلك، قمنا بدراسة تأثيرها على الخلايا الشمسية الضوئية المتعددة الوصال.

كلمات البحث: ترسيب السيلكون المهدرجة غير المتبلور ،تقنيات الترسيب ، الخلايا الشمسية الضوئية المتعددة الوصال، الخلايا الشمسية الرقيقة